

## MOVIMENTOS VERTICAIS DETERMINADOS POR GNSS

João Miguel Pinto Ferreira, Centro de Informação Geoespacial do Exército,  
[jmferreira@igeoe.pt](mailto:jmferreira@igeoe.pt)

DOI: [https://doi.org/10.60746/8\\_14\\_36806](https://doi.org/10.60746/8_14_36806)

### ABSTRACT

The precise determination of vertical land motions is crucial for understanding various geophysical phenomena. Space geodetic techniques, specifically Global Navigation Satellite Systems (GNSS), are used to measure these movements. The process is often complex due to the influence of diverse natural and anthropogenic phenomena with a broad range of spatiotemporal scales. The main focus of this study is the generation of a global field of vertical land motions by seamlessly combining several velocity fields from GNSS that are in the public domain. The method involved comparing velocities determined by six GNSS centers and three terrestrial reference frame realizations. The final global combined solution was generated using a weighted least-squares estimator (for the mean value) with inputs from four GNSS analysis center solutions. The weights were defined by the inverse of the individual variances, calculated using a three-cornered hat method adjusted for four data sets.

**Keywords:** GNSS, Space geodesy, Three-cornered hat, Vertical land motion.

### RESUMO

A determinação dos movimentos verticais terrestres é fundamental para a compreensão de diversos fenómenos geofísicos. Várias técnicas de geodesia espacial nomeadamente Navegação Global por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite*

*Systems*) são utilizadas para medir estes movimentos, sendo o processo muitas vezes complexo, devido à influência de fenômenos naturais e antropogênicos com escalas de variação temporal diversificadas. O presente estudo teve como objetivo analisar os movimentos verticais terrestres com GNSS, propondo uma solução combinada global com base em diversas soluções de referência publicadas. O método consistiu na comparação das velocidades determinadas por seis centros GNSS e três soluções de referenciais. A solução combinada global foi determinada através de uma média ponderada entre quatro centros de análise GNSS, sendo os pesos definidos pelo inverso da variância individual, calculada através do método *three-cornered hat* ajustado para quatro conjuntos de dados.

**Palavras-chave:** GNSS, Geodesia Espacial, Movimentos verticais terrestres, *Three-cornered hat*.

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação precisa dos movimentos verticais terrestres (VLM - *Vertical Land Motion*) reveste-se de extrema importância para a compreensão de fenômenos geofísicos, como sejam os efeitos da sismologia, permitindo analisar as propriedades materiais do interior da terra através de deformações pós-sísmicas (Koulali et al., 2022; Qin et al., 2018), estudos em zonas de subducção (áreas de convergência de placas tectônicas), análise de processos de recuperação do efeito do Ajustamento Glacial Isostático (GIA – *Glacial Isostatic Adjustment*) (Blewitt et al., 2016; Santamaría-Gómez et al., 2011; Santamaría-Gómez & Mémin, 2015) e a variação do nível do mar em regiões costeiras, essencial para a correção de valores registados por marégrafos (Hammond et al., 2021; Santamaría-Gómez & Mémin, 2015; Wöppelmann & Marcos, 2016; Zulkifli et al., 2018). Estes movimentos são influenciados por diferentes fenômenos naturais e antropogênicos, surgindo como resposta a mudanças na

distribuição da massa nos continentes, oceanos e atmosfera (Pfeffer et al., 2017), sendo o GIA amplamente reconhecido pela literatura como o de maior impacto (Hammond et al., 2021; Ludwigsen et al., 2020; Peltier et al., 2015). Pese embora a preponderância deste fenómeno, muitos outros evidenciam impacto nos valores de VLM, quer globais quer em determinadas regiões ou locais com taxas e padrões bastante diversificados, destacando-se: mudanças no fluxo do manto terrestre e movimentos de placas tectónicas (Grgić et al., 2020), enquanto fenómenos naturais geradores de movimentos lentos/seculares e constantes; resposta elástica derivada de redução da camada de gelo, carga superficial (fruto de variações na pressão atmosférica) (Martens et al., 2020), deformações sísmicas, atividade vulcânica, compactação de sedimentos por ação do homem em processos de construção (Grgić et al., 2020; Pfeffer et al., 2017; Wöppelmann & Marcos, 2016), responsáveis por valores de VLM de curto prazo e instáveis.

