



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**GESTÃO HÍDRICA EM PERÍODOS DE SECA NO MUNDO:
MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DE IMPACTO**

Tamer Abdalla Doueidar Sandim

CAMPO GRANDE – MS

Março / 2023

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Programa de Pós Graduação em Tecnologias Ambientais

Tamer Abdalla Doueidar Sandim

GESTÃO HÍDRICA EM PERÍODOS DE SECA NO MUNDO: MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DE IMPACTOS

Dissertação apresentada visando à obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, área de concentração: *Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos*

Orientador(a): Prof^ª. Dr^ª. Dulce B. B. Rodrigues
Co-orientador: Prof. Jamil Alexandre Ayach

Anache

Aprovado em: 08/03/2023

Banca Examinadora

Prof^ª. Dr^ª. Dulce B. B. Rodrigues
Presidente

Dr. Glauber Altrão Carvalho

Prof. Dr. André Almargo

Campo Grande, MS
Março/ 2023

“Não enlouqueça buscando a perfeição.

Alguns defeitos são importantes.”

Paulo Coelho

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de pesquisa a minha mãe Samira, ao meu pai Edilson e a minha avó Nely (*in memoriam*). Suas grandes forças foram a mola propulsora que permitiram o meu avanço, mesmo durante os momentos mais difíceis. Agradeço do fundo do meu coração.

AGRADECIMENTOS

Ao meu co-orientador Dr. Jamil A. A. Anache pela orientação, apoio e confiança.

A CAPES pelo financiamento de fundos para pesquisa.

A minha psicóloga Ana Clara França Balbino pelos conselhos e apoio emocional.

RESUMO

A seca é definida como déficit de precipitação em uma região e tem-se tornado um assunto preocupante por atingir a relação político-econômica dos países. Pode-se classificá-la em meteorológica, agrícola, hidrológica e ecológica, sendo essas classificações de acordo com o impacto que cada uma pode causar nas variáveis hidrológicas e dos ecossistemas. Este trabalho tem por objetivo fazer uma revisão sistemática global da gestão hídrica durante períodos de seca. Para isso, fez-se um compilado de estudos publicados em inglês através da busca de palavras-chave nas bases de indexação *Scielo*, *Scopus* e *Web of Science* para o desenvolvimento de mapas infográficos e quadros estatísticos a nível global e nacional. Descobriu-se que China e EUA dominam o número de publicações, sendo 18,91% e 11,47% para cada, respectivamente, enquanto o Brasil possui 2,57% do total. Além disso, o *Standardized Precipitation Index (SPI)* foi a métrica mais utilizada, sendo 89% do total. Foram identificadas medidas não-estruturais de mitigação de impacto, sendo mais utilizadas do que as estruturais, tanto a nível nacional, quanto ao internacional, estando presente em 94,5% dos trabalhos. Concluiu-se que o Brasil possui poucas publicações a nível internacional e que países mais desenvolvidos investem mais na pesquisa sobre esse assunto. Por fim, este trabalho visou contribuir com a comunidade científica por meio de uma revisão sistemática clara e sucinta, facilitando o entendimento sobre a seca e quais são as medidas adotadas pelos países para sua mitigação.

Palavras-chave: ciências ambientais, índices de monitoramento, engenharias

ABSTRACT

Drought is defined as a rainfall deficit in a region and has become a matter of concern because it affects the political-economic relationship of countries. It can be classified into meteorological, agricultural, hydrological and ecological, according to the impact that each one can have on hydrological and ecosystem variables. This work aims to carry out a global systematic review of water management during periods of drought. For this, a compilation of studies published in English was made through the search for keywords in the *Scielo*, *Scopus* and *Web of Science* indexing bases for the development of infographic maps and statistical tables at global and national level. It was found that China and the USA dominate the number of publications, with 18.91% and 11.47% for each, respectively, while Brazil has 2.57% of the total. In addition, the Standardized Precipitation Index (SPI) was the most used metric, accounting for 89% of the total. Non-structural impact mitigation measures were identified, being used more than structural measures, both nationally and internationally, being present in 94.5% of the works. In conclusion Brazil has few publications at an international level and the most developed countries invest more in research on this subject. Finally, this work aimed to contribute to the scientific community through a clear and succinct systematic review, facilitating the understanding of drought and what are the measures adopted by countries for its mitigation.

Keywords: environmental sciences, monitoring indexes, engineering.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 <i>Objetivo Geral</i>	14
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
3. METODOLOGIA	15
3.1 Contexto de estudo.....	15
3.2 Terminologia	15
3.3 Coleta de dados	18
3.4 Análise de dados	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1 Distribuição espacial	19
4.1.1 Seca meteorológica	22
4.1.2 Seca agrícola	25
4.1.3 Seca hidrológica	27
4.1.3 Seca ecológica	29
4.2 Variáveis monitoradas e linhas de pesquisa	30
4.2.1 <i>Standardized Precipitation Index (SPI)</i>	33
4.3 Medidas de mitigação de impacto	35
4.3.1 Medidas Estruturais	35
4.3.2 Medidas Não-estruturais	36
5. CONCLUSÃO	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - tipos de seca e suas relações de causas e consequências (Wilhite and Glantz, 1985).	16
Figura 2 - Caracterização da seca ecológica (Crausbay et al. 2017).....	17
Figura 3 - Número de publicações sobre seca meteorológica nos países mais relevantes	20
Figura 4 - Número de publicações sobre seca agrícola nos países mais relevantes.....	20
Figura 5 Número de publicações sobre seca hidrológica nos países mais relevantes.....	21
Figura 6 - Número de publicações sobre seca ecológica nos países mais relevantes	21
Figura 7 - Distribuição mundial de trabalhos sobre a seca meteorológica	23
Figura 9 - Distribuição mundial de trabalhos sobre a seca agrícola	25
Figura 10 - Distribuição nacional de trabalhos sobre a seca agrícola	27
Figura 12 - Distribuição nacional de trabalhos sobre a seca hidrológica	29
Figura 13 - Distribuição mundial de trabalhos sobre a seca ecológica	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Medidas adotadas para mitigação da seca	18
Tabela 2 - Strings de pesquisa utilizadas na busca de tópicos (título, resumo, palavra-chave).....	18
Tabela 3 - Strings de pesquisa aplicados nos websites de busca.....	19
Tabela 4 – Índices mais utilizados para monitoramento pelos países mais relevantes por tipo de seca	20
Tabela 5 - Classificação do clima de acordo com o valor do SPI	34
Tabela 6 - Classificação da seca de acordo com o valor do SPI	34
Tabela 7 - Valores do SPI por país	35

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E ABREVIações

ADRI	<i>Australian Disaster Resilience Index</i>
AWD	<i>Atmospheric Water Deficit</i>
CMI	<i>Crop Moisture Index</i>
CWSI	<i>Crop Water Stress Index</i>
DEI	<i>Drought Exposure Index</i>
DEPI	<i>Drought Exceedance Probability Index</i>
DMAPS	<i>Drought Monitoring and Prediction Systems</i>
DRI	<i>Drought response index</i>
DSI	<i>Drought Severity Index</i>
ENSO	<i>El-Nino Southern Oscillation</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVI	<i>El-Nino Southern Oscillation</i>
GDIS	<i>Grassland Drought Index</i>
GIIF	<i>Global IBI Facility</i>
MADI	<i>Malawi Drought Index</i>
NADM	<i>North American Drought Monitor</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NJHDI	<i>Nonlinear Joint Hydrological Drought Index</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PNPI	<i>Percent Of Normal Precipitation Index</i>
RAI	<i>Rainfall Anomaly Index</i>
RI	<i>Runoff index</i>
SM	<i>Soil Moisture</i>
SMOS	<i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i>
SPEI	<i>Precipitation evapotranspiration index</i>
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
SSDI	<i>Supply-demand Water Index</i>
SWDI	<i>Soil Wetness Deficit Index</i>
TCI	<i>Temperature Condition Index</i>
VCI	<i>Vegetation Condition Index</i>
VHI	<i>Vegetation Health Index</i>
WQI	<i>Water Quality Index</i>

1. INTRODUÇÃO

A interferência da ação humana frente ao ciclo hidrológico tem sido um tema de preocupação perante a comunidade político-científica, já que isso pode ter consequências como a seca, apesar do ciclo entre clima, meio-ambiente e o sistema social ser descrito como dinâmico e interdependente. Assim, as discussões da gestão hídrica para disponibilidade de água têm envolvido como a sociedade a molda, significando que não se pode considerar que a falta desse recurso seja apenas resultado de fenômenos naturais (VAN LOON et al.,2016).

Desse modo, sabe-se que a escassez afeta vários setores de atividades humanas, tanto na economia, quanto em atividades rotineiras (LIU et al., 2017). No entanto, é preciso entender a diferença desses termos para se identificar a causa, impactos potenciais e contramedidas a serem tomadas, na qual um controle de risco deve ser indispensável, facilitando, assim, problemas envolvendo a demanda de água em vários setores da atividade humana, como na agricultura, atingindo principalmente a irrigação, e a indústria (VENEGAS-QUIÑONES,et al.,2020; WAŁĘGA; ZIERNICKA-WOJTASZEK, 2021).

Esse assunto se torna ainda mais preocupante quando pesquisas apontam que a extração de água pelo mundo cresceu seis vezes mais do que no último século (QASIM, 2013). Também, estima-se que, aproximadamente, 35% da população mundial sofra com a seca e que cerca de 65% do escoamento global dos rios e de ecossistemas aquáticos estão sob moderada a alta ameaça de degradação (ALCAMO; HENRICH; ROSCH, 2000; C. VÖRÖSMARTY, et al., 2010), havendo maior atenção para regiões áridas e semiáridas.

Investimentos feitos nessa área, como pesquisas desenvolvidas por universidades e instituições governamentais tem sido de suma importância, porém muitos problemas ainda permanecem. Exemplos de trabalhos desenvolvidos são: análise qualitativa de ferramentas de manejo da seca (FANOK et al.,2022) e desafios de administração de água pelo governo na África do Sul rural (MAKAYA et al.,2020), que envolvem a correlação de interferência das mudanças climáticas e de ações humanas no ciclo hidrológico através de medias estruturais e não-estruturais, ou seja, sofrem intervenções físicas nas áreas afetadas, como obras de drenagem ou a otimização de gerenciamento dos riscos, como mapeamento de áreas de risco, respectivamente .

A atenção voltada para seca em escala global e regional fez com que sistemas de monitoramento e de previsão fossem desenvolvidos (*drought monitoring and prediction systems – DMAPS*) para fornecerem histórico de dados e alertas, tendo um papel importante na tomada de decisões (HAO et al.,2017). Tem-se como exemplo o *Global Drought Information System* (GDIS), resultado de esforço internacional de informações locais, e o *North American*

Drought Monitor (NADM), voltado para a América do Norte. Além disso, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou uma iniciativa para preparar os países para as possíveis consequências dessa catástrofe, na qual 60 fazem parte e outros 6 estão no processo de desenvolvimento.

