ANÁLISE TEMPORAL DO ARMAZENAMENTO HÍDRICO EM BACIA HIDROGRÁFICA UTILIZANDO DADOS DO GRACE E O MODELO GR2M

Thaís Baêta Costa Barbosa [1]; Clara Demattos Nogueira [2]; Francisco Eustáquio Oliveira e Silva [3]; Priscilla Macedo Moura [4]; & Veber Afonso Figueiredo Costa [5]

Palavras-Chave – Seca agrícola, Modelo hidrológico, Sensoriamento remoto.

INTRODUÇÃO

O armazenamento de água no solo desempenha papel fundamental na manutenção da produção agrícola e na dinâmica do ciclo hidrológico. Reduções nesse armazenamento favorecem o desenvolvimento de secas agrícolas, caracterizadas pela insuficiência de umidade para suprir as necessidades das culturas, podendo resultar em impactos econômicos, sociais e ambientais (Mishra & Singh, 2010). Além disso, a propagação desse déficit para outros compartimentos do ciclo hidrológico pode comprometer a disponibilidade hídrica em rios e reservatórios (Van Loon, 2015). Nesse contexto, o monitoramento do armazenamento hídrico é essencial para compreender a dinâmica hidrológica das bacias e subsidiar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Para esse fim, modelos hidrológicos são ferramentas importantes por representarem, ainda que de maneira simplificada, os principais processos do ciclo hidrológico.

Dentre os modelos conceituais mais conhecidos, destacam-se aqueles da família GR (*Génie Rural*), amplamente utilizados devido à sua estrutura parcimoniosa e à reduzida necessidade de dados de entrada. O GR2M, proposto por Mouelhi *et al.* (2006) e escolhido para este estudo, representa o comportamento hidrológico da bacia em escala mensal por meio de um reservatório de produção e de um reservatório de propagação. Além disso, o modelo apresenta desempenho satisfatório na simulação de vazões mensais em diferentes bacias hidrográficas (Mouelhi *et al.*, 2006; Huard & Mailhot, 2008). Embora esses modelos permitam simular a dinâmica do armazenamento hídrico, sua avaliação é dificultada pela escassez de observações diretas em escala de bacia. Nesse contexto, produtos de sensoriamento remoto constituem uma importante fonte independente de informação para a análise e validação dessas estimativas.

A missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), composta por dois satélites gêmeos que operaram entre abril de 2002 e junho de 2017, e sua sucessora, GRACE Follow-On (GRACE-FO), em operação desde junho de 2018 (Landerer *et al.*, 2020), possibilitam o monitoramento das variações temporais do armazenamento total de água terrestre por meio da detecção de mudanças no campo gravitacional da Terra. Dentre os produtos derivados dessas missões, destacam-se os blocos de concentração de massa (*mass concentration blocks – mascons*), descritos por Watkins *et al.* (2015), que estimam as variações do campo gravitacional em células de área equivalente distribuídas sobre a superfície terrestre. A partir dessas estimativas mensais, são disponibilizadas as anomalias do armazenamento total de água terrestre (*Terrestrial Water Storage Anomaly* – TWSA), expressas em centímetro (cm) de espessura equivalente de água (*Equivalent Water Thickness* – EWT).

1) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, BH/MG. (31) 3409-1870. thaisbcb@gmail.com
2) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. clarademattosnogueira@gmail.com
3) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. fcoeustaquio@ufmg.br
4) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. pmmoura@ufmg.br
5) Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. veber@ehr.ufmg.br

O objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial das estimativas de TWSA obtidas pelo GRACE para representar a dinâmica do armazenamento hídrico da bacia hidrográfica da estação fluviométrica Jardim, por meio da comparação com o armazenamento simulado pelo modelo hidrológico GR2M.

METODOLOGIA

A área de estudo corresponde à bacia da estação fluviométrica Jardim (código 40811100), localizada no córrego Juatuba, pertencente à bacia do rio Paraopeba, inserida na bacia hidrográfica do rio São Francisco. A bacia foi selecionada por apresentar uso do solo predominantemente agropecuário, correspondendo a aproximadamente 60% de sua área (MapBiomas, 2025), o que torna o monitoramento do armazenamento de água particularmente relevante devido à sua influência sobre a disponibilidade hídrica e a ocorrência de seca agrícola. Até a seção de monitoramento, tem-se uma área de drenagem de aproximadamente 113 km². A estação é monitorada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e está localizada em um afluente do reservatório Serra Azul, um dos principais mananciais de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Os dados de precipitação e vazão foram obtidos no sistema HidroWeb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), enquanto os dados de evapotranspiração potencial foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de precipitação mensal foram obtidos a partir de quatro estações pluviométricas, sendo posteriormente espacializados pelo método dos polígonos de Thiessen para obtenção da série histórica mensal média da bacia, utilizada como entrada no modelo GR2M. A evapotranspiração potencial foi obtida a partir da normal climatológica (1991–2020) da estação de Belo Horizonte, enquanto os dados de vazão observada da estação Jardim foram empregados na calibração e validação do modelo hidrológico. A Tabela 1 apresenta os dados das estações citadas.

