



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 12, nº 1 (2026)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2026v12n1ID37683>



Automatização da obtenção de séries temporais posicionais e da geração de campos de velocidades

Automation of positional time series acquisition and velocity field generation

Krisley Xavier Soares de Freitas¹; William Rodrigo Dal Poz²; Júlio César de Oliveira³; Lécio Alves Nascimento⁴

¹ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. Email: krisle.freitas@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8453-324X>

² Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. Email: william.dalpoz@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9532-364>

³ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. Email: oliveirajc@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0894-5597>

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG), Araçuaí/MG, Brasil.
Email: lecio.nascimento@ifnmg.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-4372>

Resumo: O presente artigo tem como objetivo apresentar o software GPTS Downloader, que possibilita a obtenção de séries temporais posicionais de mais de 23.400 estações de monitoramento contínuo ao redor do mundo - disponibilizadas pelo *Nevada Geodetic Laboratory* - e a geração de campos de velocidades de forma automatizada. De forma a demonstrar a potencialidade do GPTS Downloader, geraram-se campos de velocidades para os Estados Unidos com seis métodos de interpolação a partir de séries temporais de 20 anos de mais de 100 estações. As velocidades interpoladas foram aplicadas em atualizações temporais de coordenadas e suas discrepâncias analisadas. Por apresentar a maior consistência entre os métodos analisados, a interpolação de Função de Base Radial se mostrou o método mais confiável para interpolar velocidades estimadas a partir de séries temporais posicionais. As discrepâncias obtidas com as velocidades interpoladas foram significativamente melhores que aquelas obtidas com 18 modelos de velocidades utilizados pela comunidade geodésica.

Palavras-chave: Série temporal posicional; Campo de velocidades; GPS.

Abstract: The aim of this paper is to present the GPTS Downloader software, which allows for the acquisition of positional time series from over 23,400 continuous monitoring stations around the world—provided by the Nevada Geodetic Laboratory—and the automated generation of velocity fields. To demonstrate the potential of GPTS Downloader, velocity fields were generated for the United States using six interpolation methods from 20-year time series from more than 100 stations. The interpolated velocities were applied to temporal coordinate updates, and their discrepancies were analyzed. Among the methods analyzed, Radial Basis Function interpolation proved to be the most reliable for interpolating velocities estimated from positional time series due to its greater consistency. The discrepancies obtained using the interpolated velocities were significantly better than those obtained with the 18 velocity models commonly used by the geodetic community.

Keywords: Positional time series; Velocity field; GPS.

Recebido: 16/09/2024; Aceito: 07/04/2026; Publicado: 12/06/2026.

1. Introdução

O GPS (*Global Positioning System*) é uma ferramenta de fundamental importância para a nova geração das ciências da Terra, pois possibilita investigar e/ou monitorar vulcões, terremotos, tsunamis, alterações no nível do mar, geleiras, aquíferos, deformações crustais, deslocamento de placas tectônicas (BLEWITT; HAMMOND; KREEMER, 2018). Essas investigações geralmente envolvem a aplicação e análise de séries temporais posicionais (que consistem em um conjunto de coordenadas ordenadas no tempo, derivadas de observações GPS, e associadas a um sistema de referência) e velocidades geodésicas, que estão relacionadas com a tendência da série temporal, assim como com a sazonalidade e ruídos (HE et al., 2017).

Bogusz et al. (2016) afirmam que o número de estações GPS está em constante expansão e, conseqüentemente, tendem a cobrir quase a totalidade da Terra com uma rede global. Aliado a isso, o acréscimo contínuo no período de dados disponíveis em conjunto com a evolução computacional, vem propiciando a ampliação das possibilidades metodológico-investigativas nas mais diversas áreas que utilizam séries posicionais, como se pode observar nas seguintes pesquisas: Nascimento et al. (2021) utilizam séries posicionais e de dados linimétricos para investigar deformações associadas ao efeito de carga hidrológica na região da Amazônia brasileira; Kierulf et al. (2021) criaram um campo de velocidade para a Fino-Escandinávia visando analisar deformações crustais locais e processos geodinâmicos de grande escala; Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021) estimaram velocidades de estações brasileiras considerando sazonalidade, tendência e ruídos presentes nas séries; Kılıç e Özarpacı (2022) propõem um método de estimativa de velocidades de estações por *Ensemble Clustering*, analisando deslocamentos na Turquia, região em que as placas Arábica e Africana colidem com a Placa Euro-Asiática; Pırtı, Hoşbaş, e Yücel (2023) analisam o deslocamento horizontal e vertical na Islândia, localizada na Dorsal Mesoatlântica, borda entre a Placa Norte-Americana e Placa Eurasiática; e, Savchyn, Brusak e Tretyak (2023) estudaram a cinemática das placas tectônicas da Antártica.

Dessa forma, ter acesso a séries de dados posicionais de estações GPS estimados com técnicas robustas de posicionamento é essencial para novas aplicações e descobertas científicas. Nesse âmbito, o NGL (*Nevada Geodetic Laboratory*) implementou um sistema que diminui as barreiras ao acesso às séries de dados, facilitando assim a realização de inúmeras investigações. Atualmente o NGL coleta dados brutos de mais de 23.400 estações ao redor do mundo, com algumas contendo um período de dados de mais de 30 anos. Os dados brutos são processados internamente no NGL utilizando o método PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) do software Gipsy X (*GNSS-Inferred Positioning System X*), do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e na sequência são disponibilizadas gratuitamente aos usuários as coordenadas geodésicas e cartesianas provenientes de observações com período de rastreamento de 24h, com suas respectivas precisões e covariâncias (BLEWITT; HAMMOND; KREEMER, 2018). No entanto, a disponibilização de uma quantidade tão grande de dados traz consigo o desafio de apresentar aos usuários opções de acesso, visualização espacializada e seleção das estações de interesse de forma simplificada e intuitiva.

Atualmente, quem busca estações de um país específico, por exemplo, deve navegar pelo mapa online, identificar o nome das estações de interesse e acessar seus respectivos dados de forma individual, tornando assim o processo moroso e pouco eficiente, especialmente para casos que utilizam um grande número de estações. Visando a otimização na aquisição destes dados, alternativas automatizadas são disponibilizadas como se observa em Zhongshan (2026). No entanto, tal alternativa ainda apresenta limitações. Primeiramente, ela é elaborada em linguagem MATLAB (*Matrix Laboratory*), o que torna necessário o conhecimento na linguagem bem como a disponibilidade do software para sua execução. Além disso, retorna apenas dados no SGL (Sistema Geodésico Local) referentes a estações GPS que estejam inseridas em um polígono predefinido.

Nesse sentido, este artigo apresenta um software desenvolvido para sistema Windows, nomeado de GPTS Downloader (*GPS Position Time Series Downloader*), destinado à simplificação do processo de seleção das estações de interesse e acesso às séries posicionais disponibilizadas pelo NGL. Além disso, o software proporciona a geração automatizada de campos de velocidades estimados a partir das séries obtidas. De forma a demonstrar a potencialidade do GPTS Downloader, gerou-se campos de velocidades para os Estados Unidos com seis métodos de interpolação a partir de séries de mais de 100 estações. As velocidades interpoladas foram aplicadas em atualizações temporais de coordenadas e suas discrepâncias analisadas.