No Brasil, a região que tem a atenção voltada para esse assunto é a Nordeste, principalmente no seu interior, onde o clima é semiárido, conhecido como sertão. Sendo assim, medidas de adaptação a mudanças climáticas, tais como práticas de conservação do solo para manter sua umidade, projetos de infraestrutura como transferência de água entre bacias, reservatórios, barragens, bombeamento de água de aquíferos, além de ações de educação dos residentes desse local, como fazendeiros, são tomadas para mitigar os efeitos da seca, já que sua vulnerabilidade provém de chuvas temporais, falta de irrigação e pobreza nas áreas rurais (MARENGO,2022).

Conforme o exposto acima, este trabalho tem por objetivo discutir a gestão hídrica mundial durante os períodos de seca, discriminando sua tipologia de acordo com os fatores de interferência que a causam, abordando métodos que são utilizados para minimizar seus efeitos, sejam eles por meio de atividades diretas ou indiretas. Para tanto, uma revisão de estudo foi feita, criando um copilado de informações, tais como condições meteorológicas e econômicas, por meio de pesquisa em websites de revistas científicas, gerando tabelas e gráficos que facilitam a organização de resultados de diversos trabalhos.

Perguntas essenciais precisaram ser respondidas para o avanço do trabalho, por exemplo: Onde estão localizados os principais pontos de seca? Por quanto tempo eles têm sido monitorados? O que foi aprendido desses estudos? Quais avanços foram atingidos? Em sumo, características geográficas a nível mundial foram mapeadas, sendo elas de caráter climático-sócio-político, contribuindo para tomada de decisões referente ao assunto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as características da gestão hídrica em períodos de seca através do monitoramento e mitigação de impacto em escala global e nacional

2.2 Objetivos específicos

- i. Qualificar os estudos científicos publicados em websites de impacto de acordo com o tipo de seca e seu arranjo mundial;
- ii. Relacionar as publicações mais relevantes com os seus respectivos países e climas para identificação das principais variáveis monitoradas;
- iii. Contrastar medidas estruturais e não-estruturais de mitigação de impacto da seca mais utilizadas pelos países em destaque;

3. METODOLOGIA

3.1 Contexto de estudo

Procurou-se relacionar a classificação da seca com os seus possíveis impactos em âmbito social, econômico e ambiental, apresentando medidas de gestão hídrica para minimizar seus efeitos através do seu monitoramento e métodos de mitigação. Para tanto, fez-se uma revisão de literatura sistemática com delimitação geográfica para os tópicos em estudo, fazendo menção ao Brasil ao fim de cada item de resultado.

3.2 Terminologia

A definição de seca pode ser difícil porque, apesar de ser um evento natural, pode ser agravado pelo modo do uso da água para benefício humano. Então, cientistas a descrevem como um acontecimento concepcional e operacional (ESTRELA, TEODORO; VARGAS, ELISA; EU, 2007, QUIRING 2009). A primeira, diz respeito a uma ideia de termo geral para identificar os limites de seu conceito, ou seja, relacionado a algum acontecimento como falta de precipitação. Já a segunda demonstra como ela funciona, ajudando a definir seu significado pela localização ou gravidade, por exemplo, baseando-se em índices matemáticos, necessitando de dados climáticos para sua caracterização.

Já que, desde 1980, mais de 150 definições de seca foram publicadas, Wilhite and Glantz (1985) a categorizaram em 4 tipos para medi-la: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica. As 3 primeiras medem a seca como um fenômeno físico, já a última a trata como em termos de oferta e demanda, rastreando os efeitos da escassez da água à medida que ela se propaga pelo sistema econômico.

Assim, esses cientistas elaboraram uma representação de forma resumida dos seus tipos e definições, mostrando seus impactos durante o tempo (Figura 1). Em sumo, deve-se entender seca meteorológica apenas com base no grau de secura e na duração do período seco; a seca agrícola como várias características da seca meteorológica relacionadas aos impactos agrícolas, focando, por exemplo, na escassez de precipitação ou numerosos fatores meteorológicos como a evapotranspiração; a seca hidrológica como efeitos das secas na hidrologia superficial ou subsuperficial.

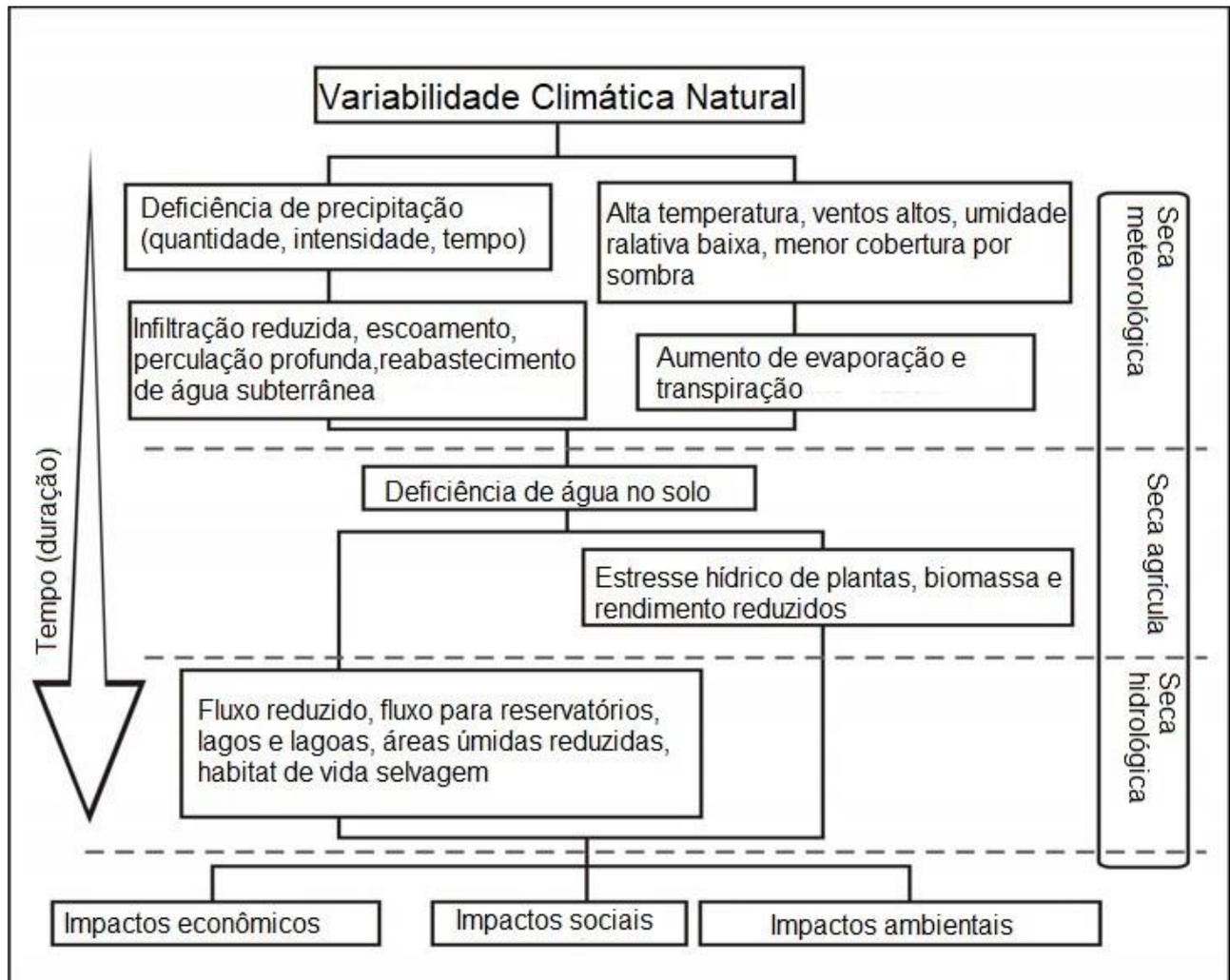


Figura 1 - tipos de seca e suas relações de causas e consequências (WILHITE AND GLANTZ, 1985).

A comunidade científica recentemente definiu a seca ecológica como a mais nova tipologia, sendo definida como déficit episódico na disponibilidade de água que leva os ecossistemas além dos limites de vulnerabilidade, impacta os serviços ecossistêmicos e desencadeia feedbacks em sistemas naturais ou humanos, caracterizada conforme mostra a figura 2 (CRAUSBAY et al. 2017).

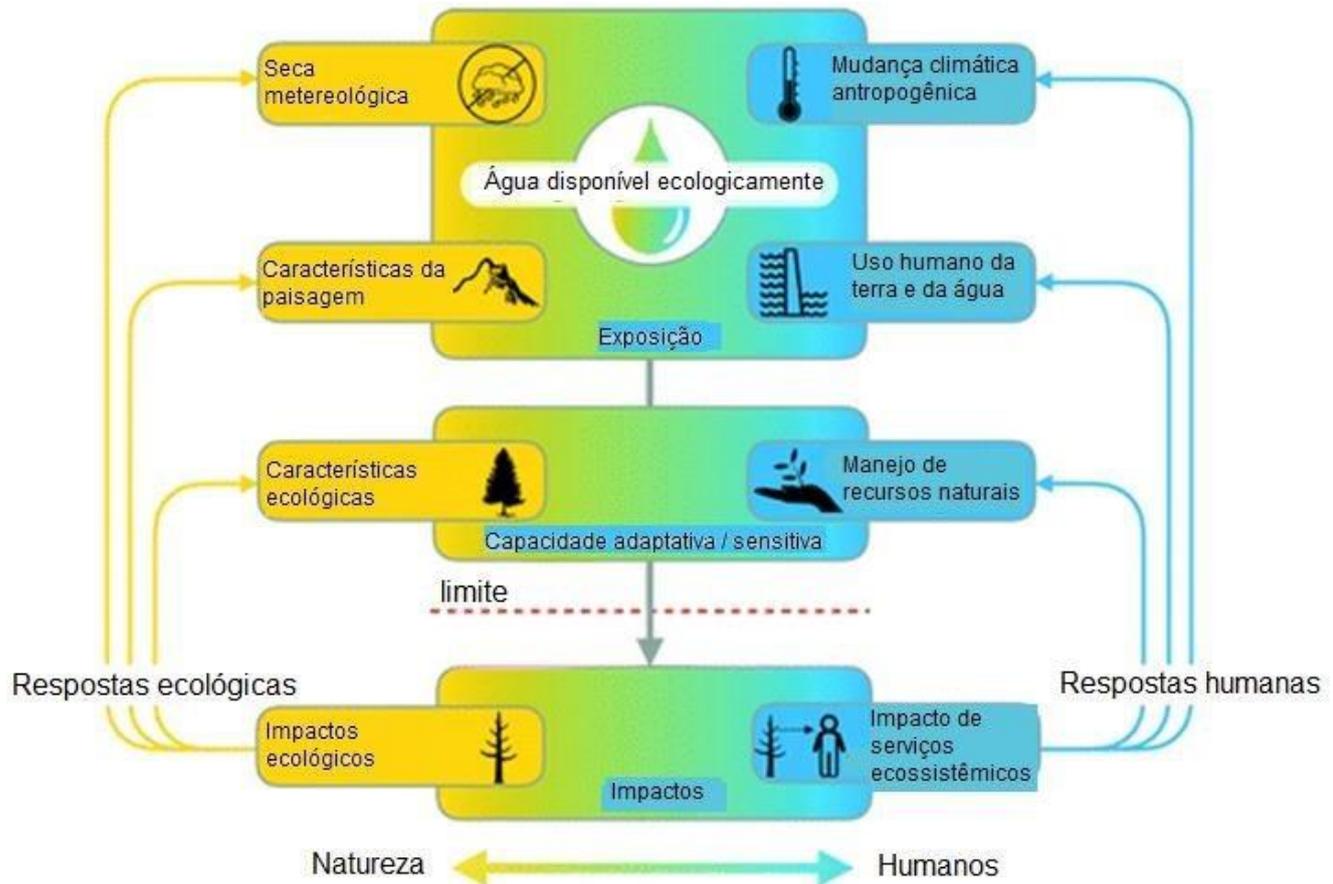


Figura 2 - Caracterização da seca ecológica (CRAUSBAY et al. 2017).