Tabela 1 – Metadados das estações hidrometeorológicas utilizadas

Código	Nome do posto	Tipo	Latitude	Longitude	Período de observação
2044021	Alto da Boa Vista	Pluviométrica	-20,1056	-44,4011	1972 - 2019
2044041	Fazenda Laranjeiras - Jusante	Pluviométrica	-20,1022	-44,4847	1976 - 2025
2044052	Jardim	Pluviométrica	-20,0450	-44,4078	1982 - 2025
2044054	Serra Azul	Pluviométrica	-20,0867	-44,4272	1987 - 2025
40811100	Jardim	Fluviométrica	-20,0475	-44,4089	1979 - 2025
83587	Belo Horizonte	Meteorológica convencional	-19,9344	-43,9522	1991 - 2020

O modelo hidrológico GR2M foi implementado no software R, por meio do pacote airGR (Coron *et al.*, 2017), para simular o balanço hídrico mensal da bacia. O modelo possui dois parâmetros passíveis de calibração: X_1, correspondente à capacidade máxima do reservatório de produção, e X_2, relacionado às trocas de água com o meio externo, conforme implementação adotada no airGR. Os parâmetros foram calibrados automaticamente pela função '*Calibration_Michel*', utilizando como função objetivo o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), calculado a partir das vazões observadas na estação Jardim.

As simulações compreenderam o período de 1990 a 2020, considerando um ano de aquecimento do modelo (*warm-up*), calibração entre 1991 e 2005 e validação entre 2006 e 2020. Os armazenamentos dos reservatórios de produção e propagação foram somados e posteriormente padronizados para comparação com as anomalias padronizadas de TWSA obtidas pelo GRACE.

As anomalias mensais TWSA foram obtidas a partir do produto GRACE *Monthly Mass Grids Release 06 Version 04 – Mascon* (NASA/GRACE/MASS_GRIDS_V04/MASCON), disponível na

plataforma Google Earth Engine. Embora os dados sejam disponibilizados em uma grade de 0,5° x 0,5°, a resolução espacial efetiva do produto é de aproximadamente 3° (~300 km), correspondente aos *mascons* utilizados na estimativa das variações do campo gravitacional (Watkins *et al.*, 2015).

A série temporal das anomalias na bacia hidrográfica da estação Jardim foi obtida pela extração dos valores mensais da banda '*lwe_thickness*' sobre a área da bacia. Por meio do *Mascon Visualization Tool* do *Colorado Center for Astrodynamics Research* (CCAR, 2025), verificou-se que toda a bacia está contida no *mascon* #3136. Dessa forma, a série temporal extraída representa diretamente as variações de TWSA desse único *mascon*, expressas em centímetros de EWT, e foi padronizada e utilizada na comparação com o armazenamento simulado pelo modelo hidrológico GR2M.

RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a comparação entre as anomalias padronizadas do armazenamento hídrico obtidas pelo GRACE e as simuladas pelo modelo hidrológico GR2M. Apesar da diferença entre as abordagens empregadas, observa-se que ambas as séries reproduzem os principais períodos de aumento e redução do armazenamento ao longo da série histórica, evidenciando o potencial das estimativas derivadas do GRACE para representar a dinâmica temporal do armazenamento mesmo em uma bacia de pequena dimensão. Ressalta-se que a série do GR2M foi construída a partir da soma dos armazenamentos dos reservatórios de produção e propagação, enquanto a série do GRACE corresponde às anomalias do armazenamento total de água terrestre (TWSA).

