

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: efeitos e considerações sobre o estado de Santa Catarina, Brasil

Glorgia Barbosa de Lima de Farias

Doutora em Geografia, Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Bragança, Pará, Brasil¹
glorgia.farias@gmail.com

Luiz Fernando Scheibe

Doutor em Geociências, Professor da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Geociências, Florianópolis, Brasil²
scheibe2@gmail.com

RESUMO: Com base em revisão sistemática, são apresentados os impactos potenciais das mudanças climáticas através de alterações nos regimes de chuva, temperatura, evaporação e outros, e seus efeitos sobre as águas subterrâneas. São analisadas as pressões sobre as águas subterrâneas, a relação entre as mudanças climáticas e os sistemas aquíferos, e os eventos de intensificação de secas e inundações, com base nas tendências da variabilidade climática em Santa Catarina. Existem importantes incertezas e lacunas de informação, que dificultam uma total compreensão da resposta dos aquíferos às alterações climáticas. Contudo, por meio do monitoramento das águas subterrâneas e do conhecimento acerca das possibilidades futuras dos processos de recarga, pode-se auxiliar os gestores e responsáveis pela tomada de decisão na gestão e planejamento adequados dos recursos hídricos, bem como na identificação das incertezas associadas, considerando as mudanças climáticas, o bombeamento excessivo e as pressões que as atividades antrópicas impõem aos sistemas aquíferos.

Palavras-chave: Variabilidade climática; Aquíferos; Secas; Pressões; Exploração.

CLIMATE CHANGE AND GROUNDWATER: effects and considerations for the state of Santa Catarina, Brazil

ABSTRACT: Based on a systematic review, the potential impacts of climate change through changes in rainfall, temperature, evaporation and other regimes and their effects on groundwater are presented. Pressures on groundwater, the relationship between climate change and aquifer systems, and intensification of droughts and flooding events, based on trends in climate variability in Santa Catarina, are analysed. There are important uncertainties and information gaps, which make it difficult to completely understand the response of aquifers to climate change. Anyway, through groundwater and knowledge monitoring about the future possibilities of recharge processes, managers and decision-makers can be assisted in the proper management and planning of water resources, as well as in identifying the associated uncertainties, considering climate change, excessive pumping and the pressures that anthropogenic activities impose on the aquifer systems.

Keywords: Climate variability; Aquifers; Droughts; Pressures; Exploitation.

CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUAS SUBTERRÂNEAS: Efectos y consideraciones para el estado de Santa Catarina, Brasil

RESUMEN: A partir de revisión sistemática, se presentan los impactos potenciales del cambio climático a través de cambios en las precipitaciones, la temperatura, la evaporación y otros regímenes, y sus efectos sobre las aguas subterrâneas. Se analizan las presiones sobre esas aguas, la relación entre el cambio climático y los sistemas aquíferos y los fenómenos de intensificación de las sequias e inundaciones, basándose en las tendencias de la variabilidad climática en Santa Catarina. Importantes incertidumbres y vacíos de información dificultan la total comprensión de la respuesta de los aquíferos al cambio climático. Sin embargo, a través del monitoreo de las aguas subterrâneas y el conocimiento

¹ Endereço para correspondência: Av. Alcindo Cacela, 2268, CEP: 66040-273, Belém, Pará, Brasil.

² Endereço para correspondência: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geociências, Trindade, CEP: 88010-970, Caixa Postal 476, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

sobre las posibilidades futuras de los procesos de recarga, se puede ayudar a los gestores y tomadores de decisiones en la adecuada gestión y planificación de los recursos hídricos, así como en la identificación de las incertidumbres asociadas, considerando el cambio climático, el bombeo excesivo y las presiones que las actividades antropogénicas imponen al sistema acuífero.

Palabras clave: Cambio climático; Aguas subterráneas; Sequías; Pression; Explotacion.

Introdução

As mudanças climáticas podem ser analisadas quanto a seus efeitos em desastres naturais, à vulnerabilidade de populações e ecossistemas, e à adaptação aos respectivos impactos. Com alterações significativas em regimes de chuvas, temperaturas, evaporação e umidade em relação a valores históricos, esse fenômeno relaciona-se com o aquecimento global em função de crescentes emissões de gases de efeito estufa por atividades antrópicas, sobretudo nas últimas três décadas (HIRATA et al., 2019).

Alterações na temperatura atmosférica e no balanço de radiação interferem no ciclo hidrológico, e os modelos climáticos disponibilizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, indicam intensas mudanças futuras nos padrões de precipitação. Com maior variabilidade e distribuição temporal da vazão nos rios, eventos hidrológicos críticos (ex. secas e enchentes) tenderão a ser mais frequentes (GONDIM et al., 2010; BREDÁ et al., 2023). Além disso, transformações do ambiente biofísico afetarão ecossistemas, assentamentos humanos e recursos hídricos, e a produção de alimentos (PBMC, 2014). Além de prolongamentos nos períodos regulares de seca, a escassez de água derivará da degradação dos recursos hídricos, pois eventos extremos de precipitação carregam sedimentos, patógenos e outros contaminantes para os corpos hídricos (DENICOLA et al., 2015; DONADELLI SACCHI et al., 2024).

Nesse contexto, governos e populações deverão se adaptar aos impactos decorrentes de mudanças climáticas como o derretimento de geleiras e calotas polares, secas intensas, inundações, alteração nos regimes de chuvas, furacões, tempestades, degradação da biodiversidade e outros fenômenos (MARENGO, 2009; UNFCCC, 2007). Essa adaptação depende da compreensão do nível de vulnerabilidade de diferentes sistemas e regiões frente às ameaças. Fatores influentes a impactos, vulnerabilidade e capacidade adaptativa são complexos e desiguais em diversas regiões, relacionando-se com níveis de desenvolvimento e capacidade de resposta da sociedade, entre outros indicadores (LAUKKONEN et al., 2009; GIDDENS, 2010; PANEZ PINTO, 2022).

As regiões Sul, Sudeste e Nordeste brasileiras devem sofrer com a intensificação das mudanças climáticas futuras. Braga et al. (2006) já apontavam essas regiões (as mais populosas do país) como hotspots globais de risco de desastres hidrológicos e de seca, o que tem sido frequentemente noticiado. Essas previsões vêm sendo confirmadas por Minuzzi e Frederico (2017), Donadelli Sacchi et al. (2024) e Paiva et al. (2024). Na região sul, contribuem com o cenário de intensificação de eventos climáticos extremos a grande amplitude térmica anual, variabilidade espacial e sazonal do clima médio e significativas oscilações interanuais de chuva e temperatura devido aos fenômenos El Niño e La Niña, (MINUZZI; FREDERICO, 2017).

Neste cenário, este artigo evidencia tendências na variabilidade climática no estado de Santa Catarina e enfatiza as implicações para as águas subterráneas por meio de revisão sistemática da bibliografia. São apresentadas três abordagens para discutir (1) as pressões às quais as águas subterráneas podem estar expostas, (2) a provável relação entre as mudanças climáticas e os sistemas aquíferos a partir de estudos em diferentes regiões no mundo, (3) e os eventos de intensificação de secas e estiagens.

Materiais e Métodos

Foram analisadas as pesquisas referentes às tendências climatológicas e das águas subterrâneas no estado por meio de análise sistemática da bibliografia nas plataformas Google Acadêmico e Periódicos CAPES. A pesquisa sobre a dinâmica climática do estado de Santa Catarina baseou-se nos trabalhos de Alves e Minuzzi (2018), Franke et al. (2017), Cardoso e De Quadro (2017), Alves et al. (2017), Spinelli et al. (2012), Ernst (2022). Fez-se necessário identificar a ocorrência de aumento, estabilidade ou diminuição das precipitações, ou seja, compreender a variabilidade das chuvas.

Pesquisas como as de Minuzzi (2010), Minuzzi e Lopes (2014), Minuzzi e Frederico (2017), Gotardo (2018), Minuzzi (2018) e Baptista e Severo (2018) analisaram a variabilidade climática e a variabilidade no regime de chuvas em Santa Catarina. A análise dos resultados dessas pesquisas, juntamente com a análise dos resultados disponibilizados pelo relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (2022) – e das pesquisas da Rede Guarani/Serra Geral (2020) sobre as águas subterrâneas, possibilitaram a discussão acerca das expectativas climáticas futuras para a área de estudo e suas implicações sobre os sistemas de águas subterrâneas.

Resultados e Discussão

Este capítulo está dividido em sete subcapítulos, em que são apresentados os resultados e discussões da pesquisa. Faz uma abordagem acerca das pressões sobre os sistemas de águas subterrâneas no contexto das mudanças climáticas mostrando as implicações e as expectativas para a gestão dessas águas, considerando a intensificação das secas e estiagens, bem como a variabilidade climática no estado de Santa Catarina.