Com base nessas classificações, procurou-se associar os tipos de seca com a gestão hídrica adotada por cientistas e pelas autoridades políticas no mundo. Índices foram desenvolvidos para medição da seca de acordo com seu tipo, como, por exemplo, o *Palmer Drought Severity Index* (PDSI), usado principalmente para a seca meteorológica, futuramente evoluído para o *Crop Moisture Index* (CMI) para a seca agrícola e para o *Surface Water Supply Index* (SWSI) para a seca hidrológica (PALMER, W.C., 1965;1968;1981)

Também, desenvolveram-se métodos de mitigação de impacto classificados como estruturais e não-estruturais. A primeira entende-se como interferência física, podendo aumentar o armazenamento de água, como a construção de novos reservatórios, e melhorar a eficiência do sistema de água existente, como a detecção de vazamentos. Por outro lado, a segunda se define como decisões social e política a serem tomadas, através do desenvolvimento de sistemas de alerta de seca e a tomada de medidas relacionadas a políticas que podem ser tomadas para reduzir o impacto na sociedade (YANG, TSUN-HUA; LIU, WEN-CHENG, 2020). A tabela 1 resume exemplos de medidas adotadas para cada situação.

Tabela 1- Medidas adotadas para mitigação da seca

Estratégia	Medidas		Tipo de desastre
	Estrutural	Não-estrutural	Seca
Monitoramento	Estabelecimento de rede de monitoramento (estações de medição, satélite, etc.)		Precipitação, umidade do solo, etc.
Previsão e aviso	n/a	Modelos numéricos	Índice de precipitação padronizado
Avaliação impactante	n/a	Modelos numéricos	Estimativa da duração e severidade da seca
Resposta e manejo	Reservatório, manutenção do transporte de água, reciclagem de águas residuais, etc.	Baixa pressão da água, redução do fornecimento de água, pagamento para frear a agricultura, etc.	Diminuição do impacto socioeconômico da seca

3.3 Coleta de dados

Para se fazer um compilado de informações sobre tipos de seca e quais as medidas para mitigar seus efeitos, utilizou-se de dados disponíveis em bases de dados científicos, sendo eles *Web of Science*, *Scopus* e *Scielo*. A utilização das palavras-chave como tipos de seca e gestão hídrica foram utilizadas na pesquisa, revisando trabalhos publicados desde 1985 até Julho de 2022, apenas em inglês.

Para organizar os dados, foram utilizadas categorias como coordenadas geográficas, variáveis monitoradas, tipo de seca detectada (optou-se por excluir socioeconômica por não ser um fenômeno físico), características relacionadas ao tempo (data de obtenção dos dados), medidas sugeridas ou adotadas (estruturais ou não estruturais) principais descobertas e publicação de trabalhos (referência bibliográfica). A tabela 2 demonstra a lista de informações coletadas.

Tabela 2 - Strings de pesquisa utilizadas na busca de tópicos (título, resumo, palavra-chave)

Título, resumo, palavra-chave	Palavra-chave
	<i>meteorological drought</i>
	<i>hydrological drought</i>
	<i>agricultural drought</i>
	<i>ecological drought</i>
<i>drought management</i>	

3.4 Análise de dados

Os dados foram analisados conforme identificado o assunto de gestão hídrica da seca presente no título e/ou resumo, organizados usando sistema de planilhas e informações geográficas. Estatística descritiva e mapas temáticos foram então usados para produzir informação temporal e espacial relativo a cada tipo de seca, como localização, monitoramento de variáveis, quantidade de sensores e períodos monitorados. O número de publicações usando dados de tipo de seca são apresentados e a relação desses com as características monitoradas é explorada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado nos dados coletados, foram quantificados 8.325 trabalhos, no geral, e selecionados, baseado no assunto de gestão hídrica, 2.731 de trabalhos em nível global e 89 em escala nacional (estudos feitos sobre o Brasil) para caracterização conforme mostra a tabela 3 e apresentados no Anexo I.

Tabela 3 - Strings de pesquisa aplicados nos websites de busca

Escala	Número de publicações					Total
	Palavras-chave					
	Meteorological drought	Hydrological Drought	Agricultural Drought	Ecological Drought	Drought Management	
Global	962	964	27	41	737	2731
Nacional	21	48	20	0	n/a	89

4.1 Distribuição espacial

De modo geral, as figuras 3, 4, 5, 6, mostram como está distribuído o número de publicações nos principais países localizados nas regiões áridas e semiáridas por tipo de seca.

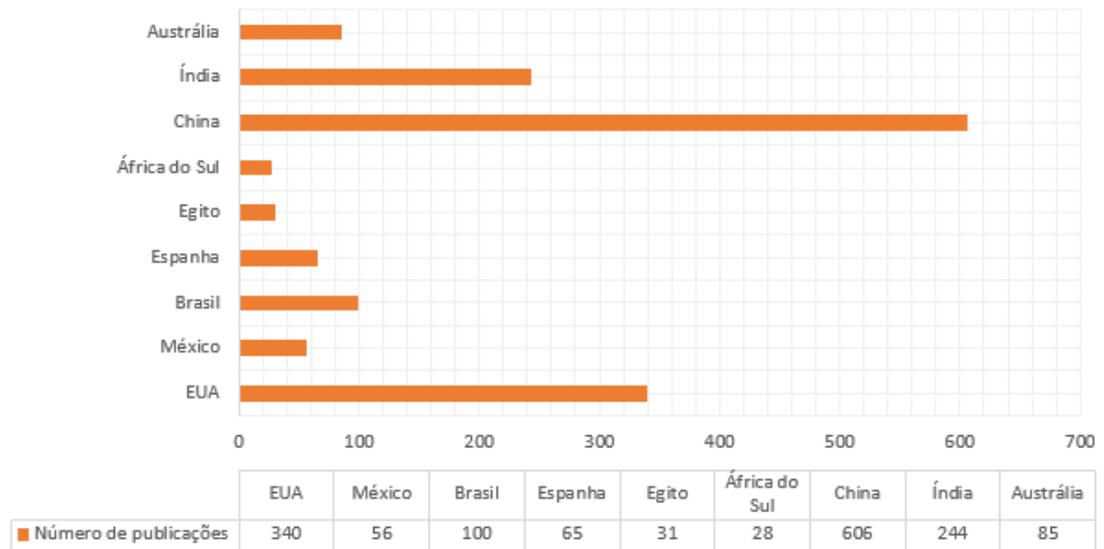


Figura 3 - Número de publicações sobre seca meteorológica nos países mais relevantes

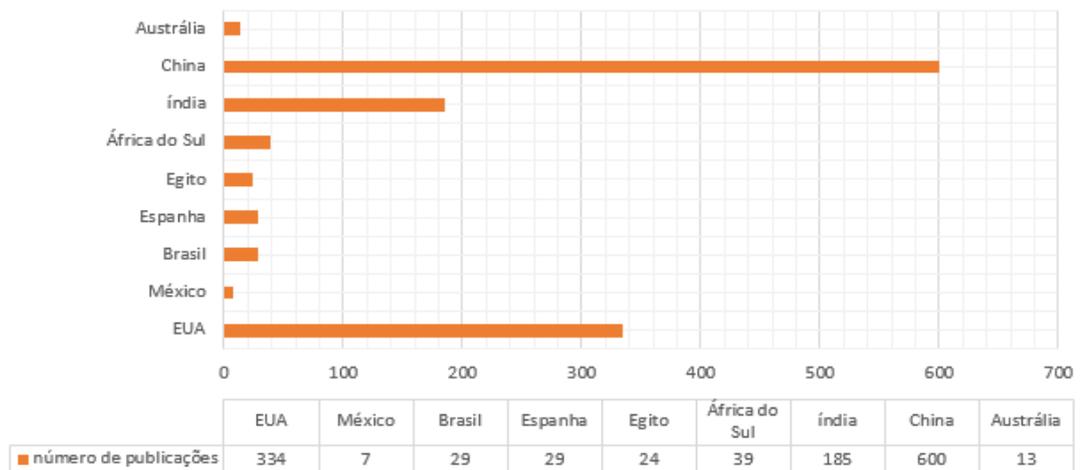


Figura 4 - Número de publicações sobre seca agrícola nos países mais relevantes

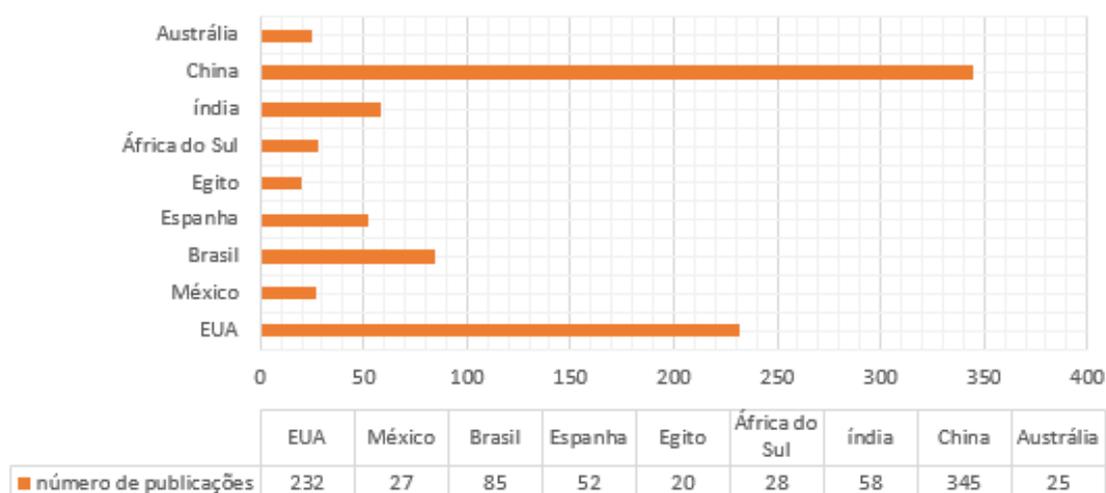


Figura 5 - Número de publicações sobre seca hidrológica nos países mais relevantes