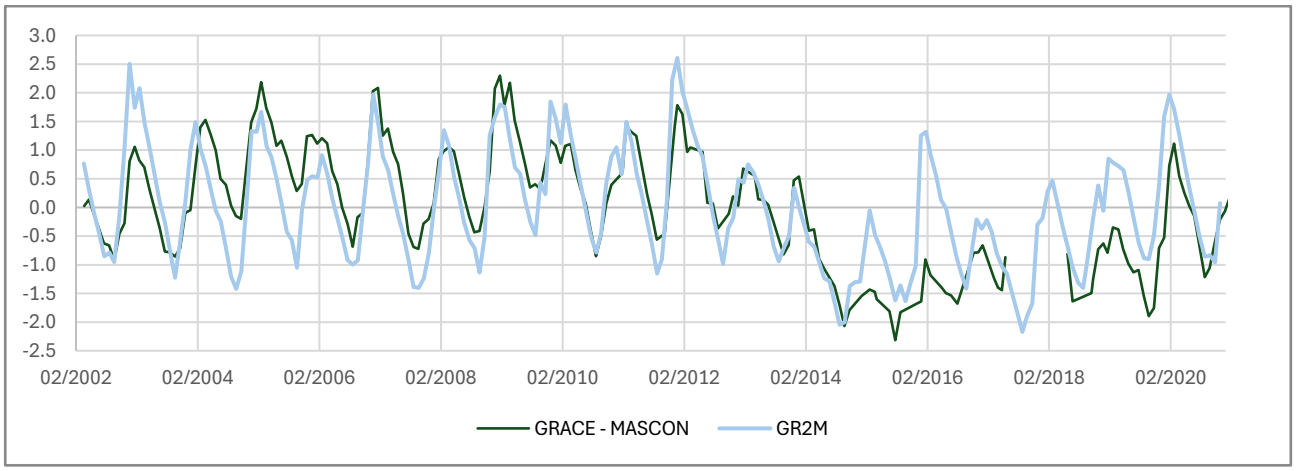


Figura 1. Gráfico comparativo das séries de armazenamento de água – GRACE x GR2M. Fonte: autoria própria.

As maiores divergências são observadas a partir do ano de 2015, período caracterizado por menores armazenamentos e condições hidrológicas mais secas. Nessa fase, o GR2M tende a superestimar as anomalias positivas e subestimar as anomalias negativas em relação ao GRACE, comportamento que pode estar associado ao processo de calibração do modelo. Como a calibração foi realizada entre 1991 e 2005, período relativamente mais úmido e caracterizado por maiores vazões, os parâmetros obtidos representam de forma mais adequada condições hidrológicas mais úmidas, comprometendo a representação dos períodos de menor disponibilidade hídrica observados nos anos posteriores.

Outra limitação importante está relacionada à interrupção da missão GRACE entre maio de 2017 e maio de 2018, correspondente ao intervalo entre o encerramento da missão original e o início da missão GRACE-FO, resultando em uma descontinuidade da série temporal que limita análises contínuas nesse período. Além disso, devem ser consideradas as limitações inerentes ao próprio produto GRACE. Embora os dados sejam disponibilizados em grade de 0,5°, sua resolução espacial efetiva (~300 km) é bastante superior às dimensões da bacia estudada (113 km²). Dessa forma, as estimativas de armazenamento representam uma área significativamente maior que a bacia

hidrográfica, o que pode suavizar variações locais e contribuir para as diferenças observadas entre as séries.

CONCLUSÕES

As estimativas de TWSA obtidas pelo GRACE apresentaram potencial para representar a dinâmica temporal do armazenamento hídrico da bacia, reproduzindo os principais padrões de variação observados nas simulações do modelo GR2M. As diferenças identificadas entre as séries estão associadas tanto às limitações da modelagem hidrológica, especialmente em períodos de menor disponibilidade hídrica devido à calibração realizada sob condições mais úmidas, quanto à resolução espacial do produto e à descontinuidade entre as missões GRACE e GRACE-FO. Ainda assim, os resultados demonstram o potencial do GRACE como fonte complementar e independente de informação para estudos de armazenamento hídrico, seca agrícola e gestão de recursos hídricos, particularmente em bacias com limitada disponibilidade de dados observados.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. "*HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas"*. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao

CCAR - COLORADO CENTER FOR ASTRODYNAMICS RESEARCH (2025). "*GRACE Mascon Visualization Tool"*. University of Colorado Boulder. Disponível em: https://ccar.colorado.edu/grace/

CORON, L.; THIREL, G.; DELAIGUE, O.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V. (2017). "*The suite of lumped GR hydrological models in an R package*". Environmental Modelling & Software, v.94, p.166–171.

HUARD, D.; MAILHOT, A. (2008). "*Calibration of hydrological model GR2M using Bayesian uncertainty analysis*". Water Resources Research, v.44, W02424.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. "*Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*". Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/

LANDERER, F. W.; FLECHTNER, F. M.; SAVE, H.; *et al.* (2020). "*Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance*". Geophysical Research Letters, v.47, e2020GL088306.

MAPBIOMAS. (2025). "*Projeto MapBiomas – Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil*". Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. (2010). "*A review of drought concepts*". Journal of Hydrology, v.391, p.202–216.

MOUELHI, S.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V. (2006). "*Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model*". Journal of Hydrology, v.318, p.200–214.

VAN LOON, A. F. (2015). "*Hydrological drought explained*". WIREs Water, v.2, p.359–392.

WATKINS, M. M.; WIESE, D. N.; YUAN, D.-N.; BOENING, C.; LANDERER, F. W. (2015). "*Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons*". Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v.120, p.2648–2671.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa hydro_stat pelas discussões e contribuições científicas. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido.