

Análise do comportamento do PPP e do TEC ionosférico no pós-processamento de dados GNSS de terremotos ocorridos no Chile: Maule M8.8 em 2010 e Iquique M8.2 em 2014

Analysis of the behavior of PPP and ionospheric TEC in the post-processing GNSS data from earthquakes in Chile: Maule M8.8 in 2010 and Iquique M8.2 in 2014

Lissa Cunha de Almeida¹; Paulo Sérgio de Oliveira Júnior²; Tiago Lima Rodrigues³; Maria Vitória Pagno⁴

¹ Universidade Federal do Paraná, PPGCG/Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: lcageofisica@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9347-6013>

² Universidade Federal do Paraná, PPGCG/Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: paulo.junior@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7000-6924>

³ Universidade Federal do Paraná, PPGCG/Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: tiagorodrigues@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-9037>

⁴ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, Curitiba/PR, Brasil. Email: mariapagno@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4986-3074>

Resumo: O Posicionamento GNSS é uma ferramenta poderosa em sismologia capaz de monitorar movimentos crustais em momentos de atividade sísmica, as influências das ondas de gravidade no TEC, e quantificar ondas provenientes de eventos sísmicos de alta intensidade. O objetivo deste trabalho é corroborar com pesquisas que utilizem GNSS em estudos de terremotos, através da busca de assinaturas sísmicas no posicionamento e no TEC. Para tal, dois estudos de caso foram realizados para eventos no Chile, o terremoto em Maule (Mw 8.8), em 27 de fevereiro de 2010, e em Iquique (Mw 8.2), em 1 de abril de 2014. Neste estudo, foram analisadas soluções do PPP e TEC ionosférico, utilizando dados de estações GNSS localizadas nas proximidades do epicentro destes terremotos. Os detalhes e a natureza dos terremotos continuam desafiadores por meio de observações das técnicas tradicionais, sendo assim, as discussões geradas neste artigo suportam a continuidade da aplicação do GNSS em investigações de monitoramento de terremotos e também apresentam perspectivas importantes para estudos futuros na área. Este é um viés necessário para que medidas sejam tomadas no aprimoramento de mecanismos responsáveis pelo monitoramento e prevenção de áreas propensas à ocorrência de terremotos de alta magnitude.

Palavras-chave: Posicionamento GNSS; TEC ionosférico; Terremotos.

Abstract: GNSS positioning has been a powerful tool in seismology, enabling to monitoring of crustal movements during seismic events, monitor the influence of the atmospheric gravity waves on the Total Electron Content (TEC), and even quantifying seismic wave, often with significant advantages over land-based seismographs. Therefore, the goal of this study is to contribute to research that employs GNSS in earthquake analysis by identifying seismic signatures in the GNSS positioning and TEC, as well as by analyzing ionospheric disturbances associated with seismic events. Thereby, two case studies were carried out for seismic events in Chile: the Maule earthquake (Mw 8.8) on February 27, 2010, and the Iquique earthquake (Mw 8.2) on April 1, 2014. In this study, PPP solutions and TEC data were analyzed using observations from GNSS stations located near the earthquake epicenters. The details and nature of earthquakes remain challenging through observations of traditional techniques. Therefore, the discussions presented in this article support the application of PPP and also brought some important perspectives for future studies in this area. This is a necessary bias for the implementation of measures aimed at improving the mechanisms responsible for monitoring and preventing high-intensity earthquakes occurrences in vulnerable areas.

Keywords: GNSS positioning; Ionospheric TEC; Earthquake.

1. Introdução

Os terremotos são ocorrências geológicas até então inevitáveis, ou seja, é um fenômeno de grande escala que ocorre de forma repentina e sua frequência está relacionada à tectônica de placas da região em que ocorre o fenômeno (PRESS *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2009). Os riscos que esses eventos apresentam para as sociedades que vivem próximas a regiões de intensa atividade tectônica são diversos, envolvendo casualidades civis como desabamentos, incêndios e até mesmo tsunamis em alguns casos. Riscos como estes tendem a ser mitigados uma vez que se entende melhor a tectônica de placas da região e as diferentes tecnologias de monitoramento e prevenção de terremotos que podem ser utilizadas.

