



Dinâmica do Armazenamento Hídrico no Sistema Aquífero Urucuia: Uma Abordagem com GRACE, GPM e Google Earth Engine

Dynamics of Water Storage in the Urucuia Aquifer System: An Approach Using GRACE, GPM, and Google Earth Engine

N. M. S. R. Saturnino¹; R. D. Gonçalves^{1,2*}; F. C. Guerra³

¹Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

²Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

³Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 13083-970, Campinas-São Paulo, Brasil

* roger.dias@academico.ufs.br

(Recebido em 13 de julho de 2025; aceito em 17 de setembro de 2025)

A exploração intensiva dos recursos hídricos subterrâneos, impulsionada pela expansão agrícola e pelas mudanças climáticas, gera preocupações sobre a sustentabilidade hídrica de grandes sistemas aquíferos. O monitoramento tradicional *in situ* apresenta desafios, como custos elevados e cobertura irregular de poços, o que dificulta a compreensão da dinâmica de aquíferos em larga escala, de modo que o sensoriamento remoto surge como uma alternativa viável. Este estudo analisou as variações do armazenamento de água subterrânea no Sistema Aquífero Urucuia (SAU) entre 2002 e 2023. Para isso, foram utilizados dados de anomalias do campo gravitacional da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e dados de precipitação do GPM (*Global Precipitation Measurement*), processados na plataforma Google Earth Engine (GEE). Os resultados revelaram uma tendência de declínio no armazenamento hídrico, a uma taxa de $-17,12 \pm 2,92$ mm/ano, e um déficit de $47,9 \pm 8,2$ km³ de água no período analisado. As flutuações sazonais identificadas não foram suficientes para compensar as perdas acumuladas ao longo do tempo, e a precipitação, embora apresente variabilidade espacial e temporal, não demonstrou tendência que justifique tal declínio. A diminuição da água armazenada sugere que a extração intensiva de águas subterrâneas, juntamente com alterações no uso da terra, tem reduzido significativamente a recarga líquida do aquífero. A dependência do SAU para a manutenção do fluxo de base dos afluentes do rio São Francisco ressalta a importância de políticas públicas e do monitoramento contínuo para apoiar estratégias de gestão hídrica em regiões sob forte pressão antrópica, como o MATOPIBA.

Palavras-chave: TWS-GRACE, Rio São Francisco, depleção de aquíferos.

The intensive exploitation of groundwater resources, driven by agricultural expansion and climate change, raises concerns about the water sustainability of large aquifer systems. Traditional *in situ* monitoring presents challenges such as high costs and irregular well coverage, hindering the understanding of aquifer dynamics on a large scale. In this context, remote sensing emerges as a viable alternative. This study analyzed variations in groundwater storage in the Urucuia Aquifer System (UAS) between 2002 and 2023. Gravitational field anomaly data from the GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) mission and precipitation data from the GPM (*Global Precipitation Measurement*) mission were used, processed through the Google Earth Engine (GEE) platform. The results revealed a decreasing trend in water storage at a rate of -17.12 ± 2.92 mm/year and a total water deficit of 47.9 ± 8.2 km³ over the study period. The identified seasonal fluctuations were insufficient to offset the cumulative losses, and precipitation, although variable in space and time, did not show a trend that would explain such a decline. The reduction in stored water suggests that intensive groundwater extraction, along with land use changes, has significantly reduced the aquifer's net recharge. The UAS plays a critical role in maintaining the baseflow of the São Francisco River tributaries, underscoring the importance of public policies and continuous monitoring to support water management strategies in regions under strong anthropogenic pressure, such as the MATOPIBA region.

Palavras-chave: TWS-GRACE, São Francisco River, aquifer depletion.

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam cerca de 99% de toda a água doce líquida da Terra [1] e são distribuídas globalmente, ainda que de maneira desigual. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2022) [2], mais de 2 bilhões de pessoas dependem das águas subterrâneas para atender às suas necessidades diárias. Essas águas representam aproximadamente metade da água retirada para uso doméstico pela população mundial, e cerca de 25% da água utilizada para irrigação, suprindo 38% das áreas irrigadas no planeta [3]. No Brasil, cerca de 40% das sedes urbanas são abastecidas exclusivamente por esses mananciais e 3% possuem abastecimento misto com predominância subterrânea [4].

A crescente dependência das reservas subterrâneas para suprir a demanda por água é impulsionada tanto por fatores naturais quanto por intervenções humanas. Secas severas e prolongadas diminuem a disponibilidade de água superficial e forçam populações e setores econômicos a recorrerem cada vez mais aos aquíferos [5, 6]. Além disso, o crescimento populacional, as mudanças climáticas e o gerenciamento inadequado dos recursos hídricos têm um impacto destrutivo sobre a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos subterrâneos, tornando a extração dos aquíferos não apenas excessiva, mas em muitos casos, insustentável [7, 8].

A depleção das águas subterrâneas tem se intensificado significativamente nas últimas décadas, refletindo a complexa interação entre fatores naturais e atividades antropogênicas. Entre 1960 e 2010, estima-se que a depleção global das águas subterrâneas tenha atingido pelo menos 7 trilhões de metros cúbicos [9], com as atividades humanas, como a irrigação e o abastecimento urbano, desempenhando um papel central [10, 11].

Mesmo na ausência de exploração, anomalias no armazenamento de águas subterrâneas podem ocorrer naturalmente devido às variações na precipitação e na umidade do solo [12]. As mudanças climáticas também têm demonstrado impacto significativo na alteração da recarga dos aquíferos [13, 14], resultando em taxas de recarga frequentemente decrescentes, apesar do aumento na intensidade das precipitações [15].

Desta forma, em um cenário global, a compreensão da dinâmica das águas subterrâneas torna-se cada vez mais necessária, uma vez que esse manancial representa o maior reservatório de água doce não congelada do planeta, conectado com águas superficiais, reservatórios e lagos [5]. Esse entendimento pode ser obtido por meio de técnicas de monitoramento que permitem a avaliação contínua dos níveis de água subterrânea.

O monitoramento hidrogeológico é comumente realizado por meio de poços de observação instalados no local de interesse. Este método fornece medições diretas dos níveis de água subterrânea, geralmente com alta resolução temporal [16]. No entanto, a implementação e manutenção desses poços são associadas a altos custos e exigem investimentos significativos de tempo [17, 18]. Adicionalmente, as dificuldades relacionadas aos fatores geológicos, como a complexidade e diversidade das formações e suas estruturas, bem como as propriedades hidráulicas dos aquíferos e as variações climáticas, dificultam ainda mais o monitoramento eficaz em diferentes escalas [19-21].

Os avanços tecnológicos em observação da Terra baseados em sensoriamento remoto proporcionaram a criação de conjuntos de dados robustos que complementam o monitoramento tradicional das águas subterrâneas, oferecendo informações para quantificar as variações no armazenamento hídrico subterrâneo [22]. Com isso, o monitoramento baseado em poços, tradicionalmente limitado em escala, pode ser significativamente aprimorado para avaliações abrangentes e em larga escala [23].

No campo do sensoriamento remoto, os satélites da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), lançados em 2002, surgem como uma das iniciativas mais relevantes. Criado pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), o GRACE foi projetado para detectar mudanças no armazenamento de água terrestre, incluindo as águas subterrâneas, ao estimar as variações mensais no campo gravitacional da Terra [24]. O GRACE avalia a gravidade ao comparar a distância entre dois satélites idênticos, o que permite a estimativa do armazenamento de água em diversas formas, como a água no solo, a umidade do solo, a água superficial e o gelo [25].