Pressões sobre os sistemas de águas subterrâneas em um contexto de mudanças climáticas

Devem se somar à variabilidade natural do clima as mudanças climáticas induzidas ou intensificadas por ação antrópica, às quais têm sido atribuídos impactos generalizados, perdas e danos à natureza e às pessoas. Maiores frequências de eventos climáticos extremos expuseram milhões de pessoas à insegurança alimentar aguda e reduziram a segurança hídrica, especialmente na África, Ásia, América Central e do Sul, pequenas Ilhas e no Ártico (IPCC, 2022). Essas mudanças interferem no ciclo hidrológico, alteram o regime pluviométrico e a evapotranspiração em uma região, influenciando no processo de recarga dos aquíferos e no fluxo dos rios (HIRATA; CONICELLI, 2012; GOMES, 2008).

Avaliações recentes estimam que a extensão e a magnitude dos impactos das mudanças climáticas são maiores hoje do que as verificadas anteriormente (IPCC, 2022). Áreas de escassez de água, isto é, excesso de demanda sobre a oferta de água, passam por períodos de seca que podem se agravar no futuro (GOMEZ-GOMEZ et al., 2022). Essa escassez caracteriza-se pela impossibilidade de suprir a demanda decorrente da superexploração das águas subterrâneas e da vulnerabilidade dos recursos naturais (STEDUTO et al., 2012).

Além das mudanças climáticas terem tornado as secas mais intensas e frequentes em todo o mundo, o que leva a graves perdas econômicas e sociais, o desmatamento na Amazônia é um aspecto fomentador desse cenário, tanto local como globalmente (SOARES et al., 2021). Entre março e maio de 2021, o clima seco nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil levou a um déficit hídrico de 267 km³ de água retida em rios, em lagos, no solo e em aquíferos, em comparação com a média sazonal de vinte anos anteriores (GETIRANA et al., 2021). Essas regiões, responsáveis por 70% do Produto Interno Bruto brasileiro, têm hidroclima parcialmente controlado pela transferência de umidade da floresta. Isso ocorre

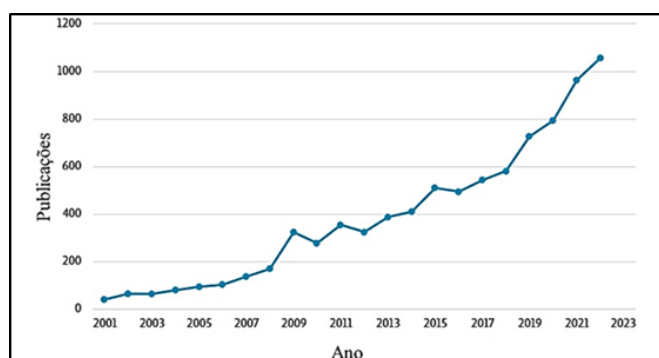
porque os fluxos atmosféricos causados pela transpiração das árvores, ou ‘rios voadores’, são os maiores responsáveis pelas chuvas diárias nessas regiões.

Em outra realidade, regiões áridas e semiáridas são mais vulneráveis à variabilidade climática e impactos na disponibilidade de água (BHERING, 2021). Pesquisas indicam que serão essas as regiões com ainda maiores impactos sobre os recursos hídricos (TORTELLA; TIRADO, 2011), o que possivelmente implicará em maior exploração das águas subterrâneas.

Águas subterrâneas e mudanças climáticas

Há uma curva crescente nas publicações sobre a relação da disponibilidade de água subterrânea e as mudanças climáticas. Ao pesquisar por artigos com esses termos em inglês no título, no resumo ou nas palavras chave foram encontradas 1052 publicações em 2022. Em contraste, houve apenas 40 em 2001, apresentando uma tendência de aumento no interesse científico sobre o assunto (Figura 1). Foi utilizada, na plataforma SCOPUS, a expressão “TITLE-ABS-KEY ("groundwater" AND "climate change") AND PUBYEAR > 2000”.

Figura 1: Publicações entre 2001 e 2022 sobre mudanças climáticas e águas subterrâneas



Fonte: Plataforma SCOPUS, 2023.

É consenso que as mudanças climáticas podem afetar a distribuição espacial e temporal das variáveis hidrológicas (YIHDEGO et al., 2017; JOHANNSEN et al., 2016; REINECKE et al., 2021). Mudanças nos regimes de chuvas são uma consequência, assim como alterações em vazões de rios e recarga de aquíferos, podendo levar a danos em ecossistemas, abastecimento de água, geração de energia e produção de alimentos (ADAM, 2016). O aumento da frequência e da intensidade dessas mudanças tem sido comumente interpretado como evidência de que se trata de um processo cumulativo, superando variações cíclicas anteriores.

Ramos et al. (2020) apresentaram um modelo numérico detalhado do fluxo de água subterrânea de um aquífero na costa leste africana, o qual mostrou como a precipitação e a variabilidade da temperatura afetam a recarga de sistemas aquíferos e concluíram que uma boa distribuição das chuvas e chuvas mais intensas seriam mais importantes para a produção efetiva de recarga do aquífero do que a precipitação total anual (RAMOS et al., 2020). Portanto, acredita-se que um aquífero em uma região com seca prolongada e com demanda social e econômica por água, depende da ocorrência de seguidos períodos de chuva intensa para que sua recarga efetivamente ocorra. Por outro lado, chuvas pouco intensas podem não ser capazes de recarregar aquíferos em virtude da evaporação, da absorção pelas plantas e do escoamento superficial.

Sadoff e Muller (2010) já apontavam esta tendência para a região do Mediterrâneo, onde era esperado o aumento da atual extração massiva de água “fóssil” do Aquífero Arenito Núbio e do Aquífero Norte do Saara, gerando numerosos problemas secundários. Com isso,

os modelos sugeriam que a recarga das águas subterrâneas diminuirá em mais de 70% até 2050 ao longo da costa sul do Mediterrâneo (SADOFF; MULLER, 2010).

A Figura 2 ilustra a influência das mudanças climáticas sobre a recarga dos aquíferos. As cores verde e vermelha indicam aspectos que contribuem, respectivamente, de forma positiva ou negativa com o processo.

Figura 2: Esquema para a recarga de aquíferos. Em azul, situação de maior precipitação; em vermelho, situação das estiagens e secas



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

As mudanças climáticas impactam diretamente na precipitação e na variabilidade da temperatura, as quais, por sua vez, influenciam na recarga dos aquíferos. No caso da precipitação, em períodos de chuva intensa a recarga é mais efetiva. Por outro lado, em períodos de seca a recarga é comprometida, as águas superficiais se tornam escassas. Aumentos da captação decorrentes do crescimento econômico podem agravar esse quadro. No caso da variabilidade na temperatura, nota-se que a evaporação, absorção pelas plantas e o escoamento superficial são aspectos diretamente afetados e que por sua vez influenciam na recarga dos aquíferos.

Implicações das mudanças climáticas nos sistemas de águas subterrâneas

As condições dos aquíferos nos cenários das mudanças climáticas são cruciais em diversas atividades, como é o caso do monitoramento de barragens. Ao avaliar a segurança hídrica para a bacia hidrográfica da Barragem de Doruzan, Irã, considerando o tempo presente e três cenários de mudanças climáticas, Naderi (2020) concluiu que a precipitação média anual diminuirá entre 13 e 17%; a temperatura média aumentará entre 1,5 e 3,3°C; e que a entrada de menos água na barragem (-50%) limitará a disponibilidade de água a jusante. Assim, a exploração das águas subterrâneas será insustentável em todos os aquíferos da área e as alterações climáticas diminuirão ainda mais sua disponibilidade, intensificando a crise hídrica.

Ramos et al. (2020) afirmam que o nível da água subterrânea, além de ser significativamente afetado por períodos de três anos em condições de seca, demanda um período úmido excepcional para retornar ao estado inicial. Destacam que a diminuição do nível da água subterrânea não ocorre uniformemente em todas as formações geológicas e os possíveis efeitos também não são equivalentes. Outro aspecto importante diz respeito à

cunha salina, que se movimenta para o interior diante do aumento do período de seca, podendo variar de 0,5 a 2 km (no caso do objeto de estudo).

Gomez-Gomez et al. (2022) evidenciaram essa mesma situação ao avaliar o impacto dos potenciais cenários futuros de mudanças climáticas no sistema de gestão da bacia hidrográfica do rio Segura, sudeste da Espanha, região de escassez hídrica. Os autores destacaram que as secas podem ser consideradas como um fenômeno do sistema terrestre que abrange uma série de processos meteorológicos, hidrológicos e biofísicos com implicações socioeconômicas, as quais influem na sua classificação. Segundo Mattiuzzi (2021), as secas podem ser meteorológicas (falta de precipitação), agrícolas (deficiência na disponibilidade de água para agricultura e crescimento das plantas), hidrológicas (deficiências nos volumes de água superficiais e subterrâneos) e operacionais ou socioeconômicas (falta de água para atendimento das demandas).

Em regiões áridas, mais suscetíveis às mudanças climáticas, podem ocorrer grandes implicações sobre ecossistemas e o balanço hídrico, o que impactaria a economia da população (ex. agropecuária). Os resultados obtidos por Gomez-Gomez et al. (2022) mostraram que nos três cenários estudados para o período de 2071-2100, os recursos disponíveis para atender os diferentes elementos de demanda serão menores, o que significaria maiores déficits hídricos específicos. Nesses três cenários previram-se redução significativa de precipitação e aumento consistente de temperatura, além de grandes incrementos de número, duração, intensidade e magnitude das secas. Concluiu-se que são estimadas taxas mais altas de bombeamento em aquíferos e menores garantias para atender as demandas (GOMEZ-GOMEZ et al., 2022). Embora haja credibilidade nos modelos referidos, salienta-se a necessidade de confirmação de dados de tamanha extrapolação, pois variáveis influentes adicionais aos efeitos citados pelos autores podem ocorrer antes do período delimitado e devem ser consideradas em avaliações mais profundas.

