

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA EM
AQUÍFEROS POROSOS NO NORDESTE BRASILEIRO UTILIZANDO
DADOS DE MÚLTIPLOS SATÉLITES E MEDIÇÕES *IN SITU***

Clyvihk Renna Camacho¹; Augusto Getirana²; Maria Antonieta A. Mourão³
e Otto Corrêa Rotunno Filho⁴

Resumo – Estudos sobre o comportamento dos aquíferos na região semiárida do Brasil têm se apoiado em monitoramento de poços da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) em dados de satélites, como os da missão *Gravity Recovery e Climate Experiment* (GRACE) e do programa *Global Precipitation Measurement* (GPM). A presente investigação concentra esforços em avaliar a variabilidade do armazenamento de água mediante exame das séries temporais RIMAS, GRACE e GPM associadas sobretudo ao nordeste do Brasil ao longo do período 2002-2020 na medida de suas correspondentes disponibilidades. O trabalho desenvolve uma análise extensiva de comportamento e tendência com base em testes estatísticos de Mann-Kendall, Sen, e Pettitt. Os resultados apontam para perdas de massa de água em todos os aquíferos em estudo e áreas adjacentes, além de fortes relações entre dados RIMAS e GRACE, conforme evidenciam os resultados das análises estatísticas conduzidas.

Abstract – Studies on behavior of aquifers in the semiarid region of Brazil have relied on monitoring wells of the Integrated Groundwater Monitoring Network (RIMAS) and on satellite data, such as those from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission and from Global Precipitation Measurement (GPM) program. The present investigation concentrate efforts in the evaluation of the water storage variability by means of the examination of the time series RIMAS, GRACE and GPM associated notably to the northeast of Brazil in the 2002-2020 time span accordingly to the corresponding data availability. The work develops an extensive analysis of the behavior and tendency based on Mann-Kendall, Sen, and Pettitt statistical tests. The results point out to water mass losses in all the studied aquifers and neighbor areas jointly with strong relationship between RIMAS and GRACE datasets as highlighted by the statistical evaluation herein conducted.

Palavras-Chaves – Hidrogeologia, Armazenamento de água subterrânea, RIMAS; GRACE; GPM.

1 Eng. Geólogo. M.Sc., Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil; Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Belo Horizonte, Brasil. clyvihk.camacho@cprm.gov.br; ORCID - 0000-0003-2545-1118.
2 Eng. Civil. Dr, *Hydrological Sciences Laboratory*, NASA *Goddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD, Estados Unidos da América. *Science Applications International Corporation*, Greenbelt, MD, Estados Unidos da América.
3 Geóloga. Dr^a, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Belo Horizonte, Brasil.
4 Professor, Ph.D., Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Estudos de reconhecimento hidrogeológico no semiárido brasileiro com a utilização de dados dos satélites da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) (TAPLEY, BETTADPUR *et al.*, 2004) têm avançado nos últimos anos. Diversos trabalhos abordam essa temática, como Getirana (2016), que analisou as respostas observadas de variação da anomalia total de água armazenada (em inglês, *total water storage* - TWS) no Brasil, ou Hu *et al.*, (2017), que caracterizaram aquíferos brasileiros com o auxílio de dados GRACE e modelos de assimilação de dados como o GLDAS. Em adição, Li *et al.* (2019) assimilaram dados GRACE em um modelo hidrológico e analisaram as variações das águas subterrâneas em escala global, incluindo o semiárido brasileiro. Ressalta-se ainda o trabalho de Gonçalves *et al.* (2020), que efetuaram um estudo sobre o comportamento do sinal GRACE com base em dados de poços de monitoramento de águas subterrâneas sobre o aquífero Urucuia na região nordeste do Brasil, revelando uma forte tendência negativa no TWS.

As medições *in situ* dos níveis dos aquíferos nordestinos, realizadas pela Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) do Serviço Geológico do Brasil – CPRM permitem constituir acervo de dados que configuram uma referência essencial para análise das variações e oscilações de TWS identificadas por meio do satélite GRACE. Por outro lado, o estudo das águas subterrâneas deve também contemplar os processos de recarga de aquífero, de forma a permitir avaliar o comportamento do sistema aquífero frente às diferentes pressões, naturais ou antropicamente induzidas, sendo a precipitação reconhecida como principal fonte do processo de recarga, podendo historicamente ser usualmente mensurada por pluviômetros e mais recentemente por produtos de satélite. Sikora (2019), por exemplo, ao estudar a distribuição espaço-temporal de chuva para a bacia do rio Madeira na Amazônia, descreve as dificuldades do monitoramento exclusivo da chuva por meio de estações de superfície, expondo que a carência ou escassez de dados de pluviômetros limita a representação do campo pluviométrico, recorrendo ao uso de dados satelitais TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*) e CHIRPS (*Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations*). Essa avaliação confirma análises conduzidas em estudos anteriores, como, por exemplo, em Pereira *et al.* (2013), em que dificuldades quanto ao baixo período de amostragem e dados faltantes em séries históricas coletadas localmente somadas à densidade irregular das estações de medição *in situ* são reiteradamente citadas na literatura. Haja vista a área de estudo do presente trabalho, englobando o nordeste do Brasil e norte do estado de Minas Gerais, face ao desafio de monitorar variações de armazenamento de água em aquíferos da região, impõe-se a importância do uso conjunto de dados satelitais gravimétricos GRACE e de produtos de chuva adquiridos por sensoriamento remoto. Nesse sentido, dados de chuva TRMM e GPM (*Global Precipitation Measurement*), desenvolvido no âmbito da iniciativa denominada de *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG), são examinados. Esses produtos de chuva possibilitam estudar uma área ampla, com histórico de dados a partir do ano 2000 e empregados, no caso deste estudo, segundo a resolução espacial de 0,1°, que pode ser compatibilizado com a escala do produto GRACE reamostrado e selecionado na escala de 0,25°.