2. Séries temporais posicionais do NGL

O NGL busca os dados brutos coletados por estações GPS em mais de 130 repositórios online na tentativa de encontrar todos os dados úteis possíveis, reunindo-os em um único local. Tais dados são coletados, gerenciados e distribuídos por centenas de organizações que cooperam através de várias instituições como o IGS (*International GNSS Service*) e UNAVCO (*University NAVstar Consortium*). Para lidar com a altíssima massa de dados brutos, o sistema do NGL utiliza novas estratégias de processamento, sistemas automatizados, algoritmos e técnicas de estimativa robustas. Salienta-se que o processamento dos dados brutos é efetuado utilizando o software Gipsy X (BERTIGER et al., 2020), cujos parâmetros aplicados na estratégia de processamento são sumarizados e podem ser consultados em <https://geodesy.unr.edu/gps/ngl.acn.IGS20.txt>. Após o processamento dos dados brutos, são disponibilizadas as séries temporais de dados posicionais contendo as coordenadas geodésicas (latitude, longitude, e altitude geométrica) e cartesianas (X, Y, Z) com suas respectivas precisões e covariâncias para todas as estações encontradas, com diferentes intervalos de observação e diferentes latências (tempo entre a coleta dos dados e a disponibilidade para uso) (BLEWITT; HAMMOND; KREEMER, 2018). Destaca-se que todas as séries possuem todas as coordenadas em um mesmo referencial, o IGS20 (desde agosto de 2025) (NGL, 2026). As séries posicionais disponíveis, em sua maior parte, abarcam um período entre 5 e 15 anos, como apresentado na Figura 1. Além disso, há um número considerável de séries entre 15 e 33 anos. Nesse sentido, observa-se que as séries posicionais disponibilizadas possibilitam o desenvolvimento de investigações mais abrangentes acerca de efeitos de longa duração, tendências e periodicidades.

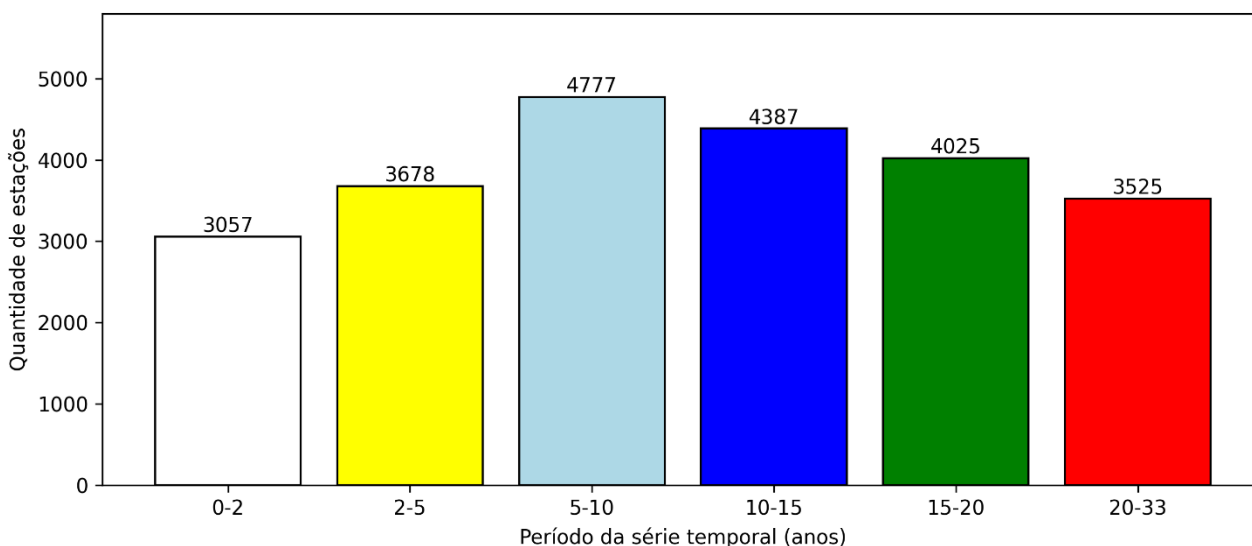


Figura 1- Quantidade de séries posicionais disponíveis em abril de 2026 com seus respectivos períodos.

Fonte: Autores (2026). Dados: NGL (2026).

Destaca-se que, em abril de 2026, o NGL atualiza semanalmente as coordenadas processadas com 24h de observação de 23.448 estações; e diariamente, as coordenadas de 5 minutos de 8.521 estações (NGL, 2026). A disposição das estações, assim como o período das séries posicionais disponibilizadas pelo NGL em 2026 podem ser verificados na Figura 2.

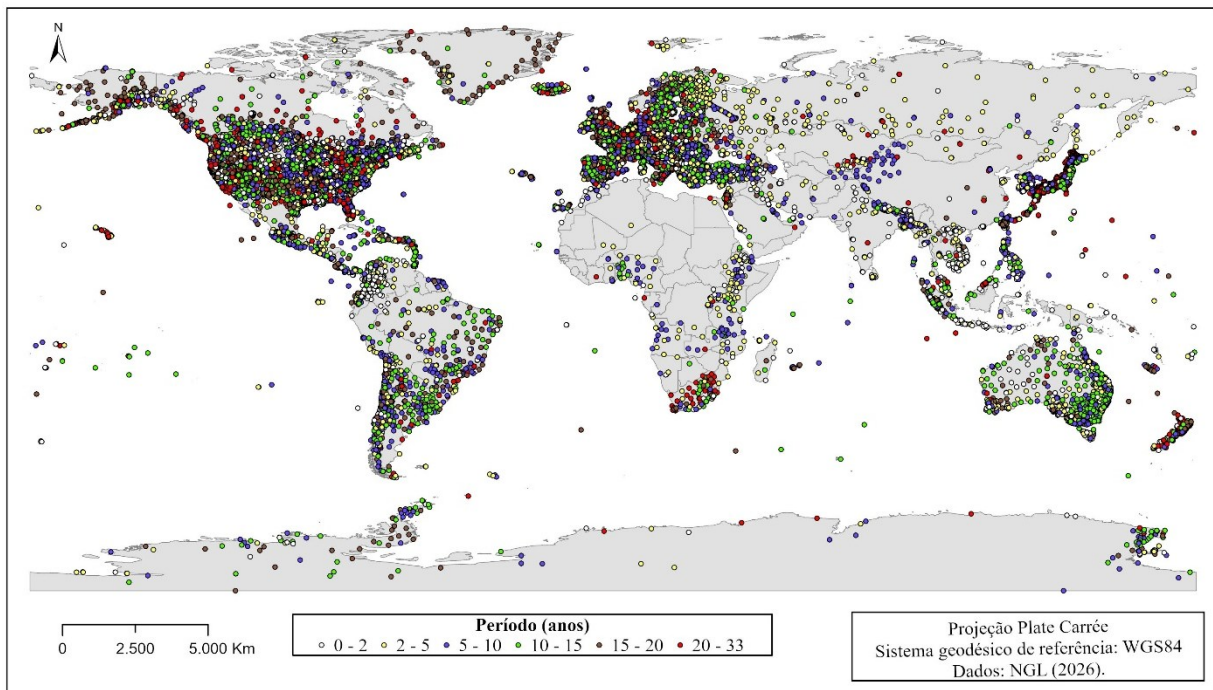


Figura 2 - Disposição e período de dados das estações englobadas pelo NGL em abril de 2026.