Nos últimos anos, temos assistido à utilização de várias técnicas de geodesia espacial para determinação dos movimentos verticais, como seja o GNSS. Em conjunto com os dados de marégrafos, o nivelamento geodésico foi, durante muitos anos, das únicas fontes de informação sobre VLM. Contudo, a utilização do GNSS garante uma continuidade temporal e baixos custos de mão de obra (Lai et al., 2017; Qin et al., 2018). Apesar destas vantagens, a determinação de movimentos verticais, ao contrário dos movimentos horizontais que permitem medir deformações com elevada precisão por apresentarem efeitos mais reduzidos dos sinais periódicos geofísicos (Bouin & Wöppelmann, 2010; Pan et al., 2021), não é um processo de simples execução, influenciado tanto por fenómenos locais/regionais e globais, como pelo ruído existente nas medições GNSS. Muitas vezes, efeitos incorretamente modelados, bem como as estratégias de processamento utilizadas, afetam as estimativas de velocidades verticais

(Bouin & Wöppelmann, 2010; Santamaría-Gómez et al., 2011; Gobron, 2021; Serpelloni et al., 2013).

Diversos centros de análise de referência na determinação de velocidades verticais com recurso a GNSS divulgam regularmente as suas soluções para estações distribuídas a nível global. De acordo com os aspetos supramencionados, considera-se pertinente, compreender a concordância dos valores publicados através de uma comparação entre soluções, descrevendo as principais diferenças com base nas estratégias de processamento e tratamento das séries temporais adotadas.

A realização de um novo Referencial Terrestre Internacional (ITRF – *International Terrestrial Reference Frame*), representa a solução mais rigorosa que podemos obter de valores de velocidade vertical, sendo que, após alguns anos da sua publicação, diferentes fenómenos afetam o comportamento das estações, tornando necessária a utilização de soluções mais atualizadas. A existência de múltiplas soluções individuais publicadas pelos centros de análise torna o processo de escolha algo ambíguo. Nesta perspetiva, considera-se importante definir uma estratégia que permita combinar as diversas soluções numa única, mais robusta, compensando enviesamentos causados pelas estratégias adotadas por cada centro de análise.

## **2. DADOS E MÉTODO**

### **2.1. DADOS**

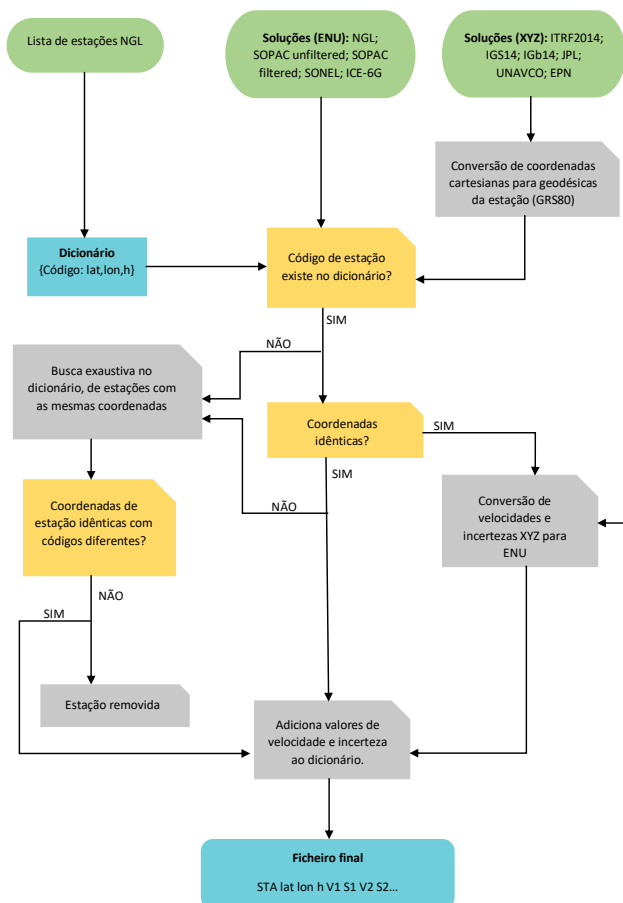
O conjunto de dados selecionados envolve valores de velocidade vertical retirados de soluções produzidas por diversos centros de análise e disponíveis online (soluções retiradas em 10/01/2022): *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL); *Jet Propulsion Laboratory* (JPL); *Scripps Orbit and Permanent Array Center* (SOPAC); UNAVCO; *EUREF Permanent GNSS network* (EPN); *Système d'Observation du Niveau des Eaux*

*Littorales* (SONEL). Para além destes centros foram utilizadas 3 soluções GNSS de referenciais: ITRF2014, IGS14, IGB14.

