



Abordagem Estatística Aplicada à Investigação de Deformações Associadas ao Efeito de Carga Hidrológica na Amazônia Brasileira

Statistical Approach Applied to the Investigation of Deformations Associated with the Effect of Hydrological Load in the Brazilian Amazon

Lécio Alves Nascimento¹, William Rodrigo Dal Poz², Paulo César Emiliano³ e Krisley Xavier Soares de Freitas⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG) - Campus Araçuaí - MG, Brasil, lecio.nascimento@ifnmg.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-4372>

² Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa - MG, Brasil, william.dalpoz@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9532-3643>

³ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Estatística, Viçosa - MG, Brasil, paulo.emiliano@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1314-9002>

⁴ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa -MG, Brasil, krisley.freitas@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8453-324X>

Recebido: 04.2021 | Aceito: 06.2021

Resumo: Pontos da superfície terrestre estão sujeitos a deslocamentos causados por fenômenos geodinâmicos e de deformação, tais como: o movimento de placa, a atividade vulcânica, a carga hidrológica etc. Nesse sentido, as investigações do efeito da carga hidrológica têm se concentrado nas deformações associadas às componentes verticais. Entretanto, devido à viscoelasticidade da Terra, tais deformações também afetam as componentes horizontais (planimétricas). Assim sendo, objetiva-se com este trabalho investigar as deformações ocorridas em duas estações da RBMC (NAUS e AMBC) que margeiam o Rio Negro, na Amazônia brasileira, fundamentando-se em análises estatísticas de tendência e periodicidade (sazonalidade e ciclo) das séries temporais posicionais e de cotas linimétricas. Observou-se que em ambas as estações as componentes Δn e Δe apresentaram tendência (deformação contínua) significativa, o que não ocorreu para a componente Δu . Taxas de deformação contínua de 0,01198 e -0,00347 m/ano e de 0,01084 e -0,00476 m/ano foram observadas para Δn e Δe das estações NAUS e AMBC, respectivamente. As deformações periódicas de Δn e Δu da NAUS apresentaram *lag* sazonal similar ao das cotas linimétricas (365,2 dias), o que não ocorreu para Δe (1217,2 dias). Os extremos de tais deformações ocorrem anteriormente aos picos das cheias em 100% dos anos para Δn e 90% para Δu e, posteriormente aos vales das secas, em 80% dos anos em Δn e Δu . Por fim, os extremos das deformações periódicas de Δn e Δu da AMBC ocorreram antes dos picos e vales em 100% dos anos. O contrário foi observado para Δe em 100% dos anos.

Palavras-chave: Geodésia. Deformações. Séries temporais. PPP. Carga hidrológica.

Abstract: Points on the Earth's surface are subject to displacement caused by geodynamic and the crustal deformation phenomena, such as plate movement, volcanic activity, hydrological load, etc. In this sense, the investigations of the effect of the hydrological load have concentrated on the deformations associated with the vertical components. However, due to the viscoelasticity of the Earth, such deformations also affect the horizontal (planimetric) components. Therefore, the objective of this work is to investigate the deformations that occurred in two stations of the RBMC (NAUS and AMBC) that border the Rio Negro, in the Brazilian Amazon, based on statistical analyzes of trend and periodicity (seasonality and cycle) of time series positional and linimetric. It was observed that in both stations the Δn and Δe components showed a significant trend (continuous deformation), which did not occur for the Δu component. Continuous strain rates of 0.01198 and -0.00347 m/year and 0.01084 and -0.00476 m/year were observed for Δn and Δe from the NAUS and AMBC stations, respectively. The periodic deformations of NAUS Δn and Δu showed seasonal lag similar to that of linimetric quotas (365.2 days), which did not occur for Δe (1217.2 days). The extremes of such deformations occur before the flood peaks in 100% of the years for Δn and 90% for Δu and, after the drought valleys, in 80% of the years in Δn and Δu . Finally, the extremes of AMBC's periodic deformations of Δn and Δu occurred before peaks and valleys in 100% of years. The opposite was observed for Δe in 100% of the years.

Keywords: Geodesy. Deformations. Time series. PPP. Hydrological load.

1 INTRODUÇÃO

Deslocamentos posicionais de pontos da superfície terrestre podem ser associados aos efeitos de fenômenos geodinâmicos e de deformação, tais como: o movimento de placas tectônicas, a atividade vulcânica, a carga atmosférica, hidrológica etc. Uma das formas de se investigar estes tipos de fenômenos consiste em analisar a evolução espaço-temporal dos seus efeitos nas séries temporais de posição (coordenadas) (FRITSCHÉ; DOLL; DIETRICH, 2012; SANCHEZ; DREWES, 2016; KOWALCZYK; RAPINSKI, 2018).

Comumente, tem-se utilizado a integração entre a tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e o método de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) para a geração das séries temporais posicionais. No Brasil, tal integração é frequentemente efetuada considerando dados GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) (COSTA et al., 2018; RBMC, 2020) em conjunto com o serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-PPP) (IBGE, 2017; IBGE-PPP, 2020), ambos mantidos e disponibilizados gratuitamente pelo IBGE.

O IBGE-PPP considera em sua implementação a modelagem dos efeitos de diversos fenômenos seguindo as recomendações descritas em Petit e Luzum (2010). No entanto, efeitos de fenômenos como a carga hidrológica (*water storage e hidrological load*) são desconsiderados por não possuir modelagem consistente em escala global (PETIT; LUZUM, 2010; RAJNER; LIWOSZ, 2012). De fato, este fenômeno restringe-se a regiões específicas que apresentam transferência significativa de massa d'água associada ao ciclo hidrológico, como a região da bacia Amazônica brasileira, o que ocasiona deformações viscoelásticas temporais (transitórias) na superfície da Terra (TREGONING et al., 2009; FRITSCHÉ; DOLL; DIETRICH, 2012).

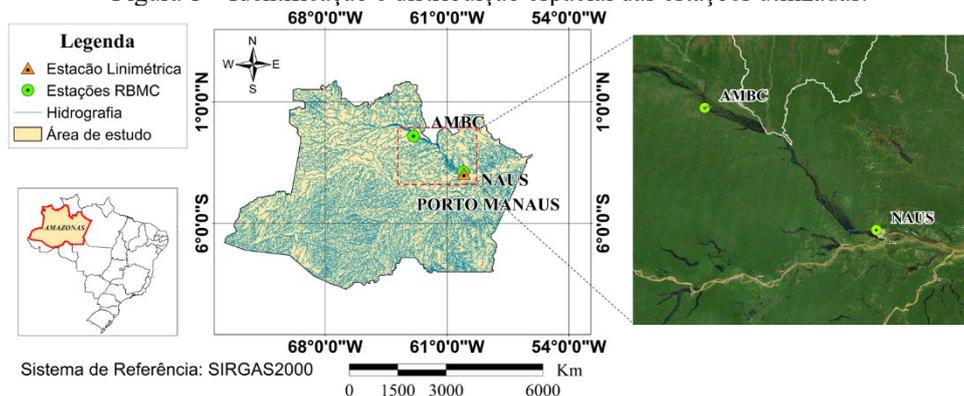
Nesse sentido, diversas investigações avaliam as deformações relativas ao efeito da carga hidrológica nas componentes verticais, fundamentando-se na associação das variações temporais de cotas linimétricas (nível do rio) às séries posicionais de componentes verticais, como se pode observar em Van Dam et al. (2001), Bevis et al. (2005), Costa, Matos e Blitzkow (2012), Nascimento (2016), Moreira et al. (2016), Giacometti et al. (2017), Oliveira (2018) e Knowles, Bennett e Harig (2020). No entanto, devido à viscoelasticidade da Terra, as deformações causadas pela carga hidrológica também afetam as componentes horizontais (planimétricas) e, portanto, é importante que estas sejam consideradas nas análises.

Assim sendo, objetiva-se com este trabalho efetuar uma abordagem estatística baseada na aplicação de análises espectrais e testes de hipóteses para a investigação das deformações ocorridas em estações da RBMC fundamentando-se nas análises de tendência (velocidades) e periodicidade (sazonalidade e ciclo). Será avaliada a combinação da modelagem de Box e Jenkins associada ao procedimento iterativo de Chen e Liu para a identificação e correção dos saltos ocasionados por trocas de antenas e/ou receptores.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho utilizou-se dados de observação GNSS (GPS e GLONASS) de duas estações da RBMC e dados de uma estação linimétrica. A disposição e identificação das estações, assim como os períodos adotados nas séries temporais, podem ser verificados nas Figura 1 e Tabela 1, respectivamente.

Figura 1 – Identificação e distribuição espacial das estações utilizadas.



Fonte: Os autores (2021).

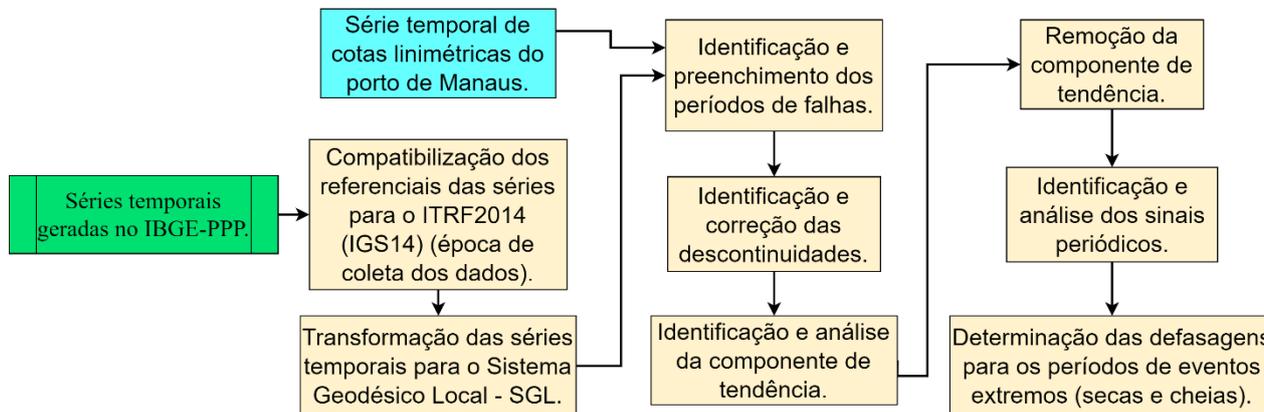
Tabela 1 – Estações utilizadas e os respectivos períodos considerados nas séries temporais. *DOY (Dias do ano).

