

VARIAÇÕES ESPACIAIS DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA TERRESTRE DETECTADA POR SATÉLITES GRAVIMÉTRICOS NO ESTADO DO CEARÁ

Spatial Variations in Terrestrial Water Storage Detected by Gravimetric Satellites in the State of Ceará

**José Nelson do NASCIMENTO NETO¹, Gabriel do Nascimento GUIMARÃES², Henry
Diverth MONTECINO C.³, João Vitor Meza BRAVO²**

¹Universidade Estadual Vale do Acaraú. Avenida Padre Francisco Sadoc de Araújo, 850 – Betânia. Sobral, CE.
E-mail: josenelsonnascimento@gmail.com

²Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG.
E-mail: gabriel@ufu.br; jvbravo@gmail.com

³Universidade de Concepción. Department of Geodesy Science and Geomatics. Rua Juan Antonio Coloma 0201, Los Angeles, Chile.
E-mail: henrymontecino@udec.cl

Introdução
Água subterrânea em regiões semiáridas
Área de estudo
Método
 Seleção dos dados
 Processamento de dados
Resultados e discussões
Desafios e perspectivas futuras
Considerações finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - As regiões semiáridas sofrem com o aumento da escassez hídrica e com as ocorrências das secas extremas, essas situações comprometem a segurança hídrica e aumentam a dependência do uso expressivo das águas subterrâneas. Para avaliar essa situação, selecionou-se os núcleos de desertificação situados no Estado do Ceará. Um total de 665 poços instalados na região foram avaliados em relação a vazão explorada, assim, como as características litoestratigráficas em relação a maior ou menores disponibilidade hídrica. Utilizou-se os dados do armazenamento total de água da missão *Gravity Recovery and Climate Experiment*, para compreender a distribuição espacial da água subterrânea em relação aos períodos de chuva e seca na região. Para validar os dados utiliza-se a umidade do solo pelo modelo *Global Land Data Assimilation System* e a precipitação *in situ* situados ao longo dos núcleos de desertificação. Os resultados indicam que as secas são recorrentes com intervalo médio de aproximadamente três anos e que as áreas com maior suscetibilidade à desertificação coincidem com zonas de baixa vazão de poços e menor armazenamento hídrico subterrâneo. Esses dados reforçam a necessidade de estratégias de gestão hídrica baseadas em dados espaciais e climáticos integrados, especialmente frete às mudanças climáticas.

Palavras-Chaves: Água subterrânea. Poços. GRACE. Segurança hídrica. Escassez hídrica. Núcleos de desertificação.

ABSTRACT - Semi-arid regions suffer from increasing water scarcity and extreme droughts, which compromise water security and increase dependence on the significant use of groundwater. To assess this situation, desertification centers in the state of Ceará were selected. A total of 665 wells installed in the region were evaluated in relation to exploited flow, as well as lithostratigraphic characteristics in relation to greater or lesser water availability. Data on total water storage from the Gravity Recovery and Climate Experiment mission were used to understand the spatial distribution of groundwater in relation to rainy and dry periods in the region. To validate the data, soil moisture was used by the Global Land Data Assimilation System model and in situ precipitation located along the desertification cores. The results indicate that droughts are recurrent with an average interval of approximately three years and that the areas most susceptible to desertification coincide with zones of low well flow and lower groundwater storage. These data reinforce the need for water management strategies based on integrated spatial and climate data, especially in the face of climate change.

Keywords: Groundwater. Wells. GRACE. Water security. Water scarcity. Desertification Cores.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm ocasionado uma série de desequilíbrios nos ecossistemas terrestres, afetando a biosfera e os componentes bióticos e abióticos (Vörösmarty et al., 2000; Vörösmarty et al., 2021; Mishra et al., 2021; & Shayanmehr et al., 2022). Essa situação tem provocado a sociedade a desenvolver novas perspectivas sobre a segurança hídrica global (Cook &

Bakkerb, 2012; & Jepson et al., 2019), principalmente por afetarem ecossistemas terrestres sensíveis como as regiões semiáridas (Stringer et al., 2021).

Neste contexto, os períodos severos de seca têm desafiado a sociedade em relação a sua política de recursos hídricos (Hettiarachchi et al., 2022), de modo que essa situação instiga os

governantes a estabelecer novas medidas para mitigar os efeitos da escassez hídrica. É importante salientar que, ao longo das duas últimas décadas, cerca de 46% da população mundial tem enfrentado longos períodos de estiagem (Vanham et al., 2021).

O uso adequado da água subterrânea é um dos principais desafios para se alcançar a segurança global da água, principalmente para as regiões semiáridas, onde a demanda é urgente e as infraestruturas hídricas são limitadas (Bierkens & Wada, 2019).

Nesse sentido, a exploração inadequada de recursos hídricos nestas regiões tem afetado a garantia dos abastecimentos de água dos núcleos familiares e das comunidades rurais (Mirdashtvan et al., 2021).

Uma alternativa cada vez mais utilizada para avaliar a disponibilidade hídrica terrestre são os modelos hidrológicos, como os modelos de circulação geral, o HDTM 1.0 Modelo Hidrodinâmico, Macro-PDM (Modelo de Distribuição de Probabilidade Macro), MPI-HM (Instituto Max Planck – Modelo de Hidrologia), GWA (Modelo de Avaliação da Disponibilidade Global de Água), VIC (Modelo de Capacidade de Infiltração Variável), LAD (Modelo Dinâmico de Terra), WaterGAP (Água – Modelo de Análise e Prognóstico Global), PCR-GLOBWB (modelo de balanço hídrico PCRaster GLOBal), LPJmL (modelo de terras administradas por Lund-Potsdam-Jena), WASMOD-M (Sistema de modelagem de equilíbrio de água e neve), H08 (H07) e ISBA-TRIP (Interações entre solo, biosfera e atmosfera – Vias de integração do escoamento total) (Sood & Smarkhtin, 2015).

Além dos modelos hidrológicos tradicionais, variações que retratam o armazenamento terrestre de água obtidos a partir de satélites, como as missões *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE e GRACE-FO) têm sido utilizadas para monitorar os efeitos das estiagens (Foroumandi et al., 2023). Dentre as principais vantagens dos produtos GRACE, destaca-se o que contempla medidas sobre o armazenamento total de água – *Total Water Storage Anomaly* (TWSA), que contempla todas as componentes hidrológicas, incluindo a água subterrânea, a umidade do solo, a água superficial e armazenada na vegetação. Isso representa um diferencial relevante em relação à maioria dos modelos hidrológicos tradicionais, os quais geralmente não incluem a componente subterrânea de forma

explícita ou confiável.

Além disso, os dados GRACE permitem uma avaliação integrada em escala regional ou global. Esses dados são especialmente úteis em áreas remotas ou com escassez de observações em *in situ*. Contribuem, assim, para o monitoramento de secas, a gestão de recursos hídricos e o estudo dos impactos das mudanças climáticas (Getirana et al., 2020; Guimarães & Mendonça, 2021).

Com o aumento das secas severas nas regiões semiáridas, tem sido ainda mais desafiador para os gestores desenvolverem estratégias vinculadas a segurança hídrica (Cosgrove & Loucks, 2015). Por exemplo, para compreender a variação espacial da água, embora a missão GRACE tenha contribuído com informações gerais da massa de água terrestre, ainda assim, as suas resoluções espaciais são limitadas (Chen et al., 2022).

Essa condição reforça a necessidade de sistematização de informações pontuais *in situ*. Além disso, (Getirana et al., 2017) chamam atenção para a necessidade de compreender o comportamento do modelo de armazenamento terrestre de água em relação ao conjunto de rios e reservatórios em todo o mundo.

Nesse sentido, é importante esclarecer que, o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da NASA, o *Center for Space Research at University of Texas* (CSR), e o Centro Aeroespacial Alemão *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR) em colaboração com o GFZ, lançaram em março de 2002 a missão espacial *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), que tem sido utilizada para observações indiretas da anomalia do armazenamento total de água.

A partir de 2018, a missão foi sucedida pela GRACE Follow-On (GRACE-FO), que mantém os princípios operacionais da missão original, aprimorando a continuidade dos dados e assegurando o monitoramento de longo prazo das mudanças no ciclo hidrológico global com alta precisão e cobertura espacial.

As regiões semiáridas são particularmente sensíveis às variações climáticas, o que as torna áreas prioritárias para estudos de monitoramento hidrológico. A aplicação de dados provenientes da missão GRACE nessas regiões tem se mostrado relevante ao longo das últimas décadas. Um exemplo pioneiro é o estudo de Rodell & Famiglietti (2002), que detectou uma redução de 113,7 mm no armazenamento de água subterrânea durante um período de 11 anos nas Planícies Altas dos Estados Unidos. Em estudos poste-

riores, como o de Joodaki et al., (2014), a missão GRACE também foi utilizada para estimar o esgotamento dos aquíferos subterrâneos no Oriente Médio, com base na análise de séries temporais e dados de poços, evidenciando a capacidade dos satélites em monitorar a dinâmica hídrica mesmo em regiões com escassez de dados *in situ*.

No Brasil, os primeiros trabalhos aplicando informações satelitais da missão GRACE avaliaram o impacto da seca extrema na região sudeste (Getirana, 2016). Logo em seguida, na região semiárida, foram estimados o esgotamento das águas subterrânea na bacia do atlântico nordeste (Rosenhaim, 2017), e em aquífero de pequena escala (Melati et al., 2019; & Gonçalves et al., 2020).

Nessa mesma linha, estudos recentes contribuíram para o avanço do conhecimento sobre os impactos hidrológicos em regiões vulneráveis do semiárido brasileiro, destacando-se: a análise da seca de 2012–2015 com dados GRACE (Ferreira et al., 2019), o monitoramento da disponibilidade de água subterrânea por meio de integrações

entre GRACE, GLDAS e dados *in situ* (Ferreira et al., 2019b), e a recente investigação em relação as mudanças hidrológicas no nordeste no Brasil (Montecino et al., 2025).

A necessidade de explorar água subterrânea em regiões semiáridas, para atender as demandas emergências, tem gerado sobre a sociedade o desafio de avaliar o impacto da extração de água do subsolo (Foster & Van der Gun, 2016; & Mussa et al., 2020).

Com isso, esse artigo explora a capacidade da missão GRACE em reconhecer a situação da quantidade de água de forma indireta no Estado do Ceará, com especial atenção aos núcleos de desertificações localizados nesta região.

Especificamente objetiva avaliar a quantidade de água disponível no semiárido cearense, com ênfase nos núcleos de desertificação, buscando correlacionar com os aspectos da fisiologia da paisagem local e sua adaptação às intensidades de fenômenos climáticos regionais, como por exemplo o El Niño, que provoca secas severas locais.

ÁGUA SUBTERRÂNEA EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

As regiões semiáridas cobrem 41% da superfície terrestre (Huang et al., 2020). Essas áreas são vitais ao sistema Terra, pois são ambientes ecologicamente abundantes e sensíveis (Singh & Chudasama, 2021), apesar das limitações nos seus recursos hídricos e na sua cobertura vegetal (Almalki et al., 2022).

Nos últimos anos, as regiões semiáridas reduziram em 0,53 milhões de km²; em compensação, as regiões áridas que expandiram 13% em todo o mundo chegando a ocupar cerca de 6,34 milhões de km² (Sardans et al., 2024). Além disso, no futuro, os eventos climáticos extremos podem elevar os níveis insustentáveis de uso das águas subterrâneas e, consequentemente, o avanço da aridez, o que reforça a necessidade de um planejamento adequado do uso dos recursos hídricos.