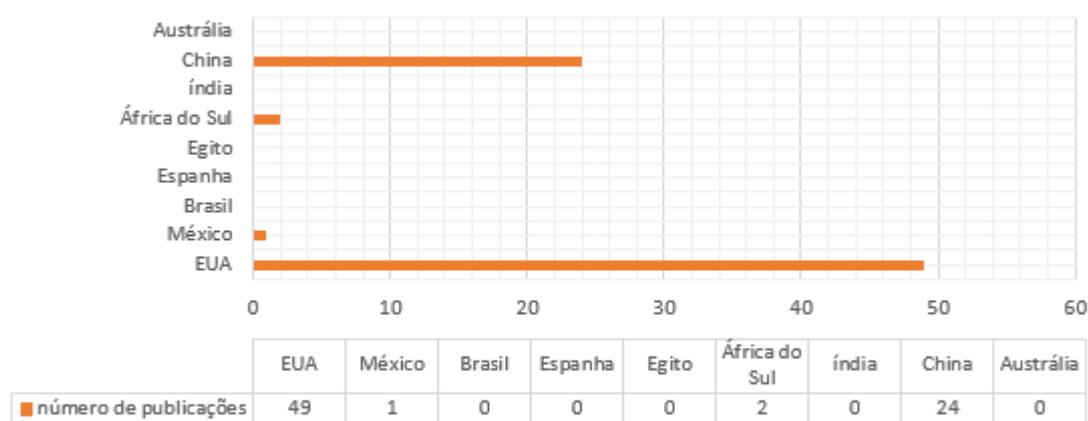


Figura 6 - Número de publicações sobre seca ecológica nos países mais relevantes

De modo geral, o ranking da distribuição global dos estudos de acordo com o tipo de seca para os países selecionados não foi muito variável. Para os tipos de seca meteorológica, hidrológica e agrícola a China obteve a liderança, ficando à frente dos EUA com 18,91% do total de publicações, perdendo apenas na seca ecológica, ficando em segundo lugar. Por sua vez, os EUA obtiveram a vice-liderança nos demais, com 11,47% do total dos trabalhos. Em âmbito nacional, o Brasil se destacou na seca hidrológica e não possuiu trabalhos publicados sobre a seca ecológica.

O arranjo mundial dos trabalhos por país por tipo de seca pode ter relação com o potencial econômico de cada um, já que muitas pesquisas requerem investimento, além de, também, possuir vínculo com a tipologia climática de cada região, destacando-se o clima árido e semiárido. Sivakumar et al. (2014) afirma que as características dos impactos da seca diferem

dependendo das atividades econômicas primárias e da vulnerabilidade da população a longos períodos de escassez de água.

A China é um dos que mais sofre com a seca, sendo frequente na sua região norte, afetando-o economicamente, principalmente na produção agrícola (ZHANG, QIANG et al., 2020). Ainda, desde sua formação em 1949, houve um progresso significativo em pesquisas sobre a seca, com a mudança de estudos anteriores sobre alguns grandes eventos de seca para mais recentes investigações sistemáticas e integradas, sendo totalmente voltado para a pesquisa de seca em nível internacional (ZHANG et al., 2015). Apesar do grande número de publicações, Zhang, Qiang et al. (2020) ainda afirma que os resultados estão fragmentados, com pontos de vista diferentes e contraditórios.

De acordo com Folger & Cody (2014), parte dos EUA está quase sempre passando por seca em algum nível. A área de terra afetada pela seca pode variar muito por ano e também dentro de um determinado ano. Em maio de 2017, apenas 3,8% da área total dos EUA foi afetada pela seca de intensidade pelo menos moderada. Em contraste, em setembro de 2012, 55% da nação enfrentou seca de intensidade moderada ou maior, e 35% do país estava sob forte seca.

No Brasil, percebeu-se que as áreas de maior destaque são o Nordeste e Sudeste do país, na qual o estado do Ceará é a região mais estudada, contendo 8,4% do total de trabalhos nacionais. Em um estudo feito por Cunha et al. (2019), as secas são generalizadas e recorrentes na região Nordeste, que possui a maior proporção de pessoas e situação de pobreza do país, apesar de que outras regiões tem sido afetada pelo fenômeno, como a Norte durante o ano hidrológico de 2014-2015, na qual atingiu 34% do território nacional.

Na África, estudos mostram evidências de ocorrência de seca extrema, como o feito por El-Tantawi, Attia M. et al. (2020) no Egito, na qual os anos de seca intensa foram 11%, severas 10%, moderadas 9% e leves 10% ao longo do período estudado. Ainda, Ayugi, Brian et al. (2022) mostram que as mudanças projetadas demonstram a recuperação de eventos de seca no domínio oeste/leste da África, enquanto as regiões sul e norte indicam uma tendência de aumento das características de seca.

O continente asiático é marcado pela seca em sua região central, sendo alvo principal de estudos desse tipo. Apesar disso, as baixas precipitações nessa região foram pouco estudadas, existindo alguns estudos para sua região leste e sul, sendo mais pesquisadas do que a região norte e oeste. Em resumo, as variações de longo prazo da seca para toda a região da Ásia Central ao longo do século XX e sua ligação com os padrões climáticos de grande escala, em particular as discrepâncias entre as estações, ainda não foram compreendidas com muita clareza. (ZHANG, XUEZHEN et al, 2021).

Na Oceania, o clima seco se estende principalmente pela Austrália. Este país não teve estudos grande número sobre a seca meteorológica, na qual a maioria se destaca por apresentar relação de índices meteorológicas para medir a seca na região, não sendo encontrados dados gerias sobre publicações. Em um estudo feito por DEO, Ravinesh C. et al. (2017) mostra que no norte da Austrália, o evento de 1925-1929 foi o pior, enquanto na Tasmânia, o evento de 1911-1915 exibiu a maior gravidade, seguido pelo evento da Seca do Milênio.

Em escala nacional, os estados de São Paulo e Paraíba têm o maior número de estudos, com 6 cada. Bevacqua, Alena G. et al. (2021) mostra que as secas meteorológicas mais severas são observadas em regiões úmidas (por exemplo, Amazônia e Sul do Brasil). Em média, ocorreram 17 secas meteorológicas por bacia entre 1980 e 2015, durando 8,4 meses cada. As regiões secas (São Francisco e Nordeste do Brasil) são caracterizadas por um elevado número de secas meteorológicas curtas (entre 15 e 25 eventos com duração de 5 a 10 meses cada), que são comumente agrupadas próximas umas das outras. A figura 8 mostra a distribuição espacial dos estudos realizados no Brasil.

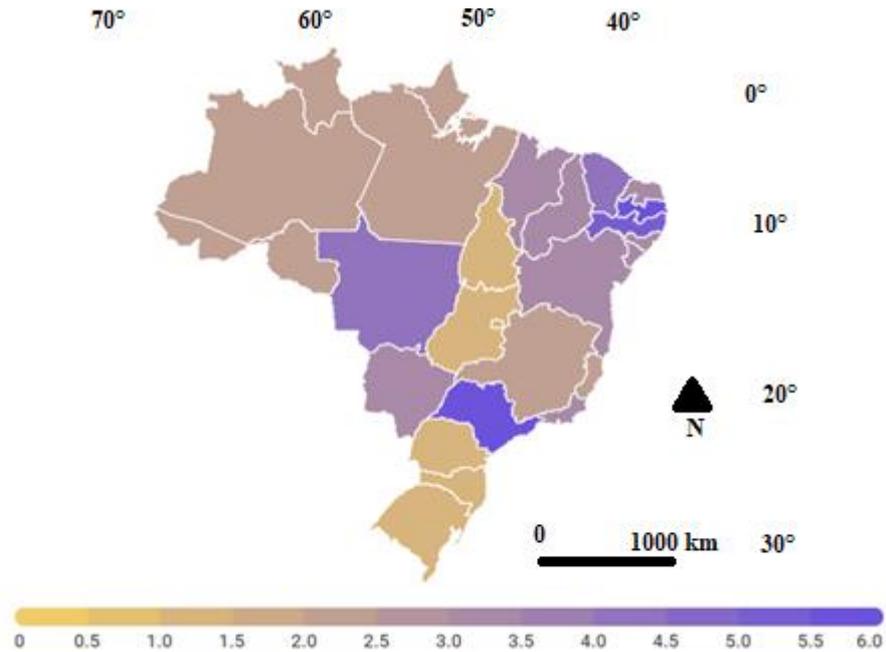


Figura 8 - Distribuição nacional de trabalhos sobre a seca meteorológica

4.1.2 Seca agrícola

O infográfico mostrado na figura 9 mostra que a maioria dos países possui menos de 50 publicações sobre o assunto.

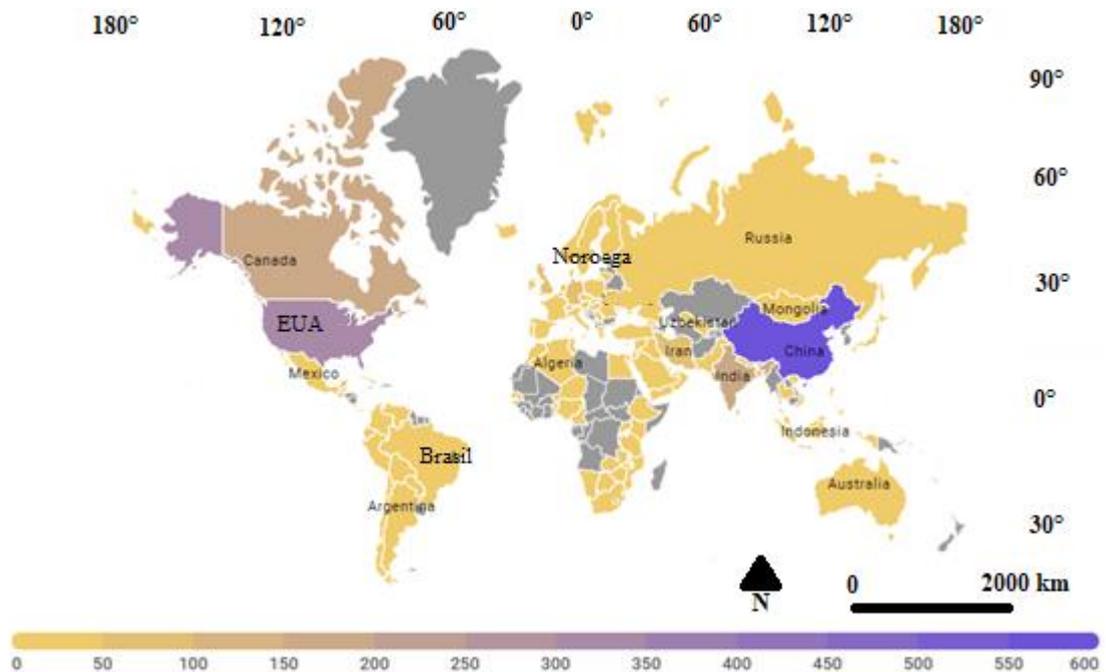


Figura 9 - Distribuição mundial de trabalhos sobre a seca agrícola

Na América do Norte, Canadá e EUA se obtiveram maior número de publicações. No entanto, O Canadá não é um país cuja características representam o clima árido ou semiárido em sua maior parte, não sendo encontrado dados referentes ao número de estudos feitos nesses

países ou sobre a proporção em seus territórios. Já no México, em um estudo feito por Ortega-Gaucin, David et al. (2021) mostra que 32% dos municípios do estado de Zacatecas estão em alto e muito alto risco de seca agrícola. Esses municípios estão localizados principalmente no centro e norte do estado, onde 75,8% da agricultura é de sequeiro, 63,6% das unidades de produção estão localizadas e 67,4% da população do estado depende da atividade agropecuária.