Estações	Município	Data inicial	Data final
AMBC	Barcelos (AM)	27/05/2015 (DOY nº 147)	31/12/2019 (DOY nº 365)
NAUS	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY nº 001)	
PORTO MANAUS	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY nº 001)	

Fonte: Os autores (2021).

O fluxograma apresentado na Figura 2 resume as etapas metodológicas desenvolvidas neste trabalho e que serão descritas e fundamentadas na sequência.

Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.



Fonte: Os autores (2021).

As séries temporais posicionais foram geradas considerando as coordenadas estimadas na época de coleta dos dados, resultantes do processamento dos arquivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) de observações GNSS, com seção de rastreamento de 24 horas, no serviço online IBGE-PPP (IBGE-PPP, 2020) em modo estático. Originalmente, o referencial das coordenadas estimadas neste serviço está associado à realização IGS (*International GNSS Service*) na data de coleta dos dados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Realizações IGS adotadas pelo IBGE-PPP considerando a data do levantamento.

Data de rastreamento GNSS	Realização IGS
05/11/2006 a 16/04/2011	IGS05
17/04/2011 a 06/10/2012	IGS08
07/10/2012 a 28/01/2017	IGb08
29/01/2017 a 16/05/2020	IGS14
17/05/2020 a atualmente	IGb14

Fonte: IBGE (2017) e IBGE-PPP (2020).

Destaca-se que o IGS14/IGb14 e o ITRF2014 (*International Terrestrial Reference Frame 2014*) são compatíveis e alinhados (REBISCHUNG; SCHMID, 2016; IGSACC, 2020; REBISCHUNG, 2020), assim como o IGS08/IGb08 e o ITRF2008 (WESTON; SOLER, 2012; IGSACC, 2020) e o IGS05 e o ITRF2005 (IGSACC, 2020).

Considerando os períodos adotados nas séries temporais posicionadas, observou-se a ocorrência de, no mínimo, duas materializações do ITRF (IGS). Nesse caso, efetuou-se a compatibilização das materializações ITRF2005 (IGS05) e/ou ITRF2008 (IGS08, IGb08) para a materialização mais consistente no período considerado, o ITRF2014 (IGS14), utilizando o procedimento descrito em Petit e Luzum (2010), Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016), Braga e Dal Poz (2019). Os conjuntos de parâmetros de transformação utilizados, bem como suas respectivas variações temporais são disponibilizados em Petit e Luzum (2010), Altamimi, Collilieux e Métivier (2012) e Altamimi et. al. (2016). Salienta-se que se deve atentar ao fato de que tanto os parâmetros quanto as coordenadas cartesianas geocêntricas (*X, Y, Z*) consideradas nas materializações devem estar na mesma época.

Como os resultados de análises associadas às componentes cartesianas geocêntricas *X, Y* e *Z*, apresentam complexidade quanto à interpretação, Leick (2004) destaca que tal complexidade é minimizada

transformando-se as componentes X , Y e Z para o SGL (Sistema Geodésico Local), o que facilita as interpretações. Adicionalmente, Monico (2008) afirma que o SGL possibilita avaliar as variações locais específicas, ocorridas em X , Y e Z , em termos das componentes horizontais e vertical.

Nesse sentido, transformou-se as componentes X , Y e Z para componentes norte (Δn), leste (Δe) e vertical (Δu) do SGL aplicando-se o modelo apresentado na Eq. (1):

$$\begin{bmatrix} \Delta n_j \\ \Delta e_j \\ \Delta u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -sen\bar{\varphi}cos\bar{\lambda} & -sen\bar{\varphi}sen\bar{\lambda} & cos\bar{\varphi} \\ -sen\bar{\lambda} & cos\bar{\lambda} & 0 \\ cos\bar{\varphi}cos\bar{\lambda} & cos\bar{\varphi}sen\bar{\lambda} & sen\bar{\varphi} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_j - \bar{X} \\ Y_j - \bar{Y} \\ Z_j - \bar{Z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que: (Δn_j , Δe_j , Δu_j) são as componentes geodésicas locais da j -ésima época de interesse; (X_j , Y_j , Z_j) são as componentes cartesianas da j -ésima época de interesse; (\bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z}) são as componentes cartesianas médias das séries temporais; e, ($\bar{\varphi}$, $\bar{\lambda}$) são as componentes elipsoidais médias referentes às componentes cartesianas médias das séries temporais.

Salienta-se que a origem e a orientação espacial do SGL são dependentes das componentes elipsoidais φ_o (latitude) e λ_o (longitude) do ponto definido como origem (LEICK, 2004; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). No caso das séries temporais, considera-se como origem as componentes elipsoidais médias, ou seja, (φ_o, λ_o) = ($\bar{\varphi}, \bar{\lambda}$) (SILVA; MONICO, 2012; MACIUK; SZOMBARA, 2018).

Séries temporais de cotas linimétricas coletadas pela estação do porto de Manaus, disponíveis em PM (2020), também foram consideradas neste trabalho. Destaca-se que as cotas linimétricas representam apenas a variação superficial da água, não refletindo outros fatores relativos à carga hidrológica. No entanto, a associação entre variáveis posicionais e hidrológicas possibilitam avaliar as variações do sinal hidrológico representado nas séries, permitindo analisar seu deslocamento de fase e amplitude (ANDERSEN et al., 2008).

Ao examinar as séries temporais posicionais, constatou-se que estas continham períodos de falhas (falta de dados) devido a indisponibilidade de dados GNSS pelo IBGE. Neste caso, efetuou-se o preenchimento (imputação) dos dados para os períodos de falhas. O procedimento aplicado para imputação considera que, se os dados anteriores àquele dado faltante apresentarem padrão sazonal, utiliza-se uma decomposição sazonal na interpolação, caso contrário, procede-se com a interpolação linear para o preenchimento dos dados (MORITZ et al., 2015). Justifica-se a imputação pela relação de dependência de alguns procedimentos executados na sequência às observações anteriores, caso da condição de autorregressividade, que se fundamenta no pressuposto de que o valor atual da série é uma combinação linear dos valores anteriores mais os resíduos (CRYER; CHAN, 2008).

As séries temporais de componentes posicionais, segundo Bogusz et al. (2016), Herring, Floyd e King (2017) e Barzaghi, Betti e De Gaetani (2018), podem ser escritas em termos dos componentes que a constituem conforme Eq. (2), com $\vec{x}_p(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)] = [\Delta n(t), \Delta e(t), \Delta u(t)]$, para $p = 1, 2, 3$ e $t = 1, 2, 3, \dots, N$:

$$x_{p_t} = \underbrace{x_{p_o} + v_{x_p} \cdot t}_{comp. de tendência} + \underbrace{\sum_{i=1}^P [R_i \cos(2\pi f_i t + \tau_i)]}_{comp. periódica} + \underbrace{O_{x_p}}_{outlier} + \underbrace{\sum_{j=1}^M H_j \cdot x_{p_j}^{off}}_{descontinuidades} + \underbrace{\varepsilon_{x_p}(t)}_{resíduo} \quad (2)$$

em que: x_{p_o} corresponde a posição inicial; v_{x_p} é a velocidade da estação; R_i , f_i e τ_i é a amplitude, frequência e diferença de fase, respectivamente; O_{x_p} são os outliers; $x_{p_j}^{off}$ correspondem as amplitudes dos deslocamentos da mudança de nível; H_j é uma função degrau; ε_{x_p} são os resíduos; P é a P -ésima componente periódica considerada (anual, semianual, sazonal); M é a M -ésima descontinuidade (mudança de nível ou salto) e t é a época.

Descontinuidades ou saltos (mudança de nível) podem ocorrer nas séries temporais posicionais e suas causas podem ser naturais (como fortes terremotos) ou artificiais (como mudança de antena e/ou receptores ou modificação física do monumento da antena). Em áreas não sismogênicas ou que apresentem sismos de baixa magnitude, como o Brasil, os saltos observados são essencialmente artificiais. Portanto, quando o propósito é estudar as causas físicas do movimento ou deformação da crosta é importante que se remova estes saltos das

séries (BEVIS; BEDFORD; CACCAMISE, 2020).

Nos casos em que se constatou a ocorrência de saltos ocasionados por fatores artificiais, utilizou-se a seguinte estratégia para a correção: de início ajustou-se um modelo ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) às séries posicionais seguindo a metodologia de Box e Jenkins, detalhada em Morettin e Toloí (2006); em seguida, aplicou-se as séries posicionais e seus respectivos modelos ARIMA ajustados no procedimento iterativo proposto por Chen e Liu (1993) para identificação e correção dos saltos. Este procedimento é composto por três estágios: o primeiro corresponde à estimativa inicial dos parâmetros e detecção de mudanças de nível; no segundo, ocorre a estimativa conjunta dos efeitos das mudanças de nível e parâmetros do modelo e, no terceiro, ocorre a detecção de mudanças de nível utilizando as estimativas finais dos parâmetros do modelo ARIMA. Ao final, os trechos corrigidos dos saltos foram incorporados às séries originais.

Com as séries posicionais imputadas e corrigidas dos saltos causados por fatores artificiais, prosseguiu-se para as análises da tendência e da periodicidade. Para verificação da existência da componente de tendência nas séries, aplicou-se o teste de Dickey-Fuller aumentado ou abreviadamente, ADF teste. Tal teste consiste na análise da regressão descrita na Eq. (3):

$$\Delta x_{p_t} = \beta_1 + \beta_2 t + \pi x_{p_{t-1}} + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta x_{p_{t-i}} + \varepsilon_t \quad (3)$$

em que: Δx_{p_t} é a primeira diferença da série em análise; β_1 representa o intercepto; β_2 é o coeficiente de tendência determinística; π é o coeficiente de tendência estocástica; m é o menor valor inteiro que torna os resíduos da equação ruído branco e pode ser minimizado pelo critério de informação de Akaike - AIC (AKAIKE, 1974) ou pelo critério de informação bayesiano - BIC (SCHWARZ, 1978) e ε_t é ruído branco.