No Brasil, 87,8% da região nordestina está situada em área semiárida, exigindo atenção especial quanto ao abastecimento de água (Cavalcante Junior et al., 2019). De acordo com Suliman et al., (2022), os recursos hídricos subterrâneos precisam ser devidamente monitorados para não haver esgotamento.

Ainda, para Cavalcante Junior et al. (2019), garantir a disponibilidade de recursos hídricos de forma regular e de boa qualidade é o maior desafio para as regiões semiáridas, uma vez que

são anos consecutivos de precipitação abaixo da média com secas severas (Bhering et al., 2021).

Os estudos de modelagem, por exemplo, aplicados na Bacia Hidrográfica de Tapacurá no Estado do Pernambuco no semiárido brasileiro indicaram a redução de águas subterrâneas entre os anos de 2010-2029 (-13,90%); os números pioram entre os anos de 2040-2069 (-22,63%) e -32,91% entre os anos de 2070-2099 (Montenegro & Ragab, 2012). Logo, no futuro, os sistemas que dependem das águas subterrâneas enfrentarão desafios sem precedentes (Tsuyuguchi et al., 2020).

Em cenário de mudanças climáticas, a região semiárida do Brasil pode diminuir em até 70% as recargas das águas subterrâneas até o cenário de 2050 (Kundzewicz et al., 2008). Deste modo, naturalmente, nos períodos de estiagem, há diminuição do armazenamento de água nos aquíferos, e a recomposição do volume, ocorre durante o período chuvoso - cada vez mais curto e menos intenso - no semiárido cearense (Andrade et al., 2014).

Para tanto, torna-se fundamental avaliar essa condição no Estado do Ceará, em especial nas áreas de núcleos de desertificação, por ser região de interesse desta pesquisa. No tópico seguinte apresenta-se as características dessa região geográfica.

ÁREA DE ESTUDO

Os núcleos de desertificação situados no Estado do Ceará (Figura 1) correspondem à 28.919,56 km² (FUNCENE, 2016). Abrangem 13 municípios e uma população estimada de 631,509 habitantes (IBGE, 2025). O núcleo de desertificação I, compreende os municípios de Sobral, Itapajé, Miraíma, Irauçuba, Santa Quitéria e Canindé; o núcleo II corresponde aos

municípios de Independência, Tauá e Arneiroz; e o núcleo III corresponde aos municípios de Jaguaribe, Jaguaretama, Alto Santo, Jaguaribara e Morada Nova. É importante salientar aqui que o Estado do Ceará se tornou suscetível à desertificação devido à forte influência de fatores climáticos e antrópicos (Barbosa & Oliveira, 2022).

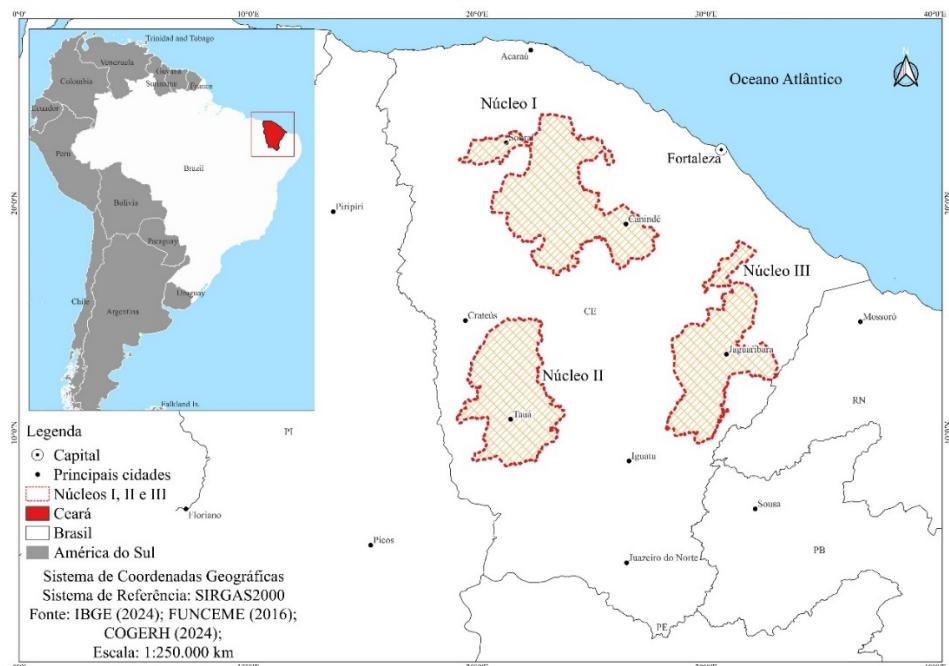


Figura 1 - Localização espacial da área de estudo no interior do estado do Ceará, com indicação dos núcleos de desertificação.

O bioma caatinga é predominante no Estado do Ceará (Souza et al., 2022). Entretanto, esse bioma apresenta fitofisionomias distintas no território, com a vegetação de dunas, floresta de tabuleiro com 12,6%, matas ciliares com 2,5%, mata úmida do sedimentar 1,8%, mata seca do sedimentar com 3,5%, caatinga do sedimentar com 5,9% e cerrado e cerradão 0,7%, mata úmida do cristalino 0,3% e mata seca do cristalino com 3,7%, sendo predominante nos núcleos de desertificação a caatinga do cristalino com 68,8% (Moro et al., 2015).

No Estado do Ceará predominam dois grandes domínios geológicos: um sedimentar e outro cristalino (Peulvast & Sales, 2004), cada um apresentando diferentes tipos de modeladores de relevo (Holanda Bastos & Cordeiro, 2021). Em 85% do seu território predomina o clima semiárido, seguido pelo clima árido em 8%, o clima subúmido seco com 5,68%, e o clima subúmido chuvoso com 0,04% (Muniz et al., 2017). Além disso, na região o regime pluvio-

métrico é subdividido em dois períodos distintos, o período chuvoso de fevereiro a maio e período seco de junho a dezembro.

A Zona de Convergência Intertropical - ZCTI é o principal sistema atmosférico atuante na região, associado à presença de outros subsistemas atmosféricos como os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis – VCAN, o Complexo Convectivo de Meso escala- CCMS e Onda de Leste (Ferreira & Mello, 2005).

O Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará (IPECE, 2025) mapeou os seguintes substratos sedimentares: planícies litorâneas, planícies fluviais, tabuleiros costeiros, chapada do Apodi, serra da Ibiapaba e chapada do Araripe. Além desses, foram identificadas as unidades de depressões sertanejas e maciços residuais com substrato cristalino como unidades predominantes na área de estudo.

Ainda, é possível identificar nas áreas que abrangem os Núcleos de Desertificação, os seguintes tipos de solos: Planossolos, Luvissolos,

Neossolos Litólicos eutróficos, Neossolos Flúvico eutrófico e Solos Podzólicos (Alves Meira et al., 2019). Os núcleos de desertificação I, II e III (Figuras 2a, 2b e 2c):

O núcleo I, possui relevo de maciços residual e inselbergs, associados a planícies fluviais; o núcleo II é associado a superfície sertaneja; o núcleo III possui superfície sertaneja e planícies

fluviais.

Assim, observando-se essas características, é possível traçar um perfil da fisiologia da paisagem dos núcleos de desertificação cearenses, o que auxiliará a explicação dos resultados encontrados nesta pesquisa. Dessa forma, no item que segue, apresenta-se o método empregado nesta pesquisa.

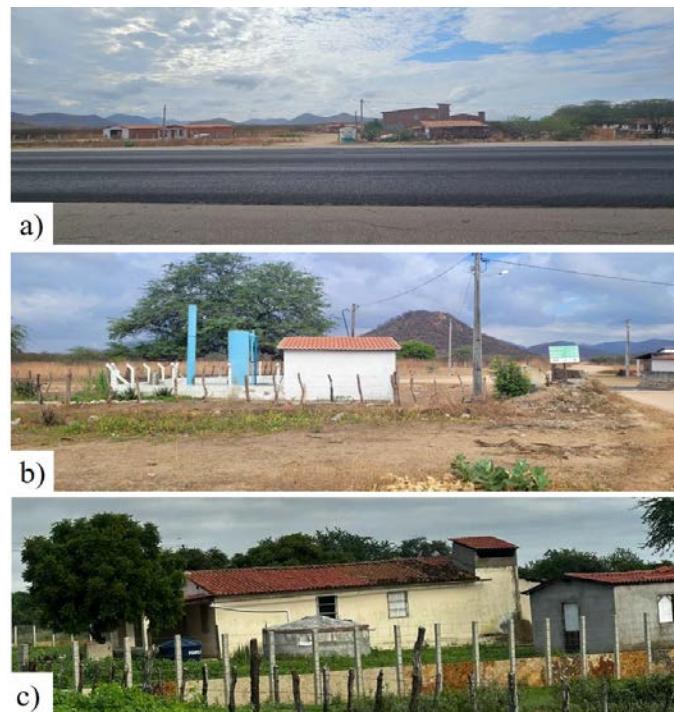


Figura 2. Vista geral dos Núcleo de desertificação: a) Núcleo I; b) Núcleo II; c) Núcleo III.

MÉTODO

Para avaliação da quantidade de água disponível na região geográfica de interesse e para a elaboração de possíveis explicações para os achados, utilizou-se conjunto de dados - de múltiplas fontes - que permite a discussão dos aspectos fisiográficos que afetam a disponibilidade de

água. O esquema da figura 3 ilustra as etapas da aquisição e integração dos dados provenientes das diferentes fontes. Foram utilizados satélites (GRACE e GLDAS), poços subterrâneos (SOHIDRA), registros de precipitação (FUNCEME) e dados geológicos (CPRM), referentes aos núcleos I, II e III.

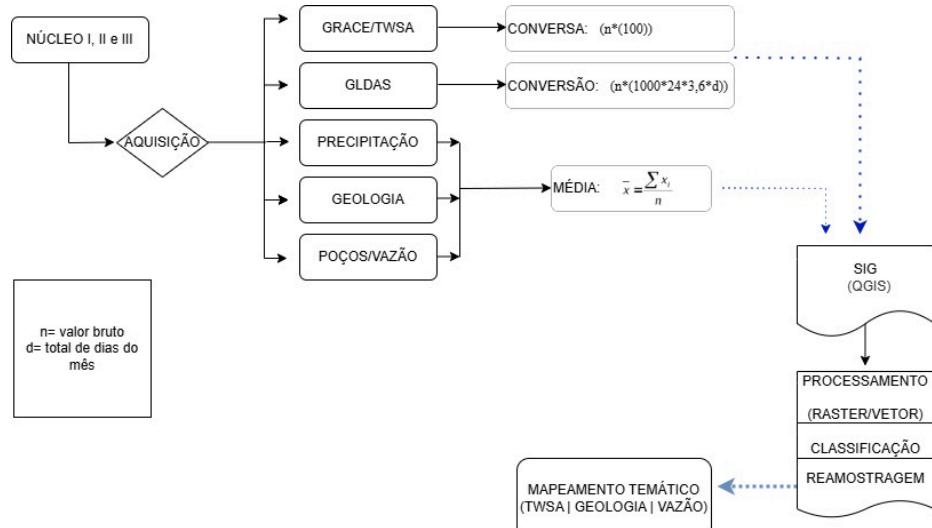


Figura 3 - Fluxograma metodológico da pesquisa.