Fonte: Autores (2026).

Além das coordenadas, as velocidades das estações também são atualizadas periodicamente. Elas são estimadas utilizando o MIDAS (*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness* - Diferença Interanual Mediana Ajustada para Distorção), que consiste em um estimador de velocidades de estações GPS insensível à *outliers*, sazonalidade anual, saltos de descontinuidade e heteroscedasticidade (BLEWITT et al., 2016).

Os produtos gerados pelo NGL são disponibilizados de forma online e gratuita no endereço <https://geodesy.unr.edu/>, incluindo metadados, listas de estações, gráficos de séries temporais posicionais, tabelas de dados disponíveis, e descrições de novos itens relacionados aos produtos.

3. GPTS Downloader

O software denominado GPTS Downloader foi desenvolvido para facilitar tanto a seleção quanto a aquisição das séries temporais posicionais, possibilitando a classificação dos dados quanto à data inicial e final de disponibilidade, período em anos decorrido entre essas duas datas, número de dias com dados, assim como a quantidade de dias com dados ausentes de todas as estações disponíveis. Adicionalmente, foram implementados filtros por localização que permitem a seleção de estações por países, além da possibilidade de os usuários inserirem sua própria lista com estações específicas. A interface do GPTS Downloader é apresentada na Figura 3.

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	h (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Data Inicial	Data Final	Data Modificação	Nº dias com dados	Período (anos)	Dias sem dados
00NA	-12,4666	-229,156	104,851	4073662,2759	4712084,7454	1367874,5096	27/03/2008	25/09/2018	25/09/2025	3185	10,50	649
01NA	-12,4782	-229,018	105,409	4084823,4607	4702026,6696	-1369125,8993	08/04/2008	29/09/2019	25/09/2025	2360	11,48	1831
02NA	-12,3559	-229,1183	117,652	4078496,4388	4711380,1446	-1359915,1775	22/09/2008	31/12/2016	25/09/2025	1913	08,28	1109
03NA	68,3543	-341,1836	431,389	2233957,4175	761080,4273	5906186,1144	11/06/2009	01/03/2026	13/03/2026	5907	16,73	200
04NA	65,0337	-338,6671	52,762	2514609,5968	982067,1548	5759343,7129	05/04/2023	01/03/2026	13/03/2026	1034	02,91	27
05NA	58,6589	-343,8204	60,548	3193913,9705	936687,3947	5424322,2456	10/04/2015	01/03/2026	13/03/2026	3942	10,90	36
06NA	55,4814	-341,638	43,131	3082774,4229	1019646,6993	5471402,961	25/08/2010	01/03/2026	13/03/2026	5635	15,53	32
07NA	62,7805	-343,9863	272,454	2811733,5415	806979,4457	5649069,3343	14/12/2015	01/03/2026	13/03/2026	3686	10,22	44
08NA	61,3445	-343,9351	142,743	2946812,9614	848598,9594	5573978,8306	21/11/2005	01/03/2026	13/03/2026	7369	20,29	36
09NA	57,9295	-347,4722	116,732	3313951,2113	736374,5033	5381673,7302	10/02/2011	01/03/2026	13/03/2026	5460	15,06	38
10NA	59,8663	-341,9292	56,726	3051686,6597	995723,9513	5493063,2182	20/04/2002	01/03/2026	13/03/2026	8655	23,88	61
11NA	65,1321	-338,9794	118,648	2510660,1077	964790,0082	5764026,5704	05/04/2023	01/03/2026	13/03/2026	1025	02,91	36
12NA	56,9466	-344,0928	158,208	3353530,0266	995732,9305	5322792,6315	19/10/2018	01/03/2026	13/03/2026	2662	07,37	28
13NA	61,231	-345,9629	280,051	2989626,4894	748502,7274	5568019,7189	23/11/2005	19/04/2024	25/09/2025	6707	18,42	15
14NA	60,5102	-346,8488	192,096	3065281,6564	716200,4687	5528849,7358	09/05/2015	01/03/2026	13/03/2026	3919	10,82	30
15NA	58,8703	-344,9998	143,433	3192908,0497	895548,4044	5436602,2471	16/07/2009	01/03/2026	13/03/2026	6008	16,64	64
16NA	65,9582	-343,7943	462,317	2502400,2137	727285,4144	5802472,3076	31/01/2008	01/03/2026	13/03/2026	6511	18,09	93
17NA	64,5325	-340,6501	248,871	2594858,6396	911244,4311	5735716,025	05/05/2016	01/03/2026	13/03/2026	3546	09,83	41

Figura 3 - Interface do GPTS Downloader. Fonte: Autores (2026).

Informações acerca das estações são exibidas em uma tabela personalizável na tela inicial do programa e é baseada no arquivo que contém a lista e metadados das estações disponíveis fornecido pelo NGL. Nesse sentido, o GPTS Downloader realiza automaticamente o *download* deste arquivo toda vez que é executado, fazendo com que as informações das estações estejam sempre atualizadas.

O GPTS Downloader conta com filtros de localização por região para todos os países com estações disponíveis. Ao selecionar o filtro do Brasil, por exemplo (dados de abril de 2026), no lugar de visualizar as mais de 23.400 estações espalhadas pelo mundo, serão mostradas apenas as 231 estações disponíveis no território brasileiro. Consultando as informações exibidas é possível verificar que dessas estações, 219 possuem pelo menos 365 dias de dados e 118 abrangem período maior que 10 anos. A estação com maior período em atividade é a BRAZ (mais de 30 anos), apresentando dados desde 05/03/1995, e que continua em operação, apesar de possuir 1160 dias sem dados em sua série.

Salienta-se que os filtros são obtidos automaticamente utilizando a biblioteca *geopandas* da linguagem Python, através da qual é realizada uma seleção geoespacial das coordenadas das estações baseada em um *shapefile* de fronteiras políticas dos países - disponibilizado por Tapiquén (2015). O usuário pode também inserir sua própria lista de estações com a opção de “importar lista”, bastando para isso, colocar os nomes das estações em ordem alfabética em um arquivo de texto para ser importado. Esta opção possibilita aos usuários selecionar estações específicas ou contidas em diferentes filtros para o *download* das séries posicionais, o que torna o processo de aquisição das séries mais eficiente.

Uma vez selecionadas as estações (podendo ser qualquer quantidade, de uma a até todas as mais de 23 mil), basta clicar em um botão para realizar o *download* das séries posicionais.

Adicionalmente, há um aplicativo interno chamado “Interpolar Velocidades” cuja funcionalidade consiste em ler os arquivos gerados pelo GPTS Downloader, calcular a velocidade para cada estação e interpolar as velocidades para os pontos de interesse inseridos pelo usuário. São disponibilizados resultados com os seguintes métodos de interpolação: *griddata*, *Inverse distance weighted (IDW)*, *K-Nearest Neighbors (KNN)*; *Krigagem Ordinária (KO)*; *Radial basis function interpolation (RBF)* e, *Random Forest Regression (RF)*.