Destaca-se que o produto GPM é amplamente utilizado globalmente. Em particular, o dado GPM-IMERG tem sido empregado em estudos diversos de recursos hídricos. Falck *et al.* (2015) efetua uma avaliação de erro em modelos de fluxo para estimar a vazão de rios na região central do Brasil. Zubieta *et al.* (2017) estudaram a relação entre dados observacionais de precipitação *in situ* e dados GPM-IMERG na região da Amazônia peruana para alimentar modelos hidrológicos, tendo sido registrada uma boa aproximação entre essas fontes distintas de dados. Rozante *et al.* (2018) apontaram que os produtos IMERG apresentam melhor desempenho no território brasileiro comparado a outros satélites, além de uma resolução espacial e temporal mais apurada dos produtos de nova geração, sendo os algoritmos IMERG-Final, que também agregam observações *in situ*, os grandes substitutos dos produtos *Multi-Satellite Precipitation Analysis* – TMPA no território brasileiro. Gadelha *et al.* (2019) analisaram a relação entre os dados GPM-IMERG e dados de 4.911 pluviômetros no Brasil e revelaram boa eficiência no uso de dados de satélite para medição pluviométrica, com erros maiores associados a baixas densidades de estações pluviométricas em algumas regiões do Brasil. Mais recentemente, Getirana *et al.* (2020) demonstrou que produtos IMERG têm potencial em monitorar processos que podem vir a desencadear desastres naturais na cidade do Rio de Janeiro.

De fato, o estudo do comportamento das águas subterrâneas, incluindo os processos de recarga e o movimento das massas de água nos continentes, tem nos dados de satélites GPM e GRACE, uma importante componente de apoio para complementar a base de dados RIMAS no que concerne à análise do armazenamento de água em aquíferos.

Diante do desafio estabelecido, busca-se delinear as variações e tendências de armazenamento de água nos aquíferos dispostos, sobretudo na região nordeste do Brasil mediante o emprego dos testes estatísticos de Mann-Kendall, que observa a presença de tendência nas séries, de Sen, que estima a magnitude das tendências das amostras, e de Pettitt, que busca quebras nas sequências e potencial para indicar variações bruscas ou mudanças nas tendências ocorridas. Os testes foram aplicados nas séries temporais das três fontes de dados, GRACE, RIMAS e GPM, durante o período de estudo que se estende de 2002 a 2020.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA E DADOS UTILIZADOS

2.1. Aquíferos porosos e o monitoramento RIMAS

O monitoramento hidrogeológico (RIMAS), iniciado pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG) em 2009, busca contemplar a grande variedade hidrogeológica do Brasil com os seguintes critérios para implantação dos poços de monitoramento (Mourão, 2009): aquíferos sedimentares, importância socioeconômica da água, uso da água para abastecimento público, aspectos de vulnerabilidade natural e riscos, representatividade espacial do aquífero e existência de poços para monitoramento. O presente estudo abrange as áreas de ocorrência dos aquíferos monitorados pela RIMAS no nordeste brasileiro e norte do estado de Minas Gerais, notadamente os aquíferos Açú, Barreiras, Beberibe, Cabeças, Mauriti, Missão Velha, Poti-Piauí, Serra Grande, Tacaratu, e Urucuia. A Figura 1 mostra a localização dos aquíferos monitorados e poços instalados da RIMAS para a área de estudo.