Em tempos recentes, os dados gravimétricos dos satélites GRACE têm sido amplamente utilizados no monitoramento, detecção e caracterização de eventos secos em diversas regiões [26, 27]. Ademais, essas informações contribuem para análises de tendências climáticas e avaliações dos impactos naturais e antropogênicos [28]. O armazenamento e a diminuição de água subterrânea também são amplamente analisados utilizando dados do GRACE [29,30]. Dessa forma, o GRACE se torna uma ferramenta vantajosa para preencher as lacunas na disponibilidade de dados e no monitoramento de águas subterrâneas [31].

O avanço das análises hidrológicas em larga escala também se deve à integração do GRACE com bancos de dados climáticos globais e plataformas de processamento em nuvem. O *Google Earth Engine* (GEE), por exemplo, destaca-se como uma infraestrutura de computação geoespacial que permite o acesso, o armazenamento e o processamento paralelo de grandes volumes de dados de satélite e séries temporais hidrometeorológicas. A plataforma elimina etapas de pré-processamento, como correções radiométricas e geométricas, automatizadas pelo sistema, o que otimiza a operacionalização de estudos em escala regional e global. Pesquisas recentes [29, 32, 33] ressaltam o GEE como um ambiente ideal para análises comparativas de dados multissensores, facilitando a integração entre diferentes produtos satelitais.

Nesse contexto, a incorporação de dados do *Global Precipitation Measurement* (GPM) potencializa os estudos de balanço hídrico e recarga de aquíferos. O GPM disponibiliza estimativas de precipitação com alta resolução espacial ($\sim 0,1^\circ$) e temporal (30 minutos), o que possibilita avaliar a distribuição espaço-temporal das chuvas com maior precisão do que redes pluviométricas convencionais em diversas regiões do globo. Trabalhos como os de Santarosa et al. (2024) [34] e Qu et al. (2024) [35] demonstram que a integração metodológica entre GRACE, GPM e GEE representa um avanço significativo para a pesquisa em recursos hídricos. Essa abordagem combinada permite avaliar de forma integrada a influência da precipitação, da extração de água subterrânea e das mudanças no uso e cobertura da terra sobre as variações do armazenamento hídrico, promovendo uma compreensão mais abrangente e sistêmica da dinâmica hidrológica em múltiplas escalas.

Complementar às análises espaciais viabilizadas pelo GRACE, GEE e GPM, a análise de tendências temporais permite avaliar padrões de variação ao longo do tempo e identificar períodos críticos de depleção ou recarga. Para isso, o teste de Mann-Kendall (MK) [36, 37] e suas variações, como o Mann-Kendall Modificado (MMK) [38, 39], são amplamente empregados na hidrologia, frequentemente em conjunto com o estimador de inclinação de Sen [40]. Essas análises podem ser aprimoradas com métodos estatísticos como o cálculo de médias móveis para suavizar flutuações de curto prazo e destacar padrões de longo prazo. O uso de médias móveis tem sido amplamente aplicado para reduzir o ruído nos dados do GRACE e melhorar a interpretação das variações no armazenamento total de água. Por exemplo, Li et al. (2024) [41], empregaram a média móvel de três meses para eliminar flutuações aleatórias ao comparar anomalias de precipitação e armazenamento de água subterrânea derivadas do GRACE. Outros estudos indicam que a aplicação de médias móveis de 12 meses pode remover sinais sazonais e melhorar a correlação entre as estimativas do GRACE e dados in situ de nível d'água subterrâneo [40, 42]. Além disso, a suavização dos dados por médias móveis tem sido utilizada também para identificar tendências em séries históricas associadas a eventos climáticos, como El Niño e La Niña [43].

Este estudo tem como objetivo contribuir para a compreensão da dinâmica do armazenamento de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Urucuia (SAU), por meio da utilização de dados gravimétricos obtidos pelos satélites da missão GRACE, integrados a análises estatísticas que possibilitem a identificação de tendências temporais e padrões de variação. Dessa forma, busca-se fornecer subsídios para o manejo sustentável e integrado do aquífero, em um contexto de intensificação agrícola e crescente demanda por água.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Área

A área escolhida para aplicação dessa abordagem é o Sistema Aquífero Urucuia (SAU): um vasto aquífero livre que se estende por cerca de 625 km na direção norte-sul e 200 km na direção leste-oeste, abrangendo 126.468 km² e cobrindo partes dos estados do Maranhão, Piauí, Goiás, Tocantins, Minas Gerais e Bahia (Figura 1), sendo esta última a que possui a maior parte do aquífero, com 82.000 km² [44]. Localizado na porção média da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, o SAU desempenha um papel importante na manutenção dos corpos d'água regionais, particularmente durante a estação seca, contribuindo com cerca de 80% a 97% do fluxo de base dos rios que fluem para o norte-nordeste [45].

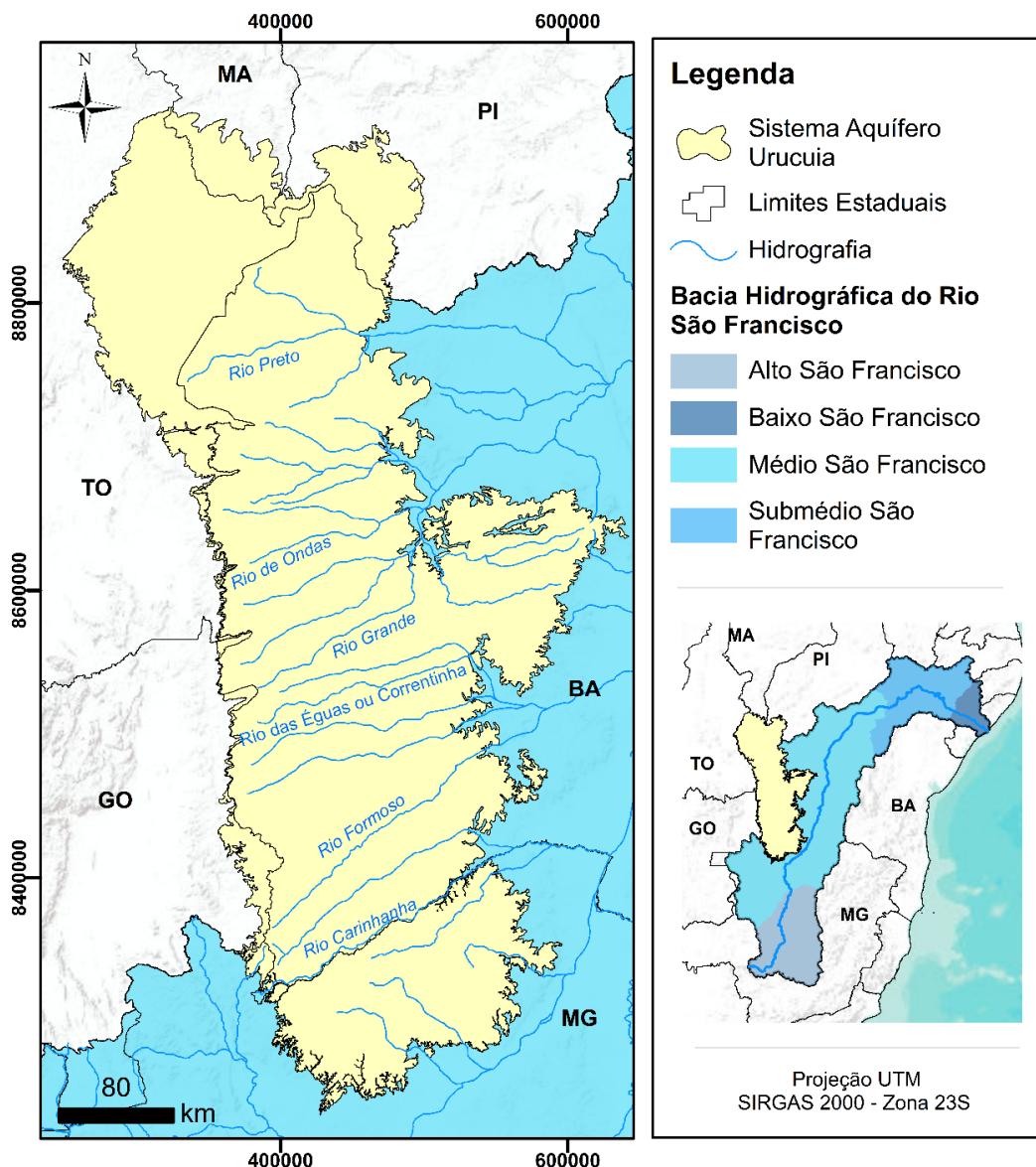


Figura 1: Mapa de localização do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), com destaque para a região do MATOPIBA e principais limites hidrográficos.