O oeste do continente sul-americano é uma região que sofre com a questão da vulnerabilidade de suas estruturas somada ao fato de possuir áreas densamente populosas em locais de moderada a alta intensidade de eventos sísmicos. Desta forma, se torna importante desenvolver e aprimorar cada vez mais ferramentas que possam monitorar e ajudar a reduzir riscos e casualidades civis. Diante de tais motivações, este trabalho tem como objetivo revisar e avaliar o uso do processamento e análise de dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) no contexto de grandes terremotos, precisamente eventos ocorridos na América do Sul. O principal interesse é identificar ocorrências de possíveis assinaturas sísmicas na análise dos dados, tais como perturbações sismo-ionoféricas e variações posicionais nas estimativas GNSS. Nesta pesquisa estas estimativas envolvem os parâmetros PPP (*Precise Point Positioning*) e o conteúdo total de elétrons da ionosfera, conhecido na comunidade científica como TEC (*Total Eletron Content*). Estudos realizados neste contexto apresentaram resultados promissores com a aplicação do posicionamento GPS/GNSS em casos similares (NIKOLAIDIS *et al.*, 2001; LIU *et al.*, 2004; HAYAKAWA *et al.*, 2011; PEREVALOVA *et al.*, 2014; JIN *et al.*, 2015). As análises presentes nesta pesquisa suportam a relação existente entre as ondas sísmicas provenientes de eventos sísmicos de grande magnitude e sua influência nos distúrbios ionosféricos observados logo em seguida a estes eventos.

2. Metodologia

Simplificadamente esta pesquisa seguiu as etapas apresentadas no fluxograma da figura 1.

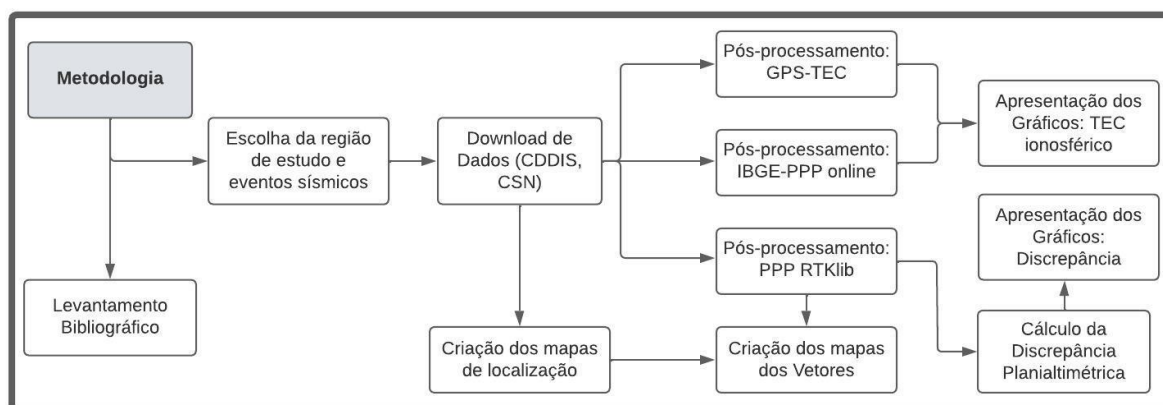


Figura 1 – Sequência metodológica utilizada.

Fonte: Autores (2025).

A primeira etapa abrangeu o levantamento bibliográfico que ocorreu durante o decorrer de toda a pesquisa e paralelamente embasou os requisitos para a escolha da região do estudo (região do círculo de fogo do pacífico) e dos estudos de casos a serem analisados (Terremoto de Maule em 2010 e de Iquique em 2014). Em seguida as estações próximas aos eventos foram mapeadas e os dados das estações disponíveis foram extraídas dos respectivos centros de dados para a criação dos mapas de localização e pós-processamento de dados, estas informações encontram-se presente na seção 2.1 e 2.2 e suas respectivas subseções. A etapa final consistiu na criação de gráficos para apresentação e discussão dos resultados, estes estão presentes na seção 3 deste artigo e suas respectivas subseções.