Para a presente avaliação, optou-se pela seleção do período compreendido entre os anos de 2002 a 2013, i.e., do ano de lançamento da missão GRACE até o acompanhamento do período anterior à última seca severa na região iniciada em 2015. Paralelamente, busca-se compreender a influência do El Niño no comportamento da variação espacial da água terrestre na região por intervir diretamente precipitação regional e local (Shukla & Nobre, 1996).

Após aquisição dos dados, as variáveis avaliadas foram processadas por meio de conversão de unidades, cálculo de médias e espacialização em ambiente SIG (QGIS), permitindo a geração de gráficos e mapeamentos temáticos, como por exemplo de geologia e vazão de poços.

Especificamente, os dados de TWSA foram adquiridos no formato GeoTIFF com resolução espacial de aproximadamente 300 km, enquanto os dados de umidade do solo (SM) foram extraídos do GLDAS (versão Noah), com resolução espacial de ~25 km e frequência temporal de 3 horas. Ambos os conjuntos de dados foram reamostrados para a mesma escala espacial e temporal, de modo a permitir a subtração direta e gerar mapas mensais da anomalia de água subterrânea na região de estudo.

Essa metodologia permitiu isolar a contribuição do aquífero nas variações do armazenamento hídrico total, considerando que, em regiões semiáridas, a fração subterrânea representa parcela significativa do sistema hidrológico.

A abordagem adotada segue trabalhos de referência na literatura científica nacional e internacional, e proporciona uma estimativa indireta, mas robusta, da dinâmica da água subterrânea ao

longo do tempo (Frappart et al., 2018; Goncalves et al., 2020; & Ferreira et al., 2023).

Seleção dos dados

O processo de aquisição dos dados foi realizado em diferentes etapas, começando pela obtenção das anomalias do armazenamento terrestre de água (TWSA) a partir das missões GRACE e GRACE-FO, disponibilizadas pelo CSR, JPL e GFZ. Em seguida, coletaram-se os dados dos poços da região de estudo por meio do portal da Superintendência de Obras Hidráulicas (SOHIDRA), que disponibiliza informações sobre a localização e vazões dos poços.

A precipitação foi obtida através da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCENE), enquanto os dados geológicos foram extraídos do acervo da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), com foco na caracterização litoestratigráfica da área. Por fim, os dados de umidade do solo foram adquiridos a partir do modelo (GLDAS), desenvolvido pela NASA, com resolução temporal de 3 horas e espacial de aproximadamente 25 km (Tabela 1).

O período de coleta de dados foi definido a partir da necessidade de compreender a influência do fenômeno El Niño sobre os diferentes núcleos de desertificação principalmente no que diz respeito à disponibilidade de água subterrânea. Esse objetivo específico orientou a seleção temporal dos dados e a escolha das variáveis analisadas. Para isso, foram utilizados os dados nativos do armazenamento total de água da missão GRACE, no formato GeoTIFF, possibilitando a análise espacial das anomalias de armazenamento hídrico.

Tabela 1: Resumo das variáveis utilizadas no estudo.

Variável	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Fonte
TWSA	~300 km	Mensal	GRACE/GRACE-FO – CSR, JPL, GFZ
Precipitação	~4 km	Diária	FUNCENE
Vazão de poços	Pontual	Irregular (histórica)	SOHIDRA
Geologia	Escala 1:250.000	Permanente	CPRM
Umidade do solo	~25 km	3 horas	GLDAS – NASA/GSFC

Os dados de precipitação foram avaliados com base na média anual dos últimos 30 anos, considerando o período de 1993 a 2013. Em relação aos poços, foram analisadas duas variáveis principais: a profundidade média e a vazão explorada, com o intuito de identificar padrões regionais de disponibilidade e potencial de exploração hídrica subterrânea frente aos eventos climáticos extremos.

O processo de ocorrência do fenômeno El Niño adotados no presente estudo foram restritos a 2002/2003, 2006/2007 e 2009/2010 (INPE, 2024).

Os dados da missão GRACE foram selecionados na plataforma *web* da NASA. A análise adotada neste estudo corresponde aos períodos chuvosos e secos registrados na (Tabela 2).

Tabela 2 - Período de análise da anomalia terrestre de água subterrânea da Missão GRACE.

PERÍODO	CHUVOSO			SECO		
	Março	Abril	Maio	Setembro	Outubro	Novembro
2002		X	X	X	X	X
2003	X	X	X	X	X	X
2006	X	X	X	X	X	X
2007	X	X	X	X	X	X
2009	X	X	X	X	X	X
2010	X	X	X	X	X	X

Os dados de precipitação da (FUNCME), de vazão dos poços da (SOHIDRA), de Geologia da (CPRM) estão disponíveis na *web*, em seus respectivos sítios, no Brasil. Já os dados referentes a Umidade do Solo estão disponíveis na plataforma *web* Giovane da NASA.

Processamento de dados

O processamento dos dados se deu em ambiente SIG, através do software livre QGIS. Os dados GeoTIFF da missão GRACE foram recortados para as seguintes dimensões em latitude: -1° a -10° e longitude -36° a -43°. Em seguida os produtos GeoTIFF foram processados em sua simbologia, pela renderização da banda pelo método falsa cor, utilizando o interpolador linear aplicando-se uma classificação de cinco classes. Posteriormente foi realizada uma reamortagem pelo método bilinear.

Os dados de vazão dos poços foram processados considerando as suas informações em relação a sua média aritmética na tabela de atributos. Os dados foram agrupados em cinco classes, seguindo a ocorrência dos símbolos pontuais proporcionais.

Os dados de geologia foram agrupados e posteriormente classificados pela unidade mapeada. As classes mapeadas por sua vez estavam vinculadas as informações das tabelas de atributos que foram modificadas a sua simbologia, onde foram categorizados por tipo de rochas, representado por sua vez a ocorrência dos tipos ao longo dos núcleos de desertificação.

Para o mapeamento da quantidade de água, selecionou-se os arquivos referentes ao TWSA, que representam a média mensal ao longo dos grids agrupados em pixel. Para a realização desta

pesquisa, considerou-se os dados nativos no modelo GeoTIFF, que são codificados com duas bandas: banda 1 representando os valores exatos e a banda 2 representando a média espacial dos dados.

Para validação dos dados sobre a quantidade de água mapeada, aqui utiliza-se o cruzamento com dados coletados *in situ*, como, por exemplo poços (Li et al., 2023), ou estações fluviométricas da ANA (Guimarães & Mendonça, 2021); ainda, valida-se os dados desta pesquisa associando a umidade do solo pelo modelo GLDAS e a precipitação pluviométrica das estações da FUNCME *in situ*.

Os dados nativos de vazão dos poços são disponibilizados em formato *shapefile*, vinculando-se as informações de média de vazão a tabela de atributos dos arquivos. Os dados de precipitação pluviométrica monitorados pela FUNCME foram selecionados para a série histórica de 1993 a 2023, onde foram utilizados os arquivos nativos. Os dados foram calculados em relação à média aritmética por ano, utilizando as unidades de (mm/ano), onde para isso, foi realizado o agrupado dos períodos em relação aos meses e anos. Os dados geológicos da CPRM foram recortados para as áreas de interesse e classificados segundo suas respectivas unidades litológicas.

Todos os dados foram recortados para três áreas distintas, sendo-as, o recorte do núcleo I nas seguintes dimensões em latitude: -3,88° a -4,02° e longitude -39,72° a -39,83° núcleo II: -5,09° a -5,18° em latitude e -38,52° a -38,60° em longitude e o núcleo III: -5,77° a 5,84° em latitude e -40,06° a -40,22° em longitude.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conjunto de sistemas atmosféricos que atuam na região do Nordeste do Brasil se caracterizam pela formação de chuvas com as concentrações que podem ser observadas na Figura 4. De acordo essa figura, a precipitação pluviométrica nos núcleos de desertificação variou

entre 1155 mm/ano a 270 mm/ano, com média de 639 mm/ano para a região.

Na análise da série histórica, não é possível identificar padrões de distribuição de chuvas na região. Entretanto, é possível observar uma irregularidade representativa. Destaca-se que os

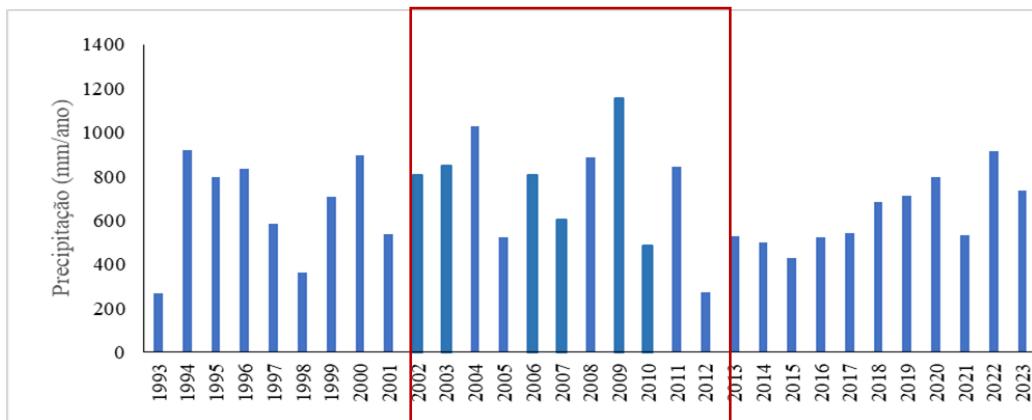


Figura 4 - Média anual da precipitação nos núcleos de desertificação.

anos de 1993, 1998 e 2012 as chuvas foram abaixo de 600 mm/ano, e em contrapartida o período de maior pico foi o ano de 2009 com 1155 mm/ano.

Tal situação influencia não apenas a dinâmica hídrica, mas também a capacidade de recarga dos aquíferos e reservatórios locais.

O período de 2012 a 2015 reflete a ocorrência da última grande seca na região, com variação de 273 mm/ano a 428 mm/ano. Essa situação evi- dencia a característica sazonal da região e reforça a necessidade de investimentos em infraestrutura hídrica para garantir o abastecimento regional e o monitoramento hídrico.

Além disso, as regiões semiáridas apresentam precipitações irregulares e evapotranspiração intensa. No Estado do Ceará essa situação não é diferente, o que caracteriza as limitações de uso dos recursos hídricos superficiais.

Desse modo, nestes ambientes o acesso à água se dá por meio da exploração das águas subterrâneas; com isso em mente, explorou-se o uso dos dados gravimétricos obtidos pela missão GRACE que avaliam a anomalia da água terrestre subterrânea.

Para isso, mapeou-se o total de água armazena- da, a partir dos dados dos satélites GRACE, para detectar as possíveis variações decorrentes da atuação do El Niño na região. O El Niño é um fenômeno atmosférico que interfere na distribuição espacial das chuvas na região e influência na ocorrência de secas que podem ser detectadas pela anomalia terrestre de água subterrânea na Figura 5.

O período de 2002 representa variação repre- sentativa da anomalia terrestre de água subter- rânea para os três núcleos de desertificação do Estado do Ceará. Destaque pode ser dado ao núcleo de desertificação II, que apresentou uma anomalia de -23 cm de água terrestre na região: dado alarmante.

Por outro lado, o período de 2003 variou para o núcleo III na estação chuvosa, diferente do período de 2002. O período seco, apresentou variação do núcleo II, o que sugere que a região demandou maior exploração de água subterrânea com variação de 15 cm a -20 cm, totalizando -5 cm no período.

No período chuvoso, observa-se uma concentração de anomalia terrestre de água subterrânea na região noroeste do Ceará, especialmente entre o planalto da Ibiapaba e as bordas leste da bacia hidrográfica do rio Parnaíba.

Já na região central e centro-sul do Estado, a variação é de 6 cm a -20 cm, o que interfere no processo de recarga dos aquíferos da bacia do Atlântico Nordeste Brasileiro.

Outra ocorrência do El Niño é o período de 2006 a 2007 (Figura 6) onde é possível iden- tificar os efeitos mais intensos na região, levando a uma ocorrência de secas severas. Situação que influência no processo de gestão de recursos hídricos na região e na exploração das águas subterrâneas. O período de 2006 representa uma concentração maior de anomalia terrestre de água subterrânea para o período chuvoso alcançando 18 cm de máximo e o mínimo de -11 cm, indicando uma seca severa na região. Ainda na (Figura 6), no ano de 2007 identifica a ocorrência de seca na região no núcleo III. Para o período chuvoso na região foi considerado situação anormal com redução de -4 cm, com uma maior variação para o período seco do mesmo ano. Por exemplo, a variação de anomalia terrestre de água subterrânea chegou a -11 cm no período seco. A Figura 7 representa a ocorrência do El Niño no período de 2009 a 2010.

Embora o ano de 2009 represente variação de anomalia de água terrestre no período chuvoso de 11 cm a -1 cm, observa-se pelos registros da série temporal da precipitação (Figura 4), que o ano de

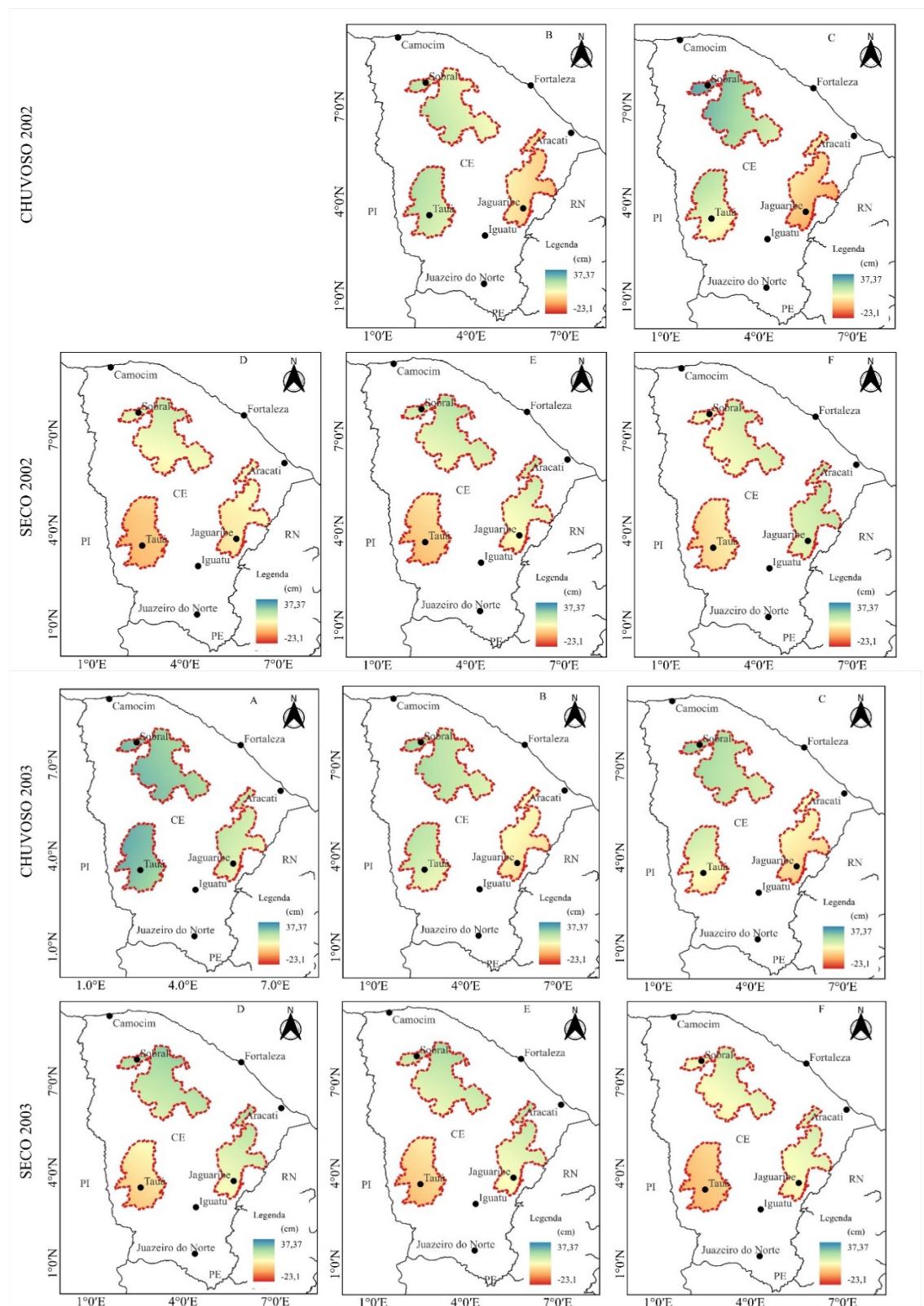


Figura 5 - Total de água armazenada nos períodos chuvosos e secos de 2002 e 2003.

2009 foi o mais chuvoso para a região.

Essa situação favoreceu, por exemplo, recargas dos sistemas aquíferos na região no período seco, com variação de 8 cm a 4 cm nos núcleos de desertificação.

No ano de 2010, a anomalia de água terrestre dos núcleos de desertificação, por exemplo, apontava variação representativa entre os

períodos chuvoso e seco, ou seja, no período chuvoso essa variação chegou a 10 cm.

Tal situação, já indicava uma necessidade de planejamento de uso estratégico da água subterrânea na região. Para visualizar a variação da anomalia de armazenamento total de água terrestre entre os núcleos de desertificação construiu-se a representação da série histórica (Ex. Figura 8). Ao

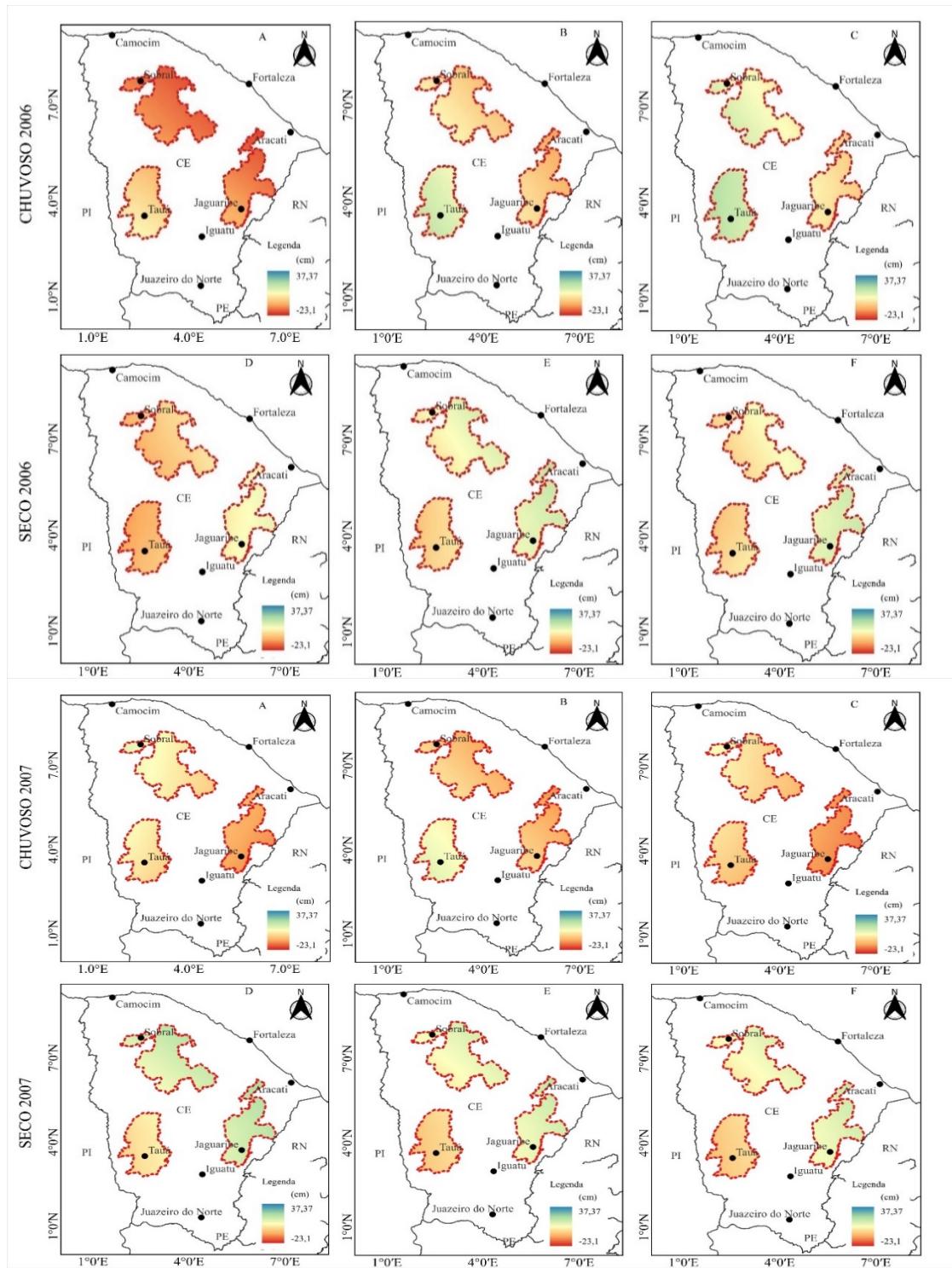


Figura 6 - Total de água armazenada nos períodos chuvosos e secos de 2006 e 2007.

se observar a Figura 8, é possível identificar as relações existentes nos três núcleos de desertificação, que apontam que os anos de 2002 a 2004, 2008 e final de 2012, tiveram secas severas com a atuação do El Niño associada aos ciclos de dois anos.

Do mesmo modo, observa-se a ocorrência do fenômeno nos anos de 2002/3 e 2006/7. A variação da anomalia de água terrestre analisadas entre os períodos chuvoso e seco, indica períodos de recarga de água associada a presença de

chuvas intensas, iniciadas após o fim dos ciclos de atuação do El Niño como, por exemplo, os anos de 2004, 2009 e 2011.

Para validar os dados acima discutidos, compara-se a anomalia de água terrestre TWSA com os dados proveniente da umidade do solo pelo modelo GLDAS na (Figura 9).

Na Figura 9, é possível ratificar que os três núcleos de desertificação possuem relação semelhante entre si, entretanto, observa-se uma diferença do núcleo III em relação aos demais núcleos.