Na China, os impactos potenciais das mudanças climáticas e das atividades humanas sobre o sistema de águas subterrâneas e sobre o fluxo base da bacia hidrográfica de Guanzhong foram estudados através de uma abordagem integrada (Wang et al., 2018). Por meio de análise multivariada de dados observacionais foram incluídos registros de escoamento de rios; níveis históricos de águas subterrâneas e clima; investigação hidroquímica e análise de tendências dos dados hidroquímicos históricos; análise Wavelet de dados climáticos; e o índice de fluxo de base. Foi observada tendência de aquecimento e de diminuição das chuvas desde a década de 1960, e o aumento das atividades humanas desde a década de 1970. A redução da recarga das águas subterrâneas nos últimos 30 anos levou à depleção contínua dos níveis dessas águas, mudanças complexas do ambiente químico, salinização localizada e forte declínio da vazão de base para o rio (WANG et al., 2018).

A falta de dados relacionados ao sistema de recarga, as incertezas com relação à escolha de indicadores e a indisponibilidade de modelos preditivos dos efeitos de longo prazo, são limitantes aos estudos que buscam relacionar as mudanças climáticas e a variedade de atividades humanas com os sistemas de águas subterrâneas.

No Brasil, Bhering et al. (2021) evidenciam, no município de Montes Claros, MG, a importância de uma caracterização detalhada da hidrogeologia da área estudada para a definição de políticas mais eficientes de abastecimento de água, especialmente no cenário de escassez em regiões semiáridas. Destacam que na área urbana o aquífero apresenta uma baixa capacidade específica e há grande concentração de poços. Isso implica, no eventual rebaixamento do nível do lençol freático, e aumento do balanço hídrico negativo, pois a exploração das águas subterrâneas é superior à recarga local pela chuva. Melhor planejamento integrado das águas, gestão e monitoramento consistente das águas são necessários para garantir o bem-estar social (ALTHOFF et al., 2021).

As mudanças climáticas interferem de forma direta na relação entre sociedade, setores produtivos e as águas, modificando a demanda ou demandando água com outras características físicas, químicas e biológicas (HIRATA; CONICELLI, 2012). Destaca-se que o

impacto das mudanças climáticas pode variar de acordo com a localização geográfica e outros fatores que levam os sistemas e regiões a diferentes níveis de vulnerabilidade.

As mudanças climáticas, o crescimento populacional e as atividades econômicas aumentam a pressão sobre as águas, comprometendo os escoamentos e a qualidade dos grandes ecossistemas de água doce do mundo (BHERING et al., 2021). De acordo com Jorgensen, Graymore e O'Toole (2009), o aumento da população, a poluição das fontes de água, a expansão urbana, a irrigação agrícola, as mudanças climáticas e as secas são fatores que contribuem para o desequilíbrio entre a disponibilidade de água e a demanda.

Em síntese, os estudos apontam as regiões semiáridas como as que estão mais sujeitas aos impactos das mudanças climáticas sobre as águas, em função da diminuição da precipitação e da variabilidade na temperatura. Fatores que interferem diretamente sobre a demanda por água subterrânea, uma vez que o esgotamento das fontes de água superficiais levará à retirada cada vez maior de água dos aquíferos. Em um cenário de intensificação da seca, o crescimento econômico contribuirá com a maior demanda por essas águas, com destaque para o uso na irrigação agrícola e para suprir a demanda da expansão urbana. Além da influência dos impactos das mudanças climáticas às dinâmicas sociais, observa-se que a interação destas afetará a manutenção dos ecossistemas e o balanço hídrico, gerando assim uma crise hídrica.

Expectativas para a gestão das águas subterrâneas

As águas subterrâneas têm função estratégica diante do cenário de mudanças climáticas, pois as características dos aquíferos possibilitam a oferta de água mesmo durante períodos de estiagem prolongados (HIRATA; CONICELLI, 2012). Entretanto, essa disponibilidade depende da recarga dos aquíferos durante períodos de chuva mais intensa. Diferenças de recarga em diferentes cenários climáticos podem ser explicadas a partir da umidade antecedente do solo (RAMOS et al., 2020). Ao final de um período de seca, em que há déficit de umidade no solo, a chuva é retida no mesmo até que o déficit de umidade seja satisfeito, e assim a recarga do aquífero fica prejudicada. O oposto ocorre em solos úmidos, em que a recarga do aquífero será maior.

Nos climas áridos, a evaporação potencial excede a precipitação e a evaporação real depende da capacidade de água disponível para a evaporação. O escoamento superficial ou a infiltração para os aquíferos ocorre unicamente nos períodos em que se produzirá precipitação suficiente para superar a evaporação (SADOFF; MULLER, 2010). Dessa forma, se a mudança no clima futuro levar a um aumento dos períodos de seca e ao declínio da precipitação total, ou declínio da intensidade dos eventos pluviométricos individuais, ocorrerá a redução da recarga das águas subterrâneas.

O esgotamento da disponibilidade das águas subterrâneas está relacionado também com as políticas sociais da área de estudo (RAMOS et al., 2020). Controle e monitoramento do uso das águas subterrâneas por meio do fortalecimento das instituições e órgãos ambientais, bem como os investimentos em métodos e tecnologias de uso mais eficiente da água, podem contribuir para a diminuição da demanda sobre as águas subterrâneas. Nesse sentido, pesquisas como a de Flores (2022) e Alghamdi et al. (2020), que avaliem o consumo de água pelo homem nos seus diversos ambientes e indiquem meios para o uso mais eficiente das águas, podem contribuir para a diminuição das pressões sobre os aquíferos.

É fundamental o investimento em pesquisas e o desenvolvimento de modelos para compreender o funcionamento dos diferentes sistemas aquíferos e a sua relação com as mudanças climáticas para apoiar a gestão integrada das águas diante dos eventos de seca intensa. Embora os estudos mostrem que ainda existem incertezas acerca da forma como ocorre a relação entre as mudanças climáticas e as águas subterrâneas, apesar da utilização de modelos baseados em geotecnologias, por exemplo, existem substanciais evidências de que medidas precisam ser tomadas e de que políticas necessitam ser colocadas em prática para gerenciar os impactos dessas mudanças e o uso da água.

São necessárias políticas que busquem a manutenção dos ecossistemas, o reflorestamento, o investimento em monitoramento das águas subterrâneas e a produção e análise de dados. Quanto às incertezas mencionadas, Wang et al. (2018) afirmam que elas existem devido a relação entre as variáveis climáticas em mudança, a variedade de atividades humanas e o sistema de águas subterrâneas ser extremamente complicada e pouco compreendida. Nesse sentido, há necessidade de inclusão de indicadores compostos, que cumprem importante papel para a confiabilidade dos resultados, gerando dados mais realistas (ASLAM et al., 2018).

Para Soares et al. (2021) indicadores ecológicos e socioeconômicos interdisciplinares que possam monitorar os efeitos das mudanças climáticas globais serão essenciais para definir, caracterizar e quantificar as consequências deste fenômeno para a sociedade. Uma estratégia eficaz seria identificar e monitorar processos que não apenas detectem mudanças, mas também indiquem como e em que medida isso afetará os bens e serviços ecossistêmicos (SOARES et al., 2021).

Em busca de sustentabilidade no uso de água subterrânea, estudos relacionam as condições atuais e as perspectivas futuras com cenários de escassez hídrica para discutir a disponibilidade de água para as gerações futuras. Hernandez e Solera (2015) afirmam que a exploração de aquíferos deve atender a estudos sistêmicos das necessidades hídricas atuais e futuras, considerando uma exploração sustentável, extraindo o necessário na escassez e recarregando na abundância.

O uso indiscriminado das águas subterrâneas está relacionado não apenas com as mudanças climáticas, mas com a forma com a qual a gestão hídrica é realizada. Para evitar ou mitigar esse impacto são necessários investimentos em políticas de abastecimento mais eficientes, na gestão integrada com monitoramento das águas, e na caracterização hidrogeológica dos aquíferos, permitindo assim o uso mais sustentável das águas subterrâneas em um contexto geral de conservação. Para alcançar isso, é fundamental o fortalecimento das instituições e órgãos ambientais de modo a instigar o desenvolvimento e utilização de técnicas de uso mais eficiente da água, o que reduziria a demanda por água subterrânea.