Neste teste verifica-se inicialmente a hipótese H_0 : A série possui raiz unitária ($\rho = 1$) e, portanto, possui tendência estocástica. Isto equivale a testar H_0 : A série possui tendência estocástica ($\pi = 0$), pois a regressão é estimada com uma diferença (Δx_{p_t}) já aplicada a série. Se H_0 for rejeitada, conclui-se que a série não possui tendência estocástica. O segundo passo é verificar a presença de tendência determinística pela hipótese H_0 : $\beta_2 = 0$ (A série não possui tendência determinística). Se H_0 não for rejeitada, conclui-se que a série está livre de tendência (DICKEY; FULLER, 1979).

Gülal, Erdogan e Tiryakioglu (2013) destacam que a análise da tendência é extremamente importante, pois define os movimentos lineares (deformações contínuas) das estações GNSS, utilizados para expressar a taxa de movimentação (ou velocidade) da placa tectônica. Dessa forma, Olds et al. (2011), Bogusz e Klos (2016) e Fazilova, Ehgamberdiev e Kuzin (2018) afirmam que a determinação das componentes de velocidade $\vec{V} = (V_n, V_e, V_u)$ é comumente efetuada ajustando-se modelos de regressão linear, em que o coeficiente angular da reta de regressão ajustada corresponde às respectivas velocidades.

Além das deformações contínuas, deformações periódicas (cíclicas e/ou sazonais) também afetam as estações GNSS. Estes tipos de deformações correspondem, geralmente, às respostas viscoelásticas da Terra aos fenômenos (ou eventos) transitórios que se repetem regularmente a cada período idêntico de tempo (a cada hora, dia, mês ou ano), como o de carga hidrológica, considerado nesse trabalho. Portanto, analisar as componentes periódicas é significativo, pois possibilitam entender a evolução temporal do comportamento destas deformações ocasionadas em estações GNSS localizadas na área de estudo. Contudo, caso exista tendência, é prudente removê-la anteriormente à análise periódica (SING; THORNE; HEGGE, 1985).

Dois procedimentos foram utilizados para a remoção da tendência das séries: no primeiro aplicou-se diferenças simples sucessivas nos dados originais, até obter uma série livre de tendência. No segundo, considerou-se que a tendência poderia ser expressa por um polinômio de baixo grau e, portanto, aplicou-se o método de suavização denominado LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*), também chamado de LOESS (*locally weighted smoothing*), para a determinação da componente de tendência das séries e, em seguida, subtraiu-se a tendência determinada da série original. Salienta-se que o método LOWESS consiste no ajuste progressivo de retas de mínimos quadrados ponderados à subconjuntos que formam as séries consideradas. Detalhes sobre ambos procedimentos podem ser consultados em Morettin e Toloí (2006).

De posse da série livre de tendência procedeu-se à análise das componentes periódicas. Morettin e Toloí (2006) destacam que a análise harmônica (ou análise de Fourier) tem sido largamente empregada na análise das componentes periódicas em séries temporais, pois permitem buscar periodicidades nos dados observados. Nesse sentido, Bevis, Bedford e Caccamise (2020) evidenciam que se deve extrair, identificar e evidenciar os sinais periódicos definidos pela trajetória das séries. Para tal finalidade, aplicou-se o método de demodulação complexa associada a um filtro passa-baixa (*low pass filter*) do tipo *Butterworth*. O filtro passa-baixa suaviza a série demodulada removendo todos os componentes de frequência maiores que uma frequência de passagem, eliminando/mitigando os efeitos dos *outliers* (BLOOMFIELD, 2004).

Bloomfield (2004) e Richardson (2019) ressaltam que a demodulação complexa efetua a extração da amplitude e fase variável no tempo de um determinado sinal de entrada. Este método funciona em três etapas: primeiro demodula o sinal de entrada; em seguida, suaviza o sinal demodulado com um filtro passa-baixa e, por fim, extrai a amplitude e a fase do sinal suavizado na etapa anterior. Neste trabalho aplicou-se a demodulação complexa considerando a frequência de demodulação $f_0 = 1/365$ (ciclo anual) com frequência de passagem $f_p = 0,005$. Detalhes sobre o método de demodulação complexa e o filtro passa-baixa podem ser verificados em Bloomfield (2004) e Hamming (2013), respectivamente.

As séries demoduladas e livre de tendência (K_{p_t}) foram decompostas no domínio das frequências de Fourier para avaliação da ocorrência de periodicidade (sazonalidade ou ciclo) e, em caso positivo, determinou-se a ordem do *lag* periódico s . Neste procedimento utilizou-se o periodograma, que consiste em um gráfico desenvolvido com a finalidade de detecção de fatores periódicos que possui em suas abscissas as frequências de Fourier (f_i) e nas ordenadas as intensidades delas $I(f_i)$ (MORETTIN; TOLOI, 2006). Cryer e Chan (2008) destacam que as intensidades correspondentes às frequências de Fourier são determinadas a partir da Eq. (4):

$$I(f_i) = \frac{2}{n} \left[\left(\sum_{t=1}^n K_{p_t} \cos(2\pi f_i t) \right)^2 + \left(\sum_{t=1}^n K_{p_t} \sen(2\pi f_i t) \right)^2 \right] \tag{4}$$

em que $n = N/2$ é o número de observações utilizadas.

Na sequência, fundamentando-se nos valores das intensidades, obteve-se o *lag* periódico s , denotado por $s = 1/f_c$, em que f_c é a frequência de Fourier crítica e corresponde à frequência responsável pela maior intensidade (pico), ou seja, $I(f_c)$.

No entanto, Morettin e Toloí (2006) destacam que mesmo apresentando diversos picos, não é possível afirmar a partir do periodograma, a priori, que cada pico corresponde a uma componente periódica da série. Portanto, a aplicação do teste G de Fisher (FISHER, 1929) deve ser efetuada para atestar a significância estatística do *lag* periódico encontrado, testando-se a hipótese H_0 : O *lag* periódico s encontrado não é significativo. Sua estatística de teste (g_{calc}) é dada pela Eq. (5),

$$g_{calc} = \frac{\max(I(f_i))}{\sum_{i=1}^n I(f_i)} \tag{5}$$

Os valores críticos (g_{crit}) do teste G, associados ao nível de significância α , são determinados pela Eq. (6):

$$g_{crit} = 1 - \left(\frac{\alpha}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} \tag{6}$$

Morettin e Toloí (2006) afirmam que uma boa aproximação do valor p para o teste G de Fisher é dado pela Eq. (7),

$$P(g_{calc} > g_{crit}) \cong n(1 - g_{calc})^{n-1} \tag{7}$$

Com o intuito de avaliar o tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica

(defasagens), foram determinados os valores máximos e mínimos anuais nas séries temporais das variáveis utilizadas, bem como suas respectivas épocas. Salienta-se que tais valores referem-se às cheias e secas ocorridos na área de estudo.

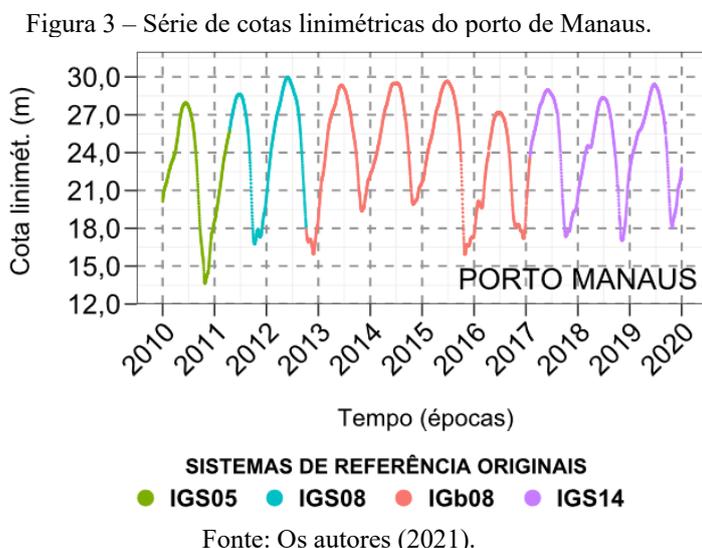
Todos os procedimentos estatístico-matemáticos aplicados no desenvolvimento metodológico, bem como os gráficos gerados, foram implementados em *scripts* no *software* R. Dentre os pacotes (*packages*) utilizados destaca-se: *utils* (R CORE TEAM, 2020), *stats* (R CORE TEAM, 2020), *ggplot2* (WICKHAM, 2016), *forecast* (HYNDMAN et al., 2020), *tsoutliers* (LACALLE, 2019), *urca* (PFAFF, 2008), *swdft* (RICHARDSON, 2019), *signal* (SIGNAL DEVELOPERS, 2013), *GeneCycle* (AHDESMAKI; FOKIANOS; STRIMMER, 2019). O *software* R caracteriza-se como uma ferramenta robusta para tais aplicações e é disponibilizado gratuitamente por R Core Team (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, salienta-se que, de forma a facilitar as análises destacou-se nos gráficos de todas as estações os períodos referentes as materializações originais dos sistemas de referência. Adicionalmente, a trajetória (tendência + sinais periódicos) das séries posicionais estão livres dos ruídos aleatórios gerados no processamento e, portanto, são utilizadas no ajuste dos modelos de regressão linear.

Considerando a série de cotas linimétricas do porto de Manaus, disposta na Figura 3, observou-se que esta não apresentou períodos de falhas. Verificou-se que o maior pico das cheias (29,97 m) ocorreu em 2012 e correspondeu à maior cheia registrada na série histórica com 110 anos de tempo de recorrência, conforme destacado em CPRM (2012). Noutro ângulo, a vazante (seca) histórica máxima (13,63 m) ocorreu em 2010 CPRM (2010). Comportamento anômalo na série pode ser observado nos picos de vazante para os anos de 2011, 2012, 2015, 2016 e 2017, o que não ocorreu nos picos das cheias. Nesse sentido, as causas associadas a tais anomalias podem estar atreladas à ocorrência de fenômenos atmosférico-oceânicos como o El Niño e La Niña e devem ser investigadas.