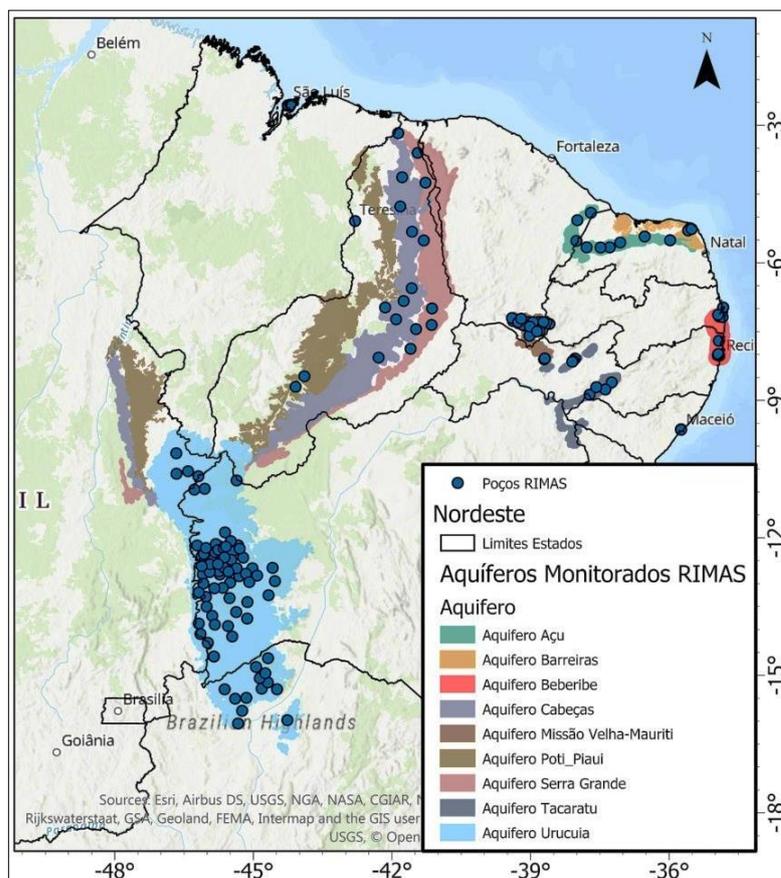


Figura 1- Aquíferos monitorados pela RIMAS e poços instalados na área de estudo.

Os relatórios no nível de diagnóstico confeccionados pelo SGB (SGB, 2009) mostram detalhes sobre a geologia e hidrogeologia de cada aquífero estudado, contudo cabe ressaltar que se trata de aquíferos livres, porosos, ou seja, apresentam uma comunicação direta com a superfície.

2.2. Dados GRACE

Os satélites da missão GRACE, de responsabilidade conjunta das agências espaciais dos Estados Unidos da América (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA) e Alemanha (*German Aerospace Center* - DLR), têm como principal objetivo a obtenção do campo gravitacional terrestre em alta resolução. Balmino (2003) descreve o funcionamento dos satélites da missão GRACE como medição das variações no campo de gravidade que causam alterações na distância entre os dois satélites. Assim, em áreas de maior gravidade, o satélite líder será atraído, acelerando-o e aumentando sua distância em relação ao segundo satélite. As variações na distância entre os satélites são mensuradas por um sistema de micro-ondas de alta precisão, onde a relação com o sistema de referência global é dada por GPS, sendo corrigidas de efeitos não gravitacionais por um acelerômetro preciso.

Após as etapas de processamento, as soluções mensais GRACE, denominadas blocos de massa concentrada (*mascons*), que correspondem ao conjunto de harmônicos esféricos referentes à variação do campo de gravidade, são fornecidas para a comunidade científica internacional (Xavier, 2012). Swenson *et al.* (2003) relatam que as variações continentais dos volumes totais de água armazenada (TWS) podem ser medidas, considerando que as grandes variações de massa sobre os continentes a cada mês são resultantes da movimentação das massas de água.

Postas essas observações, o trabalho utiliza dados GRACE RL06 V02 entre 04/2002 a 07/2020 obtidos junto a Universidade do Texas e *Jet Propulsion Laboratory* – JPL/NASA no portal http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html com resolução espacial de 0,25° e passo de tempo mensal.

2.3. Dados GPM-IMERG

Desenvolvido pela NASA em parceria com o Japão (*Japan Aeronautics Agency* - JAXA) o projeto GPM-IMERG visa monitorar globalmente, por meio de satélites, as precipitações na atmosfera, com alta resolução temporal, mais precisamente de 1 hora. O *GPM Core Observatory* possui instrumentos avançados para medir chuvas, neve, gelo e outras precipitações. Os dados mais precisos do GPM são usados para unificar e padronizar as observações de precipitação de outros satélites da constelação e produzir os dados da missão. O GPM é a continuação natural do processo iniciado com a missão *Tropical Rainfall Measuring Mission* - TRMM (1997 - 2015). A precipitação estimada é criada por um algoritmo concebido pelo *Multi-Satellite Precipitation Analysis* e nomeado de IMERG. Com acesso aos dados disponibilizado pela NASA, a partir do ano de 2015, no endereço eletrônico <https://gpm.nasa.gov/data/imerg> encontra-se um conjunto de três (3) produtos principais, IMERG-*Early*, IMERG-*Late* e IMERG-*Final*, cada um representando uma latência, com área variável. Este estudo utiliza dados mensais do IMERG-*Final*, com resolução espacial de 0.1°, entre 04/2002 a 07/2020.