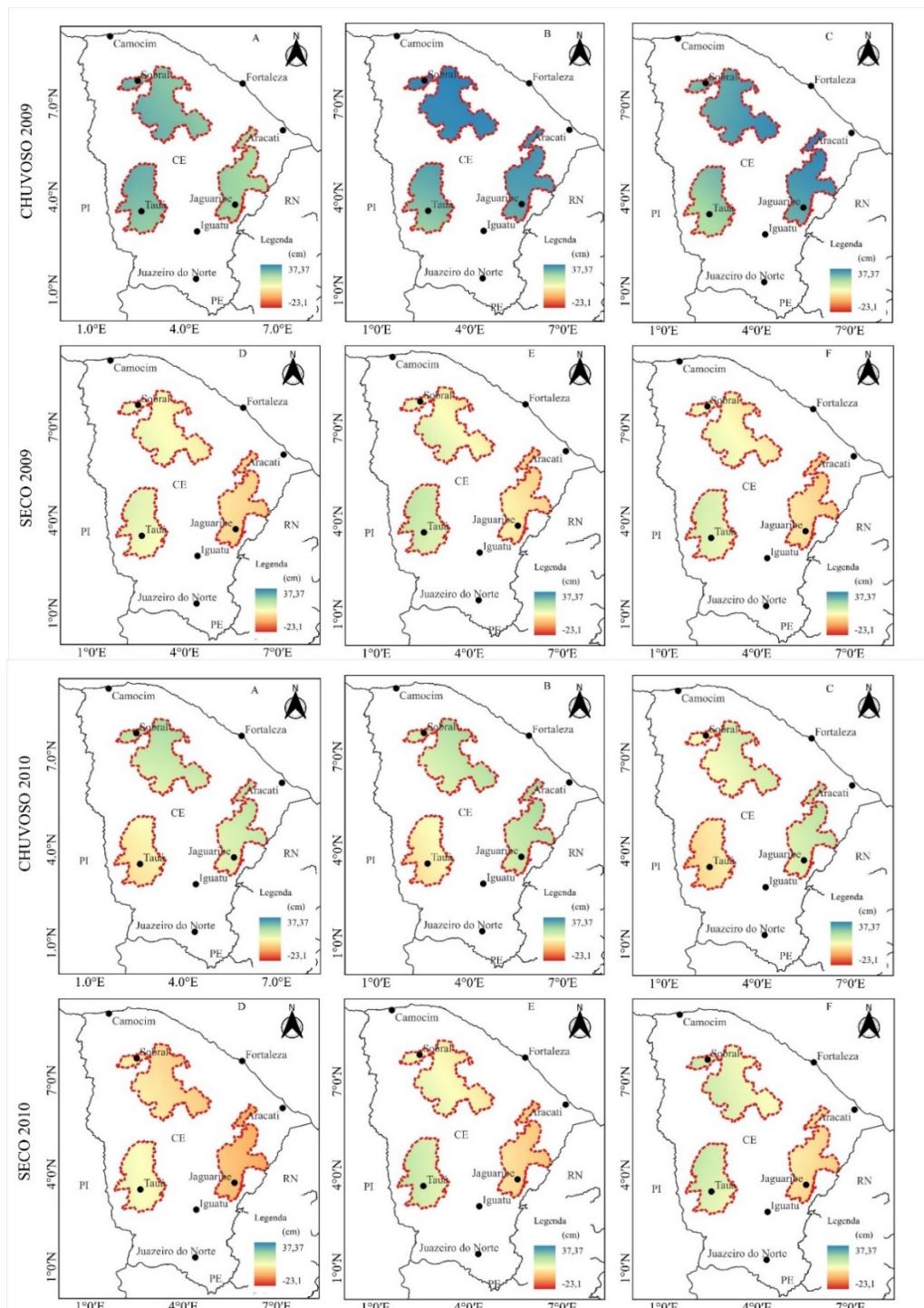


Figura 7 - Total de água armazenada nos períodos chuvosos e secos de 2009 e 2010.

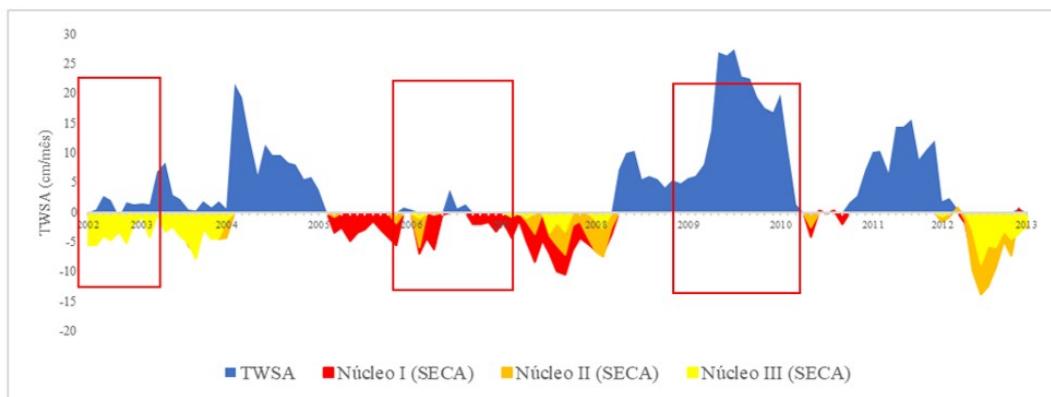


Figura 8 - Atuação do El Niño sobre a anomalia de armazenamento total de água.

Para validar os dados acima discutidos, compara-se a anomalia de água terrestre TWSA

com os dados proveniente da umidade do solo pelo modelo GLDAS na (Figura 9).

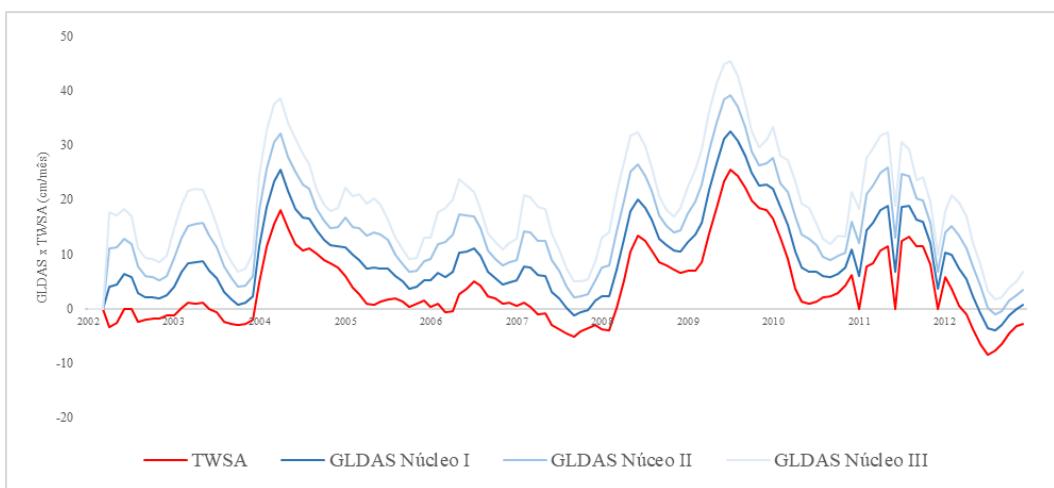


Figura 9 - Umidade superficial do solo versus anomalia total de água terrestre.

Na Figura 9, é possível ratificar que os três núcleos de desertificação possuem relação semelhante entre si, entretanto, observa-se uma diferença do núcleo III em relação aos demais núcleos. Isso de dá em função das características físicas dos solos, como estrutura, mineralogia, granulometria e o tipo de uso e cobertura da terra.

Deste modo, vale ressaltar que a umidade do solo, caracteriza-se como importante componente

do modelo hidrológico da terra em relação a análise de umidade disponível na região, uma vez que se vincula a porosidade e as características físicas dos solos na região, como sua textura e estrutura. Igualmente, observou-se a relação entre a anomalia terrestre de água subterrânea e a precipitação acumulada ao longo dos núcleos de desertificação, conforme se representa na Figura 10.

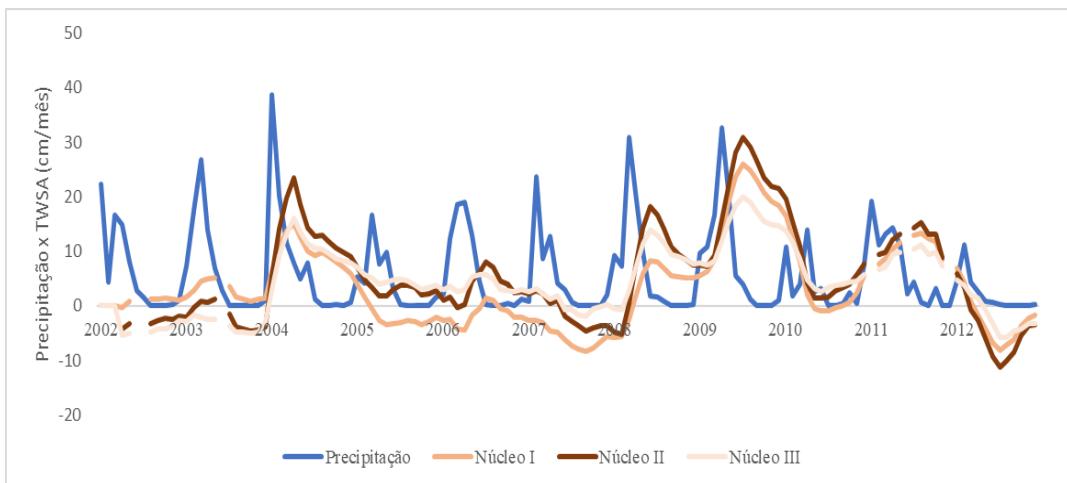


Figura 10 - Anomalia terrestre de água subterrânea e precipitação pluviométrica.

A variação de anomalia terrestre de água subterrânea da missão GRACE em relação à média da precipitação acumulada indica uma correspondência, observados os recortes dos núcleos de desertificação.

Destaca-se que o núcleo I apresentou uma redução de precipitação em 2005, 2007 e 2010, o que indica a atuação do El Niño. No entanto, a resposta hidrológica, representada pela TWSA, não foi imediata, o que indica uma possível defasagem temporal entre os eventos de chuva e

a recarga efetiva da superfície terrestre para a região, já que o sensor possui uma resolução temporal de 30 dias; deve-se considerar, ainda, o tempo de percolação.

Essa defasagem sugere que fatores como a litologia e a estrutura geológica de cada núcleo exercem influência direta na capacidade de infiltração e armazenamento da água.

Em regiões onde predominam formações menos permeáveis ou com baixa condutividade hidráulica, a precipitação tem menor eficiência

na recarga subterrânea, resultando em TWSA atrasado. Assim, a variabilidade espaço-temporal entre a chuva e a anomalia de armazenamento de água reflete não apenas o impacto climático, mas também as particularidades geológicas e pedológicas de cada sítio estudado.

Para os núcleos de desertificação II e III, a resposta da anomalia terrestre de água subterrânea em relação a precipitação foi semelhante, para os anos de 2003, 2008 e 2012, diferente do comportamento da variação da precipitação para

os anos em questão.

Outro fator relevante é a presença ou ausência de estruturas hídricas, como açudes e aquíferos profundos, que podem interferir nesta relação.

Deste modo, vale ressaltar que a umidade do solo se caracteriza como importante componente do modelo hidrológico da terra em relação a análise de umidade disponível na região, uma vez que se vincula a porosidade e as características físicas dos solos na região, como sua textura e estrutura, conforme apresentado na Figura 11.