Secas e Estiagem

Há estiagem quando há um atraso superior a quinze dias do início da temporada de chuvas (CEPED-UFSC, 2013) ou quando as médias de precipitação pluviométrica dos meses chuvosos são inferiores a 60% das normais climatológicas regionais. Portanto, estiagem resulta da redução das precipitações pluviométricas, do atraso dos períodos chuvosos ou da ausência de chuvas previstas para uma determinada temporada, em que ocorre a queda dos índices pluviométricos para níveis sensivelmente inferiores aos habituais (CASTRO, 2003). Essa queda é denominada como 'baixa vazão', e os fenômenos que a estabelecem prejudicam a reposição de água necessária para a manutenção da umidade do solo (NODARI e ESPÍNDOLA, 2013). Por ocorrer por longos períodos e abranger grandes áreas, a estiagem é um dos desastres de maior ocorrência no mundo, produzindo reflexos sobre as reservas hidrológicas locais, e consequentes prejuízos à agricultura e pecuária. Já a seca pode ser considerada a forma crônica da estiagem, com mais tempo e maior intensidade (KOBİYAMA et al., 2006).

A ocorrência de secas pode estar condicionada a fatores meteorológicos (ex. falta de chuva) e a fatores hidrológicos (deficiência nos volumes de águas superficiais e subterrâneas). As características geoambientais podem ser elementos condicionantes na frequência, duração e intensidade dos danos e prejuízos relacionados às secas (KOBİYAMA et al., 2006): o relevo influencia no deslocamento das massas de ar, interfere na formação de nuvens e na precipitação. O fenômeno das secas pode impactar setores econômicos e sociais e corresponde a um dos principais desastres relacionados às águas (MATTIUIZI, 2021). Dados

recentes mostram que entre 2009 e 2019 as secas afetaram mais de 100 milhões de pessoas, causando perdas maiores do que 10 bilhões de dólares em todo o mundo (CRED, 2020).

O Brasil depende da agricultura para quase 25% de seu PIB e as culturas de soja, café e cana-de-açúcar, além da pecuária, usam grande parte da água disponível (GETIRANA et al., 2021). Entre 2019 e 2021 houve baixo regime de chuvas no Sul do Brasil, o que resultou em baixa disponibilidade hídrica (MATTIUZI, 2021), a qual impactou diferentes setores (menores níveis dos reservatórios, abastecimento de água e perdas agrícolas). Essa escassez pode relacionar-se com o fenômeno La Niña, o qual causa precipitações abaixo da média na região Sul do Brasil, e destaca-se que em situações de escassez hídrica a regularização do abastecimento de água é promovida pelos aquíferos. (MATTIUZI, 2021).

Getirana et al. (2021) destacam que no Brasil, sendo responsável por um terço das exportações globais, o preço da soja subiu 67% entre junho de 2020 e maio de 2021; a tarifa de energia elétrica subiu em média 130% e diversas cidades enfrentaram racionamento de água. Entretanto, os problemas socioambientais relacionados à escassez hídrica são ainda maiores.

A maior demanda por água subterrânea afeta aquíferos e as águas superficiais reduzindo os fluxos de base e, conseqüentemente, a biodiversidade, impactando outros sistemas dependentes de níveis estáveis de água (HIRATA e CONICELLI, 2012). No caso da Bacia do Rio do Prata, por exemplo, temperaturas mais elevadas podem limitar a água para consumo, agricultura e geração de energia, devido a um acréscimo na evaporação e na evapotranspiração (GOMES, 2008). Isso afetaria o balanço hídrico e comprometeria tanto a vazão dos cursos de água como a recarga de aquíferos, especialmente a do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral – SAIG/SG (STALLBAUM et al., 2018). Além disso, mudanças na temperatura podem levar à redução da cobertura vegetal, redução da estabilidade dos agregados do solo devido à diminuição de agentes de agregação (ex. teor de matéria orgânica), redução da taxa de infiltração e redução do volume de água nos rios (GOMES, 2008).

O impacto combinado das mudanças climáticas e atividades humanas intensivas pode causar um declínio substancial na recarga dos aquíferos e nos níveis das águas subterrâneas, uma vez que as disparidades entre disponibilidade e demanda de água estão aumentando (JOHANNSEN et al., 2016). Em anos de secas, as águas subterrâneas são mais usadas para irrigação, podendo levar ao esgotamento dos aquíferos, bem como à degradação da qualidade das águas e a mudanças associadas nos ecossistemas (WANG et al., 2018). Assim, a disponibilidade local de água depende fortemente das mudanças demográficas, da economia e ecologia locais e do impacto do uso da terra e das mudanças climáticas (JOHANNSEN et al., 2016). As potenciais mudanças na recarga dos aquíferos exigem maior atenção da comunidade científica e dos tomadores de decisão, pois afetam a disponibilidade futura de água e o bem-estar de bilhões de pessoas.

A pesquisa de Reinecke et al. (2021), que investiga as projeções de recarga de águas subterrâneas, observa que apesar das incertezas, são fornecidas mais evidências de que as mudanças climáticas afetarão a disponibilidade de água subterrânea em muitas regiões do mundo. Afirmam esperar-se diminuição notável da disponibilidade hídrica no Mediterrâneo, na Amazônia e no restante do Brasil.

Dados do IPCC (2022) indicam que as regiões Sul e Sudeste do Brasil sofrerão com a maior frequência de eventos pluviométricos. Embora seja esperada mais chuva em algumas regiões do país, a distribuição das mesmas não será uniforme ao longo do ano, podendo ocorrer a concentração das chuvas em momentos específicos (provocando inundações), e causar períodos de seca mais severa (HIRATA; CONICELLI, 2012).

Variabilidade climática em Santa Catarina

O aumento da frequência de eventos extremos e desastres naturais é cada vez mais notável, o que é evidência da alteração do clima tanto em nível global, como regional e local

(GOTARDO et al., 2018). Regionalmente essas mudanças são muito divergentes e nem sempre acompanham a tendência global, principalmente no que se refere à temperatura (MINUZZI, 2010). Diante das projeções climáticas são necessárias informações e ferramentas precisas nas escalas regional e global, visando o aprimoramento e atualização da tomada de decisão e de práticas rotineiras na produção agrícola, inserindo-as nas políticas de adaptabilidade e mitigação (MINUZZI, 2010). São fundamentais os estudos de ocorrência e distribuição das precipitações para apoiar a tomada de decisão no planejamento de atividades econômicas, local e regionalmente (GOTARDO et al., 2018; BAPTISTA; SEVERO, 2018).

No Brasil, verificou-se um aumento significativo do volume precipitado a partir de 1950 (GROISMAN et al., 2005). A região Sul apresenta precipitação bem distribuída ao longo do ano com maior concentração de chuvas no verão, quando ocorre o encontro de massas de ar com temperatura e umidade distintas, denominadas chuvas frontais (JOSÉ; MINUZZI, 2019). A localização garante amplitude térmica no ciclo anual, evidenciando a diferença entre inverno e verão (ALVES; MINUZZI, 2018).

Santa Catarina apresenta melhor distribuição pluviométrica ao longo do ano entre os estados brasileiros, com média anual entre 1250mm e 2000mm (SPINELLI et al., 2012). Os sistemas meteorológicos responsáveis por chuvas no estado são: frentes frias; vórtices ciclônicos; cavados de níveis médios; convecção tropical; Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e circulação marítima (MONTEIRO, 2001). A combinação da umidade da Bacia Amazônica para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil com as frentes frias oriundas do Sul são os principais responsáveis pelas chuvas na região. Distintas configurações de relevo influenciam a distribuição de precipitações. Nas áreas de barlavento próximas a encostas de montanhas, as precipitações são mais abundantes pela elevação do ar úmido e quente, o que favorece a formação de nuvens cumuliformes, resultando no aumento do volume precipitado. Dessa forma, há índices maiores de precipitação em municípios próximos à encosta da Serra Geral em comparação com a Zona Costeira (MONTEIRO, 2001).

O estado de Santa Catarina, mesmo com limitado distanciamento latitudinal, especialmente no Oeste, apresenta variações climáticas espaciais expressivas e sistemas atmosféricos diversos associados a diferenças de altitude entre o Planalto e regiões circunvizinhas. Tanto os episódios de muitas chuvas, como os de pequenas estiagens, podem ser intensificados pelos fenômenos El-Niño e La-Niña, respectivamente (MONTEIRO, 2001). Entretanto, para o período de 1991 a 2012 os anos em que ocorreram registros do fenômeno La-Niña não coincidem com os anos com mais registros de estiagem e seca (Tabela 1) (CEPED-UFSC, 2013).