2.1 Localização dos abalos sísmicos estudados

O terremoto de Maule ocorreu na região centro-sul do Chile em 27 de fevereiro de 2010 às 03:34 do horário local (06:34 UTC). O tremor intenso, com magnitude de momento de Mw 8.8, profundidade de 22,5 km, durou cerca de 3 minutos e é considerado o sexto maior terremoto já registrado na história. O terremoto de Iquique ocorreu em 1 de abril de 2014 às 20:46 do horário local (23:46 UTC), cuja magnitude foi de Mw 8.2 e profundidade de 25 km, na costa oeste do norte do Chile, como resultado de um cavalcamento de rasa profundidade das placas na costa chilena (informações retiradas da publicação de Hayes *et al.*, 2017). A figura 2 mostra a localização do epicentro de cada um dos terremotos supracitados (Figura 2.A. representando Maule e figura 2.B. representando Iquique) e as estações mais próximas com dados disponíveis de cada.

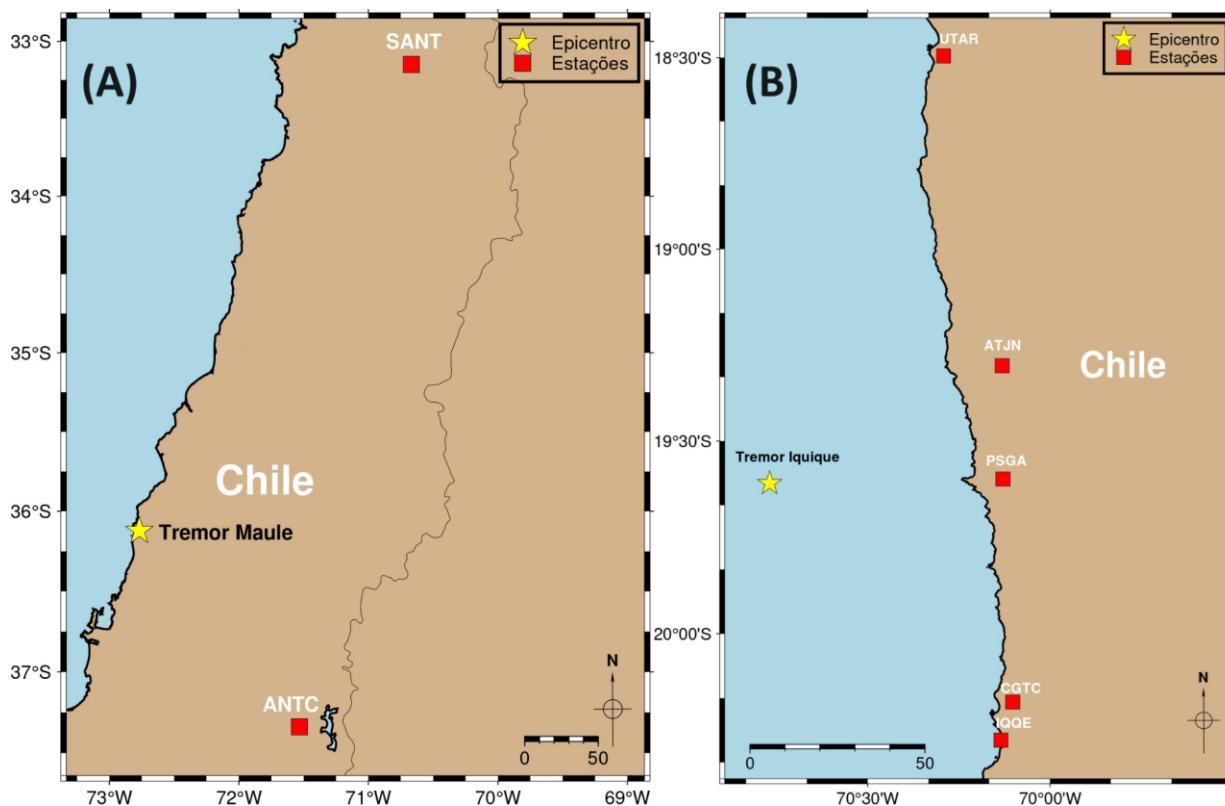


Figura 2 – Mapa de localização do epicentro dos terremotos de Maule (A) e Iquique (B) e suas respectivas estações geodésicas (IGS/CSN).

Fonte: Autores (2025).

As características de magnitudes ≥ 6.5 e a profundidade ≤ 40 km foram fatores relevantes para a escolha dos eventos deste estudo. Em geral, as chances de registro de distúrbios no TEC estão correlacionadas com a magnitude do evento, que de acordo com Perevalova *et al.* (2014) e seu estudo devem respeitar a relação $M_w \geq 6.5$. Hayakawa *et al.* (2011) também observou uma significativa correlação entre os terremotos e distúrbios ionosféricos para eventos de magnitude superior a 6 e profundidade epicentral inferior a 40 quilômetros. Portanto, a magnitude e profundidade epicentral destes eventos foram fatores determinantes para a escolha dos mesmos neste trabalho, maximizando as condições para a caracterização destes.

As estações geodésicas próximas ao evento e que possuíam dados disponíveis foram mapeadas e integradas à pesquisa. A tabela 1 apresenta as coordenadas de cada estação e suas respectivas distâncias em relação ao epicentro do terremoto ao qual estão relacionadas.