O Sistema Aquífero Urucuia está inserido no contexto do MATOPIBA, uma região que engloba os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Nas últimas décadas, essa área tem

passado por uma rápida expansão agrícola, impulsionada por políticas públicas favoráveis e características naturais como o relevo plano e precipitações anuais elevadas [46, 47]. O oeste da Bahia, em particular, se consolidou como uma das principais frentes agrícolas do Brasil, promovendo uma intensificação da exploração dos recursos hídricos para atender à crescente demanda por irrigação. Essa pressão sobre os recursos hídricos tem causado uma sobrecarga nos aquíferos, incluindo o SAU, resultando em desafios ambientais e conflitos relacionados à água. A crescente utilização de tecnologias avançadas e o aumento do acesso à energia têm exacerbado o problema, levando a um debate contínuo na comunidade científica sobre a sustentabilidade e a gestão desses recursos [48]. A superexplotação do SAU não apenas afeta a disponibilidade de água superficial, mas também influencia a dinâmica dos ecossistemas locais e a qualidade da água, levantando questões sobre a necessidade de estratégias de manejo integrado e sustentável para solucionar essas problemáticas.

O clima na região do Sistema Aquífero Urucuia, segundo a classificação climática de Köppen, é de Savana Tropical (Aw), caracterizado por duas estações anuais bem definidas: uma estação chuvosa e quente que ocorre de outubro a abril, e uma estação seca e amena que se estende de maio a setembro [49,50]. As taxas de precipitação variam regionalmente, oscilando entre 900 e 1.450 mm anuais, com uma tendência de aumento gradual de leste para oeste [51]. Esse fenômeno pode ser atribuído ao controle orográfico da chuva, onde as massas de ar descarregam progressivamente de oeste para leste [50].

A distribuição sazonal da precipitação é marcadamente desigual, com aproximadamente 80% das chuvas ocorrendo entre novembro e março e quase nenhuma precipitação registrada entre junho e agosto [52]. A evapotranspiração potencial média anual é de aproximadamente 1.580 mm, indicando um balanço hídrico geralmente deficitário durante a estação seca [53].

A região do Sistema Aquífero Urucuia está inserida no contexto da Bacia Sanfranciscana (BS), uma área de 140.000 km² constituída por registros sedimentares e vulcânicos fanerozoicos, abrangendo os grupos Santa Fé (Permo-carbonífero), Areado (Eocretáceo) e Urucuia (Neocretáceo), coletivamente denominados Supersequência Sanfranciscana [54]. As diferenças nos tipos litológicos e no padrão de sedimentação em condições essencialmente continentais do Grupo Urucuia possibilitam a distinção de duas unidades litoestratigráficas: a inferior, Formação Posse, que comporta duas litofácies (1 e 2), e a superior, Formação Serra das Araras [55, 56].

O SAU é uma bacia hidrogeológica assimétrica e sua estruturação é influenciada pela presença de um divisor de fluxo subterrâneo de orientação predominantemente norte-sul, o qual não necessariamente coincide com o divisor topográfico. Seu posicionamento aproximado foi demarcado com base nas informações de levantamentos geofísicos elétricos [57-60] e dados de nível estático dos poços cadastrados na região.

A oeste deste eixo divisor, os níveis potenciométricos alcançam profundidades de aproximadamente 180 metros [59, 61]. A recarga ocorre principalmente através da infiltração das águas pluviais em áreas de altitudes regionalmente elevadas com relevo plano, onde os latossolos arenosos desempenham um papel fundamental devido à sua porosidade e permeabilidade [61]. Além disso, as porções centro-ocidentais do SAU apresentam maiores espessuras saturadas e potencialidade hídrica mais expressiva [58, 59, 62].

A hidrografia na região do Sistema Aquífero Urucuia é caracterizada por uma rede de drenagem predominantemente paralela a subparalela [63], provavelmente influenciada pela reativação de fraturas pré-existentes no Grupo Bambuí do Pré-Cambriano, o que também afeta o Grupo Urucuia. Essa configuração de rios, alinhados segundo estruturas com orientação geral de N60E, esculpe uma pradaria levemente inclinada, com topo plano, variando em altitudes de 470 a 1.016 m [64].

2.2 Processamento e Análise de Dados

Neste estudo, foram utilizados dados mensais do satélite GRACE da variação do armazenamento total de água (Δ TWS) e comparados com a precipitação média acumulada mensal do *Global Precipitation Measurement* (GPM) para avaliar a dinâmica das variações no armazenamento de água subterrânea no Sistema Aquífero Urucuia, no período de 2002 a 2023.

Os dados de precipitação mensal do GPM *vRelease 07* foram coletados por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), utilizando scripts em Python, e analisados no software ArcMap. Já os dados mensais de anomalias de massa terrestre foram obtidos a partir do conjunto GRACE *Monthly Mass Grids Release 6.3 Version 4 - Global Mascons*, disponibilizado pelo NASA *Jet Propulsion Laboratory*. Estes dados foram processados no GEE e pós-processados em planilhas do Excel.

Cabe destacar que existem lacunas na série histórica do GRACE, decorrentes do desgaste das baterias dos satélites, cujo gerenciamento se tornou necessário a partir de 2011. Essas lacunas ocorrem em intervalos de 5 a 6 meses, com duração média de 4 a 5 semanas [65]. Além disso, há uma interrupção significativa no conjunto de dados entre a desativação do GRACE, em outubro de 2017, e o lançamento do GRACE-FO (*Follow-On*), em maio de 2018.

Os dados gravitacionais obtidos pelo GRACE são interpretados como anomalias no armazenamento de água terrestre, após a remoção de sinais associados às marés, atmosfera, oceanos e à Terra sólida. As estimativas mensais desse produto representam o armazenamento vertical integrado de água terrestre, englobando diversos componentes do balanço hídrico: anomalias na equivalência de água da neve, anomalias no armazenamento de umidade do solo, anomalias no armazenamento de água superficial e anomalias no armazenamento de água subterrânea [66].

No Brasil, Gonçalves et al. [31] utilizaram dados do GRACE para analisar o armazenamento de água terrestre no Sistema Aquífero Urucuia. O estudo aponta que devido ao clima quente e ao terreno pouco profundo da região, não foi necessário considerar os efeitos de neve e gelo no sinal do GRACE. Além disso, a ausência de grandes reservatórios no platô elimina qualquer impacto significativo no sinal e, apesar da intensa atividade agrícola na área, as variações anuais na biomassa ficaram abaixo da capacidade de detecção do GRACE. Assim, as variações no armazenamento total de água na região são predominantemente causadas por alterações no armazenamento de água na zona radicular e no armazenamento de água subterrânea, validando o uso do produto TWS.