Tabela 1 – Anos de ocorrência e intensidade do fenômeno La Niña

Anos de ocorrência do fenômeno <i>La Niña</i>			
1892-1893	1916-1917	1949-1950	1988-1989
1893-1894	1917-1918	1954-1955	1998-1999
1903-1904	1924-1925	1955-1956	1999-2000
1906-1907	1933-1934	1967-1968	2007-2008
1908-1909	1937-1938	1970-1971	2010-2011
1909-1910	1938-1939	1973-1974	2017-2018
1910-1911	1942-1943	1975-1976	-

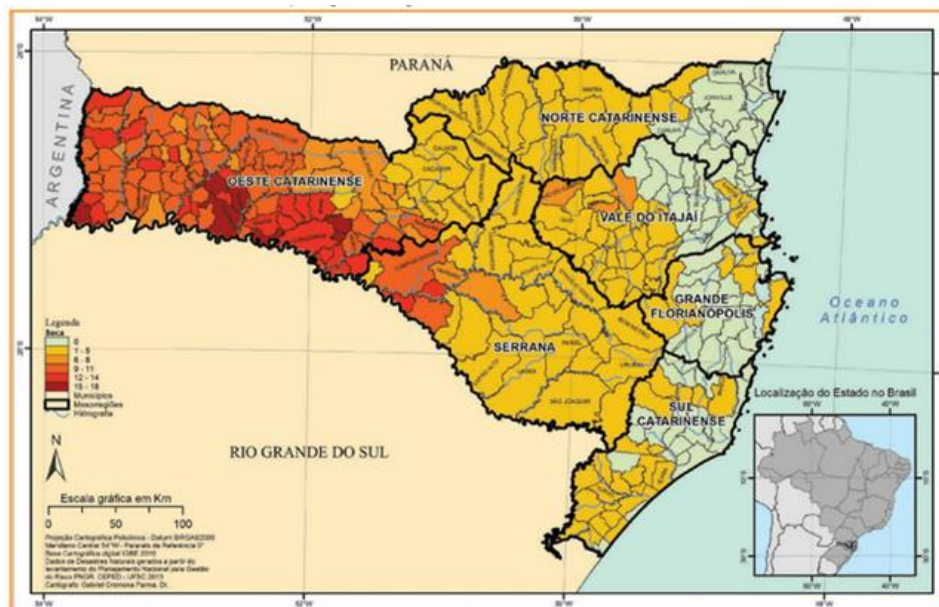
Legenda:

Forte
Moderado
Fraco

Fonte: Adaptado de CPTEC-INPE (2022).

Não parece haver correlação entre a intensidade e abrangência da estiagem com a ocorrência ou não do fenômeno La Niña. A Figura 3 mostra 1518 ocorrências de estiagem e seca em 227 municípios em Santa Catarina entre 1991 e 2012, com predominância nos municípios do oeste e região serrana (CEPED-UFSC, 2013).

Figura 3: Registros de estiagem e seca em Santa Catarina entre 1991 e 2012



Fonte: Centro Universitário de Estudos e Pesquisa sobre Desastres da UFSC (2013).

A Tabela 2 sintetiza notícias sobre a estiagem em Santa Catarina. São evidenciadas perdas agrícolas, falta de água para abastecimento, intensidade da seca, cidades em situação de emergência e prejuízos financeiros.

Tabela 2 – Notícias sobre a estiagem em Santa Catarina

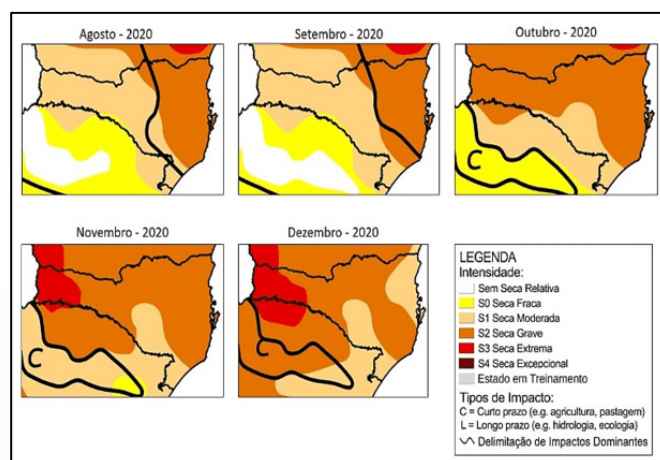
Fonte	Título da reportagem	Data	Síntese
ND+	Defesa Civil monitora municípios atingidos pela estiagem em Santa Catarina	27.03.2012	A Secretaria de Estado da Defesa Civil acompanha a situação dos municípios atingidos pela estiagem em Santa Catarina. Conforme último relatório, atualizado terça-feira (27), são 113 municípios em situação de emergência
ND+	Seca no meio-oeste é uma das piores dos últimos cem anos no mês de novembro, segundo a Epagri	06.12.2012	A prefeitura de Joaçaba decretou situação de emergência no fim da tarde desta quarta-feira (5). De acordo com o prefeito, a falta de chuva prejudicou grande parte das culturas no município. “O quadro climático de novembro prejudicou muito a produção de grãos e existe um apelo dos agricultores para avaliação criteriosa desse quadro”, enfatizou o prefeito.
g1	Seca pode prejudicar até 50% da colheita de melancias no sul de SC	04.12.2014	Estiagem prejudica produção da fruta em Jaguaruna desde novembro. Seca e calor afetam também metade das plantações de milho.
ND+	Segunda estiagem de 2017 castiga produtores agrícolas de Santa Catarina	21.09.2017	Prestes a completar um mês de seca, Santa Catarina deve ter redução de 29% da produção das lavouras de trigo
ND+	Seca pode ser a maior dos últimos 20 anos em Santa Catarina, aponta CASAN	22.09.2017	Desde o dia 23 de agosto não chove regularmente no estado; CASAN pede que a população economize água
ND+	Estiagem de 2019 é semelhante às ocorridas em 2014 e 2017 em Santa Catarina, afirma Epagri	25.09.2019	As estiagens ocorridas em 2014 e 2017 foram semelhantes à ocorrida em 2019, com persistência e sem prazo para ser encerrada.
ND+	Estiagem: governo autoriza perfuração de poços artesianos	04.05.2020	O governo do Estado autorizou a perfuração de poços artesianos para minimizar os impactos da estiagem aqui em Santa Catarina.

Fonte	Título da reportagem	Data	Síntese
ND+	CASAN anuncia perfuração de poços para minimizar estiagem em Chapecó	13.01.2021	A informação foi repassada ao prefeito João Rodrigues em audiência realizada em Florianópolis; a perfuração iniciará no bairro Boa Vista.
ND+	SC tem nove cidades em nível crítico de estiagem e seca extrema; veja quais	03.09.2021	Boletim Hidrometeorológico divulgado pelos órgãos de controle do Estado ainda mostram 83 cidades em atenção e 27 em alerta
ND+	Seca extrema em SC: veja as cidades em situação de emergência e o risco de faltar água no verão	21.12.2021	Nos últimos dois anos, choveu 900 mm a menos no Estado; seca se mantém em níveis graves e extremos na região Oeste
Correio de Santa Catarina	Seca no Oeste catarinense chega a R\$3,7 bilhões em prejuízos	03.03.2022	O déficit hídrico tem causado secas mais intensas nos últimos 3 anos. Isso tem causado anos com abundância de produção, intercalados com sequências de anos ruins e grandes prejuízos.
NSC-DC	Oeste de SC vive drama com falta de água e estiagem provoca prejuízo bilionário à economia	26.02.2022	Moradores buscam alternativas para manter higiene e alimentação, enquanto agricultura acumula perdas históricas devido à falta de chuva; especialistas alertam que a situação pode piorar nos próximos meses.
Estadão	Seca e onda de calor no Sul e Centro-Oeste já causam perdas de R\$ 45 bilhões no agronegócio	13.01.2022	Prejuízos equivalem a 40% do valor da produção agrícola no RS, e a 37% no PR; soja e milho são as culturas mais atingidas pela falta de chuva e por temperaturas perto de 40°C.
g1	Seca histórica em SC: 42% das cidades decretam emergência; 'Situação desumana', diz moradora	23.02.2022	Santa Catarina tem 125 cidades com decretos de emergência assinados por conta da seca. Em 2020 o estado igualou a pior seca da história do estado, ocorrida em 1957.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Os prejuízos na produção agrícola são os mais fortemente sentidos ou evidenciados entre os causados pela estiagem, o que tem levado a autorizações de perfurações de poços nas áreas rurais mais atingidas nesses momentos (Meio Oeste catarinense). Portanto, destaca-se a importância de realizar o monitoramento de secas. O Monitor de Secas é uma importante ferramenta implementada inicialmente para monitorar a seca na região Nordeste do Brasil e está sob a liderança da Agência Nacional de Águas – ANA e do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Em agosto de 2020, passou a apresentar informações sobre as secas em Santa Catarina. Nas figuras 4 e 5 são observadas as informações geradas por essa ferramenta para o estado catarinense nos anos de 2020, 2021 e 2022. No período de agosto a dezembro de 2020, todo o estado catarinense teve seca variando de moderada a extrema intensidade, com período de seca extrema a partir de novembro no extremo oeste (Figura 4).