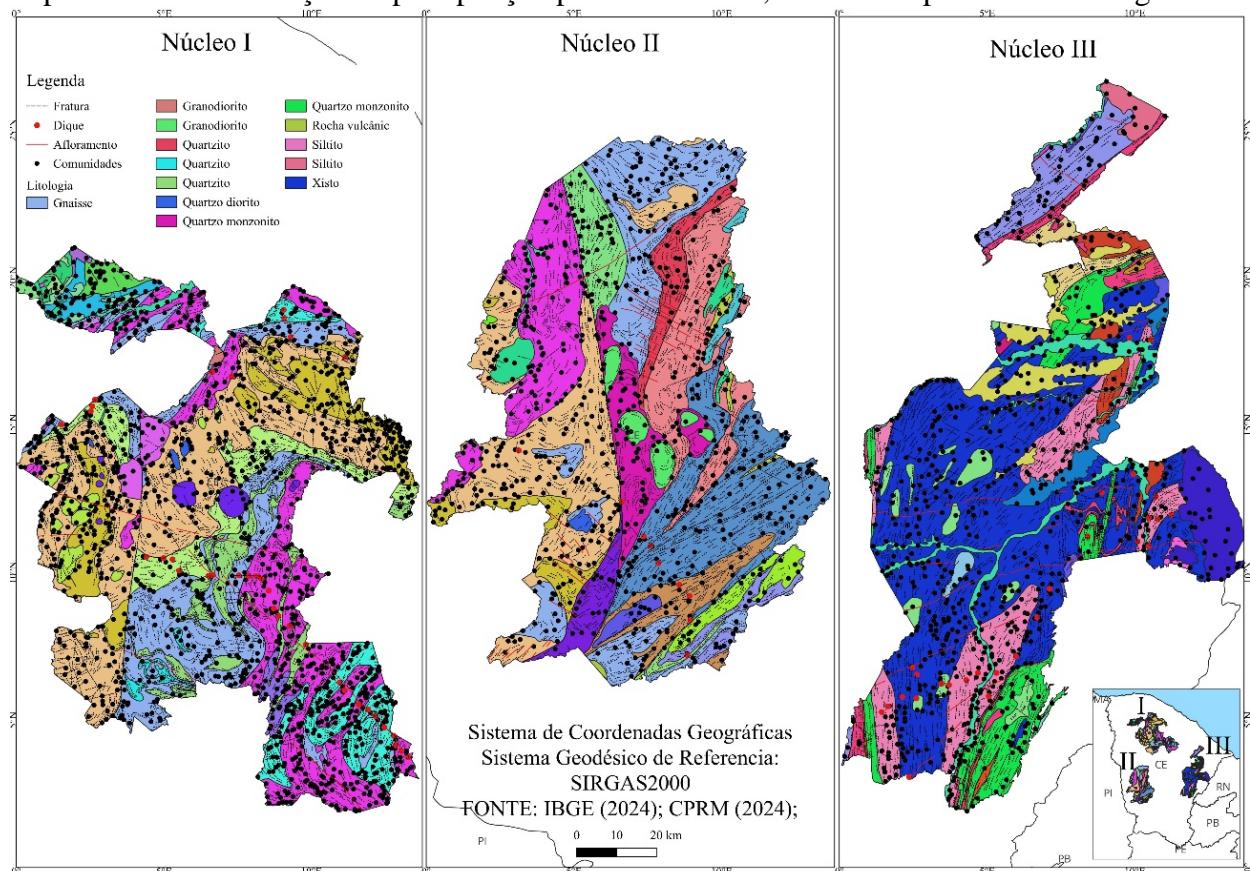


Figura 11 - Litoestratigrafia dos Núcleos de Desertificação

O Estado do Ceará possui conjunto litológico formado por estruturas de embasamento cristalinos e sedimentares. Nos núcleos de desertificação predominam a formação cristalina – cerca de 98% da área. Nessa região, a quantidade de água subterrânea se associa à presença de diques e fraturas em afloramentos rochosos (Souza Filho et al., 2002). Nestas condições o acesso a água na região se dá por poços perfurados em média com 70 a 150 m de profundidade.

A relação litoestratigráfica da região permite associar, por exemplo, como a condição geológica influencia no comportamento de armazenamento da água na região. Para isso, identificou-se que a relação de vazão maior que 7 mil m³/s, nas áreas de núcleo I, II e III, estava

associada à presença de fraturas em terrenos sedimentares. Por outro lado, observa-se que vazões menores do que 2800 mil m³/s, estão associadas a terrenos com estruturas cristalinas com rochas do tipo Quartzito.

Outra característica predominante é a concentração de sais minerais, como ferro e o cálcio, presentes nas rochas influenciam na formação de águas salobras na região (Silva et al., 2007; Braga et al., 2021), geralmente inapropriada para consumo humano. Essa situação fez com que o governo local investisse no processo de dessalinização da água na região por meio do Programa Água Doce da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH, 2025), para fortalecer estratégias da segurança hídrica para comunidades rurais difusas.

Em paralelo, no que tange à ocupação dos Núcleos de Desertificação pelas comunidades rurais, observa-se que a dispersão espacial das comunidades na região sugere a necessidade de implementar estratégias alternativas de acesso à água, como a construção de cisternas, pequenos açudes e o uso de carros-pipa para as comunidades rurais isoladas; i.e., observa-se que é

necessário investir em infraestrutura hídrica descentralizada.

A Figura 12 apresenta a relação da vazão dos poços na região. Com esses dados é possível declarar que os núcleos de desertificação I, II e III são ambientes sensíveis ao processo de oferta de água, sendo necessário a captação de água por meio de poços tubulares.

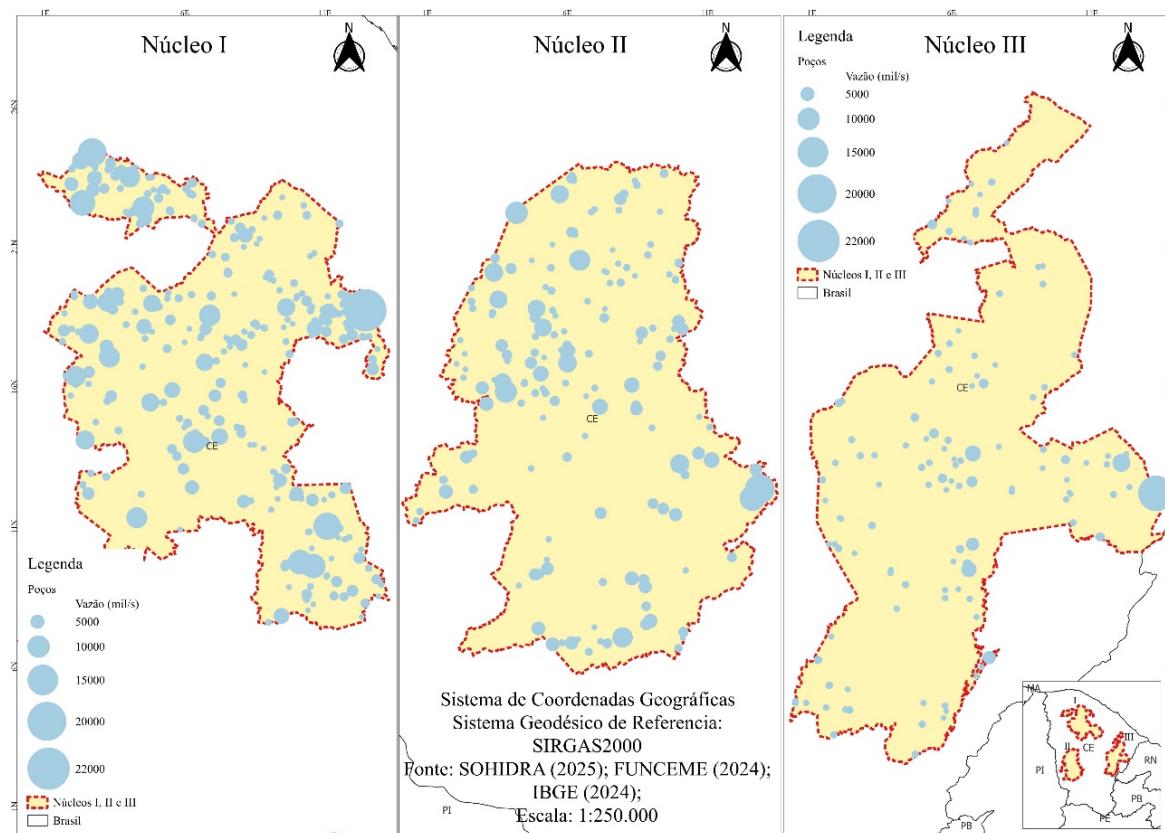


Figura 12 - Vazão dos poços ao longo dos Núcleos de Desertificação.

Esse processo ocorre através do poder público ou pela iniciativa privada. No núcleo de desertificação I existem 719 poços perfurados e, destes, 243 são poços secos, outros 473 são poços com vazão que variam de 100 m³/s a 22000 m³/s. Para melhor compreender a distribuição espacial da disponibilidade hídrica na região, realizou o agrupamento de cinco classes, sendo a primeira de 100 a 1250 m³/s, de 1250 a 2800 m³/s, 2800 a 5800 m³/s, 5800 a 10000 m³/s, 10000 a 22000 m³/s.

No núcleo de desertificação II, são 476 poços, dos quais 182 estavam com vazão seca. Desses, a variação ocorre de 0 a 14500 m³, distribuídos em cinco classes, sendo, a primeira de 100 a 1500 m³/s, a segunda com 1500 a 3300 m³/s, a terceira de 3300 a 6100 m³/s, e a quarta de 6100 a 10200 m³/s e quinta de 10200 a 14400 m³/s.

O núcleo de desertificação III, contém 292 poços, sendo que, destes 130 são poços secos e 162 poços que variam sua vazão de 100 a 18000

m³/s. Os poços foram agrupados em cinco classes, sendo a primeira classe de 100 a 1250 m³/s, a segunda classe de 1250 a 3012 m³/s, a terceira classe de 3012 a 6200 m³/s, a quarta classe 6200 a 11820 m³/s e a quinta classe de 11820 a 18000 m³/s.

Para analisar a correção da vazão com a disponibilidade hídrica da região na Tabela 3 apresenta-se a estatística descritiva dos dados de vazão para os poços em cada um dos núcleos.

Assim, observa-se que o núcleo I, além de concentrar a maior quantidade de habitantes, também concentra a maior quantidade de poços; observa-se que as comunidades possuem a maior oferta de disponibilidade hídrica extraída do subsolo, com a soma de 102664 m³/s de vazão. A região mais sensível ao acesso à água é o núcleo III, onde além de ter a menor disponibilidade hídrica com 318800 m³/s de vazão, também tem a menor quantidade de poços perfurado na região.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos núcleos de desertificação.