O software GPTS Downloader está disponível gratuitamente no endereço <https://rinexhub.wordpress.com/gptsdownloader>. Mais detalhes sobre o GPTS Downloader e sua operacionalização podem ser consultados no seu manual, disponível no menu “Ajuda” em sua interface.

4. Metodologia

Para a realização dos experimentos foram utilizadas séries temporais posicionais de soluções diárias (GPS) de 113 estações localizadas nos Estados Unidos da América (ver Figura 4). Foram selecionadas todas as estações disponíveis que atendiam a dois critérios: i) possuir série temporal que compreenda o período de 01/01/2000 a 31/12/2019 (20 anos); e, ii)

possuir dados de observação RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) disponíveis para seis dias no início da série – utilizados para a estimativa das coordenadas de referência.

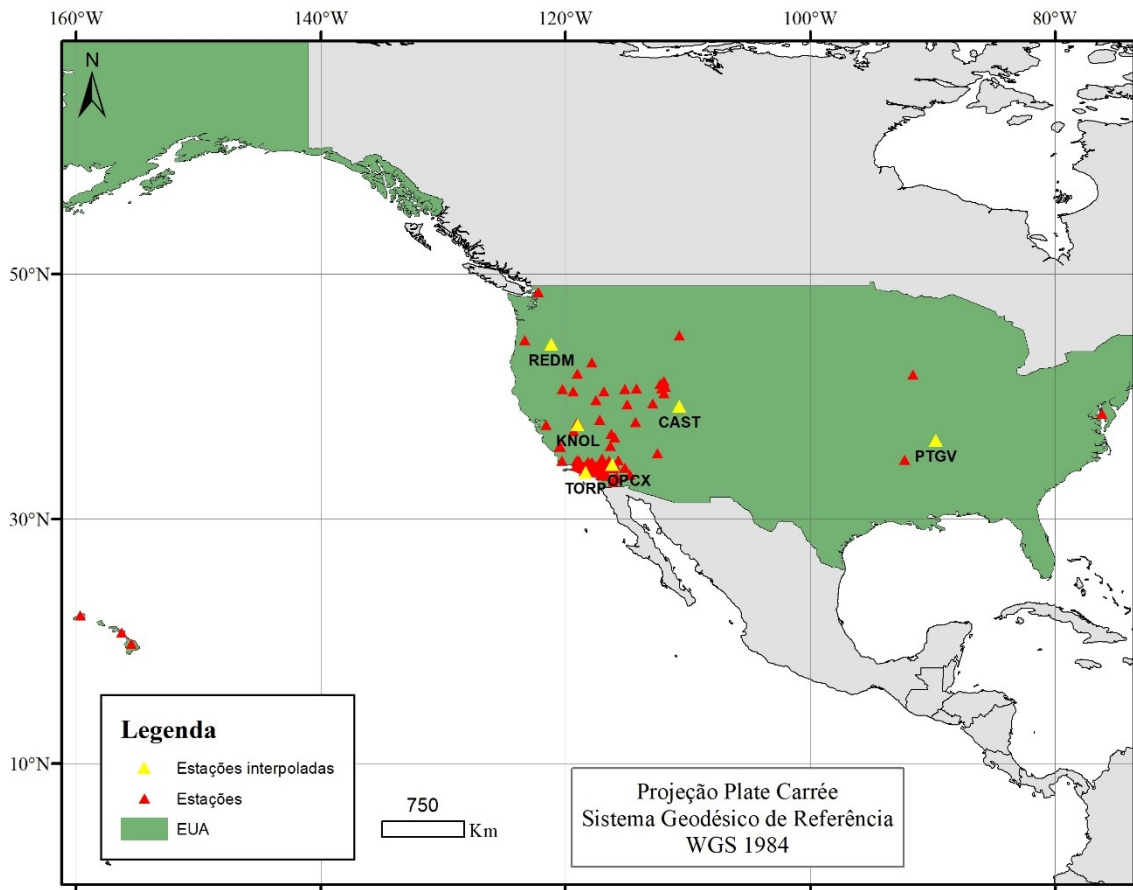


Figura 4 - Disposição das estações no território dos Estados Unidos da América. Fonte: Autores (2026).

Para estimar as velocidades a partir das séries temporais posicionais, selecionou-se o método da regressão linear simples, como utilizado por Bogusz et al. (2016), Nascimento, Dal Poz e Freitas (2021) e Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021). Optou-se por empregar o método utilizando aprendizado de máquina pela biblioteca “*Scikit-learn*” (PEDREGOSA et al., 2011) da linguagem Python.

Todas as séries temporais posicionais utilizadas nesta pesquisa apresentaram ausência de dados para alguns dias ao longo do período de 20 anos, e como as velocidades são dependentes da componente temporal das posições, foi realizado o preenchimento desses dados ausentes utilizando o método da interpolação linear, como realizado por Moritz et al. (2015), Klos et al. (2018) e Nascimento et al. (2021).

Salienta-se que as velocidades foram estimadas diretamente das séries do NGL sem pré-processamentos para remoção de *outlier*, sazonalidade ou ruídos. Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021) analisando o impacto da sazonalidade na estimativa de velocidades de estações brasileiras verificaram que negligenciar este aspecto das séries não causa alterações significativas nos resultados planimétricos. Adicionalmente, destacam a presença de ruídos brancos e ruídos de cintilação nas séries das estações, mas que não afetaram as velocidades estimadas (para séries com período de sete anos). Entretanto, Klos, Bos e Bogusz (2018) observam que se sinais sazonais e periodicidades residuais não forem propriamente removidos, as incertezas das velocidades serão artificialmente superestimadas.

Uma vez estimada as velocidades das estações, será avaliada a utilização de seis métodos de interpolação para obtenção de velocidades de pontos desconhecidos, sendo eles: Griddata – implementação da técnica chamada *natural neighbor interpolation* (SIBSON, 1981); *Inverse distance weighted* (IDW) (SHEPARD, 1968); *K-Nearest Neighbors* (KNN) (FRANK, 2023); *Radial basis function interpolation* (RBF) (ANJYO; LEWIS, 2011); Krigagem Ordinária

(KO) (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978); e, *Random Forest Regression* (RF) (BREIMAN, 2001). Com a finalidade de avaliar os resultados, retirou-se seis das 113 estações que foram consideradas desconhecidas (CAST, KNOL, PTGV, REDM, OPCX e TORP), e suas velocidades estimadas pelas séries temporais tomadas como valor de referência. As 107 restantes foram utilizadas como dados de entrada nas interpolações. Destaca-se que todos os procedimentos supracitados (aquisição das séries, preenchimento de dados ausentes, cálculo de velocidades e interpolações) foram realizados de forma automatizada pelo GPTS Downloader.