O continente africano obteve destaque no Sudeste. Entretanto, dados relevantes como do Egito foram encontrados, mostrando que mm média, 10,9 % (1.104,17 km²) e 12 % (1.215 km²) da área de estudo foram classificados como excelentes e bons para captação da água de chuva, respectivamente, enquanto 11,7 % (1.185,21 km²), 15,4 % (1.560 km²) e 50 % (5.065 km²) da área foram classificados como moderados, inadequados e pobres, respectivamente. A maioria das áreas com aptidão excelente a boa encontra-se predominantemente em áreas que enfrentaram seca severa entre 2010 e 2014. (MAHMOUD, Shereif H. et al.,2016).

Na Ásia, China e Índia se destacaram. Em um estudo feito por DAS, Prabir Kumar et al (2020) mostra que na Índia, cerca de 65% da área total cultivada foi reduzida devido à seca durante 1987, afetando cerca de 285 milhões de populações, enquanto a devastadora incidência da seca em 2009 afetou cerca de 400 milhões de pessoas. Em 2002, a Índia enfrentou sua menor monção de todos os tempos, afetando cerca de 350 milhões de pessoas, com redução de cerca de 3,1% na contribuição agrícola para o PIB.

Já na China, o estudo de WU, Jianjun et al. (2011) mostrou que a deficiência hídrica sazonal das culturas, a capacidade de retenção de água do solo e a irrigação foram identificados como os principais indicadores de vulnerabilidade agrícola à seca na China. Em escala regional, o sul e o leste da China normalmente têm uma vulnerabilidade baixa e moderada à seca, enquanto a vulnerabilidade alta e muito alta à seca agrícola é observada no norte e oeste da China. Na Austrália, Hoque, Muhammad Al-Amin et al (2021) destaca que que cerca de 19,2% e 41,7% das áreas estão sob risco muito alto e moderado a alto para secas agrícolas, respectivamente. Ambas medições tiveram como pilares a profundidade do solo, que tem uma grande influência em fornecer os nutrientes e água necessários para o crescimento das culturas, ou seja, quanto mais profundo, menor a probabilidade de seca (JAIN e t al., 2015), porcentagem de areia, umidade solo e litogia. (BAIK et al. 2019; DAYAL et al. 2018).

No Brasil, a região Nordeste se destacou predominantemente, conforme mostra figura 10. Em um estudo publicado Brunini, Orivaldo et al.(2005) mostra que a atividade agrícola no país acontece durante o período chuvoso (Março a Outubro), sendo que a seca afeta sua produção na região nordeste. Cerca de 33% (em torno de 50% da região nordeste) das perdas agrícolas são atribuídas a seca.

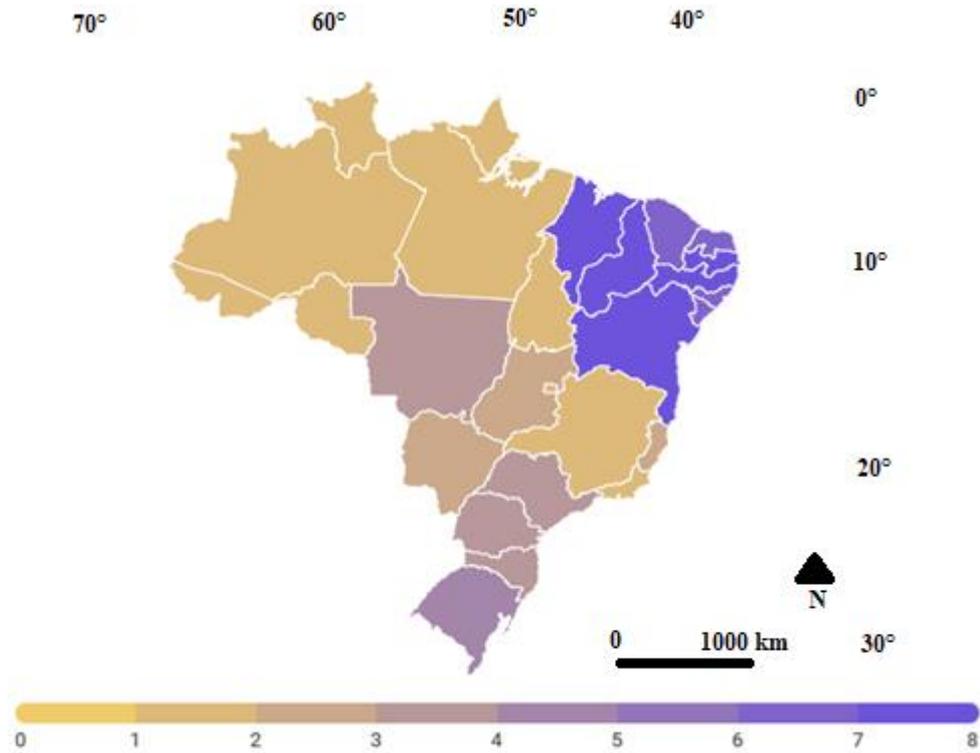


Figura 10 - Distribuição nacional de trabalhos sobre a seca agrícola

4.1.3 Seca hidrológica

A distribuição mundial de trabalhos sobre a seca hidrológica teve um melhor arranjo, estando presente em grande parte de todos os continentes, conforme mostra figura 11.

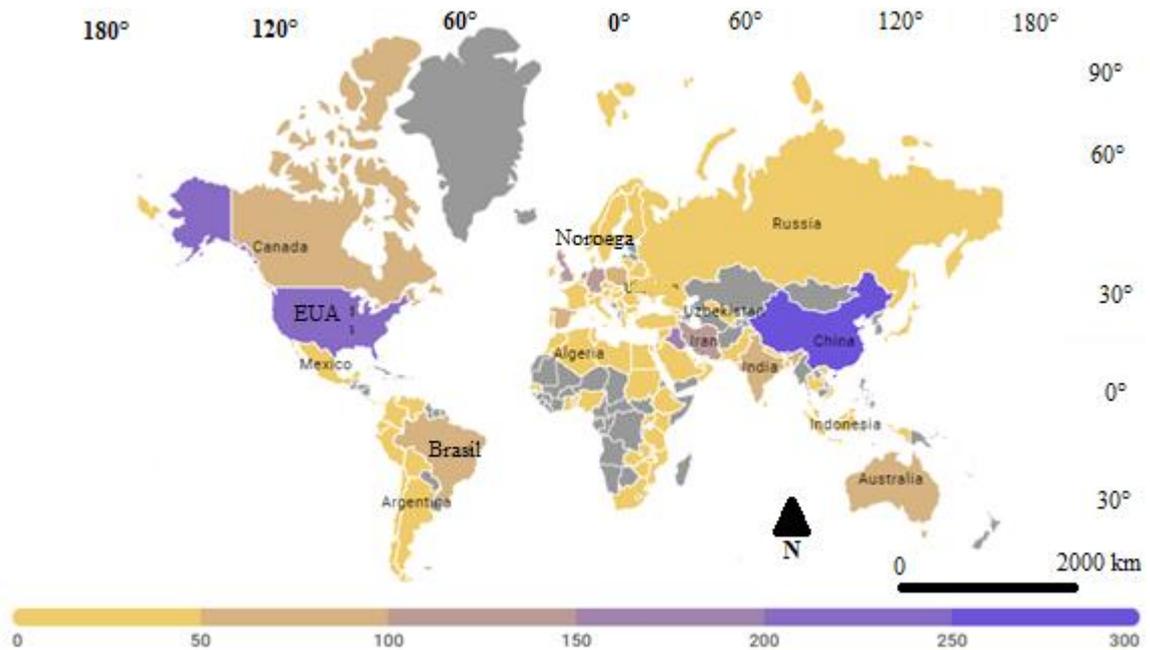


Figura 11 - Distribuição mundial de trabalhos sobre a seca hidrológica

Na América do Norte, Zhao, Cha et al. (2020) destacam que as secas hidrológicas, que combinam o efeito da precipitação e das mudanças de temperatura, apresentam um padrão muito uniforme de agravamento das secas, e que o aumento da temperatura supera o aumento esperado da precipitação média de verão em algumas regiões. As poucas bacias hidrográficas que escapam a essa tendência estão localizadas em climas mais frios (Costa Oeste do Canadá, Montanhas Rochosas) ou em regiões com o maior aumento projetado de precipitação, como o sul do Texas.

O continente africano tem uma distribuição homogeneia de trabalhos, estando presentes ao longo de sua região norte a sul, sendo na maior parte inexistente em sua região oeste. Botai, Christina M. et al. (2021) afirma que as condições hidrológicas de seca se tornaram mais frequentes e ainda exibem contrastes espaciais em toda a região de dos Três Cabos durante o período analisado, tornando-se mais prolongados e graves durante os períodos prolongados (por exemplo, 20 e 50 anos).

O continente europeu apresentou destaque para as regiões em que ocorrem secas, como a Espanha. De acordo com Peña-Angulo, D. et al (2022) tem-se tendência positiva para secas mais frequentes e severas no sul e centro da Europa e, inversamente, uma tendência negativa no norte da Europa. Esse estudo enfatiza que as secas hidrológicas mostram padrões espaciais complexos em toda a Europa nas últimas seis décadas, o que implica que o comportamento hidrológico da seca na Europa tem um caráter regional.

Na Ásia, a China possui liderança. Nesse país as secas geralmente começavam no verão e terminavam no inverno, e 6 meses era a duração média de suas secas, acima da média mundial que, geralmente, está entre 3 a 6 meses (HUANG, SHENGZHI et al, 2019). Também, Ding, Yibo et al. (2021) destacam que tem havido muitos estudos de propagação de seca múltipla, ou seja, a transformação de uma seca a outra.

A seca hidrológica na Austrália foi analisada em um estudo feito por Rahman, Sadia et al. (2017) que a definiu como redução substancial de água no ciclo hidrológico. Nesse estudo, foi encontrado que as intensidades de pico de seca não estavam necessariamente associadas às secas de maior duração, mas sim a eventos de seca com duração comparativamente curta.

No Brasil, as regiões Nordeste e Norte se destacaram por apresentar maior número de publicações, conforme mostra figura 12. As secas hidrológicas mais severas e de longa duração são encontradas na região mais seca, ou seja, Nordeste do Brasil. (BEVACQUA, ALENA G. et al., 2021).

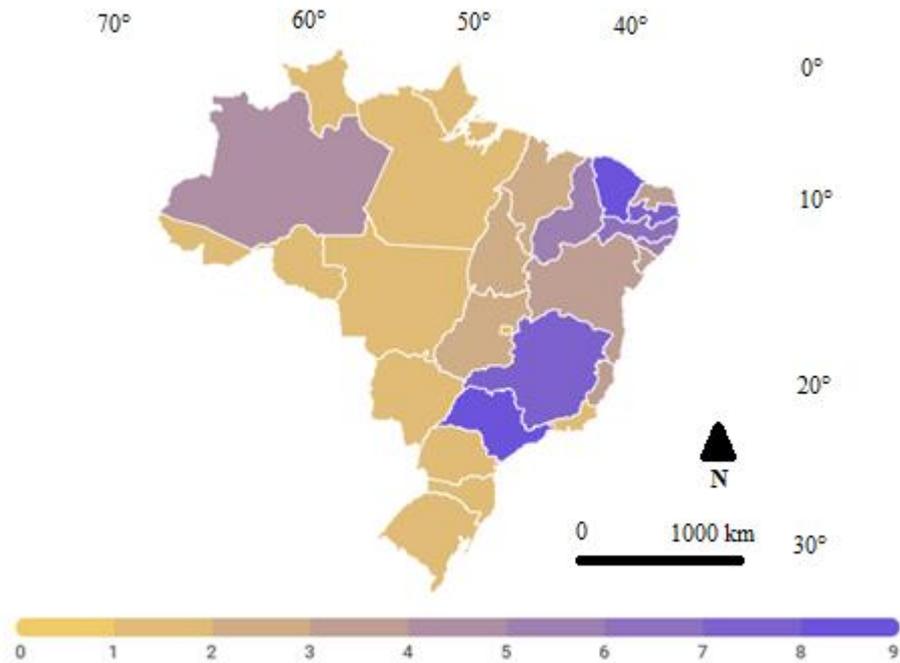


Figura 12 - Distribuição nacional de trabalhos sobre a seca hidrológica

4.1.3 Seca ecológica

A distribuição espacial global da seca ecológica é notavelmente concentrada e a liderança acontece nos EUA, superando a China. Não houveram trabalhos identificados em grande parte da América do Sul, África e Ásia, não havendo, também no Brasil, conforme mostra figura 13.

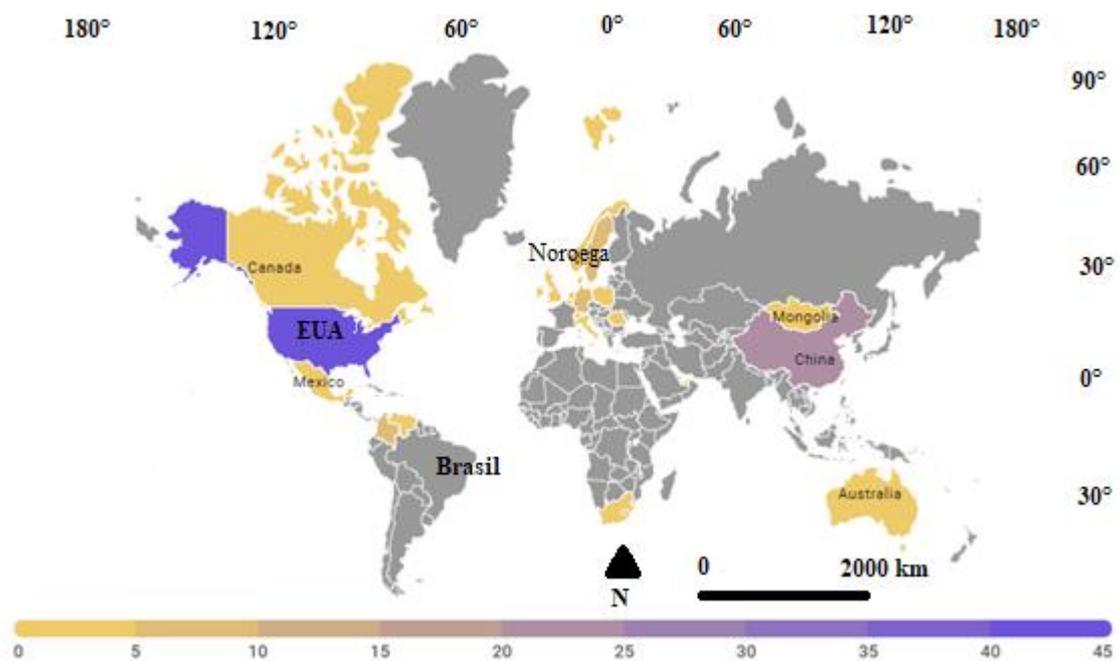


Figura 13 - Distribuição mundial de trabalhos sobre a seca ecológica

Um estudo feito por Bradford, John B. et al. (2020) mostra que, apesar das evidências limitadas de mudanças robustas na precipitação, as mudanças na seca ecológica são robustas em grandes porções de terras secas nos Estados Unidos e no Canadá. Seus resultados sugerem fortes diferenças regionais nas trajetórias de seca de longo prazo, simbolizadas pelo aumento da seca crônica nas áreas do sul, notadamente nas montanhas do Alto Gila e nas pradarias do semiárido do centro-sul, e diminuição no norte, particularmente porções das regiões temperada e oeste.

Na África do Sul, único país com esse tipo de estudo no continente africano, tem-se que o clima não está necessariamente ligado à vulnerabilidade ecológica. Os distritos de alta pluviosidade no estudo feito por Bahta, Yonas T. et al. (2019) mostraram maior vulnerabilidade ecológica à seca devido ao mau planejamento e gestão do abastecimento de água, práticas de pastoreio deficientes e gestão da terra que leva a sua grave degradação.

Na China, Zhang, Zezhong et al. (2022) afirma que a seca ecológica apresentou tendência de queda de 1999 a 2019 na planície do Norte da China, com período de 4,2 anos e 7 anos na escala interanual. A seca ecológica mais grave ocorreu no ano de 2002, com índice médio mensal de condição da vegetação variando de 0,17 (em dezembro) a 0,59 (em janeiro); o tempo de propagação da seca meteorológica para a seca ecológica foi de 2,67 meses no inverno e 1,33 meses no verão, o que é útil para prever a ocorrência de seca ecológica.

4.2 Variáveis monitoradas e linhas de pesquisa

Das informações obtidas dos mais relevantes, tem-se uma variabilidade de índices utilizados para cálculo de cada tipo de seca, conforme mostra tabela 4, resumido neste tópico e detalhado no Anexo II.

Tabela 4 – Índices mais utilizados para monitoramento pelos países mais relevantes por tipo de seca

País	Seca			
	Meteorológica	Agrícola	Hidrológica	Ecológica
	Variáveis			
EUA	SPI	NDVI VCI TCI CWSI NDVI VHI DSI	NJHDI SDI	NDVI
México	DEPI SPI	DSI DEI DVI DRI	SPI	DSI
Brasil	SPI SSI	SPI SPEI SM SMOS	NDVI SPI SPEI SSI	N/A
Europa/Espanha	SPEI	SWDI CMI AWD SMOS	SPI	SM
Egito	SPI	NDVI	SPI SDI	RI
África do Sul	PNPI RAI	ADRI	SPI SSI	EVI
Índia	SPEI SPI	MADI NDVI SSMI	SPI WQI SDI	SPEI
China	SPI	NDVI	SSI	SSDI
Austrália	SPI	NDVI	SHDI	N/A

Legenda:

ADRI	<i>Australian Disaster Resilience Index</i>
AWD	<i>Atmospheric Water Deficit</i>
CMI	<i>Crop Moisture Index</i>
CWSI	<i>Crop Water Stress Index</i>

DEI	<i>Drought Exposure Index</i>
DEPI	<i>Drought Exceedance Probability Index</i>
DRI	<i>Drought response index</i>
DSI	<i>Drought Severity Index</i>
GDIS	<i>Grassland Drought Index</i>
MADI	<i>Malawi Drought Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NJHDI	<i>Nonlinear Joint Hydrological Drought Index</i>
PNPI	<i>Percent Of Normal Precipitation Index</i>
RAI	<i>Rainfall Anomaly Index</i>
RI	<i>Runoff index</i>
SSDI	<i>Supply-demand Water Index</i>
SM	<i>Soil Moisture</i>
SMOS	<i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i>
SPEI	<i>Precipitation evapotranspiration index</i>
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
SWDI	<i>Soil Wetness Deficit Index</i>
TCI	<i>Temperature Condition Index</i>
VCi	<i>Vegetation Condition Index</i>
VHI	<i>Vegetation Health Index</i>
WQI	<i>Water Quality Index</i>

Para a seca meteorológica, destacou-se o *Standardized Precipitation Index (SPI)*, aparecendo em 89% dos trabalhos nos países em destaque. Logo em seguida, percebeu-se também a presença do *Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)* como um dos principais pais medição da seca. Em contrapartida, outros índices foram utilizados, como o *Drought Exceedance Probability Index (DEPI)*, *Percet of Normal Precipitation Index (PNPI)*, *Rainfall Anomaly Index (RAI)* e *El Niño-Southern Oscillation (ENSO)*.

O SPI e SSI continuam em destaque na seca hidrológica, porém outros índices apareceram como alternativas de medição. O *Streamflow drought index (SDI)* e o *Water Quality Index (WQI)* também foram utilizados. Na seca agrícola e ecológica, diversos índices foram utilizados, destacando-se o *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*.

Para este trabalho, utilizou-se como critério de descrição quais são os mais utilizados nos tipos de seca, sendo o SPEI verificado em todas categorias e o SPI em todas, exceto seca ecológica.

4.2.1 Standardized Precipitation Index (SPI)

O SPI é calculado de acordo com a fórmula 1

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

Sendo

$\alpha > 0$ um parâmetro de formato;

$\beta > 0$ um parâmetro de escala;

Γ é a função gama;

$x > 0$ é a quantidade de precipitação; (EDWARDS & McKee, 1997)

Pela revisão dos estudos, pode-se perceber que o SPI não necessita de muitos dados para ser calculado e sua única fonte de informação é a precipitação ou o escoamento, sendo sua formulação considerada simples e não exige uma calibração local. Essas características o fizeram como o índice mais utilizado em tempos recentes. Em 2009, houve a Declaração de Lincoln sobre Índices de seca em que a Organização Meteorológica do Mundo recomendou seu uso em todos os serviços meteorológicos regionais e até produziu um guia para usuários deste índice.

O SPI é caracterizado por apresentar uma multiescala e isso também é considerado uma vantagem visto que cada uma permite descrever as condições de seca que desencadeiam cada problema resultante, ou seja, útil para uma aplicação diferente, seja ela para seca meteorológica ou para os outros tipos (LLOYD-HUGHES e SAUNDERS, 2002). Essas multiescalas são projetadas para superar a desvantagem de não haver um único índice de seca que possa capturar todo o conjunto variado de impactos da seca resultantes dos diferentes tipos de seca (WANDERS et al., 2017)

A multiescala pode ser apresentada como uma vantagem do índice SPI, na medida em que cada escala permite descrever as condições de seca que desencadeiam cada problema resultante; cada escala é, portanto, útil para uma aplicação diferente: meteorológica, agrícola, hidrológica, etc. (LLOYD-HUGHES e SAUNDERS, 2002). Oferece múltiplas possibilidades de agregação temporal; o usuário pode escolher o apropriado.

O SPI é calculado para períodos de acumulação mais curtos (um a três meses). Ele se refere a impactos instantâneos, como diminuição da umidade do solo, acúmulo de neve e fluxo em pequenas bacias hidrográficas; mas quando o SPI é calculado para períodos médios de acumulação (em torno de seis a 12 meses), pode ser usado como um indicador de redução

da vazão dos córregos e armazenamento do reservatório (EC, 2020). Verificou-se que escalas de tempo mais longas (SPI24 e além) se correlacionam significativamente com os níveis das águas subterrâneas e o armazenamento total de água nos aquíferos durante a seca (LEELARUBAN et al., 2017; CAMMALLERI et al., 2019).

De acordo com Patel, N. R. et al (2007), A principal vantagem do SPI, em comparação com outros índices, é que o SPI permite tanto a determinação das condições de seca em diferentes escalas de tempo quanto o monitoramento de diferentes tipos de seca. Este índice captura o déficit acumulado ($SPI < 0$) ou excedente ($SPI > 0$) de precipitação durante um período especificado e fornece uma medida normalizada (ou seja, pontuação Z espacialmente invariante) de anomalias de precipitação relativa em várias escalas de tempo. Seu valor pode ser usado tanto para classificação do clima, conforme mostra tabela 5 (KHADR, Mosaad, 2011), quanto para classificação do grau da seca meteorológica, como mostra tabela 6.

Tabela 5 – Classificação do clima de acordo com o valor do SPI

SPI	Classification
>2	Extremamente úmido
1.5 to 1.99	Muito úmido
1 to 1.49	Moderavelmente úmido
0.99 to -0.99	Perto do normal
-1 to -1.49	Moderavelmente seco
1.5 to -1.99	Severamente seco
-2 and less	Extremamente seco

Tabela 6 – Classificação da seca de acordo com o valor de SPI

Intervalos do SPI	Categoria da Seca
(-1.0, 1.0)	Perto do normal
(-1.5, -1.0]	Seca moderada
(-2.0, -1.5]	Seca severa
($-\infty$, -2.0]	Seca extrema

Em um estudo feito por Limones, Natalia et. al (2022), foram analisados 11 países de todos os continentes de acordo com as características apresentadas pelo *Climate Research Unit* (CRU). Assim, obteve-se o SPI para cada, conforme mostra tabela 7.

Tabela 7 – Valores do SPI por país

Mês/País	Turquia	Austria	Índia	Brasil	México	Chile	China	País de Gales	Itália	África do Sul	EUA
6	0.59	0.64	0.43	0.65	0.62	0.54	0.46	0.53	0.45	0.63	0.54
12	0.61	0.65	0.52	0.7	0.71	0.65	0.53	0.59	0.53	0.7	0.63
24	0.63	0.63	0.59	0.68	0.68	0.69	0.51	0.6	0.6	0.71	0.64
36	0.58	0.61	0.6	0.61	0.62	0.67	0.52	0.55	0.63	0.63	0.59
48	0.53	0.54	0.58	0.55	0.56	0.66	0.54	0.44	0.65	0.55	0.54

4.3 Medidas de mitigação de impacto

Do total de trabalho selecionados, 183 apresentaram soluções estruturais e não-estruturais como métodos para redução de impacto da seca. Desses, apenas 10 demonstraram como solucionar o problema com intervenção física direta, sendo o restante, em sua maioria, análise de índices de medida e monitoramento através de satélite. Este tópico resume as informações coletadas e as detalhadas podem ser encontrada no Anexo III.

4.3.1 Medidas Estruturais

Em sua grande maioria, as soluções apresentadas foram para a seca hidrológica, não sendo identificado, de modo individual, para a meteorológica e apenas uma para a agrícola. Países como Espanha e China apareceram nas pesquisas.

No estudo apresentado por Liu, Yizhuang et al.(2020) tem-se que a construção da hidrelétrica das três gargantas (TGD) causou seca hidrológica no lago Dongting. Como resultado, o período seco foi estendido de 123 dias/ano antes da operação do TGD (1981-2002) para 141 dias/ano (2003–2016) em média. Então, para resolver o problema causado por barragens a montante, um esquema inovador de controle de cheias (IFCS) foi introduzido, mostrando que o IFCS pode efetivamente converter a vazão de pico de inundações em estações chuvosas em recursos hídricos em estações secas, pois o IFCS poderia aumentar significativamente o armazenamento de água utilizável do lago. Por exemplo, o armazenamento de água utilizável poderia aumentar para 2,85 bilhões de m³ e 1,81 bilhão de m³ no ano de seca extrema de 2006 e 2011, respectivamente.

No Brasil, no estado do Ceará, foi identificado que para se adaptar a prolongados períodos de seca, uma rede densa de reservatórios de superfície foi implementada pelas

comunidades e fazendeiros para complementar os estratégicos construídos pelo setor público (Pereira et al., 2019), classificados como medida estrutural. Entretanto, na maioria dos pequenos, existe uma alta taxa de evaporação potencial, deixando-os assim vazios e sendo inadequados para uso humano, podendo ser usados de outra maneira, tais como o uso prioritário de acordo com a eficiência hidrológica (Brasil, Paulilo; Medeiros, Pedro., 2020). Outra solução estrutural foi identificada no Nordeste, sendo uma das poucas apresentadas pelos autores, sendo ela a transposição do Rio São Francisco no Nordeste brasileiro (Campos, José Nilson B.; De Carvalho Stuart, Ticiania Marinho, 2008).

4.3.2 Medidas Não-estruturais

Em sua maioria, as medidas não-estruturais foram compostas por monitoramento e dados presentes em bancos globais ou dos países em estudo. A seca com maior destaque foi a hidrológica, sendo a mais monitorada.

Notou-se que existe uma quantidade significativa de trabalhos que utilizaram do *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) para manejo da seca, como no caso da China. No estudo feito por CAO, Yanping et al. (2015), concluiu-se que esse sistema, pode, portanto, ser usado para caracterizar e monitorar secas em grande escala nas regiões áridas, sendo de especial valor para áreas com escassas observações. Também, notou-se destaque do *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX), como no caso do trabalho utilizado por Abiodun, Babatunde J. et al (2019) em seu estudo para a África Austral, concluindo que seus resultados tem aplicação na mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre o risco de seca nas bacias hidrográficas da região no futuro.

No Brasil, em sua maioria, as soluções não-estruturais para manejo da seca correspondem a 90%, sendo compostas por indicadores, tais como calibração de modelo hidrológico usando dados de sensoriamento remoto (Araujo, Diego Cezar dos Santos et al., 2021), previsão de chuva (Dantas, Leydson G. et al., 2020), simulação da ocorrência de secas por cópulas (Almeida, Rogério de; Barbosa, Paulo Sérgio Franco., 2020), utilização de imagens de satélites de alta resolução para mapeamento (Zhang, Shuping et al., 2021), entre outros.

5. CONCLUSÃO

Através dos dados apresentados e de sua análise, pode-se concluir que o maior número de publicações se concentra entre a China e os EUA. Isso pode ser explicado por grande investimento em pesquisas feitas por esses países, sendo ambos uma das maiores potências econômicas mundiais. Quanto ao Brasil, apesar de se destacar entre aqueles que estão localizados nos climas árido e semiárido, tem-se que o número de publicações referente ao assunto ainda é baixo, sendo pouca maioria voltada para a comunidade científica internacional, além do que sua língua nativa difere do inglês, dificultando possíveis publicações.

A seca meteorológica foi a mais estudada entre os tipos apresentados. Percebeu-se que há uma relação inversa entre a progressão da seca de um tipo para o outro, e o número de publicações. Ou seja, quanto mais a seca evolui, como por exemplo, da meteorológica para a agrícola, menos publicações são feitas a seu respeito. Isso pode estar relacionado a facilidade que a primeira pode ser identificada, na qual é avaliada de acordo com dados presentes em banco de dados que possuem histórico mais abrangente do passado ao presente. A seca ecológica apresentou poucos estudos por ser um termo recente que ainda precisa de atenção pela comunidade científica.

As variáveis monitoradas para os tipos de seca tiveram estreita relação com as medidas de mitigação de impacto. Percebeu-se que, para saber qual medida ideal a ser adotada, tem-se que avaliar a seca através desses índices, sendo o SPI o mais explorado, tendo como justificativa a facilidade de seu cálculo, necessitando de poucas informações. Também, as medidas não-estruturais foram as mais adotadas por serem mais viáveis e baratas, sendo utilizadas para prevenir, em sua maioria, impactos futuros, diferentemente das estruturais.

Este trabalho baseou-se em um compilado de informações coletadas de artigos publicados. Apesar dos esforços de mapear todo tipo medidas de combate à seca e classificação de acordo com a região de estudo, tem-se a possibilidade de algum trabalho não ter sido notado por não apresentar as palavras-chave utilizadas. Portanto, atualizações futuras aos dados coletados podem acontecer com participação da comunidade científica.

Baseado na revisão, pode-se concluir que o maior número de estudos produzidos nacionalmente está voltado para a região Nordeste. Isso pode estar relacionado ao clima semiárido predominante da região, onde os índices de precipitação são menores. Também, medidas não-estruturais são mais utilizadas em âmbito nacional por ser um recurso disponível de dados já mapeados, presentes em fontes de instituições nacionais e internacionais, obtidas por sensoriamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcamo, Joseph; HENRICH, Thomas; Rosch, T. World water in 2025. **World water series report**, v. 2, 2000.

Almeida, Rogério de; Barbosa, Paulo Sérgio Franco. Simulation of the occurrence of drought events via copulas. **RBRH**, v. 25, 2020.

Araujo, Diego Cezar dos Santos et al. Calibration of FEST-EWB hydrological model using remote sensing data in a climate transition region in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 3, p. 513-524, 2021

Apurv, Tushar; Cai, Ximing. Evaluation of the stationarity assumption for meteorological drought risk estimation at the multidecadal scale in contiguous United States. **Water Resources Research**, v. 55, n. 6, p. 5074-5101, 2019.