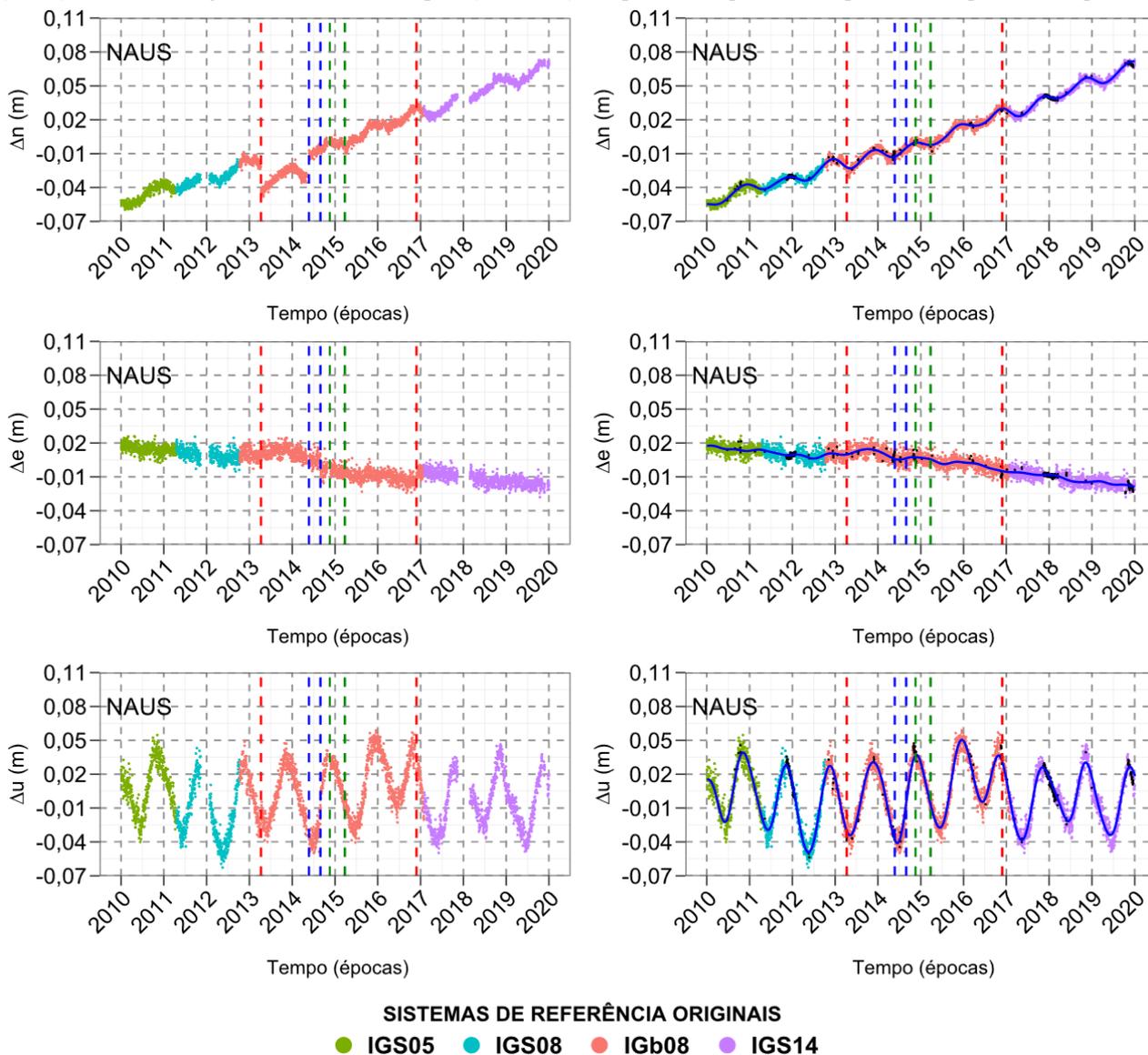
Salienta-se que o El Niño apresentou intensidade moderada (quando a anomalia de temperatura da superfície do mar foi inferior à $1,5^{\circ}\text{C}$ e superiores à $1,0^{\circ}\text{C}$) no interstício entre agosto de 2009 e julho de 2010 e forte (quando a anomalia de temperatura da superfície do mar teve valor superior a $1,5^{\circ}\text{C}$) no interstício entre agosto de 2015 e julho de 2016. Já o La Niña intensidade moderada (quando a anomalia de temperatura da superfície do mar teve valores superiores à $-1,5^{\circ}\text{C}$ e inferiores à $-1,0^{\circ}\text{C}$) para os interstícios entre agosto de 2010 e julho de 2011; e entre agosto de 2017 e julho de 2018. O interstício entre agosto de um ano até julho do ano seguinte é utilizado tanto para a determinação dos anos de ocorrência quanto para a estimação das intensidades dos fenômenos supramencionados (INPE, 2021).



As séries posicionais de todas as estações consideradas apresentaram períodos de falhas e, portanto, efetuou-se a imputação dos dados faltantes. Foram observados saltos (mudanças de nível) referentes às causas

artificiais nas séries da estação NAUS, que foram corrigidos e podem ser observadas na Figura 4.

Figura 4 – Séries posicionais da estação NAUS com saltos e falhas (esquerda) e com saltos corrigidos, períodos imputados e trajetória (direita). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.



Fonte: Os autores (2021).

Fundamentando-se nos resultados obtidos no teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF) dispostos na Tabela 3, constatou-se que as séries Δn , Δe , Δu e de cotas linimétricas em estudo não apresentam raiz unitária e, portanto, não possuem tendência estocástica, pois a regressão é estimada com uma diferença já aplicada. A hipótese de raiz unitária foi rejeitada a 5% de significância com os valores p apresentados. Analisando o coeficiente para tendência determinística observou-se que as séries Δn e Δe possuem valor significativo com valor $p \ll 0,0001$, ou seja, rejeitou-se a hipótese de nulidade que afirma que as séries não possuem tendência determinística. Desta forma, eliminou-se a tendência determinística com aplicação dos dois procedimentos anteriormente mencionados. Considerando as séries Δu e de cotas linimétricas não se pode rejeitar a hipótese de nulidade (valor p igual a 0,713 e 0,901, respectivamente) constatando que estas não possuem tendência. No entanto, deve-se considerar a modelagem dos fatores periódicos no ajuste de modelos de regressão linear para as séries Δu , uma vez que suas amplitudes são significativamente maiores do que as encontradas nas séries Δn e Δe , podendo assim levar a resultados imprecisos.

Tabela 3 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries posicionais da estação NAUS e de cota linimétrica.

Componentes	Parâmetros	β_1	β_2	π
Cotas Linimétricas	Estimativa	1,124e ⁻⁰²	-8,293e ⁻⁰⁸	-4,600e ⁻⁰⁴
	Erro-padrão	4,302e ⁻⁰³	6,715e ⁻⁰⁷	1,723e ⁻⁰⁴
	Estatística do teste	2,614	-0,123	-2,669
	Valor p	0,009	0,901	0,007
Δn	Estimativa	-3,849e ⁻⁰³	2,243e ⁻⁰⁶	-6,834e ⁻⁰²
	Erro-padrão	4,121e ⁻⁰⁴	2,362e ⁻⁰⁷	7,152e ⁻⁰³
	Estatística do teste	-9,340	9,495	-9,556
	Valor p	< 2,0e ⁻¹⁶	< 2,0e ⁻¹⁶	< 2,0e ⁻¹⁶
Δe	Estimativa	6,135e ⁻⁰³	-2,984e ⁻⁰⁶	-3,137e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	3,199e ⁻⁰⁴	1,546e ⁻⁰⁷	1,488e ⁻⁰²
	Estatística do teste	19,180	-19,300	-21,080
	Valor p	< 2,0e ⁻¹⁶	< 2,0e ⁻¹⁶	< 2,0e ⁻¹⁶
Δu	Estimativa	-4,824e ⁻⁰⁵	3,772e ⁻⁰⁸	-2,459e ⁻⁰²
	Erro-padrão	2,161e ⁻⁰⁴	1,025e ⁻⁰⁷	4,338e ⁻⁰³
	Estatística do teste	-0,223	0,368	-5,670
	Valor p	0,823	0,713	1,54e ⁻⁰⁸

Fonte: Os autores (2021).

Após a comprovação de tendência ajustou-se modelos de regressão linear às componentes Δn e Δe , determinando-se as deformações contínuas (velocidades) conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação NAUS.