Núcleos	I	II	III
Total	449 poços	294 poços	162 poços
Soma	102664 m ³ /s	764043 m ³ /s	318800 m ³ /s
Média	2189 m ³ /s	2598 m ³ /s	1967 m ³ /s
Mediana	1380 m ³ /s	1550 m ³ /s	1000 m ³ /s
Mínimo	1 m ³ /s	100 m ³ /s	1 m ³ /s
Máximo	22000 m ³ /s	14400 m ³ /s	18000 m ³ /s
Intervalo	21999 m ³ /s	14300 m ³ /s	17999 m ³ /s

De toda forma, ao somar a extração total de cada núcleo é possível identificar uma extração de 1185507 m³/s de vazão anual na região,

DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A perfuração de poços para acesso à água é uma das infraestruturas hídricas mais utilizada no mundo. Entretanto, essa tecnologia apresenta limitações. Assim, delimitar áreas propensas a disponibilidade hídrica subterrânea é um dos principais desafios da comunidade científica mundial (Uc Castillo et al., 2022).

Os estudos de sondagem e prospecção de água envolve diferentes técnicas e devem beneficiar especialmente as regiões semiáridas (Pinéo et al., 2013), ao mesmo tempo que sua aplicação em grandes áreas são onerosas, destacam Khodaei & Nassery (2013). Entretanto, são estratégias necessárias principalmente por determinar locais mais adequado a perfuração de poços conforme (Zheng et al., 2024).

Desta forma, o mapeamento de áreas propensas a instalação de tecnologias hídricas tem se destacado nos últimos anos como estratégia necessária a disponibilidade hídrica conforme indicam Patel & Chaudhari (2023) e Abdelkareem et al. (2023).

Observa-se, a partir das duas últimas décadas, avanços da comunidade científica em relação a prospecção de água terrestre em estudos utilizando a missão GRACE (Getirana et al., 2020), sobretudo, em aplicações baseadas em Inteligência Artificial (IA) para monitorar níveis de água em aquíferos no Brasil (Camacho et al., 2023).

Apesar dos avanços proporcionados pela missão GRACE na compreensão das dinâmicas hidrológicas globais e regionais, ainda persistem duas limitações importantes. A primeira refere-se ao vácuo temporal de dados ocorrido entre a desativação da missão GRACE, em 2017, e o

situação que reforça a importância do acompanhamento de estratégias e soluções para o estabelecimento da segurança hídrica local.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

início de sua missão sucessora, a GRACE-Follow-On (GRACE-FO), lançada apenas em abril de 2018 (Alghafli et al., 2023). Esse intervalo representa uma lacuna crítica em séries temporais contínuas, especialmente para análises de tendência e eventos extremos.

A segunda limitação diz respeito à resolução espacial da missão, que é de aproximadamente 300 km x 300 km, o equivalente a cerca de 90.000 km² (Sarkar et al., 2020). Essa baixa resolução dificulta aplicações em escalas mais finas, como estudos em bacias hidrográficas de pequena extensão ou núcleos de desertificação muito localizados, exigindo o uso de técnicas complementares ou dados auxiliares para análises mais detalhadas.

Com as limitações dos satélites GRACE, os desafios do monitoramento da água subterrânea se torna desafiador, pois afeta a gestão dos recursos hídricos em relação ao conhecimento do nível de água armazenada em *in situ*, atingindo as comunidades rurais isoladas.

Essa situação pode ser convertida com o monitoramento contínuo do nível dinâmico e estático da água nos poços por meio do sensor datalogger, principalmente nas comunidades que dependem dos poços como alternativa emergencial de acesso à água em períodos de secas severas nas regiões semiáridas.

Aliado a isso, vale ressaltar que a ausência de informações cronológicas *in situ* dos poços, como, por exemplo, o nível estático e dinâmico da água, prejudica o processo de validação dos dados para informações pontuais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As regiões semiáridas são ambientes sensíveis a disponibilidade hídrica, principalmente pelas condições de seca extrema e escassez hídrica. Além disso, são ambientes naturalmente suscep-

tíveis ao processo de expansão de suas áreas de desertificação, por um conjunto de ações de uso e ocupação da terra, intensificado pelos fatores ambientais e climáticos.

Ademais, as secas severas afetam de forma relevante as comunidades rurais ao longo dos núcleos de desertificação, que exploram água subterrânea de forma desordenada na região. Entretanto, embora seja extraído cerca de 1.185.507,00 cm³/ano, ainda permanece o desafio da seca, que exige estratégias eficazes de gestão hídrica na região.

A estrutura litológica associada à perfuração de poços na região contribui para mitigar os efeitos da seca. No entanto, é necessário avaliar de forma imediata o rebaixamento do nível de água subterrânea, a fim de assegurar a segurança hídrica regional.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia – UFU/MG. A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. A Superintendência de Obras Hidráulicas – SOHIDRA.

REFERÊNCIAS

- ABDELKAREEM, M.; MANSOUR, A.M.; AKAWY, A. Delineating the Potential Areas of Rainwater Harvesting in Arid Regions Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Water*, v15, n. 20: 3592. 2023. <https://doi.org/10.3390/w15203592>
- ALGHAFLI, K.; SHI, X.; SLOAN, W.; SHAMSUDDUHA, M.; TANG, Q.; SEFELNASR, A.; EBRAHEEM, A.A. Groundwater recharge estimation using in-situ and GRACE observations in the eastern region of the United Arab Emirates. *Science of the Total Environment*, p. 867, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161489>
- ALMALKI, R.; KHAKI, M.; SACO, P.M.; RODRIGUEZ, J.F. Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review. *Remote Sensing*, 14, n. 20, p. 5143, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14205143>
- ALVES MEIRA, S.; DA SILVA MARINHO, A.; DA SILVA, E.V. Fator Solo em núcleos de Desertificação no Estado do Ceará, Brasil. *Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)*, v. 21, n. 2, p. 227–240, 2019. DOI: 10.35701/rcls.v21n2.464.
- ANDRADE, T.S.; MONTENEGRO, S.M.G.; MONTENEGRO, A.A.A.; RODRIGUES, D.F.B. Estimation of alluvial recharge in the semiarid. *Scientific Papers Eng. Agríc.*, v. 34, n. 2, p. 211-221, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-6916201400000003>
- BARBOSA, T.C.S. & OLIVEIRA, V.P.V. Áreas suscetíveis à desertificação no Ceará: aspectos ambientais dos municípios de Tauá - CE e Irauçuba - CE. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 7, p. 52330-52349, 2022. DOI:10.34117/bjdv8n7-243
- BHERING, A.P.; ANTUNES, I.M.H.R.; MARQUES, E.A.G.; PAULA, R.S. Geological and hydrogeological review of a semi-arid region with conflicts to water availability (southeastern Brazil). *Environmental Research*, v. 202, p. 111756, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111756>
- BIERKENS, M.F.P. & WADA, Y. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Environ. Res.*, v. 14, p. 0630022019, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f>
- BRAGA, E.A.S.; AQUINO, M.D.; ROCHA, C.M.S.; SANTOS MENDES, L.S.A.; SANTOS SILVA, R.F. Classificação da água subterrânea para uso na irrigação - *Estudos de Caso e Notas Técnicas*, v. 34, n. 3, 2021. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i3.29967>
- CAMACHO, C.R.; GETIRANA, A.; ROTUNNO, O.C.; E MOURÃO, M.A.A. Large-Scale Groundwater Monitoring in Brazil Assisted With Satellite-Based Artificial Intelligence Techniques. *Water Resources Research*, v. 59, n. 9, p. e2022WR033588, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022WR033588>
- CAVALCANTE JÚNIOR, R.G.; VASCONCELOS FREITAS, M.A.; FIDELIS DA SILVA, N.; AZEVEDO FILHO, F.R. Sustainable groundwater exploitation aiming at the reduction of water vulnerability in the Brazilian semi-arid region. *Energies*, v. 12, 904; 2019. doi:10.3390/en12050904
- CHEN, J.; CAZENAVE, A.; DAHLE, C.; LIOVEL, W.; PANET, I.; PFEFFER, J.; MOREIRA, L. Applications and Challenges of GRACE and GRACE Follow-On Satellite Gravimetry. *Surv Geophys*, v. 43, p. 305–345, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09685-x>
- COOK, C. & BAKKERB, K. Water security: Debating an emerging paradigm, *Global Environmental Change*, v. 22, n. 1, p. 94-102, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011>
- COSGROVE, W.J. & LOUCKS, D.P. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, v. 51, n. 6., p. 4823-4839, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>
- CUNHA, S.R. *Estimativa da evapotranspiração a partir dos satélites GRACE*. Uberlândia, 2021. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.505>
- FERREIRA, A.G. & MELLO, N.S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, 2005.
- FERREIRA, V.; YONG, B.; MONTECINO, H.; NDEHEDEHE, C. E.; SEITZ, K.; KUTTERER, H.; YANG, K. Estimating GRACE terrestrial water storage anomaly using an improved point mass solution. *Sci*, v. 10, n. 10, p 234, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02122-1>
- FERREIRA, VG; NDEHEDEHE, CE; MONTECINO, HC; YONG, B.; YUAN, P.; ABDALLA, A.; MOHAMMED, AS. Perspectivas para a Imagem do Armazenamento de Água Terrestre na América do Sul Utilizando Observações Diárias de GPS. *Remote Sens*, v. 11, p. 679, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11060679>

Assim, os resultados apresentados reforçam os objetivos deste estudo, que buscou compreender a relação entre a variabilidade climática (especialmente a influência do fenômeno El Niño), a dinâmica do armazenamento terrestre de água observada pelas missões GRACE e GRACE-FO, e a realidade hidrogeológica dos núcleos de desertificação no Ceará.

Por fim, os achados evidenciam a necessidade de políticas públicas direcionadas à segurança hídrica, com base em dados integrados entre precipitação pluviométrica, umidade do solo e anomalia de armazenamento subterrâneo, considerando as particularidades geológicas de cada localidade.