Ayugi, Brian et al. Review of meteorological drought in Africa: historical trends, impacts, mitigation measures, and prospects. **Pure and Applied Geophysics**, p. 1-22, 2022.

Abiodun, Babatunde J. et al. Future projection of droughts over major river basins in Southern Africa at specific global warming levels. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, n. 3, p. 1785-1799, 2019.

Baik J, Zohaib M, Kim U, Aadil M, Choi M (2019) Agricultural drought assessment based on multiple soil moisture products. **Journal of Arid Environments** 167:43-55.

Bahta, Yonas T.; Jordaan, Andries; PHATUDI-MPHAHLELE, Boitumelo. Ecological vulnerability indicators to drought: Case of communal farmers in Eastern Cape, South Africa. **Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies**, v. 11, n. 1, p. 1-11, 2019.

Bevacqua, Alena G. et al. Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 126902, 2021

Botai, Christina M. et al. Hydrological drought assessment based on the standardized streamflow index: a case study of the three cape provinces of South Africa. **Water**, v. 13, n. 24, p. 3498, 2021.

Bradford, John B. et al. Robust ecological drought projections for drylands in the 21st century. **Global change biology**, v. 26, n. 7, p. 3906-3919, 2020.

Brasil, Paulo; MEDEIROS, Pedro. NeStRes—model for operation of Non-Strategic Reservoirs for irrigation in drylands: model description and application to a semiarid basin. **Water Resources Management**, v. 34, n. 1, p. 195-210, 2020.

Brunini, Orivaldo et al. **Agricultural drought phenomenon in Latin America with focus on Brazil**. New York: Oxford University Press, 2005.

C. Vörösmarty, P. McIntyre, M. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, S. Glidden, S. Bunn, C. Sullivan, C. Liermann, P. Davies, Global threats to human water security and river

biodiversity, **Nature** 467 (2010) 555–561.

Campos, José Nilson B.; De Carvalho Stuart, Ticiana Marinho. Drought and water policies in Northeast Brazil: backgrounds and rationale. **Water policy**, v. 10, n. 5, p. 425-438, 2008.

Cao, Yanping; NAN, Zhuotong; Cheng, Guodong. Grace gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of northwestern China. **Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 1021-1047, 2015.

Crausbay, Shelley D. et al. Defining ecological drought for the twenty-first century. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 12, p. 2543-2550, 2017.

Costa, Alexandre C. et al. Monthly and seasonal streamflow forecasting of large dryland catchments in Brazil. **Journal of Arid Land**, v. 13, n. 3, p. 205-223, 2021.

Cunha, Ana Paula MA et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

Dantas, Leydson G. et al. Rainfall Prediction in the State of Paraíba, Northeastern Brazil Using Generalized Additive Models. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2478, 2020.

Das, Prabir Kumar et al. Quantification of agricultural drought over Indian region: a multivariate phenology-based approach. **Natural Hazards**, v. 101, n. 1, p. 255-274, 2020.

Dayal KS, Deo RC, Apan AA (2018) Spatio-temporal drought risk mapping approach and its application in the drought-prone region of south-east Queensland, Australia. **Nat Hazards** 93:823-847.

Deo, Ravinesh C. et al. Application of effective drought index for quantification of meteorological drought events: a case study in Australia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, n. 1, p. 359-379, 2017.

Ding, Yibo et al. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China. **Journal of Environmental Management**, v. 283, p. 111980, 2021.

EC. 2013. Green paper on insurance of natural and man-made disasters. European Commission. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52013DC0213:EN:NOT> (accessed on March 2, 2020).

Edwards DC, McKee TB. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Atmospheric Science Paper No. 634, **Climatology Report** 97–2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 155 pp.

El-Tantawi, Attia M. et al. Assessment of meteorological drought in North-Western Egypt using rainfall deciles, standardized precipitation index and reconnaissance drought index. **Disaster Adv**, v. 14, p. 1-14, 2021.

Escalante-Sandoval, Carlos; NUNEZ-GARCIA, Pedro. Meteorological drought features in

northern and northwestern parts of Mexico under different climate change scenarios. **Journal of Arid Land**, v. 9, n. 1, p. 65-75, 2017.

Estrela, Teodoro; VARGAS, Elisa. Drought management plans in the European Union. The case of Spain. **Water resources management**, v. 26, n. 6, p. 1537-1553, 2012.

Eu, 2007. Addressing the Challenge of Water Scarcity and Droughts in the European Union, Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, **Eur. Comm.**, DG Environ., Brussels, 2007.

Fanok, Lily et al. Use of water decision-support tools for drought management. **Journal of Hydrology**, v. 607, p. 127531, 2022.

Folger, Peter Franklin; Cody, Betsy A. Drought in the United States: causes and current understanding. 2014.

Hao, Zengchao et al. An overview of drought monitoring and prediction systems at regional and global scales. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 9, p. 1879-1896, 2017.

Hoque, Muhammad Al-Amin et al. Agricultural drought risk assessment of Northern New South Wales, Australia using geospatial techniques. **Science of the Total Environment**, v. 756, p. 143600, 2021.

Huang, Shengzhi et al. Spatio-temporal characteristics of drought structure across China using an integrated drought index. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 182-192, 2019.

Jain VK, Pandey R, Jain MK (2015) Spatio-temporal assessment of vulnerability to drought. **Nat Hazards** 76:443-469

Khadr M. 2011 Water Resources Management in the Context of Drought: An Application to the Ruhr River Basin in German. Bericht-Lehr- Und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft Und Wasserbau, Wuppertal, Germany

Leelaruban N, Padmanabhan G, Oduor P. 2017. Examining the relationship between drought indices and groundwater levels. **Water** 9: 82. <https://doi.org/10.3390/w9020082>

LIMONES, Natalia; PITA-LÓPEZ, María Fernanda; CAMARILLO, Juan Mariano. A new index to assess meteorological drought: The Drought Exceedance Probability Index (DEPI). **Atmósfera**, v. 35, n. 1, p. 67-88, 2022.

Liu, J. et al. Water scarcity assessments in the past, present, and future, **Earths Future**, 5, 545–559. 2017.

Liu, Yizhuang et al. Hydrological drought in dongting lake area (China) after the running of three gorges dam and a possible solution. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2713, 2020.

Lloyd-Hughes B, Saunders MA. 2002. A drought climatology for Europe. **International Journal of Climatology** 22: 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>

Mahmoud Shereif H. et al. Rainwater harvesting for the management of agricultural droughts in arid and semi-arid regions. **Paddy and water environment**, v. 14, n. 1, p. 231-246, 2016.

Makaya, Eugene et al. Water governance challenges in rural South Africa: exploring institutional coordination in drought management. **Water policy**, v. 22, n. 4, p. 519-540, 2020.

Marengo, Jose A. et al. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e17, 2022.

Ortega-gaucin, David et al. Agricultural drought risk assessment: A spatial analysis of hazard, exposure, and vulnerability in Zacatecas, Mexico. **Water**, v. 13, n. 10, p. 1431, 2021.

Palmer, W. C., Meteorological drought, Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington, DC, 1965.

Patel, N. R.; Chopra, P.; Dadhwal, V. K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. **Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling**, v. 14, n. 4, p. 329-336, 2007.

Peña-Angulo, D. et al. The complex and spatially diverse patterns of hydrological droughts across Europe. **Water Resources Research**, v. 58, n. 4, p. e2022WR031976, 2022.

Pereira, Bruno et al. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 1, p. 66-79, 2019.

Qasim, Ahmed Waqar. United Nations Development Programme (UNDP). Human Development Report 2013. **Pakistan Development Review**, v. 52, n. 1, p. 95-96, 2013.

Quiring, Steven M. Developing objective operational definitions for monitoring drought. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 6, p. 1217-1229, 2009.

Rahman, Sadia; JAYASURIYA, Niranjali; BHUIYAN, Muhammed Ali. Assessment of hydrological drought characteristics in the Yarra River catchment: a case study. **Journal of Hydrology (New Zealand)**, v. 56, n. 2, p. 123-135, 2017.

Sivakumar, Mannava VK et al. High level meeting on national drought policy: summary and major outcomes. **Weather and climate Extremes**, v. 3, p. 126-

SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste). 1980. Plan for the Integrated Utilization of the Water Resources in Northeastern Brazil. Recife: SUDENE, 712. (in Portuguese).

Van Loon, Anne F. et al. Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 9, p. 3631-3650, 2016.

Venegas-Quiñenos, Héctor L. et al. Water scarcity or drought? The cause and solution for the

lack of water in Laguna de Aculeo. **Water Conserv Manag**, v. 4, n. 1, p. 42-50, 2020.

Vicente Serrano, Sergio M. et al. Long-term variability and trends in meteorological droughts in Western Europe (1851–2018). **International journal of climatology**, v. 41, p. E690-E717, 2021.

Wanders N, Loon AFV, van Lanen HA. 2017. Frequently used drought indices reflect different drought conditions on global scale. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions (under review)**, 16 pp. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-512>

Wałęga, Andrzej; ZIERNICKA-WOJTASZEK, Agnieszka. Preface to Drought Risk Management to Reflect Changing Meteorological Conditions. **Atmosphere**, v. 12, n. 12, p. 1660, 2021.

Werner P C, Gerstengarbe F W. 2003. The climate of Piauí and Ceará. In: Gaiser T, Krol M, Frischkorn H, et al. *Global Change and Regional Impacts*. Berlin: Springer-Verlag, 81–86.

¹Wilhite, D.A.; and M.H. Glantz. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **Water International** 10(3):111–120.

WMO. 2011. Standardized Precipitation Index. Users guide. **Technical Note No. 1090**. World Meteorological Organization, Geneva.

Wu, Jianjun et al. Quantitative assessment and spatial characteristics analysis of agricultural drought vulnerability in China. **Natural Hazards**, v. 56, n. 3, p. 785-801, 2011.

Yang, Tsun-Hua; LIU, Wen-Cheng. A general overview of the risk-reduction strategies for floods and droughts. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 2687, 2020.

Zhang, Q. et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in Northwest China. **Advances in earth science**, v. 30, n. 2, p. 196-213, 2015.

Zhao, Cha et al. Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America. **Journal of Hydrology**, v. 584, p. 124316, 2020.

Zhang, Qiang et al. Causes and changes of drought in China: research progress and prospects. **Journal of Meteorological Research**, v. 34, n. 3, p. 460-481, 2020.

Zhang, Shuping et al. Mapping regional surface water volume variation in reservoirs in northeastern Brazil during 2009–2017 using high-resolution satellite images. **Science of the Total Environment**, v. 789, p. 147711, 2021.

Zhang, Xuezheng et al. Meteorological drought and its large-scale climate patterns in each season in Central Asia from 1901 to 2015. **Climatic Change**, v. 166, n. 3, p. 1-18, 2021.

Zhang, Zezhong et al. Spatial–Temporal Patterns and Propagation Dynamics of Ecological Drought in the North China Plain. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1542, 2022.