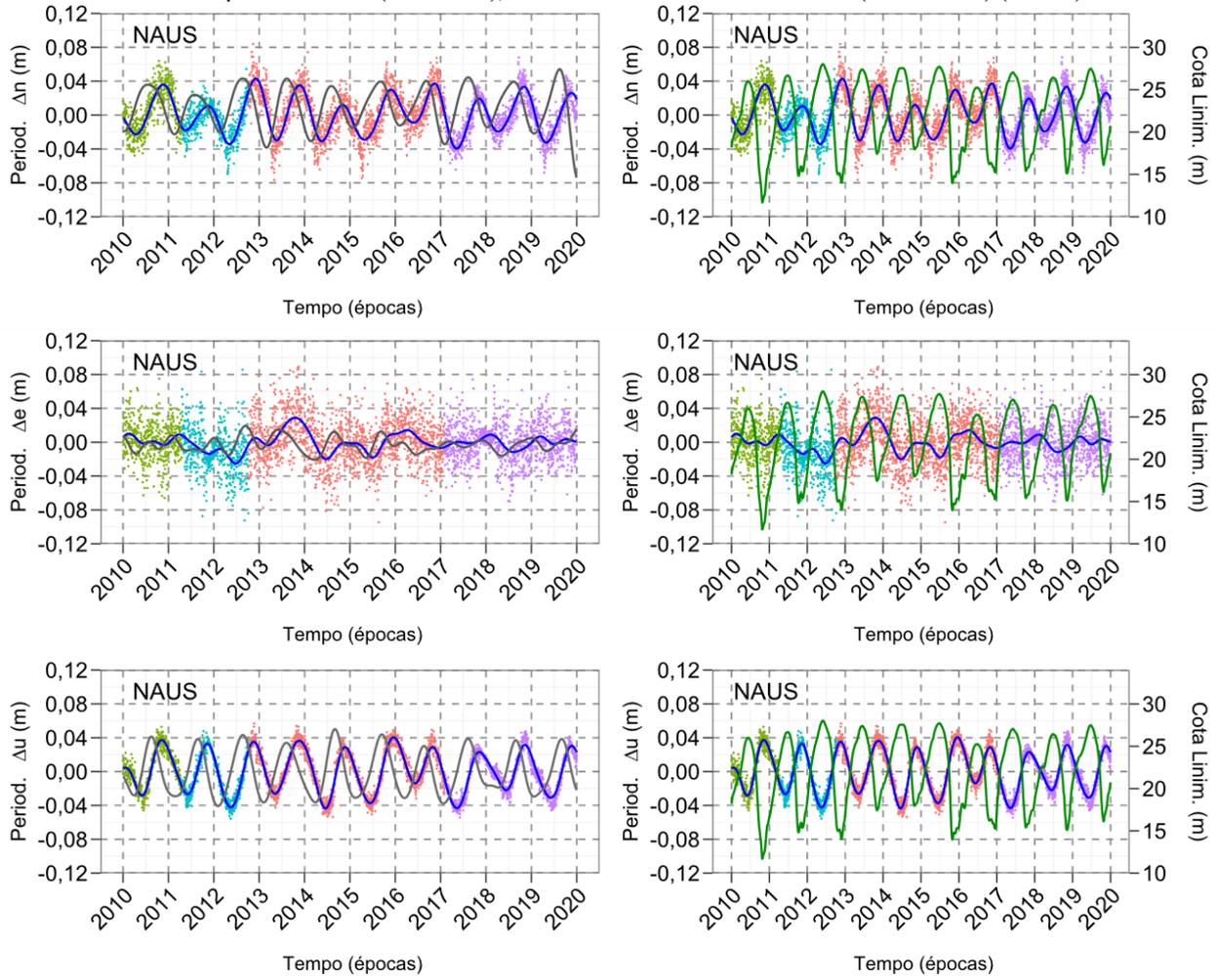
Componentes	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	Estatística <i>t</i>	Valor p
Δn	Intercepto	-24,150	5,132e ⁻⁰²	-470,5	< 2e ⁻¹⁶
	V_n (m/ano)	0,01198	2,547e ⁻⁰⁵	470,5	< 2e ⁻¹⁶
Δe	Intercepto	7,00588	3,788 e ⁻⁰²	184,9	< 2e ⁻¹⁶
	V_e (m/ano)	-0,00347	1,880 e ⁻⁰⁵	-184,9	< 2e ⁻¹⁶

Fonte: Os autores (2021).

De posse das séries livre de tendência efetuou-se a análise das componentes periódicas. Inicialmente, optou-se por utilizar os sinais periódicos extraídos com a demodulação complexa das séries diferenciadas. No entanto, percebeu-se que tais sinais apresentaram um retardo quando associadas às séries livres de tendência. Tal fato compromete as análises das defasagens atreladas aos períodos de secas e cheias. Contudo, em casos que se deseje determinar apenas o *lag* periódico *s*, tal fato não acarreta prejuízos. Salienta-se que o retardo apresentado nos sinais extraídos das séries diferenciadas não ocorreu para os sinais extraídos das séries em que a tendência foi removida com o procedimento LOWESS e, portanto, estes foram utilizados nas análises das estações em estudo. Ambos os sinais periódicos podem ser observados na Figura 5. Com a finalidade de melhorar a visualização e evidenciar seu comportamento e suas características em relação aos sinais de Δu e à série de cotas linimétricas, aplicou-se um fator de escala de seis vezes (exagero horizontal/vertical = 6) aos sinais das componentes Δn e Δe das estações consideradas.

A partir dos sinais periódicos, determinou-se os periodogramas referentes às componentes Δn , Δe e Δu da estação NAUS e à série de cotas linimétricas, apresentados na Figura 6. Observou-se a ocorrência de picos associados as frequências críticas e, portanto, caracterizam possíveis *lags* periódicos *s*, conferindo características cíclicas ou sazonais às componentes em análise. A significância dos *lags* periódicos foi validada com aplicação do teste G de Fisher, cujos resultados podem ser verificados na Tabela 5.

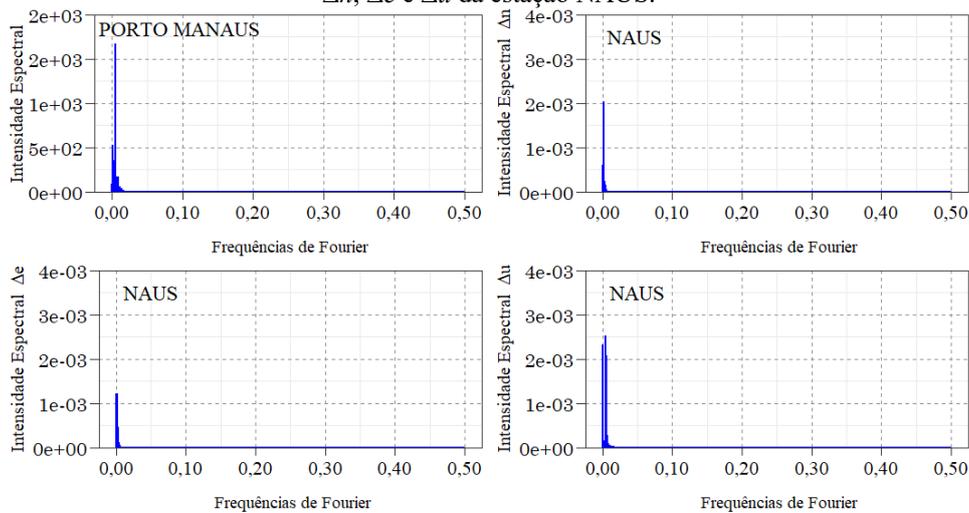
Figura 5 – Série de sinais periódicos das séries diferenciadas (linha cinza) e por LOWESS (linha azul) (esquerda) e somente por LOWESS (linha azul), com a série de cotas linimétricas (linha verde) (direita).



SISTEMAS DE REFERÊNCIA ORIGINAIS
 ● IGS05 ● IGS08 ● IGB08 ● IGS14

Fonte: Os autores (2021).

Figura 6 – Periodogramas referentes à série de cotas linimétricas do porto de Manaus e às componentes periódicas de Δn , Δe e Δu da estação NAUS.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 5 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação NAUS.

Componentes	Frequência crítica f_c (ciclos/dia)	Periodicidade $1/f_c$ (dias)	Estatística G (g_{calc})	g_{crit}	Valor p
Cotas linimétricas	0,002738	365,2	0,8489	0,0057	<< 0,00001
Δn	0,002738	365,2	0,7951	0,0057	<< 0,00001
Δe	0,000821	1217,3	0,2306	0,0057	<< 0,00001
Δu	0,002738	365,2	0,8518	0,0057	<< 0,00001

Fonte: Os autores (2021).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5 pode-se observar que as periodicidades encontradas foram significativas a 5% de significância. De fato, os valores apresentados para estatística G foram superiores aos valores críticos g_{crit} , com os valores p << 0,00001, o que confirma que os lags periódicos são significativos. A periodicidade da componente Δe evidenciou uma característica cíclica, pois o valor obtido foi superior a dois anos (730 dias). Já as componentes Δn , Δu e de cotas linimétricas evidenciaram uma sazonalidade anual. Nesse sentido, pode-se confirmar a forte relação entre as variações hidrológicas e as deformações transitórias associadas ao efeito da carga hidrológica. Adicionalmente, observando a série de cotas linimétricas e os sinais periódicos dispostos na Figura 5, verifica-se que as componentes Δn e Δu , quando comparadas às de cotas linimétricas, estão aproximadamente fora de fase (~180°), enquanto as componentes Δn e Δu estão aproximadamente em fase (~0°), quando comparadas entre si. A componente Δe apresentou comportamento indefinido, evidenciando a influência de efeitos adicionais ao da carga hidrológica.

Nesse sentido, Bevis, Bedford e Caccamise (2020) justificam que o comportamento quase em fase apresentado pelas componentes Δn e Δu ocorre devido à orientação média dos rios nas proximidades de Manaus, que é aproximadamente oeste-leste. Nos períodos de cheia, os rios aumentam sua massa e, portanto, o solo na estação NAUS é puxado para baixo em direção ao centro da mudança de massa local, que está quase ao sul.

O tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica foi analisado considerando as defasagens entre os sinais periódicos e a série de cotas linimétricas apresentadas na Tabela 6. Salienta-se que as cotas linimétricas foram consideradas como referência para os cálculos. Dessa forma, os sinais (+) e (-) que acompanham os valores anuais evidenciam se as deformações ocorreram, respectivamente, antes ou depois dos picos e vales das cheias e secas. Considerando as cheias, observou-se as deformações sofridas pelas componentes Δn e Δu ocorreram antes dos picos em 100% dos anos para Δn e 90% para Δu . Portanto, pode-se constatar que o limite viscoelástico da deformação é atingido antes dos picos das cheias, ou seja, a saturação do solo ocorre antes do nível linimétrico máximo. Entre as componentes Δn e Δu , as defasagens mostram que as deformações em Δn ocorrem antes dos picos ocorridos em Δu em 80% dos anos.

Tabela 6 – Defasagens referentes à estação NAUS.