Na presente análise, médias móveis foram calculadas para os dados de precipitação acumulada mensal e para a variação do armazenamento total de água derivada do GRACE, utilizando o software Past, versão 4.03. Considerando a presença de lacunas na série histórica do GRACE, os valores ausentes foram preenchidos por interpolação spline no Microsoft Excel. As descontinuidades variam ao longo do período estudado, com lacunas de 1 a 8 meses nos anos entre 2002 e 2018, sendo a maior interrupção de 11 meses durante a transição entre o GRACE e o GRACE-FO (junho de 2017 a abril de 2018). Para verificar o desempenho desse procedimento, foi conduzida uma análise de sensibilidade comparando séries com e sem preenchimento, e sua acurácia foi avaliada por validação cruzada. Para a análise de tendência das séries temporais de GPM e Δ TWS, foi aplicado o teste de Mann-Kendall com *pre-whitening*, em conjunto com o estimador de inclinação de Sen, utilizando scripts desenvolvidos em Python.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da variação do armazenamento de água subterrânea, derivada dos dados do satélite GRACE, e da precipitação média mensal acumulada, obtida do GPM, permitiu avaliar a dinâmica hidrológica do Sistema Aquífero Urucuia ao longo do tempo. A Figura 2 apresenta a precipitação acumulada anual na área de estudo entre 2002 e 2023.

De forma geral, observa-se uma recorrente assimetria na distribuição das chuvas, com a porção norte do aquífero recebendo volumes mais elevados ao longo da série histórica, enquanto as áreas centrais e sul registram precipitações notadamente inferiores. Em anos mais secos, como 2012, 2015, 2017, 2019 e especialmente 2023, essa discrepância espacial tende a acentuar-se, afetando principalmente as regiões centro-sul do sistema aquífero, o que reforça a vulnerabilidade hídrica nessas localidades. Esse padrão evidencia a existência de um gradiente espacial de precipitação no sentido noroeste-sudeste, o qual influencia diretamente os processos de recarga e armazenamento subterrâneo, sobretudo em contextos de variabilidade climática e pressão antrópica crescentes.

A análise dos dados mensais de variação de armazenamento hídrico terrestre e precipitação acumulada (Figura 3) permite identificar três períodos distintos com comportamentos hidrológicos característicos: equilíbrio (2002-2011), queda acentuada (2012-2019) e recuperação parcial (2019-2023). Esses padrões são corroborados pelas séries anuais de precipitação (Figura 4) e pelas tendências suavizadas por médias móveis de 12 meses (Figura 5).

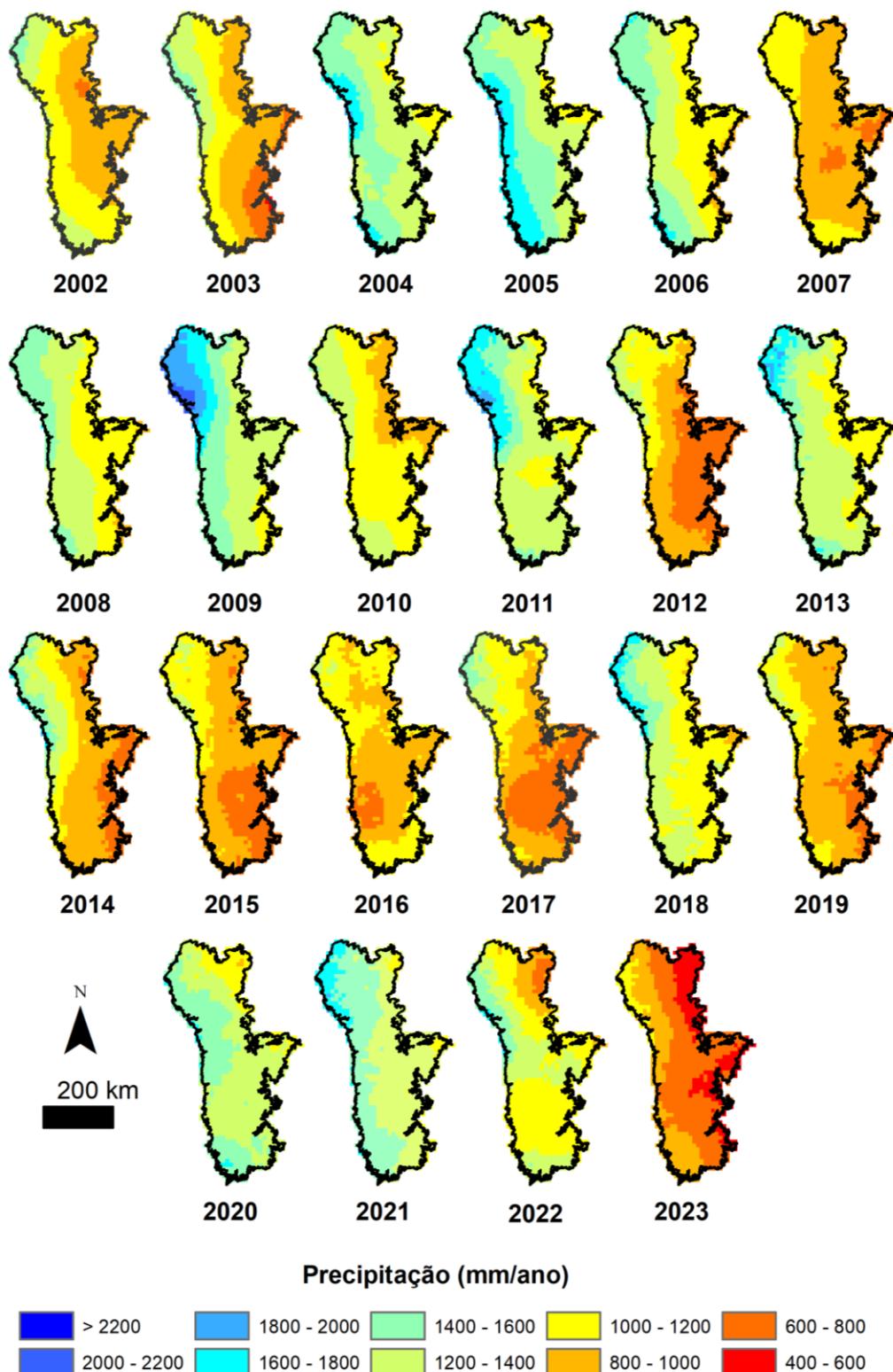
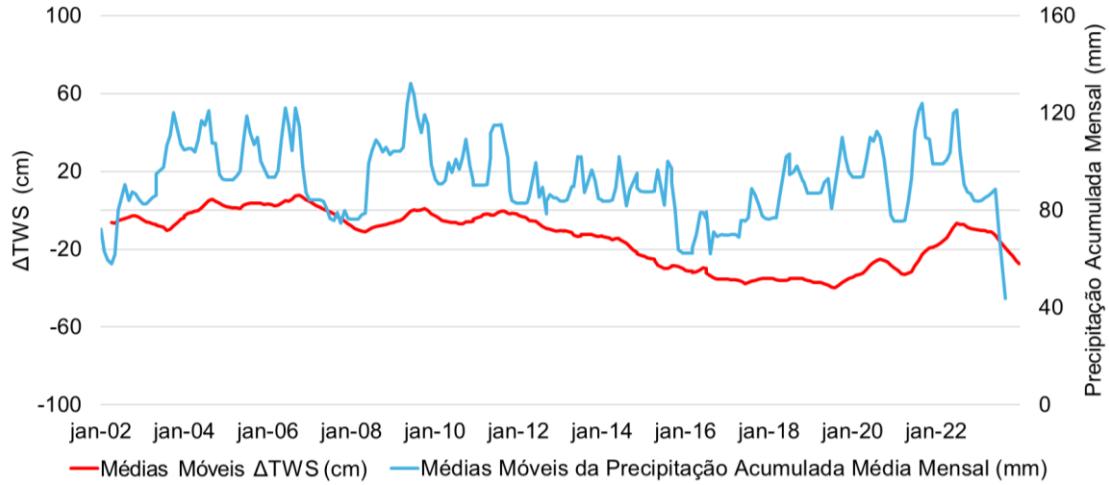
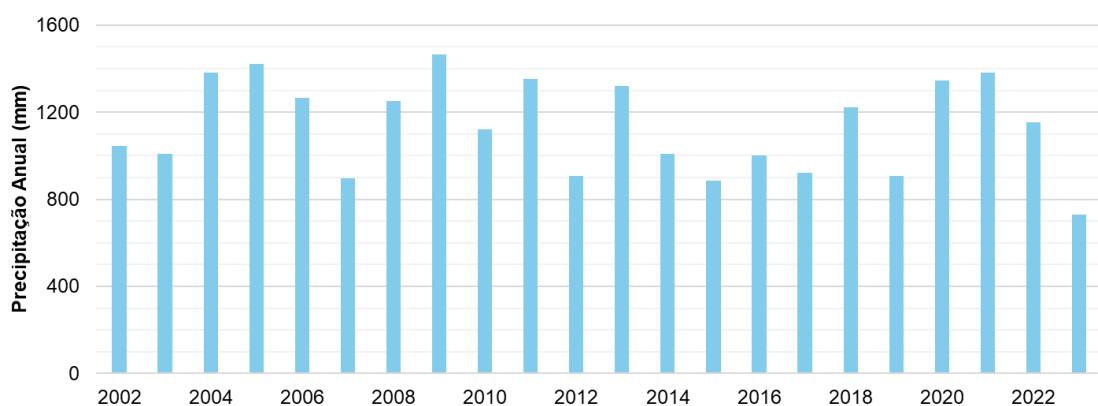
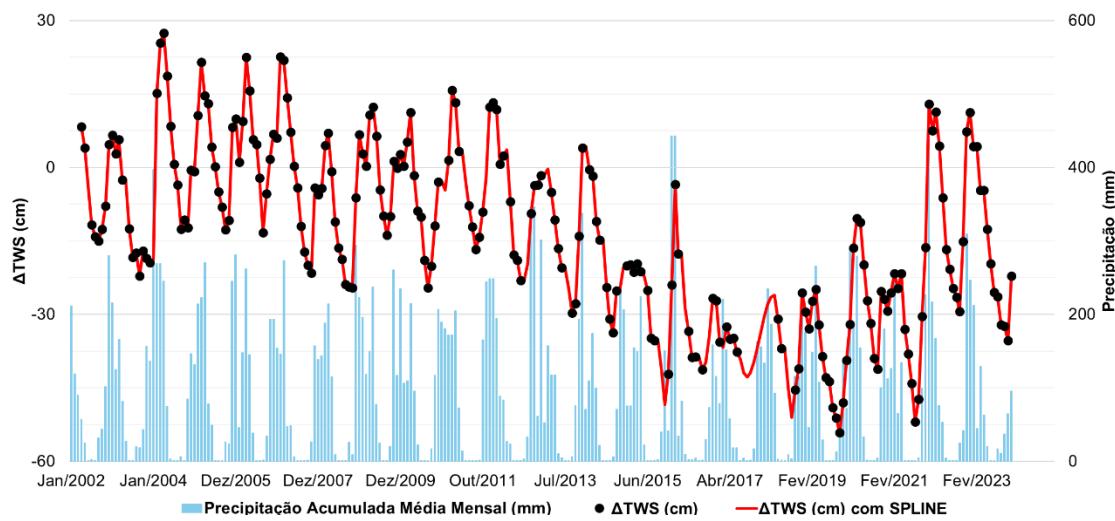


Figura 2: Distribuição espacial da precipitação anual (mm) na área do Sistema Aquífero Urucuia no período de 2002 a 2023, com base em dados do satélite GPM.



No início da série temporal, observa-se um regime pluviométrico equilibrado, com destaque para os anos de 2004 e 2006, que apresentaram precipitações anuais acima de 1.200 mm (Figura 4). Nessa fase, o ΔTWS manteve-se predominantemente positivo ou próximo de zero

(Figura 3), indicando equilíbrio entre entradas e saídas de água no sistema. Entre 2007 e 2009, ocorreram flutuações significativas: 2007 registrou uma redução pluviométrica, refletida em queda do Δ TWS, enquanto 2008 e 2009 retornaram a patamares superiores a 1.200 mm, estabilizando temporariamente a variação de armazenamento no sistema. Os anos de 2010 e 2011 mantiveram chuvas elevadas (cerca de 1.300 mm em 2011), permitindo recuperações pontuais do Δ TWS, ainda que sem tendência de crescimento evidente. Esse período encerrou-se como o último intervalo em que o sistema se comportou de forma resiliente frente às variações de entrada e saída de água.

A partir de 2012, o Sistema Aquífero sofreu uma mudança considerável. Embora tenha havido poucos anos com precipitações notadamente menores, como 2012 e 2015, que registraram valores inferiores a 1.000 mm (Figura 4), o Δ TWS entrou em declínio acentuado (Figuras 3 e 5), marcando a transição para um regime de esgotamento. Essa tendência negativa predominou, evidenciando que eventos pontuais de menor precipitação, somados ao possível aumento da demanda por água subterrânea e alterações no uso do solo, superaram a capacidade de recarga do sistema, levando a um déficit hídrico acumulado.

Entre 2020 e 2022, houve uma leve recuperação no Δ TWS (Figura 5), associada a aumentos pontuais no regime de precipitação. No entanto, essa recuperação mostrou-se insuficiente para reverter as perdas acumuladas na década anterior, e a partir de 2022, o armazenamento retomou a trajetória descendente (Figura 3). A manutenção de valores negativos de Δ TWS sugere que o sistema atingiu um estado de desequilíbrio prolongado, no qual os eventos pluviométricos mais recentes não compensam os déficits históricos.

A análise da série temporal do Δ TWS para o período de 2002 a 2023 revelou uma tendência decrescente estatisticamente significativa, com uma taxa de $-17,12 \pm 2,92$ mm/ano. Considerando a área do Sistema Aquífero Urucuia, o déficit de volume total de água nesse período de 22 anos foi estimado em $47,9 \pm 8,2$ km³. Esse volume representa uma perda líquida de água equivalente a cerca de 1,5 vezes a capacidade máxima do reservatório de Sobradinho, um dos maiores reservatórios da América Latina. A confiabilidade desse resultado foi confirmada pelas métricas de validação: o teste de Mann-Kendall aplicado à série interpolada apresentou diferença inferior a 10% em relação à série original com lacunas, e a validação cruzada indicou um Erro Quadrático Médio da Raiz de 4,64 cm, compatível com a variabilidade natural da série (desvio padrão de 18,37 cm), além de reduzir o erro padrão da estimativa em 27%, indicando maior precisão sem introduzir viés significativo.

Em contraste com a tendência do Δ TWS, a análise da série temporal de precipitação para o mesmo período não detectou uma tendência estatisticamente significativa. Esse declínio contínuo sugere um esgotamento progressivo do Sistema Aquífero Urucuia, podendo ser impulsorado não apenas pela redução na recarga, mas também pelo aumento da demanda por água na região. O fato de o Δ TWS não conseguir se recuperar mesmo após anos de precipitação mais elevada indica que os déficits hídricos acumulados ao longo das últimas décadas comprometeram a resiliência do sistema, reforçando a necessidade de uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos para evitar um colapso hídrico a longo prazo.

Pesquisas indicam que a conversão de áreas naturais em terras agrícolas tem um papel significativo nessa dinâmica. Entre 2000 e 2016, as áreas desmatadas no MATOPIBA aumentaram 41%, enquanto a área irrigada cresceu expressivamente, com o número de pivôs centrais saltando de apenas 9 em 1985 para 1.550 em 2016, concentrando-se principalmente no oeste da Bahia [67]. Essa conversão reduz a infiltração de água no solo e aumenta o escoamento superficial, dificultando a recarga do aquífero [68]. Além disso, a intensificação do uso da terra tem contribuído para mudanças climáticas regionais, como o aumento na frequência de dias quentes e a elevação das temperaturas médias [69].

A exploração hídrica também atua na redução da disponibilidade de água subterrânea. O uso crescente de poços profundos desde os anos 2000, ampliou a irrigação para além das áreas ripárias, aumentando a extração direta do Sistema Aquífero Urucuia [48]. Estudos indicam que a redução das vazões dos rios na região não pode ser explicada apenas pela diminuição da precipitação, sendo fortemente influenciada pelo avanço do agronegócio e das práticas de irrigação [49].

Outros estudos hidrológicos também indicam que, apesar da ausência de uma tendência significativa de redução da precipitação na região, o armazenamento total de água tem diminuído continuamente [70]. Gonçalves et al. (2020) [31] analisaram 12 anos da série temporal de GRACE (2003 a 2014) e também identificaram uma tendência negativa significativa no armazenamento de água total a uma taxa de $6,5 \pm 2,6$ mm/ano, o que resultou em uma perda total de $9,75 \text{ km}^3$ de água, apesar da ausência de escassez de precipitação na região. Os resultados do presente estudo corroboram essa tendência, sugerindo que a redução do armazenamento pode estar mais relacionada ao aumento da evapotranspiração e à extração intensiva de água subterrânea.

A contínua depleção do armazenamento hídrico no Sistema Aquífero Urucuia pode ter impactos significativos na disponibilidade de água para diferentes setores. A redução das vazões dos rios associada à superexploração do aquífero pode comprometer tanto o abastecimento de comunidades locais quanto a sustentabilidade da agricultura irrigada na região [71]. Além disso, os conflitos relacionados ao uso da água têm se tornado cada vez mais frequentes. Em 2017, um levante popular conhecido como "Guerra da Água" ocorreu no oeste da Bahia, quando pequenos produtores se revoltaram contra a diminuição drástica do nível do rio Corrente, atribuindo a redução ao uso intensivo de água para irrigação de grandes fazendas [48].

A persistente tendência de depleção do armazenamento hídrico no Sistema Aquífero Urucuia reforça a necessidade urgente de estratégias de manejo sustentável que conciliem o uso racional dos recursos hídricos com a manutenção da capacidade de recarga do aquífero. A integração de dados gravimétricos do GRACE e de precipitação do GPM demonstrou ser uma abordagem eficaz para monitoramento em larga escala, possibilitando a identificação de padrões de variação que seriam mais difíceis de analisar com dados exclusivamente *in situ*.

Os resultados deste estudo evidenciam que a pressão exercida pela expansão agrícola e pelo aumento na extração de água subterrânea tem superado a capacidade natural de reposição do aquífero, comprometendo não apenas a sustentabilidade hídrica regional, mas também a manutenção dos fluxos dos rios de afluentes do Rio São Francisco. Nesse contexto, o monitoramento contínuo e a formulação de políticas públicas que considerem a resiliência hídrica tornam-se elementos essenciais para mitigar os impactos da superexploração e garantir a disponibilidade futura das águas subterrâneas desse sistema.

4. CONCLUSÃO

Este estudo identificou que a precipitação é um fator essencial para a dinâmica do armazenamento total de água subterrânea, mas que sua variabilidade ao longo do tempo não tem sido suficiente para reverter a tendência de declínio do TWS. O período de 2002 a 2011 foi caracterizado por relativa estabilidade hídrica, associada a volumes pluviométricos elevados e variações positivas no armazenamento. A partir de 2012, o sistema passou a apresentar déficit progressivo, com reduções acentuadas no Δ TWS, mesmo diante de episódios isolados de precipitação abaixo da média, como em 2012 e 2015.

Nos anos mais chuvosos do período recente, como 2020, observou-se apenas uma recuperação temporária do TWS, o que indica que os impactos acumulados da redução hídrica não foram plenamente compensados. A análise estatística evidenciou uma tendência de queda significativa no armazenamento subterrâneo de água, com uma taxa de $-17,12 \pm 2,92$ mm/ano entre 2002 e 2023. Esse comportamento corresponde a um déficit de aproximadamente $47,9 \pm 8,2 \text{ km}^3$, reforçando a persistência do esgotamento hídrico regional.

A integração de dados do GRACE e GPM junto a análise de estudos da região revelou que a redução do armazenamento está fortemente associada à expansão agrícola no MATOPIBA, que reduziu a infiltração efetiva, e à exploração intensiva para irrigação, mesmo em períodos sem escassez pluviométrica significativa. Essa dinâmica ameaça a sustentabilidade hídrica regional, impactando o fluxo de base de afluentes do Rio São Francisco e gerando conflitos socioambientais, como evidenciado no episódio da "Guerra da Água" em 2017.

Para garantir a sustentabilidade do SAU, são necessárias estratégias integradas de gestão de recursos hídricos, incluindo a regulamentação do uso da água, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis e o monitoramento contínuo, combinando dados de satélite e *in situ*. A metodologia

aplicada neste estudo, que integra dados do GRACE e GPM com análises regionais, pode ser replicada em outros aquíferos sob pressão antrópica, especialmente em regiões com monitoramento tradicional limitado.