3. METODOLOGIA

O trabalho busca integrar dados de monitoramento de níveis de água *in situ* da RIMAS, dados GRACE e dados de precipitação GPM para caracterizar a variabilidade da água subterrânea nos aquíferos da região nordeste do Brasil e norte do estado de Minas Gerais. A abordagem metodológica abrange a aplicação de testes estatísticos no nível de confiança de 95%.

O teste estatístico de Mann-Kendall é um teste não paramétrico (Sneyers, 1991) utilizado para avaliar a significância das tendências das séries temporais em estudo, sendo muito apropriado para analisar possíveis mudanças em séries temporais (Goossens e Berger, 1986). O teste indica se a série de dados tem uma tendência crescente, decrescente ou não apresenta tendência. A fórmula para o cálculo do teste de Mann-Kendall é, com base em Silva *et al.* (2019) dada por

$$Z = \frac{S + u}{\sqrt{\frac{VAR(S)}{1}}} \quad (1)$$

onde VAR(S) é a variância com $u = -1$ se $S > 0$, $u = 0$ se $S = 0$ e $u = +1$ se $S < 0$; então, tem-se

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signal}(x_j - x_k) \quad (2)$$

para

$\text{signal}(x_j - x_k) = 1$ se $x_j - x_k > 0$, $\text{signal}(x_j - x_k) = 0$ se $x_j - x_k = 0$ e $\text{signal}(x_j - x_k) = -1$ se $x_j - x_k < 0$,

com:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1) \cdot (2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p \cdot (t_p - 1) \cdot (2t_p + 5) \right] \quad (3)$$

As séries temporais x variam de $k(j=k+1)$ a n . O número de grupos de valores repetidos é dado pelo valor de g (uma diferença nula entre os valores comparados) e o número de valores repetidos em cada grupo p (até g), é representado por t na Equação 3. A tendência é indicada pelo valor de Z na Equação 1. O resultado de Z positivo indica que a série temporal apresenta uma tendência crescente, enquanto que Z negativo revela uma tendência decrescente. Resultado zero aponta ausência de tendência.

O teste estatístico de Sen, assim como o de Mann-Kendall, é um teste não paramétrico, e usado para estimar as magnitudes das tendências observadas nos conjuntos de dados (Sen, 1968). O cálculo da inclinação de Sen é feito pela Equação 4 na forma

$$\text{SEN} = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j + i \quad (4)$$

O teste de Sen é insensível a dados ausentes e valores extremos (*outliers*) nas séries, sendo mais rigoroso do que a inclinação de uma regressão normal e fornecendo uma medida mais realista das tendências das séries temporais (Silva *et al.*, 2019).

Por fim, emprega-se o teste de Pettitt (Pettitt, 1979), que também é um teste não paramétrico baseado na classificação e utilizado para detectar pontos de mudança presentes em séries de dados (Conte *et al.*, 2019). Para obter os pontos de mudança, tem-se a hipótese a ser testada:

$$\begin{cases} H_0: F_1(X) = F_2(X) \text{ sem mudança} \\ H_1: F_1(X) \neq F_2(X) \text{ com mudança} \end{cases} \quad (5)$$

Para detectar o ponto de mudança, o teste utiliza a estatística $U_{t,T}$ similar ao teste de Mann-Whitney para duas amostras (Mann e Whitney, 1947), fornecido pelas equações a seguir.

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j), 1 \leq t < T \quad (6)$$

onde:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, \text{ se } x > 0 \\ 0, \text{ se } x = 0 \\ -1, \text{ se } x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

O ponto mais provável para uma mudança τ será quando a Equação 8 for satisfeita:

$$K_\tau = U_{\tau,T} = \max |U_{t,T}|, 1 \leq t \leq T \quad (8)$$

Baseado nos agrupamentos assintóticos do teste, Pettitt define o valor de p aproximado como:

$$p \approx 2 \exp \left(\frac{-6K_\tau^2}{T^3 + T^2} \right) \quad (9)$$

Sendo assim, dado um valor α de significância, se $p < \alpha$, a hipótese nula (H_0), que as duas distribuições são iguais, é rejeitada.

Para aplicar os testes em todas as séries temporais, foram criados vários algoritmos em linguagem de programação Python.

Um desafio comumente encontrado em trabalhos que utilizam dados de diferentes fontes é a grande variação espacial nos dados, resultando em um problema de análise de escala. Nesse sentido, para compatibilizar as diferenças de escalas entre os produtos utilizados no estudo, os valores do GPM-IMERG, inicialmente em escala de 0,1° foram interpolados para 0,25°, de modo que os resultados dos dados GRACE e GPM pudessem ser contrastados e avaliados conjuntamente.