	Comp.	Defasagens (dias)										Máx.	Mín.	Méd.
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			
Cheia	Δn e Linimétrica	-58	-40	-24	-24	-25	-63	-20	-25	-77	-53	77	20	40,9
	Δu e Linimétrica	-10	-24	-13	-37	+4	-16	-7	-23	-12	-16	4	37	16,2
	Δn e Δu	-48	-16	-11	+13	-29	-47	-13	-2	-65	+37	65	2	28,1
Seca	Δn e Linimétrica	+27	+36	+7	+19	+6	+30	-31	+29	-4	+25	36	4	29,7
	Δu e Linimétrica	+14	+30	-10	+14	+26	+50	-47	+32	+4	+27	50	4	31,5
	Δn e Δu	+13	+6	+17	+5	-20	-20	+16	-3	-8	-2	20	2	16,7

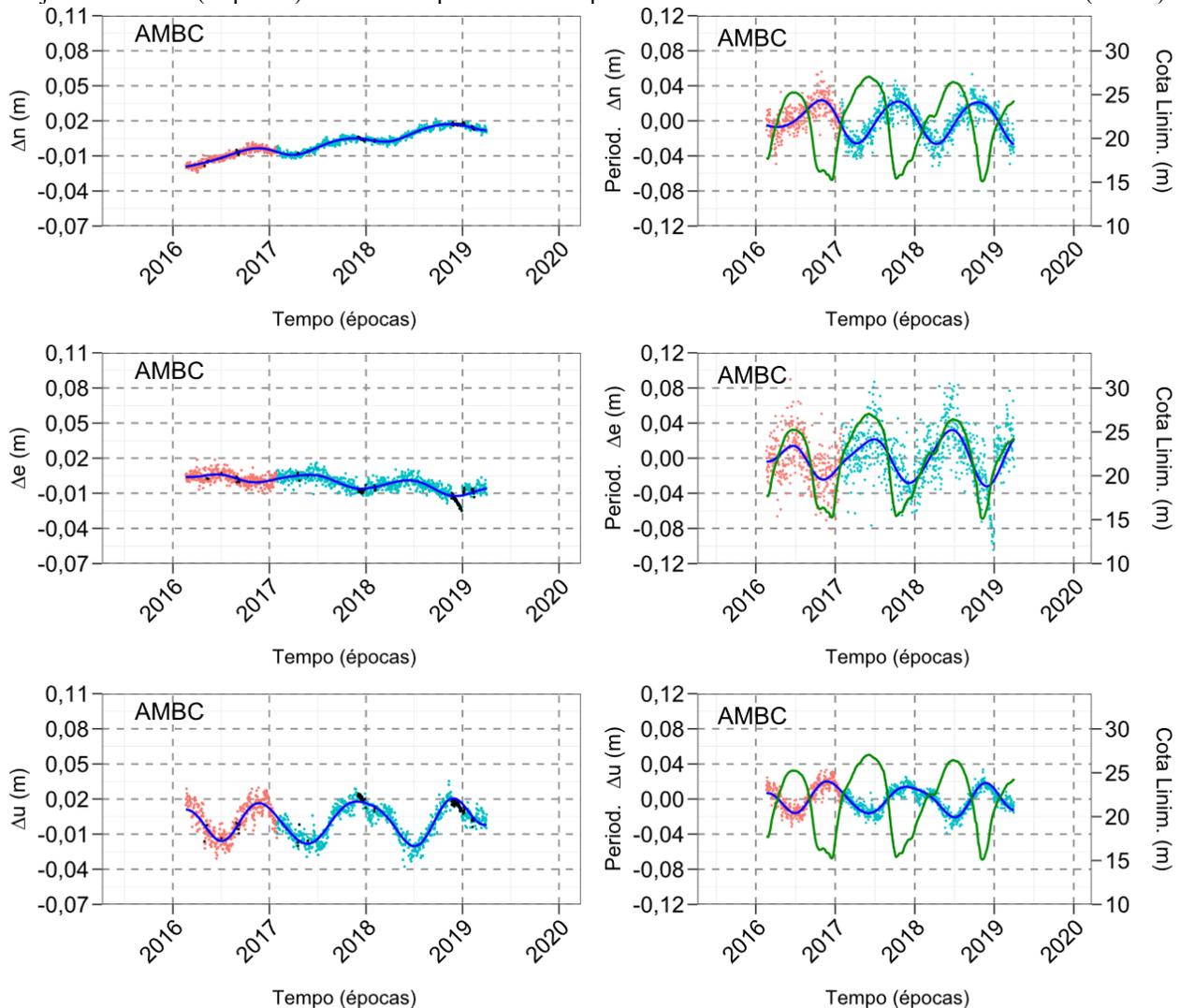
Fonte: Os autores (2021).

Para as secas, as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram após os vales em 80% dos anos para ambas as componentes. Nesse sentido, observa-se que a ocorrência do relaxamento das deformações após o nível linimétrico mínimo está associado ao processo de vazante vinculado ao remanso e às zonas úmidas, recorrentes na região de Manaus. Entre as componentes Δn e Δu , as defasagens mostram que as deformações em Δn ocorrem após os vales em Δu em 50% dos anos. Desconsiderou-se as componentes Δe nas defasagens por apresentarem comportamento irregular, com picos locais interanuais que podem ser ocasionados por fatores adicionais ao de carga hidrológica. De fato, Rosa (2008) e Knowles, Bennett e Harig (2020) destacam

que apesar da parte majoritária dos efeitos estarem associados ao efeito causado pela carga provocada pelas enchentes, ainda permanecem, na série temporal posicional, outros efeitos que requerem um estudo mais detalhado.

Ao observar as séries das componentes Δn , Δe e Δu da estação AMBC apresentadas na Figura 7, constatou-se que não houveram trocas de antenas e/ou receptores e, conseqüentemente, não tiveram saltos devido a tais fatores, como os apresentados em NAUS. Sendo assim, prosseguiu-se para a análise da tendência. De posse dos resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado dispostos na Tabela 7, afirma-se que as séries Δn , Δe , Δu em estudo não apresenta raiz unitária e, portanto, não possuem tendência estocástica, pois a regressão é estimada com uma diferença já aplicada. A hipótese de raiz unitária foi rejeitada a 5% de significância com os valores p apresentados. Fundamentando-se nos coeficientes para tendência determinística observou-se que as séries Δn e Δe possuem valor significativo com valor $p \ll 0,0001$, ou seja, rejeitou-se a hipótese de nulidade que afirma que as séries não possuem tendência determinística. Portanto, eliminou-se a tendência determinística aplicando os dois procedimentos anteriormente mencionados. Considerando a série Δu não se pode rejeitar a hipótese de nulidade (valor p igual a 0,473) constatando que esta não possui tendência.

Figura 7 – Séries posicionais da estação AMBC com períodos imputados, representados pelos pontos em preto e trajetória em azul (esquerda) com seus respectivos sinais periódicos em azul e cotas linimétricas em verde (direita).



SISTEMAS DE REFERÊNCIA ORIGINAIS
 ● IGS05 ● IGS08 ● IGB08 ● IGS14

Fonte: Os autores (2021).

Tabela 7 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries de componentes posicionais da estação AMBC.

Componentes	Parâmetros	β_1	β_2	π
Δn	Estimativa	-1,587e ⁻⁰³	2,977e ⁻⁰⁶	-1,018e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	2,731e ⁻⁰⁴	4,887e ⁻⁰⁷	1,547e ⁻⁰²
	Estatística do teste	-5,813	6,092	-6,577
	Valor p	7,99e ⁻⁰⁹	1,52e ⁻⁰⁹	7,30e ⁻¹¹
Δe	Estimativa	1,975e ⁻⁰³	-3,897e ⁻⁰⁶	-3,125e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	3,006e ⁻⁰⁴	5,032e ⁻⁰⁷	2,709e ⁻⁰²
	Estatística do teste	6,572	-7,745	-11,537
	Valor p	7,57e ⁻¹¹	2,11e ⁻¹⁴	< 2e ⁻¹⁶
Δu	Estimativa	-1,718e ⁻⁰⁴	3,722e ⁻⁰⁷	-6,530e ⁻⁰²
	Erro-padrão	3,398e ⁻⁰⁴	5,181e ⁻⁰⁷	1,250e ⁻⁰²
	Estatística do teste	-0,506	0,718	-5,222
	Valor p	0,613	0,473	2,1e ⁻⁰⁷

Fonte: Os autores (2021).

Com a comprovação de tendência para as componentes Δn e Δe ajustou-se modelos de regressão linear para a determinação das deformações contínuas (velocidades), cujos resultados são apresentados na Tabela 8.

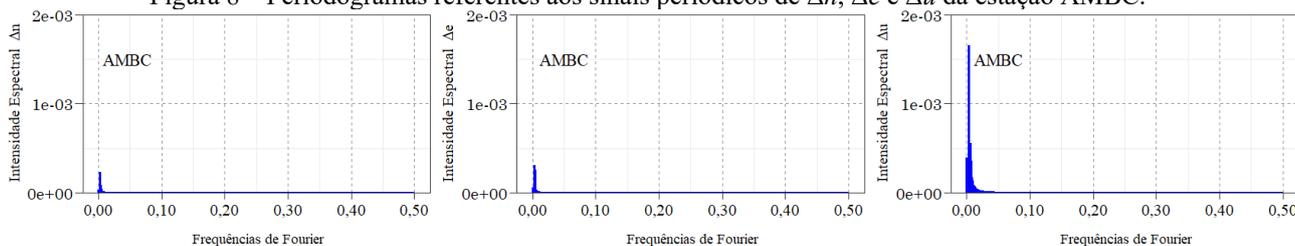
Tabela 8 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMBC.

Componentes	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	Estatística t	Valor p
Δn	Intercepto	-21,87	2,006e ⁻⁰¹	-109	< 2e ⁻¹⁶
	Vn (m/ano)	0,01084	9,943e ⁻⁰⁵	109	< 2e ⁻¹⁶
Δe	Intercepto	9,608	2,134 e ⁻⁰¹	45,02	< 2e ⁻¹⁶
	Ve (m/ano)	-0,00476	1,058 e ⁻⁰⁴	-45,03	< 2e ⁻¹⁶

Fonte: Os autores (2021).

Fundamentando-se nos periodogramas referentes aos sinais periódicos das componentes Δn , Δe e Δu da estação AMBC, apresentados na Figura 8, verificou-se que ocorreram picos associados às frequências críticas e, portanto, caracterizam possíveis lags periódicos. O teste G de Fisher foi aplicado para atestar a significância dos lags periódicos encontrados. Os valores dos lags periódicos bem como os resultados do teste G podem ser verificados na Tabela 9.