Além disso, os resultados deste estudo se alinham com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas e, em particular, com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A tendência de depleção do Sistema Aquífero Urucuia e o déficit acumulado de água reforçam a urgência de se agir para alcançar o ODS 6: Água Limpa e Saneamento, assegurando gestão sustentável da água. A pressão antrópica sobre o aquífero, ligada à expansão agrícola e à redução do fluxo de base dos rios, evidencia impactos sobre ecossistemas terrestres e aquáticos, conectando-se ao ODS 15: Vida Terrestre. Além disso, o monitoramento das variações hídricas frente à variabilidade climática contribui para ações de mitigação e adaptação, alinhadas ao ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro por meio da bolsa de Mestrado (processo n.º 132184/2023-0), que possibilitou a realização deste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Shiklomanov IA, Rodda JC. World water resources at the beginning of the twenty-first century. Cambridge (UK): Cambridge University Press; 2003.
2. UNESCO. The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. Paris (FR): UNESCO; 2022. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726>
3. Siebert S, Henrich V, Frenken K, Burke J. Update of the digital global map of irrigation areas to version 5. Bonn (GR): FAO; 2013.
4. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024: informe anual. Brasília: ANA; 2024.
5. Condon LE, Kollet S, Bierkens MFP, Fogg GE, Maxwell RM, Hill MC, et al. Global groundwater modeling and monitoring: Opportunities and challenges. *Water Resour Res.* 2021;57(12):1-27.
6. Nenweli R, Watson A, Brookfield A, Münch Z, Chow R. Is groundwater running out in the Western Cape, South Africa? Evaluating GRACE data to assess groundwater storage during droughts. *J Hydrol Reg Stud.* 2024;52:101699. doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101699
7. Sharma MK, Kumar M, Malik DS, Singh S, Patre AK, Prasad B, et al. Assessment of groundwater quality and its controlling processes in Bemetara District of Chhattisgarh State, India. *Appl Water Sci.* 2022;12(5):1-20. doi: 10.1007/s13201-022-01608-4
8. Pande CB, Moharir KN. Groundwater resources development and planning in the semi-arid region. Cham (Switzerland): Springer; 2021.
9. de Graaf IEM, van Beek RLPH, Gleeson T, Moosdorf N, Schmitz O, Sutanudjaja EH, et al. A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion. *Adv Water Resour.* 2016;102(March):53-67.
10. Analy M, Laftouhi NE. Groundwater depletion in an urban environment under semiarid climate and persistent drought-city of marrakesh (Morocco). *Water (Switzerland)*. 2021;13(22):3253.
11. Ashraf S, Nazemi A, AghaKouchak A. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Sci Rep.* 2021;11(1):1-10. doi: 10.1038/s41598-021-88522-y
12. Asoka A, Mishra V. Anthropogenic and climate contributions on the changes in terrestrial water storage in India. *J Geophys Res Atmos.* 2020;125(10):1-21.
13. Berghuijs WR, Collenteur RA, Jasechko S, Jaramillo F, Luijendijk E, Moeck C, et al. Groundwater recharge is sensitive to changing long-term aridity. *Nat Clim Chang.* 2024;14(4):357-63.
14. Trásy-Havril T, Szkolnikovics-Simon S, Mádl-Szönyi J. How complex groundwater flow systems respond to climate change induced recharge reduction? *Water (Switzerland)*. 2022;14(19):3026.
15. Li Z, Li X, Wang Y, Quiring SM. Impact of climate change on precipitation patterns in Houston, Texas, USA. *Anthropocene*. 2019;25:100193. doi: 10.1016/j.ancene.2019.100193
16. Yin W, Hu L, Zhang M, Wang J, Han S. Statistical downscaling of GRACE-Derived groundwater storage using ET data in the North China plain. *J Geophys Res Atmos.* 2018 Jun 16;123(11):5973-87. doi: 10.1029/2017JD027468

17. Chao N, Chen G, Li J, Xiang L, Wang Z, Tian K. Groundwater storage change in the Jinsha River Basin from GRACE, hydrologic models, and in situ data. *Groundwater*. 2020;58(5):735-48.
18. Li B, Rodell M, Kumar S, Beaudoin HK, Getirana A, Zaitchik BF, et al. Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: advances and challenges. *Water Resour Res.* 2019;55(9):7564-86.
19. Khorrami B, Gorjifard S, Ali S, Feizizadeh B. Local-scale monitoring of evapotranspiration based on downscaled GRACE observations and remotely sensed data: An application of terrestrial water balance approach. *Earth Sci Informatics*. 2023;16(2):1329-45.
20. Renna Camacho C, Getirana A, Rotunno Filho OC, Mourão MAA. Large-Scale groundwater monitoring in Brazil assisted with satellite-based artificial intelligence techniques. *Water Resour Res.* 2023 Sep;59(9):e2022WR033588. doi: 10.1029/2022WR033588
21. Tariq A, Qin S. Spatio-temporal variation in surface water in Punjab, Pakistan from 1985 to 2020 using machine-learning methods with time-series remote sensing data and driving factors. *Agric Water Manag.* 2023;280(February):108228. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108228
22. Akl M, Thomas BF. Challenges in applying water budget framework for estimating groundwater storage changes from GRACE observations. *J Hydrol.* 2024;35:131600. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131600
23. Zhu Q, Zhang H. Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China. *J Hydrol.* 2022;609(March):127759. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127759
24. Thomas BF, Famiglietti JS. Identifying climate-induced groundwater depletion in GRACE observations. *Sci Rep.* 2019;9(1):1-9. doi: 10.1038/s41598-019-40155-y
25. Tapley BD, Watkins MM, Flechtner F, Reigber C, Bettadpur S, Rodell M, et al. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat Clim Chang.* 2019;9(5):358-69. doi: 10.1038/s41558-019-0456-2
26. Ojha C, Werth S, Shirzaei M. Recovery of aquifer-systems in Southwest US following 2012-2015 drought: Evidence from InSAR, GRACE and groundwater level data. *J Hydrol.* 2020;587(October 2019):124943. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124943
27. Wu S, Dong Z, Cai C, Zhu S, Shao Y, Meng J, et al. Identification of extreme droughts based on a index from GRACE-Derived TWSA and precipitation in the Yellow River and Yangtze River Basins. *Water.* 2023 May 24;15(11):1-20.
28. Zhang C, Chen P, Zhu C, Lu J, Zhang Y, Yang X, et al. Assessment of natural and anthropogenic impacts on terrestrial water storage in the Loess Plateau based on different types of GRACE/GRACE-FO solutions. *J Mt Sci.* 2024;21(7):2173-92.
29. Ghosh A, Bera B. Estimation of groundwater level and storage changes using innovative trend analysis (ITA), GRACE data, and google earth engine (GEE). *Groundw Sustain Dev.* 2023;23:101003. doi: 10.1016/j.gsd.2023.101003
30. Yin W, Zhang G, Liu F, Zhang D, Zhang X, Chen S. Improving the spatial resolution of GRACE-based groundwater storage estimates using a machine learning algorithm and hydrological model. *Hydrogeol J.* 2022;30(3):947-63. doi: 10.1007/s10040-021-02447-4
31. Gonçalves RD, Stollberg R, Weiss H, Chang HK. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. *Sci Total Environ.* 2020 Feb 25;705:135845.
32. Singh VK, Pandey HK, Singh SK. Groundwater storage change estimation using GRACE data and Google Earth Engine: A basin scale study. *Phys Chem Earth.* 2023;129:103297. doi: 10.1016/j.pce.2022.103297
33. Mehdi A, Mobin E, Mohammad A, Elyasi AH, Zahra N. Application assessment of GRACE and CHIRPS data in the Google Earth Engine to investigate their relation with groundwater resource changes (Northwestern region of Iran). *J Groundw Sci Eng.* 2021;9(2):102-13.
34. Santarosa LV, Pinto GVF, Blandón Luengas JS, Gastmans D. Remote sensing to quantify potential aquifer recharge as a complementary tool for groundwater monitoring. *Hydrol Sci J.* 2024;69(16):2455-65. doi: 10.1080/02626667.2024.2412741
35. Qu W, Zhang P, Chen P, Li J, Gao Y. Spatiotemporal variations and sustainability characteristics of groundwater storage in North China from 2002 to 2022 revealed by GRACE/GRACE follow-on and multiple hydrologic data. *Remote Sens.* 2024;16(7):1176.
36. Hadavi D, Mousavi SM, Rahimzadegan M. An intercomparison of the groundwater level estimations by GRACE and GRACE-FO satellites and groundwater modeling in Iran. *Acta Geophys.* 2024;72(5):3609-29. doi: 10.1007/s11600-024-01308-4
37. Monir MM, Sarker SC. Analyzing post-2000 groundwater level and rainfall changes in Rajasthan, India, using well observations and GRACE data. *Heliyon.* 2024;10(2):e24481. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24481

