

Da gravidade à água: analisando a mudança climática no Brasil com métodos computacionais

Fabian Trigo

Universidade de Valparaíso, Chile

Resumo

A previsão de secas e inundações em contextos climáticos complexos exige análises robustas que combinem informações de variabilidade espacial e temporal. Este trabalho emprega dados gravitacionais das missões GRACE para investigar a dinâmica hídrica no Brasil, região de importância estratégica devido à sua extensa rede fluvial e à alta sensibilidade a fenômenos climáticos globais, como o El Niño e a Oscilação Decadal do Pacífico. Adotando uma abordagem computacional apoiada em métodos como a Descomposição em Valores Singulares (SVD), CFAR (detecção de picos) e DBSCAN (agrupamento espacial), identificam-se padrões de variação e áreas de maior vulnerabilidade hídrica, com destaque para as regiões de Manaus, do Mato Grosso e Minas Gerais.

Abstract

Predicting droughts and floods in climatically dynamic regions requires rigorous analyses that integrate both spatial and temporal information. This study leverages gravitational data from the GRACE missions to examine hydrological variability in Brazil, an area of strategic importance due to its extensive river network and high sensitivity to global climate phenomena such as *El Niño* and the Pacific Decadal Oscillation. By adopting a computational framework that includes Singular Value Decomposition (SVD), CFAR (peak detection), and DBSCAN (spatial clustering), key variability patterns are identified and highlight regions with elevated hydrological vulnerability, notably Manaus, Mato Grosso, and Minas Gerais.

Palavras-chave: clima, GRACE, gravidade, Brasil, água, FFT, SVD, DBSCAN

Keywords: climate, GRACE, gravity, Brazil, water, FFT, SVD, DBSCAN

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47311](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47311)

1 Introdução

Prevê-se um maior risco de secas para mais de 50 países até 2030 [1], afetando adicionalmente 180 milhões de pessoas. A interação não linear entre rios e chuvas exige métodos de previsão sofisticados [2]. Inundações e secas amazônicas, como as documentadas em [3, 4], e eventos mais recentes, como as enchentes na Espanha em 2024, particularmente em Valência [5], ganharam destaque global devido à sua severidade.

No campo da previsão de eventos extremos, embora o senso comum sugira uma relação direta e proporcional entre a quantidade de chuva torrencial e a magnitude das inundações, a Ref. [6] analisa regiões dos Estados Unidos para explorar essa conexão. Os resultados revelam que os padrões espaciais das mudanças na chuva torrencial

explicam menos de 20% das variações espaciais das inundações. Os estudos mostram que existe uma relação altamente não linear, na qual fatores adicionais, como evaporação e transporte, devem ser considerados, o que aumenta os custos para o estudo dessas regiões.

O presente estudo foca na região amazônica da América do Sul, utilizando métodos computacionais e dados gravitacionais do projeto Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [7, 8] para estabelecer correlações entre as regiões com maior variabilidade hídrica. A realização de uma análise espaço-temporal desta região, caracterizada por sua vasta rede fluvial e geografia complexa, permite validar esses métodos. Além disso, busca-se criar um marco de trabalho replicável para contribuir com mais estudos hidrológicos e climatológicos.

Este estudo emprega ferramentas de análise acessíveis e fáceis de interpretar, priorizando métodos lineares ou moderadamente complexos, em vez de técnicas altamente não lineares, como redes neurais. Essa escolha não se deve à falta de utilidade desses métodos, mas sim à intenção de tornar o texto compreensível e acessível a leitores sem amplo conhecimento prévio em ferramentas avançadas.

Os dados gravitacionais fornecem informações cruciais sobre a distribuição de massa em regiões específicas, sendo especialmente úteis para estimar o conteúdo de água na crosta terrestre, incluindo águas subterrâneas, que não podem ser detectadas por análises baseadas em imagens de satélite. Em particular, a missão GRACE tem como um de seus objetivos fornecer um mapa de anomalias gravitacionais a cada mês [9], permitindo avanços na precisão de estudos em áreas como geofísica, oceanografia, hidrologia e análise de geleiras.

Os dados do GRACE têm sido utilizados em estudos como [10] para estimar a perda de gelo na Groenlândia e na Antártica entre 2003 e 2013, com reduções na ordem de gigatoneladas por ano (Gt/ano): entre 280 ± 58 Gt/yr e 67 ± 44 Gt/yr, respectivamente, onde 1 gigatonelada corresponde a um quilômetro cúbico de água. Essa perda combinada equivale a uma elevação do nível do oceano de aproximadamente 0,9 mm/ano. Além disso, os dados do GRACE permitem obter informações sobre águas subterrâneas em regiões de difícil acesso, como o norte da Índia [11], onde foram registradas perdas de 54 ± 9 Gt/ano entre 2002 e 2008, tornando-se uma das regiões com maior declínio de água subterrânea na Terra. Outras aplicações incluem o uso da variação da pressão no fundo oceânico para estimar correntes marítimas [12], além de estudos do ciclo da água [13–15]. O estudo dos ciclos da água torna-se, assim, uma questão essencial para a vida.

2 Marco teórico

Apresenta-se o fundamento dos dados do GRACE e os diversos algoritmos utilizados em um nível suficiente para compreender e ser capaz de aplicá-los a outras áreas.

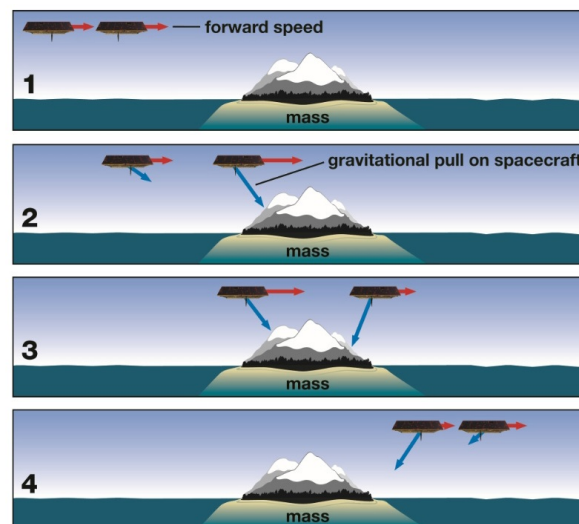


Figura 1: [19] O princípio de funcionamento do GRACE ocorre quando um dos dois satélites, que orbitam alinhados de norte a sul em alta velocidade, completa cerca de 15 órbitas por dia ao redor da Terra. Quando o primeiro satélite se aproxima de uma montanha, ele sofre uma aceleração e se adianta em relação ao segundo satélite; em seguida, o segundo satélite também é afetado pela anomalia gravitacional e alcança o primeiro.

Além do conjunto de dados gravitacionais GRACE, são utilizados datasets hidrológicos, como o HydroSHEDS [16] e o HydroBASINS [17], que correspondem a polígonos hidrográficos em diferentes níveis de resolução, incluindo rios e lagos.

2.1 Dataset GRACE

As missões GRACE e GRACE-FO consistem em dois satélites gêmeos que medem as variações da gravidade na Terra. À medida que um dos satélites se aproxima de uma anomalia de massa, ele sofre uma maior atração gravitacional em comparação com o satélite mais afastado, o que afeta a distância entre eles, conforme ilustrado na Figura 1. Essas mudanças na distância ajudam a identificar variações na massa terrestre [9, 18].

Se forem consideradas as forças provocadas pela atmosfera e outras interações externas, como a gravidade do Sol e da Lua, é possível inferir a interação da massa terrestre exercendo força gravitacional sobre o par de satélites. Por isso, é essencial levar em conta que, caso existam fenômenos não considerados na correção dos dados, podem surgir interpretações equivocadas. Para facilitar esse processo, o GRACE/FO fornece da-

dos de alto nível, já corrigidos para efeitos atmosféricos e relativísticos.

As medidas do GRACE se organizam em quatro níveis de processamento:

- *Nível 0* – Dados sem processamento binário, recorrigidos pelo DLR.
- *Nível 1* – Dados convertidos para unidades de engenharia com uma taxa de amostragem reduzida (sampling rate).
- *Nível 2, Coeficientes de Stokes:* Coeficientes harmônicos esféricos $Z_{\ell m}(t) = \{C_{\ell m}(t), S_{\ell m}(t)\}$ do campo gravitacional procesados em centros dos EUA e da Alemanha.
- *Nível 3, Mascons* – Mudanças equivalentes na altura da água derivadas dos dados de Nível 2, cuja representação gráfica pode ser vista na figura Figura 2.
- *Nível 4* – Análise das mudanças nas reservas de água no contexto temporal e espacial.

A missão GRACE ocorreu de março de 2002 até outubro de 2017, sendo sucedida pela missão GRACE-FO (*GRACE Follow On*), lançada em maio de 2018 e ativa até o presente, com melhorias na precisão [20]. Em março de 2024, a NASA anunciou a missão GRACE-C (*GRACE Continuity*), prevista para lançamento por volta de 2028.

2.2 Harmônicos esféricos

Os dados de Nível 2 são os mais utilizados e consistem em coeficientes de harmônicos esféricos. Esses coeficientes existem para o campo gravitacional devido à sua propriedade de ser irrotacional, o que matematicamente é expresso pela equação vetorial $\nabla \times \vec{g}(\vec{r}) = \vec{0}$. Isso implica que o campo gravitacional pode ser escrito como o gradiente de um outro campo escalar, $\vec{g}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r})$, uma vez que o rotacional de um gradiente é sempre nulo: $\nabla \times (-\nabla U) = \vec{0}$. Seja $U(\vec{r})$ o potencial gravitacional, então:

1. Se a distribuição de massa possui simetria esférica, então o campo segue a equação

$$U(\vec{r}) = -\frac{GM}{r}, \quad (1)$$

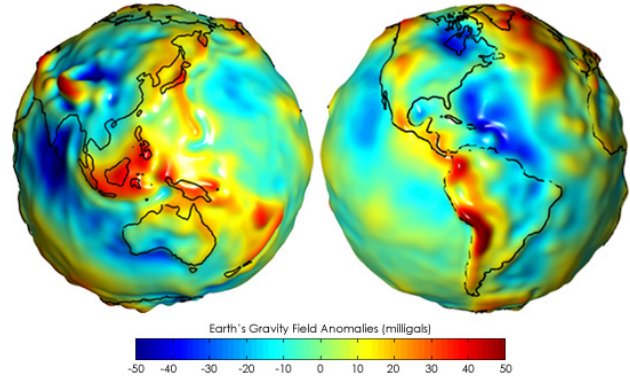


Figura 2: [23] Visualização espacial dos dados de nível 3 do experimento GRACE/FO onde vemos as anomalias gravitacionais na superfície da Terra, que são a diferença na intensidade do campo em relação à média medida em miligals (equivalente a 10^{-3} cm/s^2).

da qual se obtém a equação popular da força gravitacional,

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\frac{GMm}{r^2} \hat{r}. \quad (2)$$

Este é um caso simples que considera apenas massas pontuais.

2. Para objetos sem simetria esférica é necessário realizar uma integral nas 3 dimensões, somando todas as informações angulares, ou seja,

$$U = -G \int_{\mathbb{R}^3} \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r'. \quad (3)$$

Podemos aproximar essa expressão satisfatoriamente através de uma soma de multipolos de diferentes graus ℓ e ordem m , resultando em

$$U(\vec{r}) = -G \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \frac{1}{r^{\ell+1}} Z_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi). \quad (4)$$

Multipolos são uma ferramenta matemática para expressar objetos em grandes distâncias. Vamos ter um corpo que pode ser encerrado em uma esfera de raio R ; quanto mais próximos estivermos ($r \approx R$), precisaremos de uma resolução maior (incluindo até um grau maior ℓ), enquanto que, se estivermos muito distantes ($r \gg R$), isso não será muito diferente de uma massa pontual (o mesmo que incluir apenas o grau $\ell = 0$).

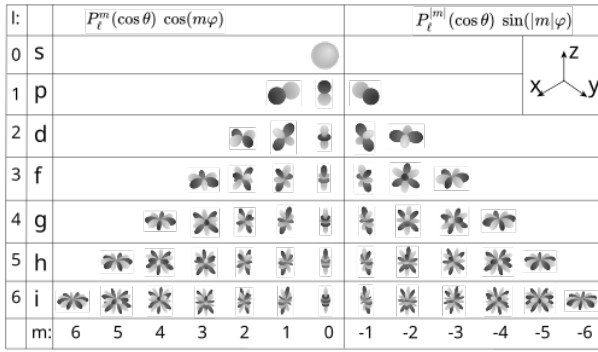


Figura 3: Uma representação dos diferentes modos de oscilação que descrevem os harmônicos esféricos, variando verticalmente a ordem ℓ e horizontalmente o modo m .

É possível dividir a função $Y_{\ell m}$ em duas partes, uma acompanhando a função cosseno da longitude ($C_{\ell m}$) e outra acompanhando a função seno ($S_{\ell m}$), estes são chamadas Coeficientes de Stokes (5)

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = P_\ell^m(\sin \theta) \begin{bmatrix} C_{\ell m} \cos m\phi \\ S_{\ell m} \sin m\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

sendo $P_{\ell m}$ os polinômios de Legendre associados, uma série de funções com propriedades úteis para decompor campos gravitacionais em somas de multipolos. Em (4) $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$ são as diferentes funções ℓ, m que representam os variados modos de vibração esféricos. Uma série dessas componentes podem ser observadas na Figura 3.

Na equação (4) $Z_{\ell m}$ estão os coeficientes, parâmetros diferentes para cada objeto que dependerão do tempo se houver massas em movimento. Se escolhermos todos os coeficientes $Z_{\ell m} = 0$ exceto $Z_{00} = 1$ (aquele coeficiente cujo grau é $\ell = 0$ e ordem $m = 0$), então teríamos o caso com simetria esférica da equação (1).

A Terra é um objeto denso, com uma variedade de montanhas, lagos e geleiras que se movem ao longo do tempo, cujo potencial gravitacional varia dependendo da região em que estamos localizados, latitude e co-longitude, θ e ϕ , respectivamente. Este cálculo do Geopotencial [cf. eq. (6)], é aquele em que realizamos uma soma infinita para diferentes ℓ e m ; cada vez que adicionamos um termo com grau mais alto aumentamos

a resolução,

$$U(r, \theta, \phi) = \frac{\mu}{r} \sum_{\ell=0}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^\ell \sum_{m=0}^{\ell} \vec{Z}_{\ell m} \cdot \vec{\varphi} P_\ell^m(\sin \theta), \quad (6)$$

onde $\mu = GM$, a_e é o raio médio da Terra e $\vec{\varphi}$, nesta notação, é um arranjo de duas partes, uma dependendo do cosseno e a outra do seno, $\cos(m\phi)$ e $\sin(m\phi)$, respectivamente, ou seja,

$$\vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Operando com o conjunto de coeficientes de Stokes, $\vec{Z}_{\ell m}$ pode ser escrito como

$$\vec{Z}_{\ell m} \cdot \vec{\varphi} = C_{\ell, m} \cos m\phi + S_{\ell, m} \sin m\phi. \quad (8)$$

A partir da equação (8), $C_{\ell, m}$ e $S_{\ell, m}$ são os coeficientes de nível 2 do experimento GRACE, que após um processo de filtragem é possível obter mudanças de massa em função da latitude e longitude.

Os *mascons* publicados pelo JPL [21] são úteis para aplicações relacionadas ao movimento da água na superfície da Terra, porque são previamente filtrados e correções atmosféricas foram aplicadas para o mesmo propósito. Entretanto, para aplicações relacionadas ao movimento de placas tectônicas ou qualquer concentração que não esteja diretamente na superfície imediata da Terra, é obrigatório estabelecer um modelo físico e gerar seus próprios *mascons*. Os *mascons* entregues pelo JPL têm aspectos importantes a serem considerados ao prosseguir com o estudo: por serem provenientes de suavização espacial, a medição entre duas células não é independente; a resolução espacial é $1^\circ \times 1^\circ$ aproximadamente $100 [km]$ no equador e o limite de erro estimado por [22] é $36 [mm]$ de equivalente de água ou *equivalente de altura de água*, conforme apresentado na documentação do JPL.

2.3 Algoritmos

O conjunto de dados é grande e contém informações espaciais e temporais, então a seguinte lista de algoritmos é usada para refinar e obter as informações importantes.

A decomposição de valores singulares (SVD) é uma técnica matemática que separa uma matriz

de dados G em três matrizes componentes: U , Λ e V . Dada uma matriz G com dimensões (*tempo*, *latitude*, *longitude*), a decomposição resulta em

$$G = U\Lambda V^T \quad (9)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{\lambda_j^2}{\sum_i \lambda_i^2} \quad (10)$$

onde

- V é uma matriz contendo os *modos espaciais* de variação. Na Eq. (9), V^T representa a matriz transposta.
- Λ é uma matriz diagonal cujos valores indicam a importância relativa de cada modo em V . As componentes desta matriz estão localizadas ao longo da diagonal $\Lambda = \text{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_j)$
- U é uma matriz contendo a *informação temporal*, permitindo determinar como os modos de V variam ao longo do tempo.

A Decomposição de Valor Singular (SVD) é amplamente usada para simplificar conjuntos de dados complexos extraindo padrões-chave e reduzindo o número de dimensões. Em áreas como análise de dados, processamento de imagens e sistemas de recomendação, essa técnica é essencial para identificar recursos significativos. Exemplos incluem o uso em aplicativos como Google, Netflix, Spotify e Facebook. Para ilustrar aplicações relacionadas, o leitor é encorajado a explorar o conceito de *eigen-faces* [24, 25].

No SVD os dados são divididos em modos, que se referem a uma representação dos dados espaciais, que sobrepostos fornecem os dados originais, os dados em um tempo t e a posição latitude longitude (ϕ, θ) é dada pela adição dos diferentes N modos,

$$G(\phi, \theta, t) = \sum_{j=0}^N u_j(t) \vec{v}_j(\phi, \theta). \quad (11)$$

Para um modo único j a distribuição espacial é dada pela matriz V^T selecionando a linha j , que contém em suas colunas os índices correspondentes à latitude longitude $v_j(\phi, \theta) = V^T[j, :]\lambda_j$ é medido em centímetros de água equivalente e $u(t) = U[j, :]$ refere-se à variação temporal.

2.3.1 Espacial

A dimensão espacial do conjunto de dados requer a identificação de padrões-chave e a detecção de regiões de interesse. Para este propósito, dois algoritmos principais são empregados.

A Taxa de Alarme Falso Constante (CFAR) é uma técnica usada para detectar picos significativos em um mapa espacial, como os modos principais obtidos após SVD. Este método avalia cada ponto no espaço considerando sua vizinhança imediata e compara seu valor com um limite adaptativo, calculado dinamicamente para manter uma taxa constante de alarmes falsos. Essa abordagem permite identificar picos relevantes mesmo em conjuntos de dados ruidosos, garantindo que as detecções não sejam afetadas por variações locais.

O agrupamento espacial baseado em densidade de aplicações com ruído (DBSCAN) é um algoritmo de agrupamento que agrupa pontos com base em sua proximidade espacial e densidade local. Isso é útil para analisar padrões espaciais nos picos detectados pelo CFAR, classificando-os em clusters significativos. Para dados geográficos, é utilizada a métrica de distância Haversine, que calcula a menor distância entre dois pontos na superfície da Terra, permitindo uma classificação precisa considerando a curvatura da Terra; a Ref. [26] implementou essa métrica para otimizar rotas entre abrigos temporários e locais de processamento de resíduos.

Dados geofísicos tendem a exibir ruído não uniforme e estruturas densas localizadas, tornando abordagens adaptativas como CFAR e algoritmos baseados em densidade como DBSCAN ideais.

2.3.2 Temporal

Qualquer dado temporal pode ser expresso como uma combinação de funções trigonométricas ($\sin \omega x, \cos \omega x$) com diferentes frequências ω , a transformada rápida de Fourier ou FFT permite que esse cálculo seja realizado de forma rápida e eficiente, obtendo assim a lista de coeficientes associados aos diferentes períodos. Ao representar graficamente a magnitude desses coeficientes em relação ao período, temos um gráfico de *importância versus período*, um “periodograma” que permite estudar os intervalos de tempo mais importantes para os dados em estudo. Entretanto,

devido ao princípio da incerteza, não é possível saber precisamente o conteúdo exato de frequência em um dado momento. A FFT elimina toda precisão temporal e fornece apenas informações sobre as frequências contidas em todo o sinal. Em casos de misturas de frequências, é necessária a Transformada Wavelet, que permite um equilíbrio, fornecendo informações sobre uma faixa de frequências, em menor resolução, contidas em um sinal para um dado momento.

3 Metodologia

Todo o código usado na análise pode ser encontrado em [27], o endereço do arquivo será brevemente mencionado.

A partir da aquisição de dados GRACE, os *mascons* foram baixados da página inicial do experimento [7], usando o script *podaac-subscriber* [28]; o arquivo baixado correspondente a *TELLUS_GRACE-GRFO_MASCON-CRI_GRID_RL06.3_V4* é um arquivo do tipo netCDF4 de cerca de 1-2 Gb, correspondendo a cerca de 250 meses diferentes, com uma resolução de $0,5^\circ$, que pode ser lido usando a biblioteca Python *gravity-toolkit* [29] com a classe *spatial*; e que junto com *cartopy* [30] permite representar graficamente e observar todo o globo (Figura 4).

O algoritmo *SVD* requer dados com espaçamento temporal uniforme, então uma interpolação prévia foi realizada para garantir a uniformidade do conjunto. Com o arquivo de dados carregado no objeto *spatial.data* representando a matriz G . A matriz G , com dimensões (*tempo, latitude, longitude*), foi transformada em uma matriz bidimensional para aplicar *SVD*. O código pode ser encontrado em *GRAVCON-GRACE/notebooks/2_svd_analysis/* nos arquivos *1_datapret.ipynb* e *2_svd.ipynb*. A decomposição gerou as matrizes U , Σ e V . Nesse caso:

- V foi interpretada como os mapas espaciais ou modos principais de variação, aos quais foram aplicados CFAR e DBScan para obter pontos de latitude e longitude que representam variação espacial.
- Os valores de Σ determinaram a importância relativa de cada modo nos dados.

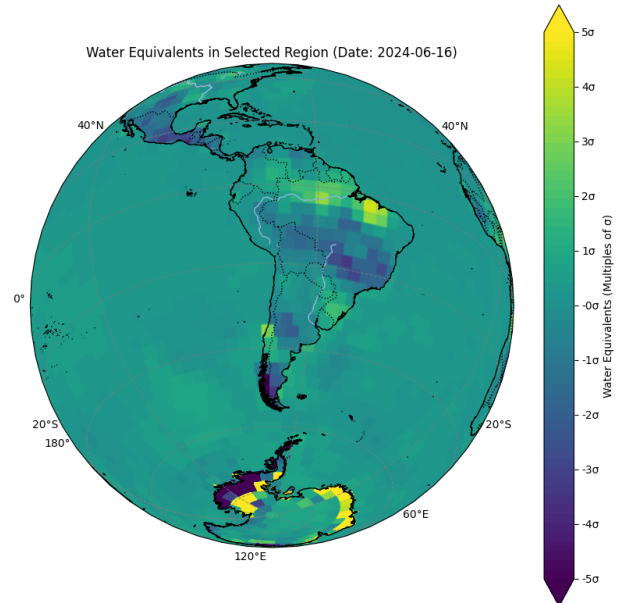


Figura 4: Visualização de dados GRACE/FO para visualizar a região da América do Sul e Antártida com uma visão ortográfica. As cores indicam a intensidade do desvio padrão em relação à média (média ou mediana, tomada sobre toda a extensão de dados: de 2002 a 2024). Há pontos cuja variação absoluta é maior que 5σ e estes são pintados como um amarelo saturado ou roxo.

- U capturou a dinâmica temporal associada aos modos espaciais.

Para entender a evolução e a correlação dos movimentos das águas na região, são selecionados os principais modos que explicam uma porcentagem significativa da variância total. Modos associados a valores singulares menores (menores λ_j) refletem padrões mais específicos ou flutuações locais, o que pode ser indicativo de fenômenos menos representativos ou ruído nos dados.

Métodos de Monte Carlo foram usados para avaliar a influência do ruído nos *mascons*, considerando a precisão dos harmônicos esféricos descritos em (5). O ruído foi simulado com um desvio padrão de ± 36 mm, com base em limites de precisão conhecidos, a fim de estabelecer um teste de hipótese Kolmogorov-Smirnov com a hipótese nula H_0 : que o modo $(V^T)_j$ vem da mesma distribuição que o ruído.

Uma vez determinados os principais modos, aqueles com uma variância explicada acumulada de mais de 95% (9 modos no total), foi possível estudar a variação espacial de cada modo, contida em V^T representando pontos geográficos-chave. O algoritmo de detecção de pico *CFAR* foi apli-

cado a estes para encontrar os pontos geográficos com a maior variabilidade. Os diferentes pontos de máxima variabilidade foram então agrupados usando o algoritmo *DBScan* com ϵ igual à resolução GRACE-FO em radianos (3×10^{-2}) e a métrica *Haversine* para levar em consideração distâncias geográficas.

Em relação à parte temporal, a matriz U foi utilizada para analisar a variação temporal dos principais modos por meio do cálculo do periodograma, representando graficamente a dependência dos modos com diferentes períodos de tempo com o objetivo de identificar o conteúdo de frequência predominante em cada modo principal. Posteriormente, por meio da transformada wavelet, foi examinado como essas frequências variam em função do tempo, permitindo uma análise mais detalhada dos fenômenos transitórios.

Foram calculados coeficientes de correlação de Pearson entre os modos principais e o índice Niño 3.4, com o objetivo de estabelecer sua relação com as oscilações globais e assim estabelecer modos que se acoplem a este índice; o código para esta seção está localizado em `2_svd_analysis/4_wavelet_nino.ipynb` no código do github [27].

Por fim, foi feita uma referência cruzada entre os principais modos com pontos de latitude e longitude do conjunto de dados de inundações [31] para estabelecer os modos altamente correlacionados espacialmente com inundações, que podem ser encontrados na pasta *GRAVCON-GRACE/notebooks/4_flooding/*. Para esse propósito, uma máscara binária foi criada para $U[\text{mode}, \text{time}]$, que é uma matriz de zeros e uns, zero no caso de não haver um evento de inundação no tempo t e um no caso de haver um evento de inundação onde t está entre "Begin" e "End" dado por [31]. Para informações espaciais, este conjunto de dados foi convertido em células binárias representando centróides de inundação com posições de latitude e longitude que foram comparadas com células $V^T[\text{mode}, \text{lat} \times \text{lon}]$ levando em consideração a área afetada e a gravidade de acordo com a equação (12), uma fórmula onde o modo e o índice da célula são abreviados: $[\text{m}, \text{c}] = [\text{mode}, \text{cell}]$, \sum_i refere-se à soma dos diferentes eventos de inundação no conjunto de dados; A_i é a área (km^2) afetada por esse evento

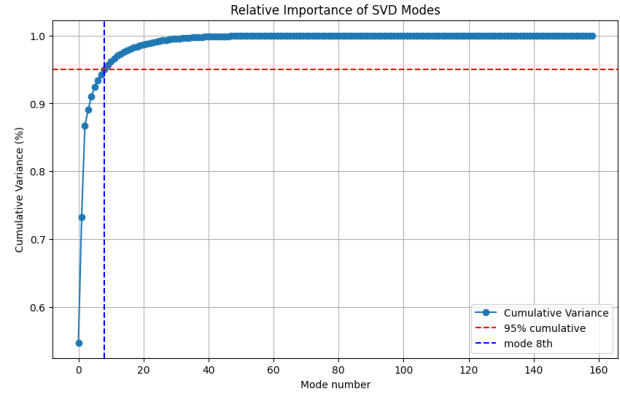


Figura 5: Importância relativa dos modos obtidos por SVD.

e S_i é a gravidade desse evento (1,0 ou 2,0)

$$\text{Index}[\text{m}, \phi, \theta] = \sum_{i=0}^{N_i} v_m(\phi, \theta) \log(A_i + 1) S_i \quad (12)$$

4 Resultados das análises

As componentes de variação espacial e temporal obtidos do SVD, representados pelas matrizes U e V^T , incluem um total de 159 modos. Todos, exceto os últimos 5, passam no teste de hipótese de Kolmogorov-Smirnov, sendo considerados como sinal e eliminando ruído.

A importância relativa de cada modo decai exponencialmente, permitindo que 95% da variância acumulada seja explicada com apenas 9 modos [cf. (10)], sendo este o principal filtro para separar os modos representativos da região de ruído; os modos principais estão listados na Tabela 1

Tabela 1: Modos principais e sua informação relevante. A variância é (σ^2)

Modo	Variância
0	5.473×10^{-1}
1	1.854×10^{-1}
2	1.348×10^{-1}
3	2.306×10^{-2}
4	1.989×10^{-2}
5	1.356×10^{-2}
6	1.052×10^{-2}
7	8.010×10^{-3}
8	7.704×10^{-3}

Para os gráficos apresentados, foram seleciona-

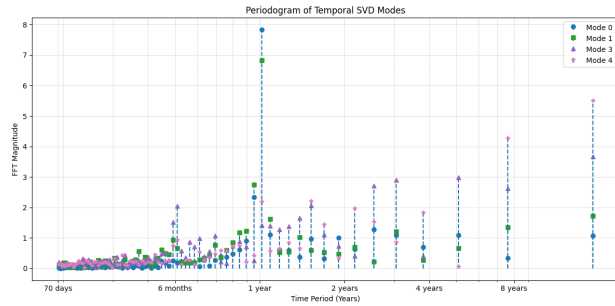


Figura 6: Periodograma dos modos de oscilação, onde a magnitude dos coeficientes da Transformada Rápida de Fourier (FFT) é representada graficamente em função do período associado, os modos 0, 1, 2 são apresentados com maior relevância e 8 como um modo importante devido à sua correlação com o índice de Niño. Os modos são diferenciados por símbolos de cores.

dos os três principais modos (índices 0, 1 e 2), que juntos representam 86% da variação total.

4.1 Temporal

Observando o periodograma na Figura 6, que abrange desde a frequência máxima permitida pelo teorema de Nyquist (correspondente a um período de 70 dias, dado que a amostragem de interpolação é de 35 dias) até aproximadamente 15 anos (a duração da missão GRACE).

Entre os padrões mais relevantes está um pico anual, observável nos três modos principais, que coincide com as estações climáticas recorrentes a cada ano. Adicionalmente, no modo 2 destaca-se um pico semestral, o que sugere a presença de fenômenos climáticos semestrais associados a estações húmidas e secas típicas de determinadas regiões, acompanhados de padrões de precipitação. Um pico de particular interesse aparece no intervalo de 8 anos, predominante no modo 3; embora o ciclo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) tenha uma periodicidade variável entre 2 e 7 anos, seu impacto cumulativo em certas regiões pode gerar padrões observáveis em uma escala de aproximadamente 8 anos.

A correlação temporal entre os modos e o índice global Niño 3.4 foi calculada usando *time lags*, onde observamos a correlação atrasando o sinal do índice Niño 3.4 em dias diferentes, observado na Figura 7 cujos valores máximos de correlação estão listados na Tabela 2, onde se observa a importância do modo 3 em relação a este índice global.

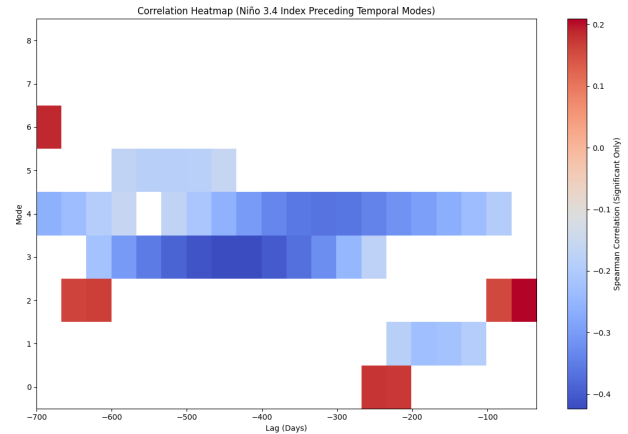


Figura 7: Correlação de Spearman dos modos selecionados com o índice de Niño 3.4. As correlações são apresentadas em formato de cor, azul para correlações positivas e vermelho para negativas, enquanto o eixo horizontal representa o intervalo de tempo do índice Niño 3.4 em relação a esse modo, usando o índice como um preditor para o modo. Enquanto as correlações que não são estatisticamente significativas são apresentadas em branco, ou seja, aquelas que têm um valor de p acima do valor crítico de 5%.

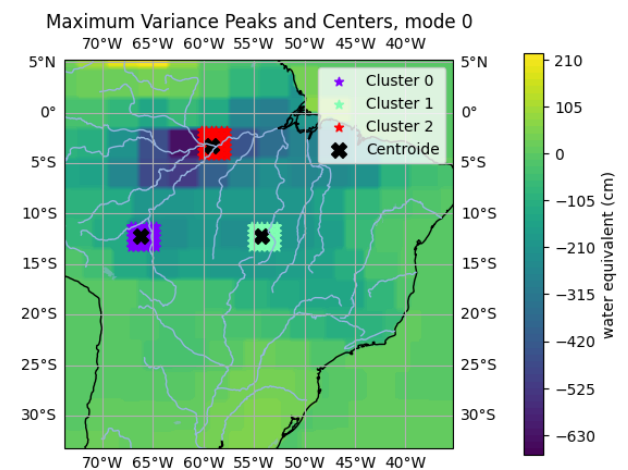


Figura 8: O primeiro modo, com 50% de importância, apresenta uma clara diminuição da massa de água na região de Manaus, Brasil, acompanhada de um aumento da massa nas regiões do entorno. Quando esse modo é encontrado com coeficientes positivos, ele indica um aumento de massa nas regiões costeiras e uma diminuição de massa na região de Manaus.

4.2 Espacial

Os 3 modos foram plotados com pontos coloridos representando os resultados do CFAR e os centróides do DBSCAN: Figura 8, Figura 9, Figura 10. Em termos de identificação das regiões com maior variabilidade dentro dos principais modais, são elas: Manaus, Minas Gerais,

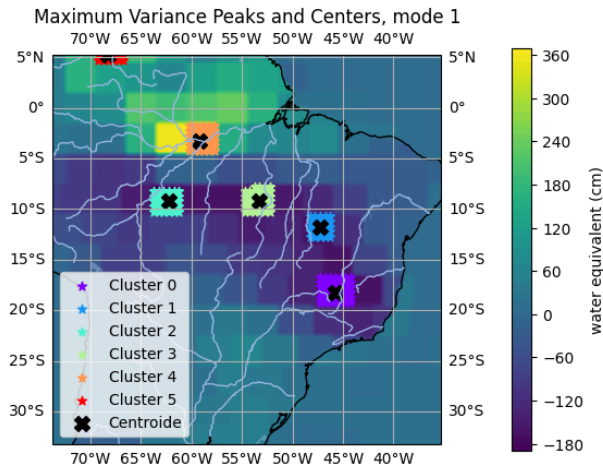


Figura 9: O segundo modo do SVD com importância de 12% também indica uma forte dependência da região de Manaus, particularmente no encontro do Rio Amazonas com o Rio Negro; entretanto, há diminuição de massa nas regiões de Mato Grosso e Minas Gerais.

Mato Grosso.

5 Discussão

Os modos principais da Tabela 1 apresentam variâncias explicadas σ^2 , consideráveis nos primeiros modos e praticamente insignificantes em relação aos modos principais, o que indica a capacidade do SVD de comprimir a informação e permitir estudar separadamente os modos que explicam a fenomenologia do clima.

Os SVD têm a força de descrever os dados em forma de base, conforme expresso na equação (11), neste caso diferentes modos espaciais na matriz V^T que evoluem no tempo guiados pela matriz U , o periodograma da Figura 6 mostra picos consideráveis onde o pico anual é observado, indicando principalmente os modos 0 e 1 como parte das estações.

A correlação calculada e apresentada na Figura 7 é a correlação de Spearman entre a variação temporal dos modos e o índice Niño 3.4 para diferentes mudanças de tempo ou *lags*. As correlações significativas encontradas estão listadas na Tabela 2 e, em particular, demonstram respostas em relação ao índice. No entanto, modelos mais complexos parecem ser necessários para estudar em maior profundidade as correlações como as dos modos 3 e 4, para incluir possíveis não linearidades, autocorrelações e até correlações entre

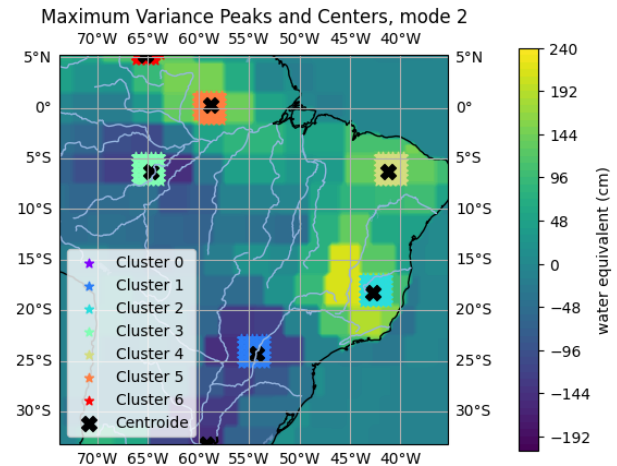


Figura 10: O terceiro modo tem importância de 10%, o que representa uma correlação entre o aumento da massa de água equivalente em Minas Gerais e a diminuição em Mato Grosso.

os mesmos modos.

A equação (12) é utilizada para dar importância às diferentes células para somar todas as inundações ocorridas, a equação é de natureza heurística, escalonando a área logicamente e multiplicando pela severidade para ter intervalos comparativos entre eventos de inundação, porém pode ser melhorada incorporando a expertise das áreas de hidrologia com base em argumentos físicos. Por sua vez, os coeficientes de correlação utilizados são os de Spearman e Pearson, mas em fenômenos cíclicos a incorporação da autocorrelação pode fornecer uma grande quantidade de informações, invisíveis à análise atual; índices de correlação conhecidos foram utilizados para manter a simplicidade do modelo. Caso o leitor prefira se aprofundar em técnicas mais poderosas, são recomendados modelos como ARIMA ou técnicas de última geração como redes neurais, que não são difíceis de implementar, mas exigem maiores critérios para interpretar os resultados e considerar o público-alvo.

6 Conclusão

No presente estudo, a decomposição em valores singulares (SVD) foi aplicada em dados gravitacionais do GRACE/FO para a região amazônica, identificando nove modos principais que explicam cerca de 95% da variância. Este resultado confirma a capacidade do SVD de decompor e iso-

Tabela 2: Correlações máximas de Spearman e seus respectivos atrasos de tempo para cada modo significativo. NS* simboliza que nenhuma correlação estatisticamente significativa foi encontrada.

Mode	Max Correlation	Lag (Days)
0	0.17	-245
1	-0.23	-175
2	0.21	-35
3	-0.42	-420
4	-0.36	-315
5	-0.19	-525
6	0.19	-700
7	NS*	—
8	NS*	—

lar padrões espaciais e temporais relevantes, que foram associados a ciclos anuais e semestrais e possíveis interações com o fenômeno El Niño – Oscilação Sul. Adicionalmente, a aproximação das correlações espaciais com eventos de inundação, apesar de sua natureza linear, mostra uma concordância significativa em células de alta mudança de massa, contribuindo para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica da Bacia Amazônica.

Os resultados obtidos estão ligados ao objetivo inicial de fornecer uma estrutura para analisar as variações da água a partir de dados gravimétricos. A seleção de métodos lineares de complexidade moderada baseia-se na necessidade de uma análise transparente e reproduzível, evitando conclusões sensacionalistas. Desta forma, destacando tanto as limitações como o real valor da informação prestada.

Por fim, este estudo contribui para a área de hidrologia e climatologia ao demonstrar que, mesmo utilizando uma abordagem estatística relativamente simples, é possível extrair padrões espaciais e temporais de dados do GRACE/FO e relacioná-los com eventos de inundação. Como linhas futuras, sugere-se o aprofundamento em metodologias não lineares (e.g., redes neurais ou modelos híbridos) que fortaleçam a interpretação dos modos menos dominantes e abordem a com-

plexidade inerente aos fenômenos climáticos na região amazônica, sem perder o rigor ou a clareza necessários para uma comunicação científica adequada.

Referências

- [1] C. Mitchell, *Flood Resilience—A Time for Cathedral-Based Thinking and Action!*, *Journal of Flood Risk Management* **15**(1), e12780 (2022).
- [2] M. I. Brunner et al., *Challenges in Modeling and Predicting Floods and Droughts: A Review*, *WIREs Water* **8**(3), e1520 (2021).
- [3] J. A. Marengo e J. C. Espinoza, *Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts*, *International Journal of Climatology* **36**(3), 1033 (2016).
- [4] J. A. Marengo et al., *The Drought of Amazonia in 2023-2024*, *American Journal of Climate Change* **13**(03), 567 (2024).
- [5] J. Wise, *Spanish Floods: Experts Call for Clearer Warnings*, *BMJ* **387**, q2421 (2024).
- [6] H. X. Do, Y. Mei e A. D. Gronewold, *To What Extent Are Changes in Flood Magnitude Related to Changes in Precipitation Extremes?*, *Geophysical Research Letters* **47**(18), e2020GL088684 (2020).
- [7] *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (2020). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE>, acesso em out. 2024.
- [8] C. Dahle et al., *GRACE 327-743 (Gravity Recovery and Climate Experiment): GFZ Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 06 (Rev. 1.0, October 26, 2018)*, Scientific Technical Report STR - Data (GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, 2018).
- [9] *GRACE Documentation*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) (2011). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/grace-documentation>, acesso em out. 2024.

- [10] I. Velicogna, T. C. Sutterley e M. R. van den Broeke, *Regional Acceleration in Ice Mass Loss from Greenland and Antarctica Using GRACE Time-Variable Gravity Data*, *Geophysical Research Letters* **41**(22), 8130 (2014).
- [11] V. M. Tiwari, J. Wahr e S. Swenson, *Dwinding Groundwater Resources in Northern India, from Satellite Gravity Observations*, *Geophysical Research Letters* **36**(18) (2009).
- [12] *Gravity Data Sheds New Light on Ocean, Climate*, Climate Change: Vital Signs of the Planet. Disponível em <https://climate.nasa.gov/news/152/gravity-data-sheds-new-light-on-ocean-climate>, acesso em out. 2024.
- [13] M. Rodell e J. T. Reager, *Water Cycle Science Enabled by the GRACE and GRACE-FO Satellite Missions*, *Nature Water* **1**(1), 47 (2023).
- [14] S. S. Soltani, B. Ataie-Ashtiani e C. T. Simmons, *Review of Assimilating GRACE Terrestrial Water Storage Data into Hydrological Models: Advances, Challenges and Opportunities*, *Earth-Science Reviews* **213**, 103487 (2021).
- [15] Z. Sun et al., *Reconstruction of GRACE Data on Changes in Total Water Storage Over the Global Land Surface and 60 Basins*, *Water Resources Research* **56**(4), e2019WR026250 (2020).
- [16] B. Lehner, K. Verdin e A. Jarvis, *New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data*, *Eos, Transactions American Geophysical Union* **89**(10), 93 (2008).
- [17] B. Lehner e G. Grill, *Global River Hydrography and Network Routing: Baseline Data and New Approaches to Study the World's Large River Systems*, *Hydrological Processes* **27**(15), 2171 (2013).
- [18] B. D. Tapley et al., *Contributions of GRACE to Understanding Climate Change*, *Nature Climate Change* **9**(5), 358 (2019).
- [19] *Lasers in Space: Earth Mission Tests New Technology*, NASA Sea Level Change Portal. Disponível em <https://sealevel.nasa.gov/news/121/lasers-in-space-earth-mission-tests-new-technology>, acesso em out. 2024.
- [20] F. W. Landerer et al., *Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance*, *Geophysical Research Letters* **47**(12), e2020GL088306 (2020).
- [21] *GRACE-FO Level-2 Monthly Geopotential Spherical Harmonics CSR Release 06.2 (RL06.2)*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/>, acesso em out. 2024.
- [22] F. W. Landerer e S. C. Swenson, *Accuracy of Scaled GRACE Terrestrial Water Storage Estimates*, *Water Resources Research* **48**(4) (2012).
- [23] *Images Taken by the GRACE Mission*, Photojournal - JPL/NASA. Disponível em <https://photojournal.jpl.nasa.gov/mission/GRACE>, acesso em out. 2024.
- [24] M. Turk e A. Pentland, *Eigenfaces for Recognition*, *Journal of Cognitive Neuroscience* **3**(1), 71 (1991).
- [25] *Principle Component Analysis - Eigenfaces*, Kaggle. Disponível em <https://kaggle.com/code/ritupande/principle-component-analysis-eigenfaces>, acesso em out. 2024.
- [26] R. A. Azdy e F. Darnis, *Use of Haversine Formula in Finding Distance Between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites*, *Journal of Physics: Conference Series* **1500**(1), 012104 (2020).
- [27] F. Trigo, *Fbientrigo/Gravcon-Grace: A Project for the Estimation of Water Flow Based on the GRACE Dataset*, GitHub. Disponível em <https://github.com/fbientrigo/gravcon-grace>, acesso em out. 2024.
- [28] *Podaac/Data-Subscriber*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center

- (PO.DAAC) (2024). Disponível em <https://podaac.jpl.nasa.gov/node/1647>, acesso em out. 2024.
- [29] T. Sutterley, *Tsutterley/Gravity-Toolkit: V1.2.1*, Zenodo (2023).
- [30] *SciTools/Cartopy*, SciTools (2024). Disponível em <https://scitools.org.uk/cartopy/docs/latest/>, acesso em out. 2024.
- [31] G. Brakenridge, *DFO - Flood Observatory*, Global Active Archive of Large Flood Events. Disponível em <https://floodobservatory.colorado.edu/index.html>, acesso em out. 2024.