De posse das velocidades interpoladas parte-se para a atualização temporal das coordenadas. As coordenadas selecionadas para serem atualizadas são referentes aos 365 dias do ano de 2019 para todas as estações (01/01/2019 a 31/12/2019 - dia corrido 1 ao 365), que serão atualizadas para data/época de referência (dr/er), que foi definida como o dia inicial da série (01/01/2000, época 2000,00). De forma a minimizar efeitos sazonais (como por exemplo, períodos de cheia e secas que causam alterações nas posições de estações localizadas próximas de grandes corpos d'água), optou-se por analisar a média das 365 discrepâncias obtidas para cada estação.

Para atualizar as coordenadas das estações da época t_0 para a época t , utiliza-se a Equação (1) (SIRGAS, 2026):

$$\begin{aligned} X(t) &= X(t_0) + v_X(t - t_0) \\ Y(t) &= Y(t_0) + v_Y(t - t_0) \\ Z(t) &= Z(t_0) + v_Z(t - t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

onde t é a época de interesse; t_0 é a época de origem; $X(t_0)$, $Y(t_0)$, $Z(t_0)$ são as coordenadas cartesianas da estação na época de origem; $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ são as coordenadas da estação na época de interesse; e v_x , v_y e v_z são as componentes da velocidade da estação.

Destaca-se que como as séries temporais posicionais obtidas possuem todas as coordenadas em um mesmo referencial (IGS14/ITRF2014 – salienta-se que os dados foram obtidos antes de agosto de 2025, quando as séries passaram a ser referenciadas ao IGS20/ITRF2020), não se faz necessário a compatibilização de referencial nem das coordenadas nem das velocidades - já que estas possuem o mesmo referencial das coordenadas das quais foram estimadas.

Uma vez que não foi possível encontrar coordenadas oficiais de referência para as estações na época desejada (dr/er), mostrou-se pertinente utilizar um método de processamento para estimar as coordenadas de referência diretamente na época de interesse e com precisão conhecida. Ebner e Featherstone (2008), que compararam as coordenadas de 46 pontos de uma rede de controle geodésico de tamanho moderado (~550 km x ~440 km) processadas com o software científico Bernese v5 e com o CSRS-PPP, recomendam o processamento pelo método PPP de arquivos com seis dias (144 horas) consecutivos de rastreamento (limite máximo de processamento atual do CSRS-PPP) para obter resultados comparáveis àqueles obtidos com o Bernese em rede. Dessa forma, optou-se por este método para a obtenção das coordenadas de referência.

Para cada estação, foram concatenados seis arquivos de observação com 24 horas cada - obtidos na página do *GAGE Data File Server* (GAGE, 2026). Assim como Cunha (2020) e Freitas, Dal Poz e Nascimento (2022), para gerar os arquivos, optou-se por utilizar três dias antes e dois dias depois do dia de referência, de forma que ele fique próximo ao meio do intervalo.

De posse das coordenadas atualizadas e das de referência, calcula-se as discrepâncias planimétricas. A sequência dos cálculos necessários para a obtenção das discrepâncias pode ser verificada em Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) e Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021). Destaca-se que as discrepâncias altimétricas não serão analisadas, já que, como destacam Drewes e Heidbach (2012) e IBGE (2015), o processo de atualização é predominantemente horizontal.

Adicionalmente, será realizada a comparação das discrepâncias planimétricas calculadas após a atualização de coordenadas utilizando as velocidades interpoladas e aquelas obtidas com 18 modelos de velocidades utilizados pela comunidade geodésica, sendo eles:

- NUVEL 1 (ARGUS; GORDON, 1991);
- NUVEL 1A (DEMETS et al., 1994);
- HS2-NUVEL1A (*Hot Spot2 Northwestern University Velocity model 1A*) (GRIPP; GORDON, 1990; DEMETS et al. 1994);
- APKIM2000.0 (DREWES, 1998; DREWES; ANGERMANN, 2001);
- ITRF2000 (DREWES; ANGERMANN 2001);

- ITRF2000 (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002);
- HS3-NUVEL1A (Hot Spot3 NUVEL 1A) (GRIPP; GORDON, 2002);
- GSRM v1.2 (*Global Strain Rate Model*) (KREEMER; HOLT; HAINES, 2003);
- CGPS 2004 (*Continuous GPS 2004*) (PRAWIRODIRDJO; BOCK, 2004);
- REVEL 2000 (SELLA; DIXON; MAO, 2004);
- APKIM2005-DGFI (*Deutsche Geodätische Forschungsinstutu*) (DREWES, 2009);
- APKIM2005-IGN (*Institute Géographique National*) (DREWES, 2009);
- MORVEL 2010 (*Mid Ocean Ridge Velocity 2010*) (DEMETS; GORDON; ARGUS, 2010);
- GEODVEL 2010 (*Geodesy Velocity 2010*) (ARGUS et al. 2010);
- NNR-MORVEL56 (ARGUS; GORDON; DEMETS, 2011);
- ITRF2008 (ALTAMIMI; MÉTIVIER; COLLILIEUX, 2012)
- GSRM v2.1 (KREEMER; BLEWITT; KLEIN, 2014); e,
- ITRF2014 (ALTAMIMI et al., 2016);

Os modelos são disponibilizados pelo *Plate Motion Calculator*, desenvolvido pela UNAVCO, que calcula velocidades para qualquer localização na Terra com um ou mais modelos de movimento de placas (UNAVCO, 2026). Salienta-se que não foi possível encontrar informações sobre o referencial das velocidades fornecidas pelo *Plate Motion Calculator*. Entretanto, como destaca Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) e Carvalho et al. (2015), a diferença causada pela mudança de referencial de velocidades pode ser negligenciada.

5. Resultados e discussão

As discrepâncias calculadas para as seis estações podem ser visualizadas na Figura 5. Para a estação CAST, em que as três estações vizinhas mais próximas estão a aproximadamente 160, 190 e 200 km - o griddata, KNN e RF apresentaram valores semelhantes entre 0,030 e 0,033 m; já a KO apresentou um valor levemente menor, de 0,027 m. A menor discrepância foi obtida com o RBF (0,023 m), o que representa 0,019 m acima do valor de referência da RL. Já o IDW apresentou a maior discrepância, com 0,160 m. A CAST está situada no estado de Utah, distante das bordas da placa Norte-Americana, entretanto, considerando que as estações vizinhas estavam todas em seu lado ocidental, não sendo uma distribuição ótima para a interpolação, os resultados possuem qualidade suficiente para serem compatíveis com diversas aplicações práticas.

A estação KNOL, localizada no norte da Califórnia, apresenta as estações vizinhas mais próximas dentre as seis selecionadas (localizadas a 3,5 km, 4 km e 7,5 km). A maior discrepância foi registrada com o método Griddata (0,042 m), enquanto os demais métodos apresentaram valores que variam entre 0,015 m e 0,026 m. Esta estação foi a única em que o IDW foi o melhor método, isto reflete o maior peso atribuído pelo IDW às estações mais próximas na interpolação, fazendo com que o valor interpolado seja similar aos conhecidos. Ademais, considerando as características locais, a proximidade também faz com que não haja uma variação na movimentação crustal em uma extensão de menos de 5 km.