Relativamente à estratégia de processamento, existem algumas diferenças adotadas pelos diferentes centros de análise, esquematizadas em Ferreira (2022). Destas destacam-se: o software utilizado e conseqüentemente o tipo de processamento (Posicionamento Pontual Preciso (PPP) ou processamento em rede); o referencial escolhido para o alinhamento da solução; o corte de elevação; órbitas finais utilizadas.

## **2.2. MÉTODO**

O processamento das soluções GNSS possibilitou agrupar num único ficheiro os resultados de velocidade de cada estação, para os diversos centros de análise/referenciais. A estratégia adotada teve por base o processamento de forma automática das diversas soluções, considerando o formato e organização de cada ficheiro de dados. O fluxo elaborado para o processamento encontra-se sintetizado na Ilustração 1.



**Ilustração 1:** Fluxo do processamento de dados.

Fonte: Elaboração própria.

### 2.3. FILTRAGEM DAS SOLUÇÕES

Para além do processo previamente descrito, as soluções foram filtradas de acordo com o número de anos de observações (nos casos em que estes dados estão presentes), sendo este processo muitas vezes executado pelos próprios centros de análise na determinação dos valores de velocidade.

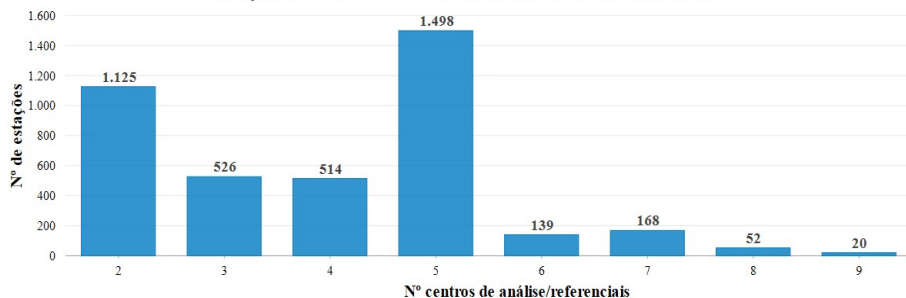
A escolha do período mínimo procurou atender ao critério de qualidade, mas garantindo a utilização do maior número possível de estações. Optou-se pela utilização de estações com um mínimo de 2.5 anos de observações. Esta escolha é corroborada pela literatura existente, nomeadamente Blewitt & Lavallée (2002), Santamaría-Gómez et al. (2012) e Bock et al. (2021) que declaram este valor como o mínimo a considerar para interpretações geofísicas, como estimação de valores de velocidade destinados à interpretação de tectónica de placas ou produção de referenciais. Tendo por base a análise prévia, as estações que apresentavam valores inferiores a 2.5 anos foram consideradas não confiáveis devido à presença esperada de sinais sazonais, não sendo incluídas no ficheiro final. O processo de filtragem consistiu ainda em mais duas etapas: a remoção de estações apenas presentes numa solução e a deteção de candidatos a *outliers* de forma “grosseira” por análise de valores extremos.

No que respeita à remoção de *outliers* para tornar exequível o processo de análise visual das diferenças, selecionaram-se apenas as estações que apresentavam valores absolutos de velocidade superiores a 20 mm/ano. Nos casos de estações presentes em apenas dois centros de análise/referenciais, aquelas que exibiam valores de velocidade com sinal oposto (subsidência numa solução e soerguimento na outra), ou valores de diferença bastante superiores à maior incerteza das velocidades, foram consideradas pouco confiáveis e retiradas de ambas as soluções.

## **2.4. SOLUÇÃO FINAL**

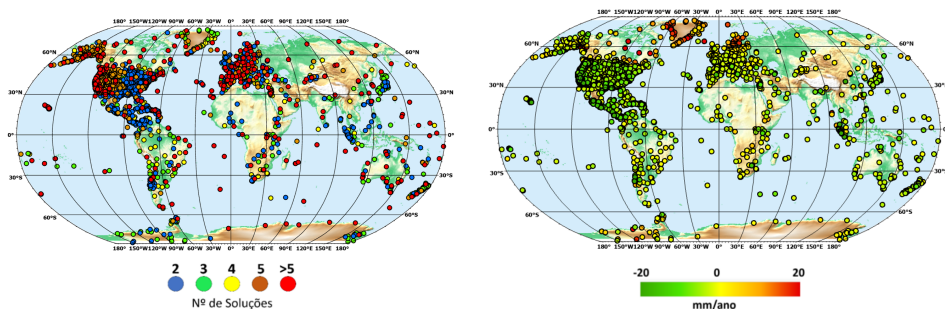
Descritos os procedimentos adotados no tratamento de dados, o resultado final consistiu num total de 4042 estações comuns a um mínimo de dois centros de análise/referenciais, com a seguinte distribuição pelas soluções: NGL – 4029; JPL – 2577; UNAVCO – 2566; SOPACF (Solução SOPAC Filtrada) – 1672; SOPACU (solução SOPAC não filtrada) – 2884; SONEL – 464; EPN – 275; ITRF2014 – 1005;

IGS14 – 250; IGB14 – 259. O histograma e a distribuição das estações por número de soluções encontram-se representados nas Ilustrações 2 e 3.