Figura 4: Mapas da seca no estado de Santa Catarina – ano 2020

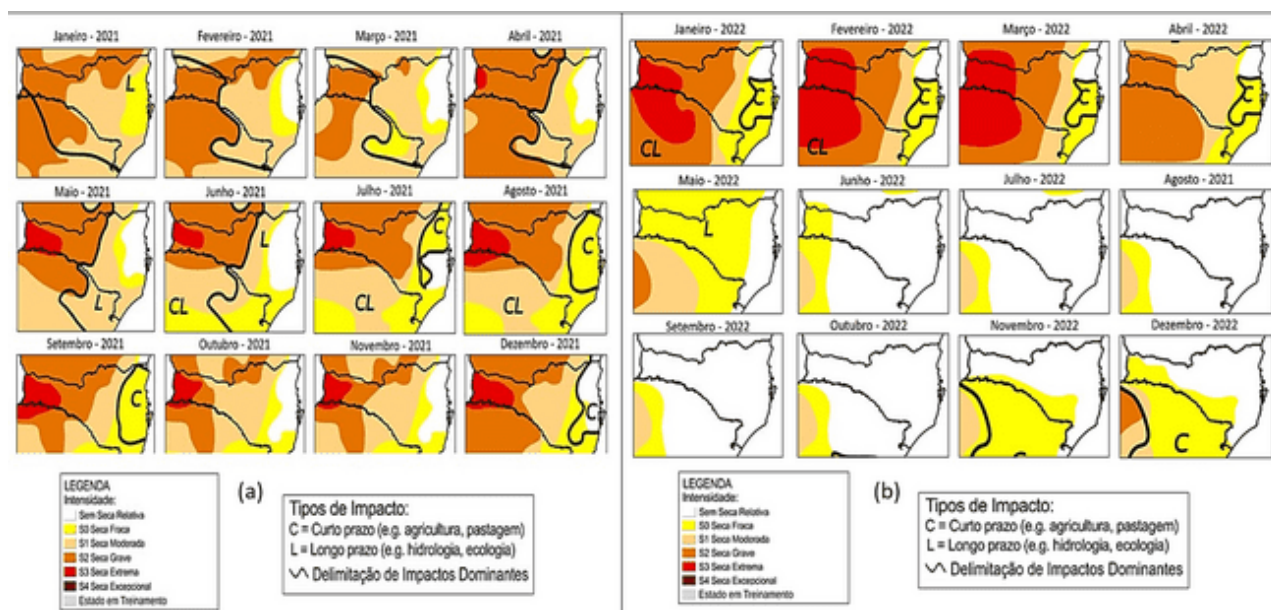


Fonte: Adaptado de Monitor de Secas (2022). Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br>.

A partir de janeiro de 2021 a seca diminuiu de intensidade em todo o estado, passando de extrema para grave no Oeste, de grave para moderada na região central do estado e de grave para fraca no litoral, seguindo a tendência de diminuição de intensidade até março de 2021. Em abril daquele ano a seca extrema retornou no extremo oeste catarinense, e seguiu com intensidade extrema e grave ao longo dos meses em direção ao meio oeste até agosto. Em setembro houve uma sensível redução da área afetada pela seca extrema e grave no meio oeste, mas com a persistência da mesma até o final do ano de 2021 (Figura 5a). Entre janeiro e abril de 2022 a seca com intensidade extrema e grave voltou a se expandir em direção à região central do estado (Figura 5b).

Apesar do pequeno intervalo de tempo considerado, a intensidade desses fenômenos, somada às demais evidências em outras áreas, aponta na direção das mudanças climáticas.

Figura 5: Mapas da seca no estado de Santa Catarina – ano 2021(a) e 2022(b)



Fonte: Adaptado de Monitor de Secas (2022). Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br>

Desmatamento na Amazônia e sua influência nas secas em Santa Catarina

Há relação entre o desmatamento da Amazônia e a intensificação dos eventos de seca nas regiões Sul e Sudeste. A umidade chega às regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil por correntes de ar procedentes da Bolívia e da parte ocidental da Amazônia brasileira, sendo que a importância do suprimento de vapor de água varia de acordo com a estação do ano (FEARNSIDE, 2022). A Amazônia é responsável por levar “chuvas essenciais” a essas regiões e o desmatamento tem diminuído a formação de vapor e, consequentemente, aumentado a seca nessas regiões do país (NOBRE, 2014).

A transpiração e a condensação, mediadas pelas árvores, mudam a pressão atmosférica e arrastam a umidade do oceano para o continente, o que ‘puxa’ os ventos do mar para a terra e produz chuvas na área florestada (Bomba Biótica). Assim, a remoção da floresta leva à menor evaporação no continente do que no oceano, o que provocará a reversão dos fluxos atmosféricos e a desertificação da Amazônia (NOBRE, 2014).

Os ‘rios voadores’ se formam a partir da evaporação da água proveniente do Oceano Atlântico, a qual é levada para dentro da Amazônia pelos ventos alísios, caracterizados por sua alta umidade (Figura 6). Esses ‘rios’ são fluxos de umidade que perdem água pela precipitação e ganham por meio da evaporação (ARRAUT, 2012).

Figura 6: Formação dos Rios Voadores e seu percurso pelo continente

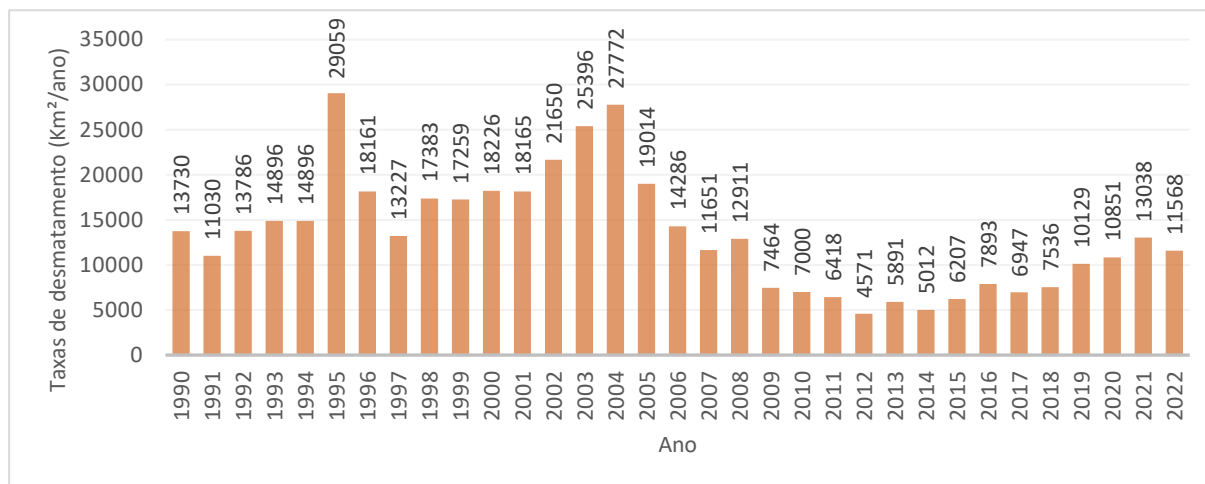


Fonte: Adaptado de Marengo (2020).

Na floresta ocorre a precipitação intensa e a recarga da umidade dos ventos por meio da evaporação advinda dela própria. Os rios voadores seguem em direção à Cordilheira dos Andes, onde parte da água é novamente precipitada e reabastece a bacia Amazônica; e o restante segue ao sul, provendo chuva para o sul do continente Sul-Americano (CORDEIRO; REZENDE, 2021; MARENGO, 2020). O desmatamento reduz a umidade proveniente da vegetação para a atmosfera, reduzindo assim o volume de água transportado pelos 'rios voadores' (MARENGO, 2020). Há consenso entre autores (MARENGO, 2020; NOBRE, 2014; COSTA, 2021) sobre a relação entre o desmatamento da Amazônia e a menor incidência de chuvas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Entretanto, não é possível afirmar que o prolongamento do período de estiagem e seca no sul do país tenha influência apenas dessas dinâmicas. É fato que o fenômeno La Niña influencia na ocorrência de estiagem e seca na região, mas ele não é o único responsável pela intensificação desses eventos. Indica-se o aumento do desmatamento, com consequente interferência nos sistemas atmosféricos; somado à ocorrência do fenômeno La Niña; bem como as alterações no clima global, como fatores que, de forma conjunta, têm levado à intensificação da seca na região.

A Figura 7 mostra queda na taxa de desmatamento da Amazônia brasileira entre 2004 e 2012 e nova intensificação a partir de 2014, o que coincide com o período de aumento da estiagem nas regiões sul, sudeste e centro-oeste, em especial em Santa Catarina. Entretanto, conforme dito anteriormente, ainda não é possível afirmar que haja correlação direta entre os dados.

Figura 7: Taxas de desmatamento da Amazônia brasileira



Fonte: Adaptado de INPE – PRODES (Desmatamento), 2022.

Algumas regiões do estado de Santa Catarina têm sofrido com períodos de estiagem e sucessivas ocorrências de eventos extremos de precipitação. Esse fato indica uma considerável variabilidade na precipitação; e as mesorregiões do Oeste Catarinense, Vale do Itajaí e Grande Florianópolis são as mais afetadas por inundações e estiagens, sendo que os municípios mais afetados pela estiagem estão localizados na mesorregião Oeste e planalto catarinense (SPINELLI et al., 2012), área de ocorrência da principal reserva de águas subterrâneas do estado, o Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral – SAIG/SG (STALLBAUM et al., 2018). Camargo et al. (2009) destacam as tendências anuais de incremento na temperatura mínima em 11 das 16 localidades catarinenses investigadas, considerando a série histórica de cada local, sendo estas principalmente localizadas no meio-oeste do estado.