Figura 8 – Periodogramas referentes aos sinais periódicos de Δn , Δe e Δu da estação AMBC.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 9 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMBC.

Componentes	Frequência crítica f_c (ciclos/dia)	Periodicidade $1/f_c$ (dias)	Estatística G (G_{calc})	g_{crit}	Valor p
Δn	0,002633	379,6	0,8874	0,0163	<< 0,00001
Δe	0,002633	379,6	0,8268	0,0163	<< 0,00001
Δu	0,002633	379,6	0,7857	0,0163	<< 0,00001

Fonte: Os autores (2021).

Baseando-se nos resultados apresentados na Tabela 9, verifica-se que as periodicidades encontradas foram significativas a 5% de significância, cujos valores apresentados para estatística G foram superiores aos valores críticos g_{crit} , com os valores p << 0,00001, o que confirma que os lags periódicos são significativos. A

periodicidade encontrada foi idêntica para todas as componentes em análises, evidenciando uma característica sazonal aproximadamente anual. No entanto, os *lags* periódicos de AMBC diferiram dos encontrados para NAUS e para as cotas linimétricas, evidenciando que as deformações se comportam de forma diferente em ambas as estações. Comparando-se os sinais periódicos Δn e Δu de AMBC com a série de cotas linimétricas dispostos na Figura 7, verifica-se que estas estão aproximadamente fora de fase ($\sim 180^\circ$), enquanto as componentes Δn e Δu estão aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$), quando comparadas entre si. Os sinais periódicos Δe apresentaram-se aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$), quando comparados à série de cotas linimétricas, diferentemente do resultado apresentado pela mesma em NAUS.

Nesse contexto, a divergência no comportamento dos sinais periódicos Δe das estações consideradas pode ser justificado pela orientação média dos rios nas proximidades de Barcelos (AMBC), que é aproximadamente sul-leste. Essa mudança de orientação pode alterar a direção da mudança do centro de massa local e, portanto, puxar o solo na direção sudoeste, distribuindo a magnitude das deformações de forma aproximadamente similar nas componentes Δn e Δe .

Quanto ao tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica destacados na Tabela 10, pode-se observar que as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram antes dos picos e vales das cotas linimétricas em 100% dos anos, evidenciando que o limite elástico da deformação é atingido antes dos máximos e mínimos das cheias e secas. O contrário é observado na Δe , em que as deformações ocorrem após os picos e vales das cotas linimétricas em 100% dos anos.

Tabela 10 – Defasagens referentes à estação AMBC.

	Comp.	Defasagens (dias)											Máx.	Mín.	Méd.
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019				
Cheia	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-118	-106	-125	*	125	106	116,3	
	Δe e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	+14	+26	+6	*	26	6	15,3	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-36	-50	-40	*	50	36	42	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	*	-83	-56	-85	*	85	56	74,6	
Seca	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-96	-40	-69	*	96	40	68,3	
	Δe e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	+15	+83	+53	*	83	15	50,3	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-69	-4	-33	*	69	4	35,3	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	*	-26	-36	-36	*	36	26	32,6	

Fonte: Os autores (2021).

No entanto, deve-se atentar para o fato de que AMBC está localizada a aproximadamente 391 quilômetros de Manaus e, portanto, se encontra fora da zona de remanso causada pelo encontro do Rio Negro com o Rio Solimões para a formação do Rio Amazonas, o que influencia diretamente as variações linimétricas em Manaus. Adicionalmente, ao se utilizar as cotas linimétricas de Manaus na determinação das defasagens em AMBC, deve-se considerar o tempo de deslocamento das massas de água entre as estações, pois grande parte do volume que flui em Barcelos, também fluirá em Manaus. Além disso, deve-se considerar também a propagação do efeito da carga hidrológica associados à estação NAUS, que conforme Bevis et al. (2005) e Costa, Matos e Blitzkow (2012) ocorre de forma mais significativa em um raio de até 200 quilômetros, porém são perceptíveis a até 1000 quilômetros. Dessa forma, justifica-se o comportamento apresentado pelas deformações a partir das defasagens.

4 CONCLUSÕES

Pode-se observar que as séries de componentes Δn , Δe e Δu são suscetíveis às deformações periódicas associadas, majoritariamente, ao efeito da carga hidrológica, evidenciadas pelos seus comportamentos quando comparadas à série de cotas linimétricas. Nesse sentido, ficou evidente que tanto a localização das estações quanto o sentido de deslocamento das massas de água exercem influência no comportamento das deformações periódicas e, conseqüentemente, em seus *lags* periódicos. Considerando a estação NAUS pode-se constatar que a periodicidade é bem definida para Δn e Δu , cujo valor obtido foi idêntico quando comparadas à periodicidade das cotas linimétricas, mostrando assim a forte relação sazonal entre o ciclo hidrológico local e as deformações periódicas sazonais. No entanto, foi evidenciado um comportamento periódico indefinido na

componente Δe , com um fator periódico semianual em alguns anos. Além disso, seu *lag* periódico foi longo (maior que dois anos) caracterizando um movimento periódico cíclico nesta componente. Noutro ângulo, as séries de componentes Δn , Δe e Δu da AMBC apresentaram comportamento periódico sazonal bem definido e com *lags* periódicos idênticos entre si, porém um pouco menores quando comparados ao *lag* das cotas linimétricas.

Considerando as defasagens, constatou-se que o limite viscoelástico da deformação é atingido antes dos picos das cotas linimétricas (pico das cheias), ou seja, a saturação do solo ocorre antes do nível linimétrico máximo em ambas as estações. Por outro lado, comportamento divergente foi verificado para os mínimos (seca). Constatou-se que na estação AMBC o relaxamento das deformações ocorre antes dos vales das cotas linimétricas (mínimo das secas), o que não se repete em NAUS, onde o relaxamento das deformações ocorre após os vales. Nesse sentido, ficou evidente a influência do remanso e das zonas úmidas nas deformações periódicas ocorridas em Manaus.

Fundamentando-se nas análises das tendências, observou-se que em ambas as estações as componentes Δn e Δe apresentaram tendência (deformação contínua) significativa, o que não ocorreu para a componente Δu . Contudo, deve-se considerar a necessidade de se modelar os efeitos sazonais predominantes na região em estudo para as séries Δu , o que proporcionará uma estimativa coerente para a tendência. Utilizar as trajetórias reconstruídas para determinação dos movimentos lineares de Δn e Δe é interessante, uma vez que estas se constituem da soma da tendência com os sinais periódicos, isentos dos efeitos de *outliers* e das flutuações ocasionadas no processamento dos dados, refletindo assim os efeitos de fenômenos locais, o que tornam as estimativas mais coerentes à realidade.

Por fim, faz-se necessário investigar o comportamento das deformações contínuas e periódicas em estações GNSS não próximas às margens do Rio Negro. Adicionalmente, aplicar outras soluções de PPP que permita ao usuário maior domínio sobre os parâmetros de processamento é importante, uma vez que possibilitam ao usuário discretizar efeitos adicionais, propiciando uma melhor avaliação da influência da carga hidrológica.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal do Norte de Minas (IFNMG) pela licença concedida para cursar pós-graduação e ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) pela disponibilidade dos dados referentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) e do serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - PPP). Esta pesquisa teve o incentivo da Universidade Federal de Viçosa através do Departamento de Engenharia Civil, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Contribuição dos Autores

O primeiro autor foi responsável pela conceptualização, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, software, visualização e redação - minuta inicial. O segundo e terceiro autor foram responsáveis pela supervisão, validação e redação - revisão e edição. O quarto autor foi responsável pela curadoria dos dados, software, visualização e redação - minuta inicial.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

AHDESMAKI, M.; FOKIANOS, K.; STRIMMER, K. **GeneCycle**: Identification of Periodically Expressed Genes. R package version 1.1.4. 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R->

- project.org/package=GeneCycle>. Acesso em: 14 set. 2020.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. In: **IEEE Transactions on Automatic Control**. Notre Dame, FR, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. **Analysis and results of ITRF2008. (IERS Technical Note; 37)** Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5, 2012.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, v. 121, n. 8, p. 6109-6131, 2016. DOI: 10.1002/2016JB013098.
- ANDERSEN, O., P. BERRY, J. FREEMAN, F. G. LEMOINE, S. LUTSCKHE, F. JAKOBSEN, AND M. BUTTS. Satellite altimetry and GRACE gravimetry for studies of annual water storage variations in Bangladesh. **Terr. Atmos. Ocean. Sci.**, v. 19, p. 47-52, 2008. DOI: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.47(SA).
- BARZAGHI, R.; BETTI, B.; DE GAETANI, C.I. **Estimating Crustal Deformations by GNSS Time Series Data Analysis**. In: Cefalo R., Zieliński J., Barbarella M. (eds) *New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Cham, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-56218-6_3.
- BEVIS, M.; ALSDORF, D.; KENDRICK, E.; FORTES, L. P.; FORSBERG, B.; SMALLEY JUNIOR, R.; BECKER, J. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophys. Res. Lett.** Berlin, DD, v. 32, n. 16, p. 4., 2005. DOI: 10.1029/2005GL023491.
- BEVIS, M.; BEDFORD, J.; CACCAMISE, II D. J. The Art and Science of Trajectory Modelling. In: Montillet JP., Bos M. (eds) *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*. **Springer Geophysics**. Springer, Cham. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-21718-1_1.
- BLOOMFIELD, P. **Fourier Analysis of Time Series: An Introduction**. John Wiley & Sons. 2004. 261 p.
- BOGUSZ, J.; KLOS, A. On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. **GPS Solutions**, v. 20, n. 4, p. 655-664, 2016. DOI: 10.1007/s10291-015-0478-9.
- BOGUSZ, J.; KLOS, A.; GRUSZCZYNSKA, M.; GRUSZCZYNSKI, M. Towards reliable velocities of permanent GNSS stations. **Reports on Geodesy and Geoinformatics** Varsóvia, CR, v. 100, p. 17-26, 2016. DOI: 10.1515/rgg-2016-0003.
- BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Potencialidades do PPP no Software Bernese com Compatibilizações de Sistemas Geodésicos de Referência e de Tempo. **Rev. Bras. Cartogr.**, v. 71, n. 3, p. 726-755, 2019. DOI: 10.14393/rbcv71n3-47483.
- CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; LAROCCA, A. P. C. Compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 3, p. 590-609, 2015. DOI: 10.1590/S1982-21702015000300033.
- CHEN, C.; LIU, L. M. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series. **Journal of the American Statistical Association**. v. 88, n. 421, 1993. p. 284-297, 1993. Disponível em: <https://www.istat.it/it/files/2014/06/Joint-Estimation-of-Model-Parameters-and-Outlier-Effects-in-Time-Series.pdf>. Acesso em: 22 set. 2020.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Relatório da vazante 2010 em Manaus. Superintendência Regional de Manaus / SUREG-MA. p. 18, 2010.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Relatório da cheia 2012 em Manaus. Superintendência Regional de Manaus / SUREG-MA. p. 21, 2012.
- COSTA, S. M. A.; MANTOVANI, G.; SCOFANO, F.; LIMA, M. A. A.; SILVA, A. L.; MOURA JÚNIOR, N. J. Ampliação e modernização da RBMC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 7., 2018, Recife. **Anais...** Recife: UFPE. Departamento de Engenharia Cartográfica, 2018. p. 440-450.
- COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. **Boletim de Ciências**