**Ilustração 2:** Histograma de distribuição de estações por número de centros/referenciais.

**Fonte:** Elaboração própria.



**Ilustração 3:** Lista de estações presentes na solução de mais de um centro de análise/referencial (esq.). Valor médio de velocidade vertical das estações (dir.).

**Fonte:** Elaboração própria.



### 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

#### 3.1. COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÕES GNSS

Centro análise / referencial	NGL	JPL	UNAVCO	SOPAC F	SOPACU	SONEL	EPN	ITRF 14	IGS 14	IGb1 4
MAE (mm/ano)	0.63	0.59	0.85	0.66	0.69	0.54	0.34	0.69	0.47	0.39
Média n.º estações	1308	1093	898	708	1088	231	103	468	146	149

**Tabela 1:** Média de MAE entre centro de análise/referencial e todas as outras soluções.

**Fonte:** Elaboração própria.

A comparação entre soluções, resumida na Tabela 1, permitiu concluir que a EPN é o centro de análise que apresenta um valor médio mais reduzido de erro médio absoluto (MAE- *Mean Absolute Error*) relativamente às restantes soluções, 0.34 mm/ano, correspondendo a uma média de estações utilizadas para comparação de 103. Este valor acaba por ser influenciado pelo número reduzido de estações utilizadas na comparação com outros centros/referenciais, bem como, nos valores de velocidade reduzidos apresentado pela maioria das estações. No caso dos centros de análise com uma média superior a 500 estações utilizadas para comparação, o JPL é o que evidencia um valor de MAE mais reduzido, 0.59 mm/ano, verificando-se valores próximos nas soluções do SOPAC e NGL. Já a UNAVCO é o centro que apresenta o valor mais elevado, aproximadamente 0.85 mm/ano. Tendo por base a análise elaborada, podemos atestar uma boa concordância entre os centros de análise NGL, JPL e SOPAC e um enviesamento da solução UNAVCO, aparentando uma ligeira subestimação dos valores de velocidade quando comparada com as restantes soluções, à exceção da EPN (não sendo significativa por apenas ser deduzida com base em 15 estações). A concordância encontrada entre os três centros de análise não nos permite aferir a

influência que a estratégia de processamento adotada por cada centro representa nos valores de velocidade publicados. Sendo o SOPAC um centro que adota uma estratégia de processamento diferente do NGL e JPL, poderíamos deduzir que o software utilizado não causa influência nos valores estimados, mas devemos ter alguma cautela, pois, como analisado, as velocidades estimadas pelo SOPAC são comparadas com as velocidades JPL de forma a eliminar grandes discrepâncias, podendo esta ação diluir o efeito causado pelas diferentes estratégias de processamento.

NGL	2541	2543	1659	2844	452	266	974	244	253
0,64	JPL	1743	1584	2434	292	129	651	232	232
1,0	0,99	UNAVCO	1491	1779	129	15	261	62	63
0,65	0,68	1,2	SOPACF	1634	51	N/A	127	23	23
0,85	0,66	1,1	0,11	SOPACU	311	132	703	246	253
0,56	0,61	0,78	0,52	0,56	SONEL	67	435	172	172
0,35	0,27	0,52	N/A	0,44	0,42	EPN	124	46	48
0,77	0,65	0,97	0,73	0,89	0,47	0,37	ITRF14	249	248
0,46	0,47	0,66	0,47	0,53	0,47	0,23	0	IGS14	244
0,4	0,35	0,44	0,43	0,45	0,5	0,15	0,31	0,29	IGb14

**Tabela 2:** Valores de MAE entre soluções (triângulo inferior esq.) em mm/ano, n.º de estações comuns entre soluções (triângulo superior dir.).