A OPCX, situada no sul da Califórnia, apesar de estar mais próxima de suas estações vizinhas (9,5, 17,5 e 22 km), apresentou resultados similares àqueles da CAST, com os métodos griddata, KNN, RF e RBF possuindo valores no intervalo de 0,030 a 0,037 m. Os métodos com maiores discrepâncias foram a KO e o IDW: 0,083 e 0,070 m, respectivamente. Destaca-se que a discrepância de referência já era de um valor mais alto, única estação acima de 1 cm (0,017 m). Foram registrados três terremotos durante o período da série entre 6,4 e 7,2 na escala Richter, com epicentro entre 290 e 250 km de distância da estação.

A PTGV, apesar de ser a estação com as estações vizinhas mais distantes (290, 620 e 1200 km), apresentou as menores discrepâncias dentre as seis estações estudadas. Com o griddata apresentando uma discrepância (0,007 m) apenas 1 mm acima do valor de referência (0,006 m), e o RBF apenas 3 mm acima (0,09 m). Os valores para o KNN, KO e RF foram de 0,018 m, 0,020 m e 0,029 m, respectivamente. A baixa discrepância pode ser atribuída ao fato de a estação estar localizada no leste dos EUA, região central da placa Norte-Americana, e consequentemente, mais estável, o que pode ser observado pelo seu vetor velocidade $\vec{v}_{m/ano} = (-0,014, 0,001, -0,001)$, com módulo de 1,4 cm/ano.

Destaca-se que as atividades sísmicas impactam as estações de forma diferente, dependendo, por exemplo, da topografia da região e da proximidade dos epicentros de terremotos. Desta forma, se uma estação utilizada como ponto conhecido na interpolação possuir saltos e/ou falhas, isso irá afetar a precisão de sua velocidade, o que consequentemente afetará a velocidade interpolada.

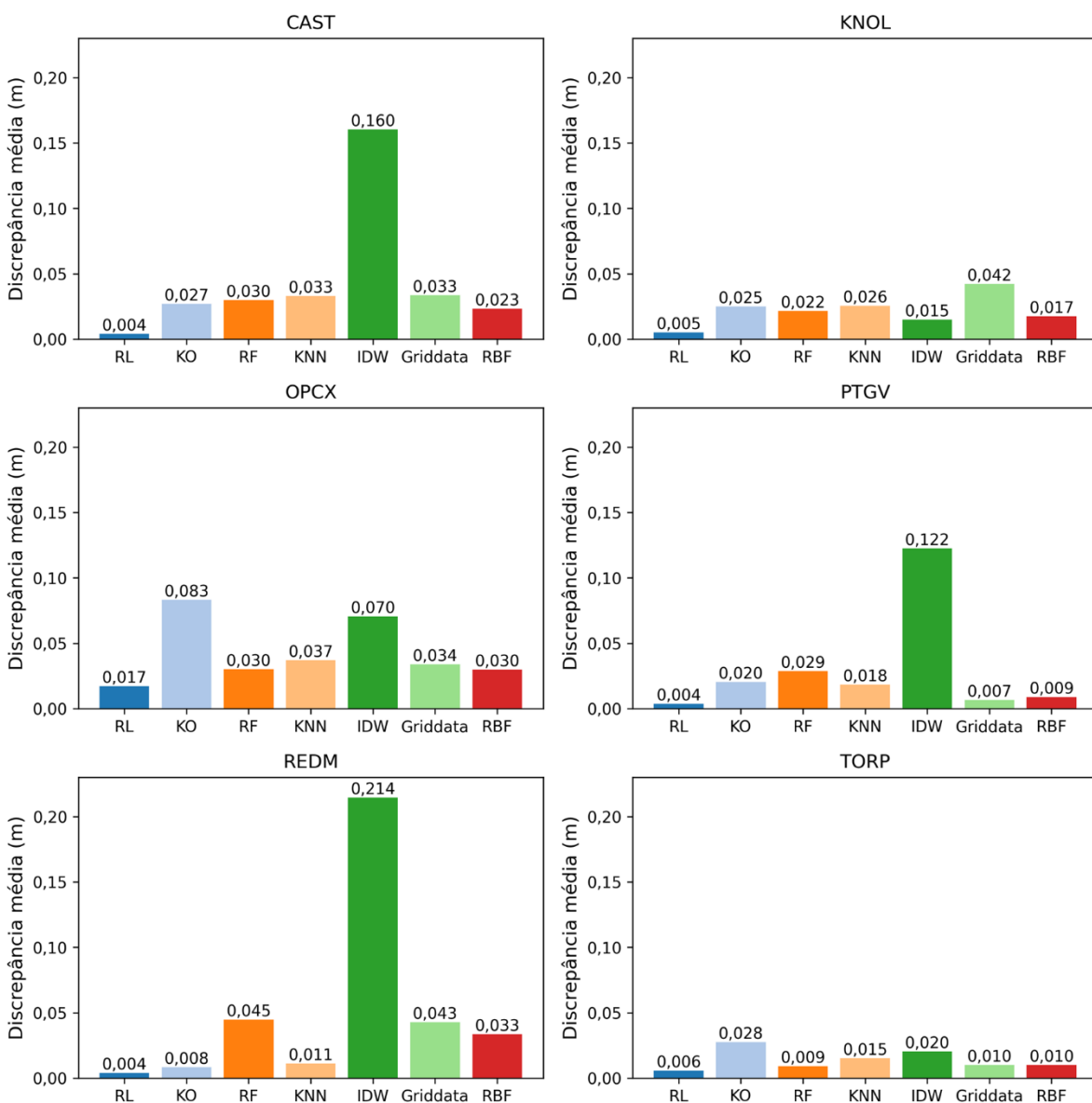


Figura 5 - Discrepância planimétrica por método de interpolação para cada estação. Fonte: Autores (2026).

A REDM, localizada no estado de Oregon, possui suas três estações vizinhas mais próximas localizadas a 175, 315 e 320 km. O IDW apresentou a maior discrepância entre os resultados de todas as estações, com 0,214 m. A KO e o KNN, por outro lado, apresentaram a menor discrepância entre as 6 estações (0,008 e 0,011 m, respectivamente), o que equivale a 4 e 7 mm acima do valor de referência, respectivamente. Os demais métodos apresentaram discrepâncias entre 0,033 e 0,045 m.

Entre as estações escolhidas a TORP está localizada na região de maior atividade sísmica. Também no estado da Califórnia, mas na placa do Pacífico, próxima da borda, e a menos de 10km do litoral. O que fica claro em seu vetor velocidade $\vec{v}_{m/ano} = (-0,0300, 0,028, 0,016)$, com módulo de mais de 4 cm/ano. As três estações vizinhas mais próximas estão a 4,5, 6 e 10 km. Apesar da região, as discrepâncias foram baixas, com o melhor métodos sendo o RF, com 0,009 m

(3 mm acima do valor de referência). O griddata e o RBF tiveram o mesmo valor de 0,010 m e o KNN, IDW e KO, 0,015 m, 0,020 m, e 0,028 m respectivamente.

De modo geral, não foi possível observar características específicas dos métodos de modo a atribuir um melhor resultado a uma dada configuração geográfica das estações vizinhas. O IDW teve o melhor resultado na KNOL, mas foi o pior em outras 3 estações. O griddata foi o melhor para a estação PTGV, mas foi o pior na KNOL. A KO foi o melhor na OPCX e a pior na REDM e TORP. O RF, o KNN e o RBF se mostraram mais consistentes, com resultados satisfatórios em todas as estações.