Perera et al. (2020), reforçam a convicção de que as mudanças climáticas se acelerarão, o que causará eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes e fortes. O aumento desses extremos leva a alguns impactos irreversíveis à medida que os sistemas naturais e humanos sejam empurrados para além de sua capacidade de resiliência – como é o caso de aquíferos profundos, como o Guarani, ou de adaptação (IPCC, 2022). A água é o principal meio através do qual se sentirão os efeitos das mudanças climáticas sobre as pessoas, nos ecossistemas e nas economias. Seja em decorrência de períodos prolongados de seca, por inundações, por maior intensidade das chuvas ou pela perda de sua qualidade para consumo; a disponibilidade de água em quantidade e qualidade necessárias para a manutenção da vida humana e dos ecossistemas é ponto fundamental diante desse cenário. Portanto, a gestão das águas deve ter abordagem preventiva e adaptativa.

Considerações Finais

Eventos extremos relacionados a alterações climáticas geram impactos na saúde humana e, mesmo em situações sem risco de morte, ocorrem impactos aos ecossistemas, à sociedade e economia. Observa-se a importância de estudos de variabilidade climática local e regional para a elaboração de planos de gestão, mitigação e adaptação aos impactos que as alterações climáticas, intensificadas pelas atividades humanas, podem causar. Entretanto, devido à ausência de séries históricas completas, ainda existe dificuldade para a definição dessas mudanças nos níveis regional e local (CARDOSO; QUADRO, 2017).

A intensificação da escassez hídrica em algumas regiões é compreendida como resultado do processo de mudanças climáticas globais. Embora haja consenso acerca de sua

ocorrência, ainda há incertezas que precisam ser sanadas. Isto deve-se às poucas informações e indicadores locais que podem ser incorporados aos modelos de análise climática. Simulações de alta resolução, maior poder computacional e observações confiáveis in situ e de satélite são fundamentais para entender como e quais fatores são mais fortemente impactados por essas mudanças. Destaca-se a importância dos cientistas do clima, da saúde e sociais, bem como modeladores no desenvolvimento de métodos que visem melhorar as previsões.

Quanto aos aquíferos, as incertezas são ainda maiores, pois há dificuldade em mensurar a resposta dos aquíferos à variabilidade e às mudanças climáticas. Dessa forma, pesquisas e monitoramento das águas subterrâneas ajudam a compreender como os aquíferos respondem às mudanças no clima, assim como ao bombeamento excessivo e às pressões que as atividades humanas impõem aos mesmos.

Portanto, conhecer as possibilidades futuras de alteração dos processos de recarga auxilia na adoção de medidas preventivas quanto a situações críticas ou de calamidade para as gerações vindouras (ex. disponibilidade de água) (GOMES, 2008). Os resultados dessas pesquisas podem contribuir para a elaboração de planos de gestão para as águas subterrâneas e dos ecossistemas relacionados, diante das crescentes pressões das intensivas atividades humanas sobrepostas às mudanças climáticas. Dessa forma, a governança atual deve ser fortalecida e é necessária orientação mais eficaz sobre como responder às crises futuras.

O investimento em pesquisas sobre o tema e o fortalecimento das instituições são fundamentais para que dados sejam produzidos e analisados, e a fiscalização e monitoramento sejam realizados, o que não se verifica atualmente em Santa Catarina e no Brasil. O sucateamento de instituições de fiscalização e monitoramento ambiental (ex. IBAMA e ICMBio) por parte do governo brasileiro (especialmente entre 2019-2022) implicou diretamente na precarização de mecanismos de gestão das secas no país. O aumento do desmatamento desde o golpe que afastou a Presidenta Dilma e o desmantelamento das políticas ambientais, perpetrado durante o (des)governo Bolsonaro, magnificaram os impactos econômicos, sociais e principalmente ambientais dos eventos analisados.

Ainda existem importantes incertezas e lacunas de informação, que dificultam uma total compreensão da resposta dos aquíferos às alterações climáticas. Contudo, por meio do monitoramento das águas subterrâneas e do conhecimento acerca das possibilidades futuras dos processos de recarga, pode-se auxiliar os gestores e responsáveis pela tomada de decisão na gestão e planejamento adequados dos recursos hídricos, bem como na identificação das incertezas associadas, considerando as mudanças climáticas, o bombeamento excessivo e as pressões que as atividades antrópicas impõem aos sistemas aquíferos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a revisão e sugestões de um revisor anônimo da versão preliminar do artigo.

Referências

ADAM, K. N. *Incerteza e impactos de mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do rio Uruguai*. 2016. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em recursos hídricos e saneamento ambiental. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, março, p.237, 2016.

ALGHAMDI, A.; HU, G.; HAIDER, H.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. *Benchmarking of water, energy, and carbon flows in academic buildings: a fuzzy clustering approach*. Sustainability,

v. 12, n. 11, p. 4422, 2020.

ALTHOFF, D.; BAZAME, H. C.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L. N. Assessing rainfall spatial variability in the Brazilian savanna region with TMPA rainfall dataset. *Elsevier: Journal of South American Earth Sciences*, p. 1-8, 2021.

ALVES, M.P.A.; MINUZZI, R.B. Climatologia das ondas de Frio invernais em Santa Catarina – Brasil. *Revista de Geografia (Recife)* – ISSN: 0104-5490, v. 35, n. 3, p. 308 – 323, 2018.

ARRAUT, J. M.; NOBRE, C.; BARBOSA, H. M. J.; OBREGON, G.; MARENGO, J. Aerial Rivers and lakes: looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. *Journal of Climate*, v. 25, n. 2, p. 543-556, 2012.

ASLAM, R. A.; SHRESTHA, S.; PANDEY, V. P. Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology. *Elsevier: Science of the Total Environment*, v. 612, p. 853–875, 2018.

BAPTISTA, G. C. Z.; SEVERO, D. L. Variabilidade espacial e temporal da precipitação de Santa Catarina. *Geosul*, Florianópolis, v. 33, n. 68, p.184-200, Set./Dez., 2018.

BHERING, A. P.; ANTUNES, I. M. H. R.; MARQUES, E. A. G; PAULA, R. S. de. Geological and hydrogeological review of a semi-arid region with conflicts to water availability (southeastern Brazil). *Elsevier: Environmental Research*, 202, 10p.,2021.

BRAGA, T. M.; OLIVEIRA, E. L. de; GIVISIEZ, G. H. N. Avaliação de metodologias de mensuração de risco e vulnerabilidade social a desastres naturais associados à mudança climática. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, realizado em Caxambú-MG – Brasil, de 18 a 22 de Set., Anais, p. 1-17, 2006.

BRÊDA, João Paulo LF et al. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, v. 619, p. 129284, 2023.

CARDOSO, C.S.; DE QUADRO, M.F.L. Análise comparativa de dados de precipitação gerados pelo “Climate Prediction Center–CPC” versus dados observados para o Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 04, 19 p., 2017.

CASTRO, A. L. C. de; CALHEIROS, E. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL, M. L. N. da C. *Manual de desastres-desastres naturais*, vol. I. Ministério da Integração Nacional-Secretaria Nacional de Defesa Civil, Brasília, DF, v. 174, 2003.

CEPED-UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. *Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012* / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis:

CEPED UFSC, 2013. 168 p. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/> Acesso em 19 de outubro de 2022.

CORDEIRO, V. V.; REZENDE, E. N. Os rios voadores e as mudanças climáticas ocasionadas pelo desmatamento da floresta amazônica: uma perspectiva a partir do constitucionalismo latino-americano. *Revista Brasileira de Direito Animal*, v. 16, n. 3, p. 100-115, 2021.

COSTA, L. C. Quadrilátero afortunado, desmatamentos na Amazônia entre 1992 e 2019, e impactos climatológicos no oeste paulista. *Ciência Geográfica - Bauru - XXV - Vol. XXV -*

(3): Janeiro/Dezembro – 2021.

CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2020). “*Natural Disasters 2019: Now is the Time to not give up*”. Disponível em: www.emdat.be/natural-disasters-2019-now-time-not-give. Acesso em: março de 2022.

DENICOLA, E.; ABURIZAIZA, O. S.; SIDDIQUE, A.; KHWAJA, H.; CARPENTER, D. O. Climate Change and Water Scarcity: The Case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, vol. 81, n° 3, 2015.

DONADELLI SACCHI, Marcelo; LILLA MANZIONE, Rodrigo; GASTMANS, Didier. How much rainwater contributes to a spring discharge in the Guarani Aquifer System: insights from stable isotopes and a mass balance model. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 60, n. 4, p. 400-416, 2024.

ERNST, Maythe Fernanda. *Identificação de regiões homogêneas de temperatura no sul do Brasil*. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2022.

FEARNSIDE, P.M. Desmatamento na Amazônia brasileira: História, índices e consequências. p. 7-19. In: FEARNSIDE, P. M. *Destruição e conservação da floresta amazônica*. INPA: Manaus, v.1, 368 p., 2022.

FLORES, R. A. *Método de avaliação da eficiência no uso de água em edificações educacionais: um sistema de benchmarking por análise de agrupamentos e lógica fuzzy*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. Brazil is in water crisis: it needs a drought plan. *Nature*, v. 600.788, p. 218-2020, 2021.

GIDDENS, A. A Política da mudança climática. Rio de Janeiro: Zahar, 314p., 2010.
GOMES, M. A. F. O Aquífero Guarani no contexto das mudanças climáticas globais. In: Congresso Aquífero Guarani, 2, Ribeirão Preto. *Anais*, 2008. 1p. Pôster, 2008.