Os dados GRACE e GPM foram separados em dois conjuntos: (i) o primeiro com séries temporais entre 2002 e 2020; (ii) o segundo com séries temporais entre 2010 e 2020. O segundo conjunto foi criado para que exista uma sobreposição com dados RIMAS disponíveis para a área de estudo.

Os dados RIMAS utilizados foram adquiridos diretamente do banco de dados do SGB no formato original de nível estático (NE) horário. Foi calculado o valor da média mensal a partir da mediana dos valores diários para cada poço da RIMAS. Em seguida, foi calculada a variação do nível das águas subterrâneas para cada mês em cada poço. Para tanto, o valor de um mês foi subtraído do valor do mês anterior, resultando na variação do NE, conforme ilustra a Equação 10:

$$var\ m\hat{e}s_0 = m\acute{e}dia_m\hat{e}s_i - m\acute{e}dia_m\hat{e}s_{i-1} \quad (10)$$

Após esse processo, o valor da média total da variação foi calculado, e esse valor foi retirado de $var\ m\hat{e}s_0$, resultando nos dados utilizados no trabalho. O cálculo é necessário, pois os dados GRACE, que serão usados para comparação, representam a variação do total de água armazenada por área em relação à média obtida das observações dos satélites entre 2002 e 2009. A Equação 11 mostra o cálculo de $var\ m\hat{e}s$:

$$var\ m\hat{e}s = var\ m\hat{e}s_0 - m\acute{e}dia(var\ m\hat{e}s_0) \quad (11)$$

Para aplicar os testes estatísticos sobre os dados RIMAS, foram considerados apenas poços que até 07/2020 possuíam no mínimo 60 meses com valores de medidas de nível estático, resultando em 98 poços selecionados para a área de estudo. Esse critério foi utilizado, uma vez que o processo de instalação de poços da rede não foi simultâneo, e a operação pode implicar alguns problemas, resultando em séries temporais curtas ou lacunas extensas nos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do teste de Mann-Kendall para os dados GRACE (Figura 2) mostram uma tendência decrescente para quase toda a área de estudo. Na resposta para o período de 2002 a 2020, é possível observar, ao norte dos aquíferos Cabeças e Poti, que corresponde ao norte dos estados do Ceará e do Piauí, ausência de tendência, situação que se modifica no mapa de 2010 a 2020. A maior parte dos poços RIMAS mostra igualmente uma tendência decrescente para esse teste, com poucas exceções. Dois poços no aquífero Beberibe e um no Açú retornaram valores crescentes para a análise, além de dois poços nos aquíferos Cabeças e Missão Velha-Mauriti, um poço no Beberibe e um poço no Urucuia, com resultados indicando ausência de tendência.

A inclinação de Sen (Figura 2) revela, para os dados GRACE, uma mudança significativa do período de 2002 a 2020 em contraste com o período de 2010 a 2020, com uma inclinação negativa maior nas áreas de estudo para esse último intervalo, revelando uma perda de massa de água. Os poços RIMAS no Aquífero Urucuia refletem com mais intensidade a perda de água ressaltada pelo GRACE. Ao norte, os aquíferos Poti e Cabeças também apresentam uma perda de coluna de água para a maioria dos poços. Situação semelhante foi também verificada para os aquíferos Missão Velha-Mauriti, Tacaratu e Açú. Já o aquífero Beberibe mostra uma menor inclinação geral da resposta do teste Sen.

O teste de Pettitt (Figura 2) revela uma quebra nas sequências GRACE na parte setentrional dos mapas, atingindo parte dos aquíferos Cabeças, Poti, Beberibe, Açú e Barreiras. Para o período de 2010 a 2020, verifica-se uma ampliação da área com quebra de sequências. Quanto aos poços RIMAS, todos apresentaram quebra nas sequências, como esperado.

Os resultados do teste de Mann-Kendall para os dados GPM (Figura 3), por sua vez, apontam para a não variação da tendência nos dados, ou seja, a precipitação na área não sofreu grandes variações durante o período de estudo, tanto para o conjunto de dados a partir de 2002

quanto para o conjunto a partir de 2010. Apenas uma pequena área no aquífero Tacaratu mostra uma tendência decrescente no mapa entre 2002 a 2020.

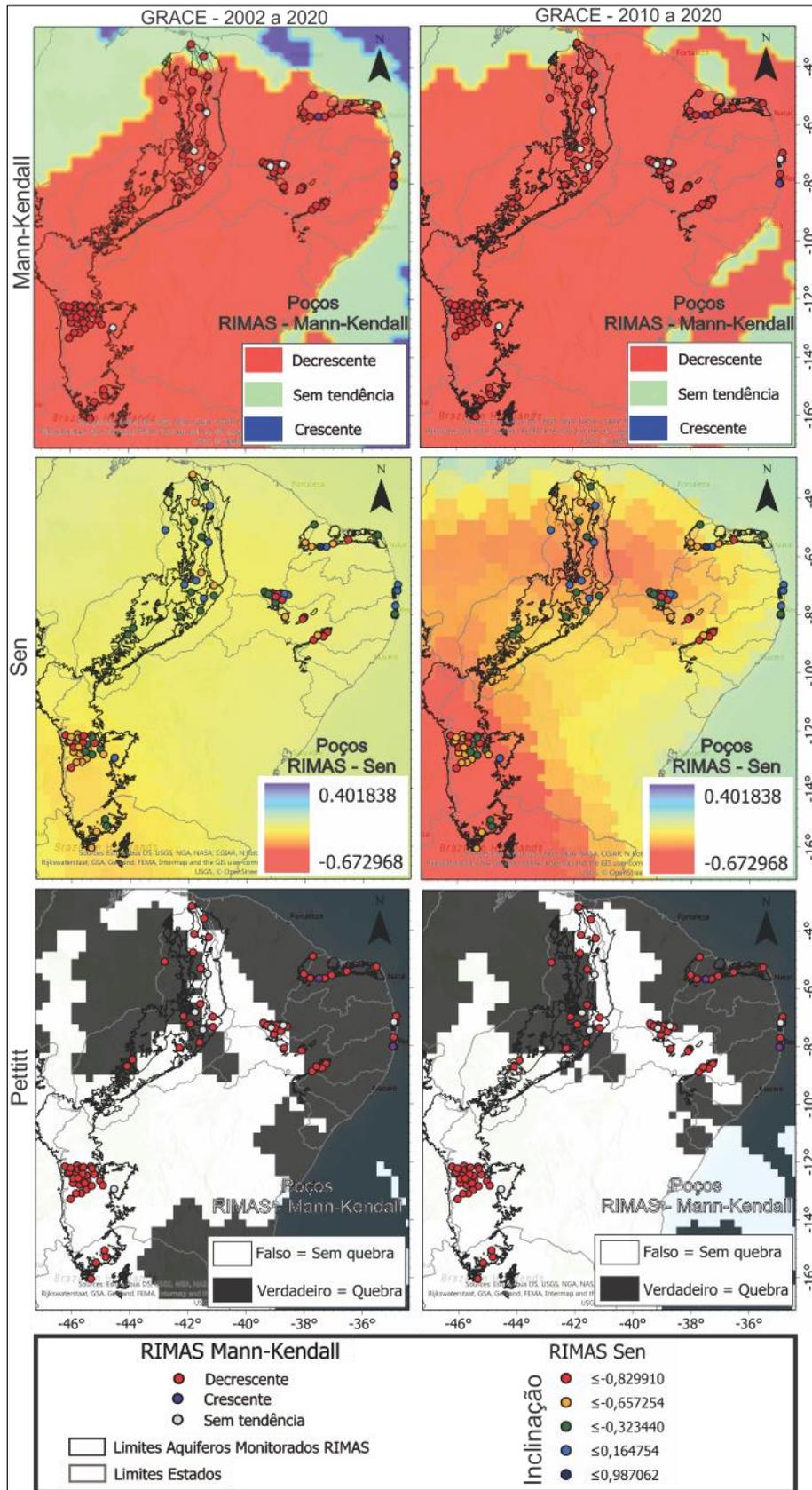


Figura 2 - Mapas com resultados dos testes estatísticos aplicados sobre os dados GRACE e RIMAS.

A inclinação de Sen reflete uma leve tendência positiva para os dados GPM (Figura 3) a partir de 2010, o que não é verificado na análise da resposta dos poços, resultado este esperado, visto que deve existir um atraso entre a precipitação e o processo de recarga. Porém o atraso

deve ser proporcional ao tempo de trânsito da água até o nível estático observado no poço, fato que não fica claro neste estudo. O teste de Pettitt mostra, para os dados GPM (Figura 3), permanência das sequências de precipitação, ou seja, sem quebras, em quase toda a área de estudo, indicando uma constância na tendência de precipitação durante o período de estudo.