38. Hasan MSU, Saif MM, Ahmad N, Rai AK, Khan MA, Aldrees A, et al. Spatiotemporal analysis of future trends in terrestrial water storage anomalies at different climatic zones of India using GRACE/GRACE-FO. *Sustain.* 2023;15(2):1572.
39. dos Santos TV, de Freitas LDA, Gonçalves RD, Chang HK. Teste de Mann-Kendall aplicado à dados hidrológicos – Desempenho dos filtros TFPW e CV2 na análise de tendências. *Ciência e Nat.* 2020;42(87):16.
40. Alghafli K, Shi X, Sloan W, Shamsuddoha M, Tang Q, Sefelnasr A, et al. Groundwater recharge estimation using in-situ and GRACE observations in the eastern region of the United Arab Emirates. *Sci Total Environ.* 2023;867(December 2022):161489.
41. Li W, Bao L, Yao G, Wang F, Guo Q, Zhu J, et al. The analysis on groundwater storage variations from GRACE/GRACE-FO in recent 20 years driven by influencing factors and prediction in Shandong Province, China. *Sci Rep.* 2024;14(1):1-18. doi: 10.1038/s41598-024-55588-3
42. Kalu I, Ndehedehe CE, Ferreira VG, Janardhanan S, Currell M, Crosbie RS, et al. Remote sensing estimation of shallow and deep aquifer response to precipitation-based recharge through downscaling. *Water Resour Res.* 2024 Dec 4;60(12):e2024WR037360.
43. Xiong J, Guo S, Yin J, Gu L, Xiong F. Using the global hydrodynamic model and grace follow-on data to access the 2020 catastrophic flood in yangtze river basin. *Remote Sens.* 2021;13(15):3023.
44. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. ANA. Hidrogeologia dos Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado. Vol. 2, Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada Compartilhada. Brasília (DF): ANA; 2017.
45. Gonçalves RD, Engelbrecht BZ, Chang HK. Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o Rio São Francisco, Brasil. Águas Subterrâneas. 2017 Dec 22;32(1):1-10.
46. Pimenta FM, Speroto AT, Costa MH, Dionizio EA. Historical changes in land use and suitability for future agriculture expansion in Western Bahia, Brazil. *Remote Sens.* 2021;13(6):1088. doi: 10.3390/rs13061088
47. dos Santos CAP, Sano EE, Santos PS. Fronteira agrícola e a dinâmica de uso e ocupação dos solos no oeste da Bahia. *Acta Geográfica.* 2018;12(28):17-32.
48. Eloy L, da Silva AL, Coelho Filho O, Ghiotti S. The water frontier: Agribusiness vs. smallholder communities in the brazilian Cerrado. *Water Altern.* 2023;16(3):869-91.
49. da Silva AL, de Souza SA, Coelho Filho O, Eloy L, Salmona YB, Passos CJS. Water appropriation on the agricultural frontier in western Bahia and its contribution to streamflow reduction: Revisiting the debate in the Brazilian cerrado. *Water (Switzerland).* 2021;13(8):1054.
50. Luz JAG, Costa AT, Campos JCV. Avaliação sobre as condições atuais de exploração dos poços e dinâmica de fluxo do Aquífero Urucuia: relatório final. Salvador (BA): Universidade Federal da Bahia / Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura; 2009.
51. Leão BRC, Silva Junior GC, Eger GZS, Marques EAG. Numerical modeling as a support tool for groundwater permits in the state of Bahia, Brazil. *Groundw Sustain Dev.* 2023;23(July):100986.
52. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil [Internet]; 2022 [acesso em 29 mar 2025]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.
53. Serviço Geológico do Brasil. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Sistema Aquífero Urucuia. Bacia sedimentar Sanfranciscana. Vol. 10. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil; 2012.
54. Zalán PV, Romeiro-Silva PC. Bacia do São Francisco. *Bol Geociências da Petrobras.* 2007;15(2):561-71.
55. Campos JEG, Dardenne MA. Distribuição, estratigrafia e sistemas deposicionais do grupo Urucuia - Cretáceo superior da bacia Sanfranciscana. *Geociências.* 1999;2(18):481-199.
56. Campos JEG, Dardenne MA. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana: Uma revisão. *Rev Bras Geociências.* 1997;27(3):269-82.
57. Barbosa NDS, Leal LRB, Barbosa NDS, Mello JDC, dos Santos CB, Lima OAL. Caracterização geométrica e hidráulica do Sistema Aquífero Urucuia Meridional com base em testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos. *Águas Subterrâneas.* 2014;28(2):41-52.
58. Amorim V, de Lima OAL. Avaliação hidrogeológica do aquífero urucuia na bacia do rio das fêmeas - Ba usando resistividade e polarização elétrica induzida. *Rev Bras Geofis.* 2007;25(2):117-29.
59. Barbosa NDS, Leal LRB, Barbosa NDS, Mello JDC, dos Santos CB, De Lima OAL. Caracterização geométrica e hidráulica do sistema aquífero Urucuia Meridional com base em testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos. *Águas Subterrâneas.* 2014;28(2):41-52.
60. Lima OAL. Estudos geológicos e geofísicos do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio Cachorro - Oeste do Estado da Bahia. Relatório Técnico. Salvador (BA): Superintendência de Recursos Hídricos (SRH) / Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia (CPGG-UFBA); 2000.
61. Gaspar MTP, Campos JEG. O Sistema Aquífero Urucuia. *Rev Bras Geociências.* 2007;37(S4):216-26.

62. Gaspar MTP, Campos JEG, De Moraes RAV. Determinação das espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a partir de estudo geofísico. *Rev Bras Geociencias*. 2012;42(SUPPL.1):154-66.
63. Oliveira SN, Carvalho Júnior OA, Gomes RAT, Guimarães RF, McManus CM. Landscape-fragmentation change due to recent agricultural expansion in the Brazilian Savanna, Western Bahia, Brazil. *Reg Environ Change*. 2017;17:411-23. doi: 10.1007/s10113-016-0960-0.
64. Oliveira LT, Klammler H, Leal LRB, Grissolia EM. Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia - Brazil. *Ambient e Agua - An Interdiscip J Appl Sci*. 2019 Nov 4;14(6):1-14.
65. Landerer FW, Cooley SS. GRACE L-3 Product user handbook. NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology; 2021.
66. Li H, Pan Y, Yeh PJ -F., Zhang C, Huang Z, Xu L, et al. A new GRACE downscaling approach for deriving high-resolution groundwater storage changes using ground-based scaling factors. *Water Resour Res*. 2024 Nov 6;60(11):e2023WR035210. doi: 10.1029/2023WR035210
67. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Diagnóstico do meio físico da região de abrangência dos sistemas Aquíferos Urucuia e Areado. Tomo I: caracterização do meio físico, do uso e ocupação da terra, levantamento hidrogeológico e investigações geofísica. Brasília (DF): ANA; 2017.
68. Salmona YB, Matricardi EAT, Skole DL, Silva JFA, Coelho Filho OA, Pedlowski MA, et al. A worrying future for river flows in the brazilian Cerrado provoked by land use and climate changes. *Sustain*. 2023;15(5):4251. doi: 10.3390/su15054251
69. Salvador MA, de Brito JIB. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. *Theor Appl Climatol*. 2018;133(1-2):253-61.
70. Ferraz LL, de Sousa LF, da Silva LS, de Jesus RM, Santos CAS, Rocha FA. Land use changes and hydrological trend analysis in a Brazilian Cerrado basin. *Int J Environ Sci Technol*. 2022;19(8):7469-82. doi: 10.1007/s13762-021-03666-8
71. Gonçalves RD, Engelbrecht BZ, Chang HK. Análise hidrológica de séries históricas da Bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. *Águas Subterrâneas*. 2016;30(2):190.