- Geodésicas**, v. 18, n. 2, p. 262-281, 2012. DOI: 10.1590/S1982-21702012000200006.
- CRYER, J. D.; CHAN, K. S. **Time series analysis with applications in R**. 2. ed. Nova York: Springer, 2008. 492 p.
- DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. **Journal of the American Statistical Association**, Boston, MA, v. 74, n. 366, p. 427-431, 1979.
- FAZILOVA, D.; EHGAMBERDIEV, SH.; KUZIN, S. Application of time series modeling to a national reference frame realization. **Geodesy and Geodynamics**, v. 9, p. 281-287, 2018. DOI: 10.1016/j.geog.2018.04.003.
- FISHER, R. A. Tests of significance in harmonic analysis. **Proceeding of the Royal Societ**, Series A, v. 125, n. 796, p. 54-59, 1929.
- FRITSCHÉ, M.; DÖLL, P.; DIETRICH, R. Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth's crust from continental watermass and atmospheric pressure variations using GPS. **Journal of Geodynamics**, v. 59, n. 60, p. 133- 142, 2012. DOI: 10.1016/j.jog.2011.04.001.
- GIACOMETTI, J. P. S.; ALBARICI, F. L.; TRABANCO, J. L. A.; GUIMARÃES, G. N. Influência da carga hídrica na altitude geométrica da estação RBMC de Inconfidentes/MG. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 1, p. 043-061, 2017. DOI: 10.3895/rbgeo.v5n1.5425.
- GÜLAL, E.; ERDOGAN, H.; TIRYAKIOGLU, I. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. **Digital Signal Processing**, v. 23, n. 6, p. 1945-1957, 2013.
- HAMMING, R. W. **Digital Filters**. Dover Publications. 2013. 306 p.
- HERRING, T. A.; FLOYD, M. A.; KING, R. W. Time series and error analysis. **UNAVCO Headquarters**, Boulder, Colorado, USA 19-23 June 2017. Disponível em: <http://geoweb.mit.edu/~floyd/courses/gg/201706_UNAVCO/pdf/31-error_analysis.pdf>. Acesso em: 22 set. 2020.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GPS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more**. Austria: Springer Wien New York, 2008.
- HYNDMAN, R.; ATHANASOPOULOS, G; BERGMEIR, C; CACERES, G; CHHAY, L; O'HARA-WILD, M; PETROPOULOS, F; RAZBASH, S; WANG, E; YASMEEN, F. **forecast**: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.12. 2020. Disponível em: <URL: <http://pkg.robjhyndman.com/forecast>>. Acesso em: 10 set. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - PPP (IBGE-PPP). Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=saiba-mais-geociencias>>. Acesso em: mai. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do Usuário - Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: abril 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: mai. 2020.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Condições atuais do ENOS**: fase neutra. 2021. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/#>>. Acesso em: jun. 2021.
- INTERNATIONAL GNSS SERVICE ANALYSIS CENTER COORDINATOR (IGSACC). **Chronology of IGS Reference Frame Usage**. Disponível em: <<http://acc.igs.org/igs-frames.html>>. Acesso em: mai. 2020.
- KNOWLES, L. A.; BENNETT, R. A.; HARIG C. Vertical displacements of the Amazon basin from 2 GRACE and GPS. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 125, n. 2, 2020. DOI: 10.1029/2019JB018105.
- KOWALCZYK, K.; RAPINSKI, J. Verification of a GNSS Time Series Discontinuity Detection Approach in Support of the Estimation of Vertical Crustal Movements. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 149, p. 1-15, 2018. DOI: 10.3390/ijgi7040149.

- LACALLE, J. L. **tsoutliers**: Detection of Outliers in Time Series. R package version 0.6-8. (2019). Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=tsoutliers>>. Acesso em: 10 set. 2020.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3rd ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2004.
- MACIUK, K.; SZOMBARA, S. Annual crustal deformation based on GNSS observations between 1996 and 2016. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 21, p. 1-12, 2018. DOI: 10.1007/s12517-018-4022-4.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.
- MOREIRA, D. M., S.; CALMANT, S.; PEROSANZ, F.; XAVIER, L.; ROTUNNO FILHO, O. C.; SEYLER, F.; MONTEIRO, A. C. Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin, Geophys. **Geophysical Research Letters**. v. 43, p. 262-281, 2016. DOI: 10.1002/2016GL070265.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.
- MORITZ, S.; SARDÁ, A.; BARTZ-BEIELSTEIN, T.; ZAEFFERER, M.; STORK, J. Comparison of different Methods for Univariate Time Series Imputation in R. **ResearchGate**, p. 1-20, out. 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1510/1510.03924.pdf>
- NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- OLDS, S.; ERIKSSON, S.; MUNSON, D.; DAHLMAN L. Analyzing Plate Motion Using EarthScope GPS Data. 2011. Disponível em: <<https://serc.carleton.edu/eet/platemotion/index.html>>. Acesso em: abr. 2020.
- OLIVEIRA, J. R. S. **Uso de informações geodésicas para estudos tectônicos no Pantanal**. 59 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**. IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. ISBN 3-89888-989-6.
- PFUFF, B. **Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R**. Second Edition. Springer, New York, 2008. ISBN 0-387-27960-1.
- PORTO DE MANAUS (PM). **Nível do Rio Negro**. Disponível em: <<https://www.portodemanaus.com.br/?pagina=nivel-do-rio-negro-hoje>>. Acesso em: 20 mai. 2020.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.. Acesso em: 20 ago. 2020.
- RAJNER, M.; LIWOSZ, T. Studies of crustal deformation due to hydrological loading on GPS height estimates. **Geodesy and Cartography**, v. 60, n. 2, p. 135- 144, 2012. DOI: 10.2478/v10277-012-0012-y.
- RAMOS, M. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas estimadas pelo PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p.389-404. 2016. DOI: 10.1590/S1982-21702016000300022.
- REBISCHUNG, P. [IGSMail-7921] **Switch to IGB14 reference frame**. Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>>. Acesso em: jun. 2020.
- REBISCHUNG, P.; SCHMID, R. **IGS14/igs14.atx: a new Framework for the IGS Products**. 2016. American Geophysical Union. Disponível em: <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1341338/1341338.pdf>>. Acesso em 27 jul. 2020.
- REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS (RBMC). **Dados diários e situação operacional**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistem-as-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: mai. 2020.
- RICHARDSON, L. F. **swdft: Sliding Window Discrete Fourier Transform (SWDFT)**. R package version 1.0.0, 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=swdft>>. Acesso em: 16 set. 2020.

- SÁNCHEZ, L.; DREWES H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, United Kingdom, v. 102, p. 1-23, dez. 2016. DOI: 10.1016/j.jog.2016.06.005.
- SCHWARZ, G. Estimating the dimensional of a model. *Annals of Statistics*. **Hayward**, vol. 6, nº 2, p. 461-464, 1978.
- SIGNAL DEVELOPERS. **signal**: Signal processing. 2013. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org/projects/signal/>>. Acesso em: 14 set. 2020.
- SILVA, H. A.; MONICO, J. F. G. Análise de séries temporais de coordenadas GNSS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 6., 2012, Recife. **Anais...** Recife: UFPE. Departamento de Engenharia Cartográfica, 2012. p. 001-009.
- SING, H. C.; THORNE, D. R.; HEGGE, F. W. Trend and rhythm analysis of time-series data using complex demodulation. **Behavior Research Methods, Instruments, & Computers**. v. 17, n.6, p. 623-629, 1985.
- TREGONING, P.; WATSON, C.; RAMILLIEN, G.; MCQUEEN, H.; ZHANG, J. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 15, p. 1-6, 2009. DOI: 10.1029/2009GL038718.
- VAN DAM, T.; WAHR, J.; MILLY, P. C. D.; SHMAKIN, A. B.; BLEWITT, G.; LAVALLÉE, D.; LARSON, K. M. Crustal displacements due to continental water loading. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 4, p. 651-654, 2001. DOI: 10.1029/2000GL012120.
- WESTON, N. D. e SOLER, T. Rigorous Geodetic Positioning in the Americas. In: FIG REGIONAL CONFERENCE, 8., 2012, Montevideo. **Anais...** Montevideo: Surveying towards Sustainable Development, 2012. p. 1-13.
- WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016.

Biografia do autor principal



Lécio Alves Nascimento é natural de Itabuna, Bahia, Brasil. É Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo pela Universidade Federal de Viçosa – UFV, mestre e doutor em Informações Espaciais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da UFV, Campus Viçosa. Atualmente é professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico – EBTT no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais – IFNMG, Campus Araçuaí. Atua nas áreas relacionadas a Agrimensura e às Geociências, onde desenvolve pesquisas relacionadas à Geodésia e Programação aplicada, cujos estudos concentram-se na Geodinâmica e deformações associadas ao efeito de carga hidrológica, modelagem e análises de séries temporais.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.