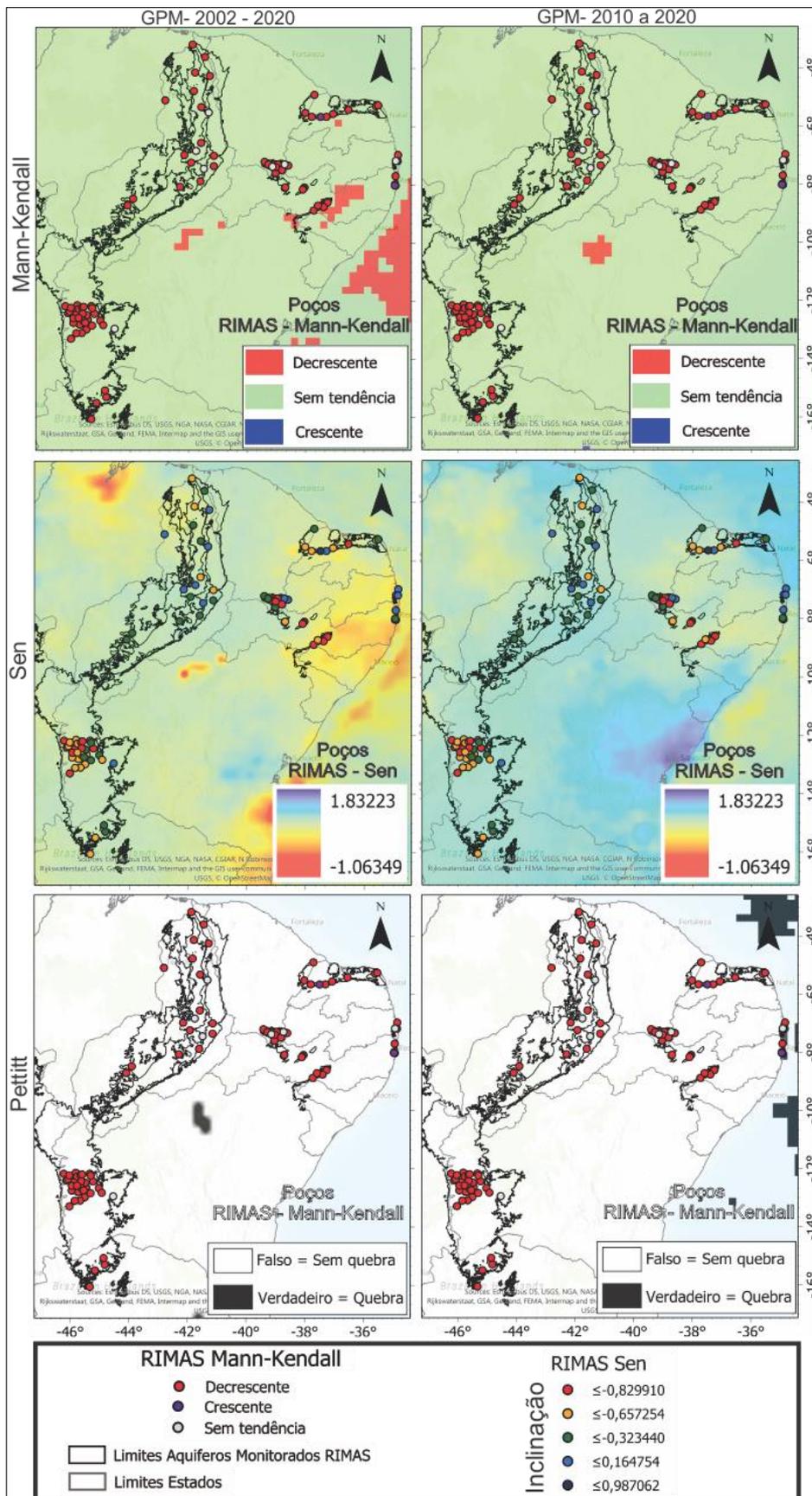


Figura 3- Mapas com resultados dos testes estatísticos aplicados sobre os dados GPM e RIMAS.

5. CONCLUSÕES

O estudo revela que os dados coletados pela rede de monitoramento RIMAS, associados a dados de satélites, GRACE e GPM, compõem uma base de dados valiosa. A metodologia proposta ilustra a importância da complementaridade de informações coletadas *in situ* e por sensoriamento remoto para o melhor entendimento e monitoramento das águas subterrâneas.

Os resultados dos testes Mann-Kendall nos dados RIMAS e GRACE mostram uma tendência decrescente no armazenamento de águas subterrâneas para a região, mesmo em áreas com regimes estacionários de precipitação, como demonstrado pelos resultados Mann-Kendall dos dados GPM. A inclinação das respostas Sen nos conjuntos de dados GRACE e RIMAS apontam para uma redução no armazenamento de água, em especial para toda a área de ocorrência dos aquíferos Urucuia, Missão Velha-Mauriti e porção média da área de exposição dos aquíferos Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande. O teste de Pettitt, mostra que não existiram grandes mudanças na precipitação da área de estudo, o que chama a atenção para os resultados GRACE e RIMAS dos testes de Mann-Kendall e Sen. Assim surge a questão, qual seria o motivo das respostas decrescentes nos armazenamentos do TWS e dos níveis das águas subterrâneas medidos pela RIMAS. O teste de Sen pode indicar que, mesmo sem grandes variações nas tendências de precipitação, houve uma diminuição da precipitação para o período de 2002 a 2020, como apontados pela leve inclinação negativa do teste.