**Fonte:** Elaboração própria.

Considerando todas as comparações entre soluções (Tabela 2), encontramos a maior concordância entre a EPN e o referencial IGB14 com um valor de MAE de 0.15 mm/ano (excluindo as comparações entre referenciais e entre as duas soluções SOPAC), sendo esta a única solução expressa no referencial IGB14 e que, durante o processo de tratamento das séries temporais, corrige as mesmas com base na solução

IGb14. Podemos assim denotar que, apesar das soluções apresentarem dados estatisticamente compatíveis e com valor de MAE inferior a 1mm/ano em praticamente todas as comparações, existem diversas estações com valores de diferenças de dezenas de mm/ano. Neste caso, torna-se necessária alguma cautela na utilização das soluções individuais, podendo algumas estações apresentar resultados pouco realistas.

### 3.2. SOLUÇÃO COMBINADA

A variabilidade encontrada nas soluções anteriores leva a uma necessidade de pesar as mesmas para determinação de uma solução combinada, procurando que as soluções mais consistentes apresentem um peso maior. O processo mais simples seria a utilização das incertezas publicadas, mas como verificámos, estas são definidas pelos próprios centros de análise e muitas vezes pouco confiáveis. Desta forma, a opção passou pela aplicação do método *three-cornered hat*, adaptado para N=4 conjunto de dados. O método referido foi desenvolvido por Grubbs (1948), servindo como uma técnica para estimação dos erros aleatórios de três instrumentos diferentes, sendo bastante utilizado na estimação dos erros aleatórios de relógios atômicos (Vernotte et al., 2004). Atualmente verifica-se a utilização do método em variadas áreas, nomeadamente em séries temporais de técnicas de geodesia espacial, revelando resultados consistentes na determinação dos erros associados a cada uma das técnicas, como é exemplo os estudos de Wang et al. (2021) e Abbondanza et al. (2015). Mais informações sobre o método utilizado, consultar Ferreira (2022).

Das soluções analisadas foram selecionadas a do NGL, JPL, SOPACU e UNAVCO. A escolha pelas soluções destes centros de análise teve por base: a existência de atualizações regulares, excluindo assim a solução do SONEL; soluções individuais, pelo que não foi considerada a solução EPN por ser uma combinação entre diversos centros de análise.

A variabilidade do número de estações utilizadas em cada solução individual, bem como o comportamento das mesmas, tornou necessário a escolha de um conjunto de estações que apresentassem um comportamento estável entre soluções, permitindo determinar os valores das variâncias das diferenças de velocidade entre centros e, conseqüentemente, o cálculo das variâncias do erro individuais de forma ajustada e que minimizasse os erros numa perspectiva global.

Após vários ensaios, apurou-se o melhor resultado para determinação das variâncias das diferenças entre centros, a utilização das estações presentes no ITRF2020. Inicialmente, foram calculadas as diferenças de velocidade entre a versão preliminar ITRF2020 e as quatro soluções individuais e determinado o valor médio destas diferenças para cada estação. No final, selecionaram-se as estações que apresentavam valores médios das diferenças inferiores a 1.5 vezes o intervalo interquartil ( $1.5 \cdot \text{IQR}$ ), resultando assim num total de 608 estações.

Através das variâncias das diferenças foram determinadas as variâncias do erro individuais aplicando o método *three-cornered hat* a quatro centros de análise, como mostra o seguinte sistema de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{(NGL-JPL)}^2 = \sigma_{\epsilon(NGL)}^2 + \sigma_{\epsilon(JPL)}^2 \\ \sigma_{(NGL-SOPACU)}^2 = \sigma_{\epsilon(NGL)}^2 + \sigma_{\epsilon(SOPACU)}^2 \\ \sigma_{(NGL-UNAVCO)}^2 = \sigma_{\epsilon(NGL)}^2 + \sigma_{\epsilon(UNAVCO)}^2 \\ \sigma_{(JPL-SOPACU)}^2 = \sigma_{\epsilon(JPL)}^2 + \sigma_{\epsilon(SOPACU)}^2 \\ \sigma_{(JPL-UNAVCO)}^2 = \sigma_{\epsilon(JPL)}^2 + \sigma_{\epsilon(UNAVCO)}^2 \\ \sigma_{(SOPACU-UNAVCO)}^2 = \sigma_{\epsilon(SOPACU)}^2 + \sigma_{\epsilon(UNAVCO)}^2 \end{array} \right. \quad (1)$$

As variâncias foram calculadas através da resolução do sistema de equações pelo método dos mínimos quadrados, resultando nas seguintes variâncias do erro: NGL – 0.29 mm/ano; JPL – 0.27 mm/ano; SOPACU – 0.22 mm/ano; UNAVCO – 0.45 mm/ano. Tendo por base estes valores, foram determinadas as velocidades verticais

para cada estação através de uma solução de média ponderada, pesando as observações de cada centro de análise através do inverso da variância do erro.