- FERREIRA, V.C.; MONTECINO, H.C.; NDEHEDEHE, C.E.; HECK, B.; GONG, Z.; DE FREITAS, S.R.; WESTERHAUS, M. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 644, n. 7, p. 256-273, 2018.
- FOROUMANDI, E.; NOURANI, V.; HUANG, J.J.; MORADKHANI, H. Drought monitoring by downscaling GRACE-derived terrestrial water storage anomalies: A deep learning approach. *Journal of Hydrology*, v. 616, p. 128838, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128838>.
- FOSTER, S. & VAN DER GUN, J. Groundwater Governance: key challenges in applying the Global Framework for Action. *Hydrogeol J.*, v. 24, p. 749–752, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1376-0>
- FRAPPART, F. & RAMILLIEN, G. Monitoring Groundwater Storage Changes Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A Review. *Remote Sens.*, v. 10, n. 6, p. 829, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060829>
- GETIRANA A.; RODELL, M.; KUMAR. S.; BEAUDOING, H. K.; ARSENAULT, K.; ZAITCHIK, B.; SAVE, H.; BETTADPUR, S. GRACE improves seasonal groundwater forecast initialization over the U.S. *Journal of Hydrometeorology*, v. 21, n. 1, p. 59-71, 2020. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0096.1>
- GETIRANA, A.S.; KUMAR, M.; GIROTTI, RODELL, M. Rivers and floodplains as key components of global terrestrial water storage variability. *Geophys. Res. Lett.*, v. 44, p. 10359-10368, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017GL074684>
- GONÇALVES, R.D.; STOLLBERG, R.; WEISS, H.; CHANG, H.K. Using GRACE to Quantify the Depletion of Terrestrial Water Storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. *Science of The Total Environment*, v. 705, p. 135845, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135845>
- GONÇALVES, R.D.; STOLLBERG, R.; WEISS, H.; CHANG, H. K. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. *Science of The Total Environment*, v. 705, p. 135845, 2020. ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135845>
- GUIMARÃES, Gabriel do Nascimento; MENDONÇA, Leônidas Rodrigues. Análise da variação da crosta terrestre devido às mudanças sazonais de massa d'água no estado de Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 2, p. e-29997, 2021. DOI: 10.14295/ras.v35i2.29997.
- HETTIARACHCHI, S.; WASKO, C.; SHARMA, A. Do Longer dry spells associated with warmer years compound the stress on global water resources? *Earth's Future*, v. 10, n. 2, p. e2021EF002392, 2022. <https://doi.org/10.1029/2021EF002392>
- HOLANDA BASTOS, F.; CORDEIRO, A.M.N. Geomorphological Properties of the Rocks and Their Repercussions in the Relief of the North Sector In Brazilian Northeast Region. *William Morris Davis*, v. 2, n. 1, p. 1–33, 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. *Cidades e Estados*. Disp. [<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/sobral.html>]. Acesso em 18 fev 2025.
- INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. IPECE. *Caracterização Ambiental: Meio Ambiente*. Disp.: [<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12.htm>]. Acesso em 18 de fev 2025.
- JEPSON, W.E.; WUTICH, A.; HARRIS, L.M. Water-security capabilities and the human right to water. *Water Politics*, p. 84-98, 2019. DOI:10.4324/9780429453571-7
- KHODAEI, K. & NASSERY, H. R. Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh, Northwest of Iran). *Arab J Geosci*, v. 6, p. 1229–1240, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0414-4>
- KUNDZEWICZ, Z.W.; MATA, L.J.; ARNELL, N.W.; DÖLL, P.; JIMENEZ, B.; MILLER, K.; OKI, T.; SEN, Z.; SHIKLOMANOV, E. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrolog. Sci.*, v. 53, n. 1, p. 3-10. 2008 Disp. em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1623/hysj.53.1.3?src=getfr> Acesso em: 30 maio 2024
- KUNWAR, G.; SAHARIA, M.; GETIRANA, A.; PANDEY, A. Detection and socio-economic attribution of groundwater depletion in India. *Hydrogeology Journal*, v 32, p. 1801–1815, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02842-7>
- LI, P., ZHA, Y., TSO, C.H.M. Reconstructing GRACE-derived terrestrial water storage anomalies with in-situ groundwater level measurements and meteorological forcing data. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 50, p. 101528, 2023. ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101528>
- MASOUD, A.M.; PHAM, Q.B.; ALEZABAWY, A.K.; EL-MAGD, S.A.A. Efficiency of Geospatial Technology and Multi-Criteria Decision Analysis for Groundwater Potential Mapping in a Semi-Arid Region. *Water (Switzerland)*, v. 14v6. 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060882>
- MELATI, M.D.; FLEISCHMANN, A.S.; FÂ, F.M.; PAIVA, R.C.D.; E ATHAYDE, G.B. Estimates of groundwater depletion under extreme drought in the Brazilian semiarid region using GRACE satellite data: application for a small-scale aquifer. *Hydrogeol J*, v. 27, p. 2789–2802, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02065-1>
- MIRDASHTVAN, M.; NAJAFINEJAD, A.; MALEKIAN, A.; SA'DODDIN, A. Sustainable Water Supply and Demand Management in Semi-arid Regions: Optimizing Water Resources Allocation Based on RCPs Scenarios. *Water Resour Manage*, v. 35, p. 5307–5324, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03004-0>
- MISHRA, S.; GHOSH, A.; RAI, K.; JAISWAL, B.; YADAV, D.S.; AGRAWAL, M.; AGRAWAL, S.B. Dimensions Of Climate Change And Its Consequences On Ecosystem Functioning, Editor(S): Suruchi Singh, Pardeep Singh, S. Rangabhashiyam, K.K. Srivastava, *Global Climate Change*, Elsevier, p. 109-149, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822928-6.00003-4>
- MONTECINO, H.D.; PONTES, J.I.; GONÇALVES, R.M. ET AL. The relation between vertical crustal deformation and hydrological changes in the São Francisco River basin from 2014 to 2024. *Earth Sci Inform*, v. 18, n. 444, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01908-8>
- MORO, M.F.; MACEDO, M.B.; MOURA-FÉ, M.; CASTRO, A.S.F.; COSTA, R.C. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidades paisagística do Estado do Ceará. *Rodriguésia*, v. 66, n. 3, p. 717-743, 2015 <https://doi.org/10.1590/2175-7860201566305>
- MSELI, Z. H.; SAID, A.; SANKARANNA, G.; MWEGOHA, W.J. The Sustainability of groundwater in semi-arid regions: the case of Makutupora Basin in Tanzania. *AQUA Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, v. 72, n. 9, p. 1731, 2023. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.056>
- MUSSA, KR.; MJEMAH, I.C.; E MACHUNDA, R.L. Open-Source Software Application for Hydrogeological Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones in the Singida Semi-Arid, Fractured Aquifer, Central Tanzania. *Hydrology*, v. 7, n. 28, p. 28, 2020. <https://doi.org/10.3390/hydrology7020028>
- NOBRE, P. & SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSSTW>2.0.CO;2)
- PATEL, A.; CHAUDHARI, N. Enhancing water security through site selection of water harvesting structures in semi-arid regions: a GIS-based multiple criteria decision analysis. *Water Supply*, p. 23, n. 10, p. 4149–4165, 2023. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.257>
- PEULVAST, J. P.; SALES, V. C. Stepped surfaces and palaeolandforms in the northern Brazilian «Nordeste»:

- constraints on models of morphotectonic evolution. **Geomorphology**, v. 62, n. 1-2, p. 89-122, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.02.006>.
- PINEO, T.R.G.; CASTELO BRANCO, R.M.G.; CUNHA, L.S.; SOUZA, M.L. Airborne and ground geophysics applied to groundwater prospection in hard rocks in Irauçuba, Ceará State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n. 4, p. 699-709, 2013. DOI:10.22564/rbgf.v31i4.347
- RIVERA-MARIN, D.; DASH, J.; E OGUTU, B. The use of remote sensing for desertification studies: A review, **Journal of Arid Environments**, v. 206, p. 104829, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104829>
- ROSENHAIM, T.L. **Observações da missão Grace aplicadas ao monitoramento do armazenamento d'água na região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental** 2017. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2017. Disp. em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25180> :Acesso em 10 de nov de 2024.
- SARDANS, J.; MIRALLES, A.; TARIQ, A.; ZENG, F.; WANG, R.; PEÑUELAS, J. Growing aridity poses threats to global land surface. **Commun Earth Environ**, v. 5, p. 776, 2024. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01935-1>
- SARKAR, T.; KANNAUJIYA, S.; TALOOR, A. K.; RAY, C. P. K.; CHAUHAN, P. Integrated study of GRACE data derived interannual groundwater storage variability over water stressed Indian regions. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, p. 100376, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100376>
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ. **Programa Água Doce. 2025.** <https://www.srh.ce.gov.br/programa-agua-doce-pad/>
- SHAYANMEHR, S.; PORHAJAŠOVÁ, J.; BABOŠOVÁ, M.; SABOONI, M.S.; MOHAMMADI, H.; HENNEBERRY, S. R.; FOROUSHANI, N. S. The impacts of climate change on water resources and crop production in an arid region. **Agriculture**, v. 12, n. 7, p. 1056, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071056>
- SILVA, F.J.A.; ARAÚJO, A.L.; SOUZA, R.O. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 28, n. 2, p. 136-159, 2007.
- SINGH, P. K; CHUDASAMA, H. Pathways for climate change adaptations in arid and semi-arid regions. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, n. 124744, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124744>
- SINGHAL, A.; GRUPTA, R.; SINGH, N. A.; SRINIVAS, A. Assessment and monitoring of groundwater quality in semi-arid region. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, p. 1003812020, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100381>
- SOOD, A.; SMAKHTIN, V. Global hydrological models: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 4, p. 549-565, 2015. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.950580>
- SOUZA FILHO, A.O.S.; VERÍSSIMO, L.S.; FEITOSA, F.A.C. Dados Lito-Estruturais e Hidrogeológicos da área de detalhe de Juá - Município de Irauçuba Estado Do Ceará; Brasil. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2002. Disp. em: <https://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/view/22554>. Acesso em: 27 set. 2025.
- SOUZA, E. B.; NEPOMUCENO, F. A. A.; SANTOS, F. D. S.; ARAÚJO, F. F.; NEPOMUCENO, I. V.; PAULA, A. S.; AMORIM, V. O.; BRANCO, M. S. D.; RABELO, S. T.; PINTO, D. M. M.; NASCIMENTO, J. B. S.; MORO, M. F. Flora and physiognomy of Caatinga vegetation over crystalline bedrock in the northern Caatinga domain, Brazil. **Rodriguésia**, v. 73, p. e01252021, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2175-7860202273109>
- STRINGER, L.C.; MIRZABAEV, A.; BENJAMINSEN, T.A.; HARRIS, R.M.B.; TABEA, M.J.; LISSNER, K.; STEVENS, N.; PAHLEN, C. Climate change impacts on water security in global drylands. **One Earth**, v. 4, n. 6, p 851-864, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.010>
- SULIMAN, M.; SAMIULLAH, ALI, M. Identification of potential groundwater recharge sitein a semi-arid region of pakistan using saaty's analytical hierarchical process (Ahp). **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 16, n. 1, p. 53-70, 2022. <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.1.53>
- TSUYUGUCHI, B.B.; MORGAN, E.A.; RÊGO, J.C.; GALVÃO, C. O. Governance of alluvial aquifers and community participation: a social-ecological systems analysis of the Brazilian semi-arid region. **Hydrogeol J.**, v 28, p. 1539-1552, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02160-8>
- UC CASTILLO, J.L.; MARTÍNEZ CRUZ, D.A.; RAMOS LEAL, J.A.; TUXPAN VARGAS, J.; RODRÍGUEZ TAPIA, S.A.; MARÍN CELESTINO, A.E. Delineation of Groundwater Potential Zones (GWPZs) in a Semi-Arid Basin through Remote Sensing, GIS, and AHP Approaches. **Water**, v. 14, n. 13, p. 2138, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14132138>
- VANHAM, D.; ALFIERI, L.; FLÖRKE, M.; GRIMALDI, S.; LORINI, V.; ROO, A; FEYEN, L. The number of people exposed to water stress in relation to how much water is reserved for the environment: a global modelling study. **The Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 11, p. e766-e774, 2021. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00234-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00234-5)
- VÖRÖSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R. B. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. **Science**, v. 289, p. 284-288, 2000. DOI:10.1126/science.289.5477.284
- VÖRÖSMARTY, C. J.; STEWART-KOSTER, B.; GREEN, P. A.; BOONE, E. L.; FLÖRKE, M.; FISCHER, G.; WIBERG, D. A.; BUNN, S. E.; BHADURI, A.; MCINTYRE, P. B.; SADOFF, C.; LIU, H.; STIFEL, D. A green-gray path to global water security and sustainable infrastructure. **Global Environmental Change**, v 70, p. 102344, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102344>.
- ZHENG, Z.; LIU, W.; ZENG, J.; GAN, F.; LU, X. An integrated geophysical approach for ground water prospecting in plateau slope zone: a case study from Shuangnuo Village, Fuyuan, Yunnan Province. **Environ Earth Sci**. v. 83, p. 160, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11452-1>

Submetido em 12 de julho de 2025
Aceito para publicação em 14 de novembro de 2025