GOMEZ-GOMEZ, J. D.; PULIDO-VELAZQUEZ, D.; COLLADOS-LARA, A. J.; FERNANDEZ-CHACON, F. The impact of climate change scenarios on droughts and their propagation in an arid Mediterranean basin. A useful approach for planning adaptation strategies. *Elsevier, Science of the total environment*, 18 p., 2022.

GONDIM, J.; MARANHÃO, N.; COIMBRA, M. R. S. C.; TRÖGER, F. H.; FIOREZE, A. P.; AMORIM, B. de. *Os Efeitos Das Mudanças Climáticas Sobre Os Recursos Hídricos: Desafios Para A Gestão*. Grupo de Trabalho sobre Mudanças Climáticas (Portaria ANA n° 36, 26/01/2010). Agência Nacional de Águas (ANA), 20 p., 2010.

GOTARDO, R.; PIAZZA, G. A.; TORRES, E.; SEVERO, D. L.; KAUFMANN, Vander. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. *Florianópolis: Geosul*, v. 33, n. 67, p. 253-276, Maio/Ago. 2018.

GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, v. 18, n. 9, p. 1326-1350, 2005.

HERNANDEZ, M. A.; SOLERA, A. Conjunctive use of surface and ground waters during drought and climate change assumptions—Duero River Basin, Spain. In: *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. CRC Press, 2015. p. 423-428.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 84, p. 297-312, 2012.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S. S.; VILALAR, P. C.; MARCELINI, L. *As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil*. São Paulo: Universidade de São Paulo / Instituto de Geociências, 66 p., 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Summary for policymakers. IPCC WGII Sixth Assessment Report, p. 37, 2022.

JOHANNSEN, I. M.; HENGST, J. C.; GOLL, A.; HÖLLERMANN, B.; DIEKKRÜGER, B. Future of Water Supply and Demand in the Middle Drâa Valley, Morocco, under Climate and Land Use Change. *Water*, v. 8, nº 313, 18 p., 2016.

JORGENSEN, B.; GRAYMORE, M.; O'TOOLE, K. Household water behavior: An integrated model. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 1, p. 227-236, 2009.

JOSÉ, M. F.; MINUZZI, R. B. Desempenho na estimativa de precipitação pelo radar meteorológico do oeste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.12, n.06, 2019.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P.V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. de M. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. Curitiba: Organic Trading, p.109, 2006.

LAUKKONEN, J.; BLANCO, P.; LENHART, J.; KEINER, M.; CAVRIC, B. e KINUTHIA-NJENGA, C. Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level. *Habitat International*, n. 33: p. 287-292, 2009.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, v. 35, p.1073-1097, 2009.

MARENGO, Jose A. Drought, floods, climate change, and forest loss in the amazon region: a present and future danger? *Front. Young Minds*, v. 7, 2020.

MATTIUZI, C. D. P. Avaliação das anomalias de precipitação na Bacia do Rio Uruguai entre 2019 e 2021. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-10, 2021.

MINUZZI, R. B. e FREDERICO, C. do A. Variabilidade de ondas de calor e a relação com o ENOS Modoki e Canônico em Santa Catarina. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 02 N. 04, 421-429, 2017.

MINUZZI, R. B. Chuvas em Santa Catarina durante eventos do El Niño oscilação sul. Florianópolis: *Geosul*, v.25, n.50, p. 107-127, Jul./Dez. 2010.

MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. *Geosul*, v. 16, n. 31, p. 69-78, 2001.

NADERI, M. Assessment of water security under climate change for the large watershed of Dorudzan Dam in southern Iran. *Hydrogeology Journal*, v. 28, n. 5, p. 1553-1574, 2020.

NOBRE, A. D. *O futuro climático da Amazônia*. Relatório de Avaliação Científica. São José dos Campos, São Paulo, 2014.

NODARI, Eunice Sueli; ESPÍNDOLA, Marcos Aurélio. Relações complexas: as estiagens no Oeste de Santa Catarina. *Migrações e Natureza*, Oikos, São Leopoldo, p. 165-166, 2013.

PAIVA, R. C. D., COLLISCHONN, W., MIRANDA, P. T., FAGUNDES, H.O., W., KOLLING, A., CASTRO, L., ROSSI, J., MATTE, G., LAIPELT, L., ALVES, W., PETRY, I. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. *CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final*. IPH-ANA-HGE-CLIMAA3. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília], 2024.

PANEZ PINTO, Alexander. *El río recuperando su cauce: despojos y resistências em los conflictos por agua-tierra-territorio bajo el neoliberalismo em Chile*. Campina Grande: EDUEPB, 2022. (ISBN: 978-85-7879-690-7 (E-book))

PBMC, PBMC, 2014: *Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas*. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E.D., Magalhães, A. R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 p.

PERERA, A. T. D.; NIK, V. M.; CHEN, D.; SCARTEZZINI, J. L.; HONG, T. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, v. 5, n. 2, p. 150–159, 2020.

RAMOS, N. F.; FOLCHA, A.; FERNÁNDEZ-GARCIA, D.; LANE, M.; THOMAS, M.; GATHENYA, J. M.; WARA, C.; THOMSON, P.; CUSTODIO, E.; HOPE, R. Evidence of groundwater vulnerability to climate variability and economic growth in coastal Kenya. *Journal of Hydrology*, v. 586, p. 124920, 2020.

REDE GUARANI/SERRA GERAL (RGSG). *Blocos hidrogeológicos, vulnerabilidade natural e risco à contaminação do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em Santa Catarina*. Laboratório de Análise Ambiental e Laboratório de Hidrogeologia da UFSC. Nota Técnica. 2020. 155p. il. mapas. Disponível em: <<https://hidrogeologia.ufsc.br/saigsg/>>. Acesso em: 26 de Maio de 2021.

REINECKE, R.; MÜLLER S., H., TRAUTMANN, T., ANDERSEN, L. S., BUREK, P., FLÖRKE, M. e DÖLL, P. Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: a global-scale multi-model ensemble study. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, n. 2, p. 787-810, 2021.

SADOFF, C.; MULLER, M. *La gestión del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático: efectos anticipados y respuestas esenciales*. Estocolmo: Global Water Partnership, 2010.

SOARES, M.O.; CAMPOS, C.C.; CARNEIRO, P.B.M.; BARBOSA, H.S.; MARINS, R.V.; TEIXEIRA, C.E.P.; MENEZES, M.O.B.; PINHEIRO, L.S.; VIANA, M.B.; FEITOSA, C.V.; SÁNCHEZ-BOTEROC, J.I.; BEZERRA, L.E.A.; ROCHA-BARREIRA, C.A.; MATTHEWS-CASCON, H.; MATOS, F.O.; GORAYEB, A.; CAVALCANTE, M.S.; MOROA, M.F.; ROSSI, S.; BELMONTE, G.; MELO, V.M.M.; ROSADO, A.S. ROSADO; RAMIRES, G.; TAVARES, T.C.L.; GARCIA, T.M. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. Associação Brasileira de Ciência Ecológica e Conservação. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 19, p. 267–278, 2021.

SPINELLI, K., MENDONÇA, M. BONETTI, C. V. D. H. C. Eventos extremos mensais e a ocorrência de inundações e estiagens na bacia do Rio do Peixe – Santa Catarina. *Revista Geonorte*, v.1, p.1011 – 1023, 2012.

STALLBAUM, Imara; MAFALDA, Antônio Carlos; SCHEIBE, Luiz Fernando; HENNING, Luciano Augusto. *Águas Subterrâneas, um Patrimônio Catarinense*. Expressão: Florianópolis, 2018, 160p. Ilustrado. Disponível em https://expressao.com.br/ebooks/aguas_subterraneas/mobile/index.html

STEDUTO, Pasquale; Harwood, Mary; PEÑA, Humberto; XURONG, Mei; HONG, Gan; LAMADDALENA, Nicola; BASTIAANSEN, Wim; KFIR, Rivka; FERERES-CASTIEL, Elias; VARELA-ORTEGA, Consuelo; BATCHELOR, Charles; MECHLIA, Netij Bem; SVENDSEN, Mark. *Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

TORTELLA, B.D.; TIRADO, D. Hotel water consumption at a seasonal mass tourist destination. The case of the island of Mallorca. *Journal of Environmental Management*, v. 92, p. 2568–2579, 2011.

UNFCCC. Climate change: impacts, vulnerabilities, and adaptation in developing countries. United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn: n. 64. 2007.
WANG, W.; ZHANG, Z.; DUAN, L.; WANG, Z.; ZHAO, Y.; ZHANG, Q.; DAI, M.; LIU, H.; ZHENG, X. e SUN, Y. Response of the groundwater system in the Guanzhong Basin (central China) to climate change and human activities. *Hydrogeology journal*, v. 26, n.5, p. 1429–1441, 2018.

YIHDEGO, Y.; WEBB, J. A.; VAHEDDOOST, B. Highlighting the role of groundwater in lake–aquifer interaction to reduce vulnerability and enhance resilience to climate change. *Hydrology*, v. 4, n. 1, p. 10, 2017.

Recebido em: 05/07/2024.
Aprovado para publicação em: 30/12/2024.