- Determinação das incertezas

A determinação dos valores das incertezas da solução combinada foi efetuada através da lei de propagação das variâncias, para a média das soluções em cada uma das estações, tendo por base as incertezas publicadas por cada centro de análise. Neste caso, considerou-se a variância média de acordo com o número de centros que serviram para a sua determinação. Considerando quatro centros de análise, deduzimos a variância ( $\sigma^2$ ) média e, conseqüentemente, o valor da incerteza ( $\sigma$ ) através da seguinte equação:

$$\sigma_{(media)}^2 = \left(\frac{1}{4}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 \sigma_d^2. \quad (2)$$

- Validação da solução combinada

O processo de validação da solução combinada proposta assentou na comparação dos parâmetros estatísticos das velocidades com os resultados preliminares do ITRF2020. Apesar desta solução preliminar não ser oficial, permitem-nos compreender o grau de concordância da solução proposta em comparação com as soluções individuais, segundo um referencial elaborado de forma rigorosa e com estações que apresentam na sua maioria um comportamento estável. A filtragem da solução ITRF2020 consistiu na seleção de estações presentes em pelo menos dois centros de análise, tendo sido ainda excluídas cinco estações consideradas *outliers*, resultando num total de 977 estações para o processo de comparação. A tabela 3 foi construída com as estações presentes nos centros de análise e no ITRF2020, tendo sido removidas em cada comparação as que apresentavam valores de diferença de velocidades verticais superiores à média mais três vezes o desvio padrão. Já a tabela 4 engloba apenas as estações (608) que serviram de cálculo à determinação das variâncias combinadas,

permitindo obter uma visão do comportamento da solução combinada nas estações consideradas mais estáveis.

Solução	NGL	JPL	UNAVCO	SOPACU	Solução combinada
<b>Média</b>	0.08	0.14	0.24	-0.20	0.02
<b>Mediana</b>	0.07	0.10	0.16	-0.23	-0.01
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1.0</b>	<b>0.95</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>0.90</b>
<b>Mínimo</b>	-5.2	-3.4	-4.4	-6.5	-5.2
<b>Máximo</b>	5.1	4.8	4.9	6.4	4.7
<b>1.º Quartil</b>	-0.29	-0.25	-0.19	-0.59	-0.29

**Tabela 3:** Dados estatísticos das diferenças de velocidade vertical (mm/ano) entre o ITRF2020 e as soluções individuais e solução combinada (todas as estações após filtragem).

**Fonte:** Elaboração própria.

Solução	NGL	JPL	UNAVCO	SOPACU	Solução Combinada
<b>Média</b>	0.10	0.11	0.28	-0.20	0.0
<b>Mediana</b>	0.07	0.09	0.17	-0.20	-0.02
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0.63</b>	<b>0.62</b>	<b>0.76</b>	<b>0.61</b>	<b>0.45</b>
<b>Mínimo</b>	-2.9	-1.6	-1.9	-3.2	-1.3
<b>Máximo</b>	2.3	3.1	4.9	2.8	1.3
<b>1.º Quartil</b>	-0.24	-0.22	-0.12	-0.55	-0.27
<b>3.º Quartil</b>	0.45	0.41	0.56	0.10	0.25
<b>N.º estações</b>	608	597	223	602	608

**Tabela 4:** Dados estatísticos das diferenças de velocidade vertical (mm/ano) entre o ITRF2020 e as soluções individuais e solução combinada (apenas as estações utilizadas para determinação dos pesos das observações: 608).

**Fonte:** Elaboração própria.

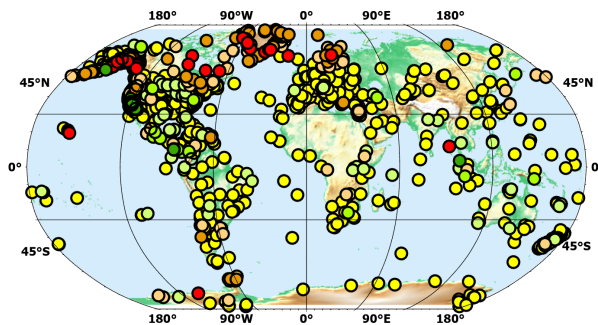
Como é possível atestar, a solução combinada apresenta um comportamento mais consistente com o ITRF2020 em ambas as análises, denotando-se um valor mais