Calculando a discrepância média das seis estações para cada método, verifica-se que o IDW com 0,100 m foi o de pior desempenho. A KO, griddata e RF foram bem similares, com 0,032 m, 0,028 m e 0,027 m, respectivamente. Os dois melhores foram o KNN com 0,023 m e o RBF com 0,020 m. Devido à maior consistência entre todas as estações, o RBF se mostrou o método mais confiável para interpolar velocidades estimadas a partir de séries temporais posicionais de observações GPS. Vale destacar que os experimentos foram realizados utilizando mais de 100 estações como pontos conhecidos, realizar interpolações utilizando apenas os três pontos mais próximos, por exemplo, pode apresentar resultados distintos, devido às particularidades de cada método.

Adicionalmente, comparou-se esses resultados com aqueles de 18 modelos de velocidades utilizados pela comunidade geodésica, como ilustrado na Figura 6.

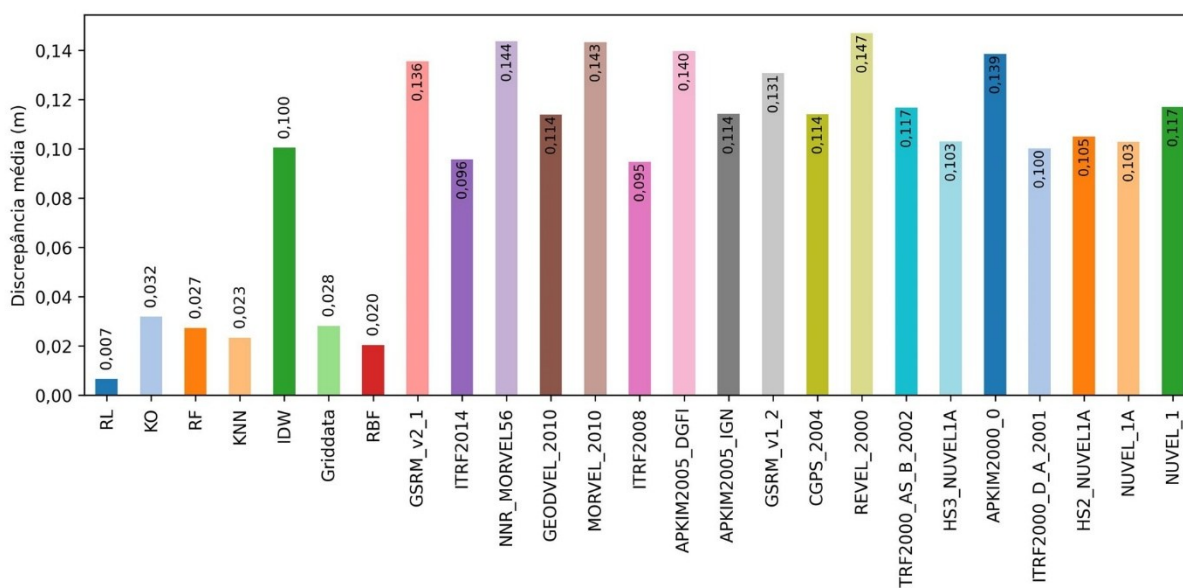


Figura 6 - Discrepância planimétrica média das seis estações interpoladas. Fonte: Autores (2026).

A discrepância média entre os 18 modelos variou entre 0,095 e 0,147 m, significativamente maior que o RF, KNN, griddata, KO e RBF. Entre os métodos de interpolação, somente o IDW apresentou resultado pior que algum dos modelos.

Tomando como referência o valor da RL, os métodos de interpolação RF, KNN, griddata e RBF apresentaram discrepâncias aproximadamente 3 a 4 vezes maiores. Contudo, as discrepâncias calculadas utilizando as velocidades interpoladas com estes métodos foram cerca de 3,5 a 7 vezes menores que as calculadas utilizando as velocidades dos 18 modelos analisados.

6. Considerações finais

Este artigo teve como objetivo apresentar o software GPTS Downloader e uma das inúmeras aplicações das séries temporais posicionais. Estimou-se a velocidade de 113 estações com base em suas respectivas séries de 20 anos de dados, interpolou-se velocidades para seis estações utilizando seis métodos de interpolação, e calculou-se a discrepância

planimétrica em relação às coordenadas de referência. Por apresentar a maior consistência entre os métodos analisados, o RBF se mostrou o método mais confiável para interpolar velocidades estimadas a partir de séries temporais posicionais.

Mesmo sem um pré-processamento das séries e analisando regiões de alta atividade sísmica (há uma alta concentração de estações no oeste dos EUA, próximas ao encontro das placas litosféricas do Pacífico e Norte-americana) foi possível atualizar coordenadas por 20 anos com baixas discrepâncias planimétricas, demonstrando o alto potencial de utilização desta metodologia para estimativa de velocidades, tanto pela facilidade de execução, baixo custo computacional e qualidade dos resultados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- ALTAMIMI, Z.; P. SILLARD; C. BOUCHER. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, **J. Geophys. Res.**, 107(B10), 2214, 2002.
- ALTAMIMI, Z.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX. ITRF2008 plate motion model. **Journal of Geophysical Research**. 117, 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**, 121, 6109– 6131, 2016.
- ANJYO, K.; LEWIS, J. P. RBF interpolation and Gaussian process regression through an RKHS formulation, **Journal of Math-for-Industry** 2011, Vol. 3 (2011A-6), pp. 63–71.
- ARGUS, D.F.; GORDON, R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, **Geophys. Res. Lett.**, 18, 2039-2042, 1991.
- ARGUS, D.F., GORDON, R.G.; DEMETS, C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame, **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, 12, No. 11, 13 pp., 2011.
- ARGUS, D.F.; GORDON, R.G.; HEFLIN, M.B.; MA, C.; EANES, R.J.; WILLIS, P.; PELTIER, W.R.; OWEN, S.E. The angular velocities of the plates and the velocity of the Earth's centre from space geodesy, **Geophys. J. Int.**, 18, 1-48, 2010.
- BERTIGER, W. et al. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. **Advances in Space Research**, v. 66, n. 3, p. 469–489, 2020. DOI: 10.1016/j.asr.2020.04.015.
- BLEWITT, G.; HAMMOND, W.; C. KREEMER; C. HARNESSING. The GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science, **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 99, 2018.
- BLEWITT, G.; KREEMER, C.; HAMMOND, W. C.; GAZEAX, J. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, n. 3, p. 2054-2068, 2016.
- BOGUSZ, J.; KLOS, A.; GRUSZCZYNSKA, M.; GRUSZCZYNSKI, M. Towards Reliable Velocities Of Permanent GNSS Stations. **Reports on Geodesy and Geoinformatics** vol. 100. 2016; pp. 17-26.
- BREIMAN, L. "Random Forests." **Machine Learning**, 2001, 45(1), 5-32.
- CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; GRIPP, J.; LAROCCA, A. P. C.; KRUEGER, C. P. Sistematização das etapas para determinação posicional em SIRGAS2000 com base nas coordenadas ITRF(IGB08) obtidas por serviços PPP online. **Revista Brasileira de Cartografia** (2015) N° 67/1 43-58. ISSN: 1808-0936.