Face a essas análises, recomenda-se que o metodologia proposta neste trabalho seja conjugada com o estudo de outros fatores também importantes para a redução no armazenamento de água subterrânea e rebaixamento dos níveis de água, sobretudo procedimentos que envolvam os processos de exploração por poços tubulares e a captação de águas superficiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as instituições que geram e difundem os dados utilizados neste trabalho: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, dados RIMAS, *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, dados GRACE e GPM. Clyvihk Renna Camacho agradece a CPRM pelo fomento à pesquisa, bem como a COPPE/UFRJ pela estrutura de apoio por meio do laboratório LABH2O do Programa de Engenharia Civil - PEC, à *JetBrains*, por disponibilizar gratuitamente a versão profissional do IDE *PyCharm*. Especial a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

REFERÊNCIAS

- BALMINO, G. "Gravity field recovery from GRACE: Unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis methods", *Space Science Reviews*, v. 108, n. 1–2, p. 47–54, 2003. DOI: 10.1023/A:1026169729063.
- CLARKE, R. T., DIAS, P. L. da S. As necessidades de observação e monitoramento dos ambientes brasileiros quanto aos recursos hídricos. Brasília, [s.n.], fev. 2003.
- CONTE, L. C., BAYER, D. M., BAYER, F. M. "Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data: case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil", *Hydrological Sciences Journal*, v. 64, n. 11, p. 1312–1326, 2019. DOI: 10.1080/02626667.2019.1632461.
- FALCK, A. S., *et al.* "Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil", *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 943–957, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.042.
- GADELHA, A. N., *et al.* "Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales", *Atmospheric Research*, v. 218, p. 231–244, 2019. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.12.001.
- GETIRANA, A. "Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space", *Journal of Hydrometeorology*, 2016. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0096.1. .
- GETIRANA, A., *et al.* "Potential of GPM IMERG precipitation estimates to monitor natural disaster triggers in urban areas: The case of Rio de Janeiro, Brazil", *Remote Sensing*, v. 12, n. 24, p. 1–20,

2020. DOI: 10.3390/rs12244095.

GONÇALVES, R. D., *et al.* "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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135845.

GOOSSENS, C., BERGER, A. "Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century.", *Annales Geophysicae*, p. 385–400, 1986.

HU, K., *et al.* "Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products", *Science of the Total Environment*, v. 599–600, p. 372–386, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.188.

LI, B., *et al.* "Global GRACE Data Assimilation for Groundwater and Drought Monitoring: Advances and Challenges", *Water Resources Research*, v. 55, n. 9, p. 7564–7586, 2019. DOI: 10.1029/2018WR024618.

MANN, H. B., WHITNEY, D. R. "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other Author (s): H . B . Mann and D . R . Whitney Source", *The Annals of Mathematical Statistics* , Vol . 18 , No . 1 (Mar . , 1947) , pp . 50-60, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947.

MOURÃO, M. A. A. Projeto - Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - Proposta Técnica. . Belo Horizonte, [s.n.], abr. 2009. Disponível em: http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/proposta_monitoramento_CPRM_2009.pdf.

PEREIRA, G., *et al.* "Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil", *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 139–148, 2013.

PETTITT. "A Non-parametric to the Approach Problem", *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

ROZANTE, J. R., *et al.* "Remote Sensing Evaluation of TRMM/GPM Blended Daily Products over Brazil", *Remote Sensing*, p. 17, 2018. DOI: 10.3390/rs10060882.

SEN, P. K. "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau", *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.

STRECK, A. *et al.* "Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico". *Pesq. agropec. bras*, Brasília, dez. 2009. v. 44, p. 1553–1561.

SGB, S. G. do B. Relatórios-Diagnóstico dos Aquíferos Sedimentares do Brasil. 2009. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>. Acesso em: 30 jan. 2021.

SILVA, W.L., *et al.* "Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants", *Theoretical and Applied Climatology*, v. 137, n. 1–2, p. 353–371, 2019. DOI: 10.1007/s00704-018-2600-8.

SIKORA, V. A. S. Padrões e tendências hidroclimáticas de chuva identificados por sensoriamento remoto na bacia do rio madeira - Amazônia. 2019. 277 f. COPPE/UFRJ, 2019.

SNEYERS, R. On the statistical analysis of series of observations. 2. ed. Geneva, Meteorological Organization, 1991.

SWENSON, S., WAHR, J., MILLY, P. C. D. "Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)", *Water Resources Research*, 2003. DOI: 10.1029/2002WR001808.

TAPLEY, B. D., *et al.* "GRACE measurements of mass variability in the Earth system", *Science*, v. 305, n. 5683, p. 503–505, 23 jul. 2004. DOI: 10.1126/science.1099192.

XAVIER, L. R. N. Modelagem Hidrológica Com O Aporte De Dados Da Missão Espacial Grace: Aplicação A Bacias Brasileiras. 2012. 250 f. UFRJ/COPPE, 2012.

ZUBIETA, R., *et al.* "Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset", *Hydrol. Earth Syst. Sci*, v. 21, p. 3543–3555, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-3543-2017.