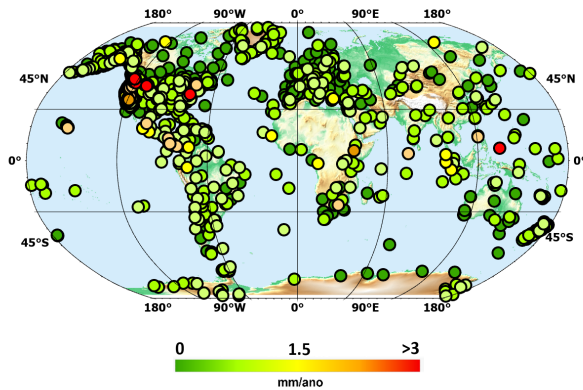
reduzido de todos os parâmetros estatísticos em comparação com as soluções individuais. Considerando a totalidade das estações, o valor do desvio padrão é reduzido numa magnitude variável de 5% em relação à solução JPL e 27% na solução SOPACU, sendo estes valores ainda mais acentuados na comparação considerando apenas as estações que serviram de base para a determinação dos pesos a atribuir a cada centro de análise, sendo neste caso a redução na ordem dos 26% em relação à solução SOPACU a 41% na solução UNAVCO.

O resultado da validação permite-nos concluir que a solução proposta é uma alternativa a ter em consideração às soluções individuais, apresentando uma maior robustez, fruto do número de observações utilizadas em cada estação, e ainda por demonstrar maior concordância com o referencial com valores mais atuais ITRF2020.

- Solução Final

Tendo em conta o processo apresentado, foi então determinada a solução final com os valores de velocidade e incerteza associada, presentes em Ferreira (2022), para um total de 2596 estações distribuídas a nível global (Ilustração 4).





**Ilustração 4:** Mapa de distribuição das estações na solução combinada e valores de velocidade vertical (em cima). Valores de incerteza estimados (em baixo).

**Fonte:** Elaboração própria.

#### 4. CONCLUSÕES

No que diz respeito à comparação entre soluções GNSS individuais, concluímos que o número de estações utilizado, a sua distribuição, a magnitude dos valores de velocidade em cada estação, e o período de observações são os fenómenos que justificam as principais diferenças existentes entre soluções. A preponderância do período de observações fica claramente demonstrada na comparação entre referenciais, onde verificamos que um período mais alargado (cinco anos de observações) resulta num valor de MAE de aproximadamente 0.3 mm/ano. Os resultados corroboram assim a pertinência da realização de uma solução combinada, que permita minimizar os efeitos característicos de cada solução individual.

A solução combinada apresentada consistiu numa solução de uma média ponderada robusta e de simples atualização composta por 2596 estações, bem distribuídas a nível global, com os respetivos valores de velocidades e incertezas associados. O processo de validação da solução permite-nos verificar uma boa concordância com as



velocidades estimadas na solução preliminar ITRF2020, sendo que a solução não se limita às estações presentes no ITRF2020, mas a todas as estações da solução, denotando-se uma redução muito significativa nos valores de desvio padrão das diferenças das velocidades com os restantes centros de análise, quando comparada com as diferenças entre as soluções individuais.

A metodologia adotada juntamente com as ferramentas desenvolvidas permite que o processo de atualização da solução seja feito de uma forma simples e praticamente automatizada, sendo apenas necessário obter as soluções de cada centro de análise no momento em que se pretende proceder à sua atualização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbondanza, C., Altamimi, Z., Chin, T. M., Gross, R. S., Heflin, M. B., Parker, J. W., & Wu, X. (2015). Three-Corner Hat for the assessment of the uncertainty of non-linear residuals of space-geodetic time series in the context of terrestrial reference frame analysis. *Journal of Geodesy*, 89(4), 313–329. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0777-x>
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W. C., & Gazeaux, J. (2016). MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 2054–2068. <https://doi.org/10.1002/2015JB012552>
- Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7), ETG 9-1-ETG 9-11. <https://doi.org/10.1029/2001jb000570>
- Bock, Y., Fang, P., Knox, A., Sullivan, A., Jiang, S., Moore, A., Argus, D., Liu, Z., & Kedar, S. (2021). *Extended Solid Earth Science ESDR System (ES 3): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) MEaSURES ROSES-17 MGviz: Map and*

*GNSS Products Visualization*. <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/measures-2/http://geoapp20.ucsd.edu/?mission=ESESE>

- Bouin, M. N., & Wöppelmann, G. (2010). Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, 180(1), 193–209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04411.x>
- Ferreira, J. (2022). *Movimentos verticais determinados por técnicas de Geodesia Espacial*. [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa].
- Gobron, K. (2021). *Statistical analysis of vertical land motions and sea level measurements at the coast* (Issue 2021LAROS004) [Université de La Rochelle; Université de Liège. Faculté des Sciences]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03566564>
- Grčić, M., Bender, J., & Bašić, T. (2020). Estimating vertical land motion from remote sensing and insitu observations in the Dubrovnik area (Croatia): A multi-method case study. *Remote Sensing*, 12(21), 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs12213543>
- Grubbs, F. E. (1948). On Estimating Precision of Measuring Instruments and Product Variability. *Journal of the American Statistical Association*, 43(242), 243–264. <https://doi.org/10.1080/01621459.1948.10483261>
- Hammond, W. C., Blewitt, G., Kreemer, C., & Nerem, R. S. (2021). GPS Imaging of Global Vertical Land Motion for Studies of Sea Level Rise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7). <https://doi.org/10.1029/2021JB022355>
- Koulali, A., Whitehouse, P. L., Clarke, P. J., Broeke, M. R., Nield, G. A., King, M. A., Bentley, M. J., Wouters, B., & Wilson, T. (2022). GPS-Observed Elastic Deformation Due to Surface Mass Balance Variability in the Southern Antarctic Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 49(4). <https://doi.org/10.1029/2021GL097109>

- Lai, Y. R., Hsu, Y. J., & You, R. J. (2017). Integrating Continuous GPS Time Series and Geodetic Leveling Data to Estimate Secular Vertical Velocity of Taiwan. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2017*, G11B-0711.
- Ludwigsen, C. A., Khan, S. A., Andersen, O. B., & Marzeion, B. (2020). Vertical Land Motion from Present-Day Deglaciation in the Wider Arctic. *Geophysical Research Letters*, 47(19). <https://doi.org/10.1029/2020GL088144>
- Martens, H. R., Argus, D. F., Norberg, C., Blewitt, G., Herring, T. A., Moore, A. W., Hammond, W. C., & Kreemer, C. (2020). Atmospheric pressure loading in GPS positions: dependency on GPS processing methods and effect on assessment of seasonal deformation in the contiguous USA and Alaska. *Journal of Geodesy*, 94(12). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01445-w>
- Pan, Y., Hammond, W. C., Ding, H., Mallick, R., Jiang, W., Xu, X., Shum, C. K., & Shen, W. (2021). GPS Imaging of Vertical Bedrock Displacements: Quantification of Two-Dimensional Vertical Crustal Deformation in China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020JB020951>
- Peltier, W. R., Argus, D. F., & Drummond, R. (2015). Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G-C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 450–487. <https://doi.org/10.1002/2014JB011176>
- Pfeffer, J., Spada, G., Mémin, A., Boy, J. P., & Allemand, P. (2017). Decoding the origins of vertical land motions observed today at coasts. *Geophysical Journal International*, 210(1), 148–165. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx142>
- Qin, S., Wang, W., & Song, S. (2018). Comparative study on vertical deformation based on GPS and leveling data. *Geodesy and Geodynamics*, 9(2), 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.07.005>

- Santamaría-Gómez, A., Bouin, M.-N., Collilieux, X., & Wöppelmann, G. (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *Journal of Geophysical Research*, 116(B1), B01405. <https://doi.org/10.1029/2010JB007701>
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Collilieux, X., Guichard, M., Míguez, B. M., Tiphaneau, P., & Wöppelmann, G. (2012). Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using 89 a state-of-the-art GPS velocity field. *Global and Planetary Change*, 98–99, 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.007>
- Santamaría-Gómez, A., & Mémin, A. (2015). Geodetic secular velocity errors due to interannual surface loading deformation. *Geophysical Journal International*, 202(2), 763–767. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv190>
- Serpelloni, E., Faccenna, C., Spada, G., Dong, D., & Williams, S. D. P. (2013). Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(11), 6003–6024. <https://doi.org/10.1002/2013JB010102>
- Vernotte, F., Delporte, J., & Brunet, M. (2004). A re-revisited three-cornered hat method for estimating clock instabilities. *18th European Frequency and Time Forum (EFTF 2004)*, 128–133. <https://doi.org/10.1049/cp:20040834>
- Wang, S. Y., Li, J., Chen, J., & Hu, X. G. (2021). Uncertainty assessments of load deformation from different gps time series products, GRACE estimates and model predictions: A case study over Europe. *Remote Sensing*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/rs13142765>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 54,

Issue 1, pp. 64–92). Blackwell Publishing Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

Zulkifli, N. A., Md Din, A. H., & Md Som, Z. A. (2018). Vertical land motion quantification using space-based geodetic methods: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012024>