- CUNHA, M. M. **Efeitos da carga oceânica no posicionamento por ponto preciso**. 2020. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.
- DEMETS, C.; GORDON, R.G.; ARGUS, D.F.; STEIN, S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, **Geophys. Res. Lett.**, 21, 2191-2194, 1994.
- DEMETS, C.; GORDON, R.G.; ARGUS, D.F. Geologically current plate motions, **Geophys. J. Int.**, 181, 1-80, 2010; see also Erratum, **Geophys. J. Int.**, 0, 1-1, 2011.
- DREWES, H., Combination of VLBI, SLR, and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models, Geodynamics, M. Feissel (Ed.), IAG Symposia, **Springer**, 1998.
- DREWES, H., The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as basis for a non-rotating ITRF, Geodetic Reference Frames, H. Drewes (Ed.), IAG Symposia, 134, 95-99, **Springer**. DOI: 10.1007/978-3-642-00860-3_15, 2009.
- DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", **Anais... IAG Symposia**, 136: 657-664, 2012.
- DREWES, H.; ANGERMANN, D. The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model 2000 (APKIM2000) as a Geodetic Reference System, **Anais... AIG 2001 Scientific Assembly**, Budapest, 2-8 Sept 2001.
- EBNER, R.; FEATHERSTONE, W. E. How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? **Journal of Applied Geodesy**, v. 2, n. 3, p. 149-157, 2008.
- FRANK, A. **k Nearest Neighbors. Predictive Analytics with KNIME** (pp.209-227), 2023.
- FREITAS, K. X. S.; DAL POZ, W. R.; NASCIMENTO, L. A. Avaliação do Impacto da Compatibilização de Referencial das Velocidades na Redução de Coordenadas no PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 73, n. 1, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n1-55416.
- FREITAS, K. X. S.; DAL POZ, W. R.; NASCIMENTO, L. A. Potencial da Utilização de Multivelocidade no Processo de Atualização Temporal de Coordenadas no PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 558-579, 2022.
- GAGE (2026). GAGE Data File Server - **GPS/GNSS Data**. Disponível em <https://www.unavco.org/data/gps-gnss/gps-gnss.html#access>. Acesso em: 01/04/2026.
- GRIPP, A.E.; R.G. GORDON, Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model, **Geophys. Res. Lett.**, 17, 1109-1112, 1990.
- GRIPP, A.E.; R.G. GORDON, Young tracks of hotspots and current plate velocities, **Geophys. J. Int.**, 150, 321-361, 2002.
- HE, X.; BOS, M. S.; MONTILLET, J. P.; FERNANDES, R. M. S. Investigation of the noise properties at low frequencies in long GNSS time series. **Journal of Geodesy**, v. 93, n. 9, p. 1271-1282, 2019.
- IBGE (2015). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Nota Técnica. **Término do período de transição para adoção no Brasil do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização de 2000,4 (SIRGAS2000)**. Acesso em: 29/03/2026.
- JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. Academic Press, 1978.
- KIERULF, H. P.; STEFFEN, H.; BARLETTA, V. R.; LIDBERG, M.; JOHANSSON, J.; KRISTIANSEN, O.; TARASOV, L. A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia, **Journal of Geodynamics**, Volume 146, 101845, ISSN 0264-3707, 2021.
- KILIÇ, B.; ÖZARPACI, S. Ensemble Clustering in GPS Velocities: A Case Study of Turkey. **Appl. Sci.**, 12, 12636, 2022.

- KLOS, A.; BOS, M. S.; BOGUSZ, J. Detecting time-varying seasonal signal in GPS position time series with different noise levels. **GPS Solutions**, v. 22, n. 1, p. 21, 2018.
- KLOS, A.; OLIVARES, G.; TEFERLE, F. N.; HUNEGNAW, A.; BOGUSZ, J. On the combined effect of periodic signals and colored noise on velocity uncertainties. *GPS Solutions*. v. 22, n. 1, p. 13, 2018. DOI. 10.1007/s10291-017-0674-x
- KREEMER, C.; G. BLEWITT; E.C. KLEIN, A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model, **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, 15, 3849-3889, 2014.
- KREEMER, C.; G. BLEWITT, 2021, Robust estimation of spatially-varying common-mode components in GPS time-series, **Journal of Geodesy**, 95, 13.
- 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.
- NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; EMILIANO, P. C.; FREITAS, K. X. S. de. Abordagem Estatística Aplicada à Investigação de Deformações Associadas ao Efeito de Carga Hidrológica na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 73, n. 4, p. 1017–1035, 2021.
- NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; FREITAS, K. X. S. O Efeito da Carga Hidrológica e sua Influência no Deslocamento e nas Velocidades de Estações GNSS na Bacia Amazônica Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 73, n. 3, p. 787–806, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n3-57734.
- PEDREGOSA et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **JMLR** 12, pp. 2825-2830, 2011.
- PIRTI, A.; HOŞBAŞ, R. G.; YÜCEL, M. A. Monitoring of Icelandic plate movement with GNSS method and GPS signal jamming effects in Iceland. **Reports on Geodesy and Geoinformatics**, 116, 15-22, 2023.
- PRAWIRODIRDJO, L.; BOCK, Y. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations, **J. Geophys. Res.**, 109, B08405.
- 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.
- RAMOS, M. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Determinação de Velocidades das Estações da RBMC com Uso do Software SARI. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 453-469, 6 abr. 2021.
- SÁNCHEZ L.; DREWES H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes. Latin America. **Journal of Geodynamics**. 2016.
- SAVCHYN, I.; BRUSAK, I.; TRETAK, K. Analysis of recent Antarctic plate kinematics based on GNSS data. **Geodesy and Geodynamics**, 14(2), 99, 2023.
- SELLA, G.F.; DIXON, T.H.; MAO, A. Revel: A model for recent plate velocities from space geodesy, *J. Geophys. Res.*, 107, B4, 2002.
- SHEPARD, D. A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data. 1968. **Proceedings of the 1968 ACM National Conference**, New York, 27-29 August 1968, 517-524.
- SIBSON, R. **A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation**. In: Barnett, V., Ed., *Interpreting Multivariate Data*, John Wiley & Sons, New York, 21-36, 1981.
- SIRGAS (2026). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, **Sistema de Referência Geocêntrico**. Disponível em: <https://www.sirgas.org/pt/velocity-model/using-velocities-gnss/>. Acesso em: 31/03/2026.
- TAPIQUÉN, C. E. P. "World_Countries.shp". *Orogénesis Soluciones Geográficas*. Porlamar, Venezuela 2015. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=57b2f5175711402f8939e2660202ce9a>. Acesso em: 28/03/2026.

UNAVCO (2026). **Plate Motion Calculator**. Disponível em: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> . Acesso em: 01/04/2026.

ZHONGSHAN J. Download_GPS_tenv3_from_NGL. Disponível em https://github.com/jzshhh/Download_GPS_tenv3_from_NGL . Acesso em: 29/03/2026.