Tabela 1 – Valores de coordenadas e distâncias das estações ao epicentro do terremoto a qual estão relacionadas.

Estação (<i>IGS/CSN</i>)	Coordenadas Geográficas		Distância do Epicentro (km)
	Lat (°N)	Long (°E)	
TERREMOTO DE MAULE			
ANTC (<i>IGS</i>)	- 37.338	- 71.532	180
SANT (<i>IGS</i>)	- 33.150	- 70.668	387
TERREMOTO DE IQUIQUE			
UTAR (<i>CSN</i>)	- 18.495	- 70.292	127
ATJN (<i>CSN</i>)	- 19.304	- 70.131	71
PSGA (<i>CSN</i>)	- 19.598	- 70.129	67
CGTC (<i>CSN</i>)	- 20.176	- 70.063	102
IQQE (<i>CSN</i>)	- 20.275	- 70.134	104

Fonte: Autores (2025).

A distância das estações em relação ao epicentro é um parâmetro que influencia diretamente no monitoramento de variações posicionais associadas a terremotos, é, desta forma, um parâmetro que deve ser significativamente considerado. Quanto mais próxima as estações estiverem em relação ao epicentro, maior será a perturbação na posição destas estações. No caso deste estudo a estação ANTC se encontra mais próxima ao epicentro do terremoto de Maule e a estação PSGA mais próxima ao epicentro do terremoto de Iquique.

2.2 Pós-processamento de dados

Os dados de entrada para este trabalho foram arquivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), efemérides e arquivos de correções (correção do relógio, antena, maré, código diferencial e parâmetros de orientação da Terra) fornecidos pelos centros de dados do IGS (*International GNSS Service* - <https://igs.org/data/>) e CSN (*Centro Sismológico Nacional* - <https://gps.csn.uchile.cl/data/>). O pós-processamento foi realizado utilizando o software RTKlib versão 2.4.2 (TAKASU, 2020). Este software, através do módulo RTKpost, é capaz de proporcionar soluções de posicionamento para diversos métodos de posicionamento. Para este estudo utilizou-se do método PPP (*Precise Point Positioning*), pois suas soluções de posicionamento podem atingir, globalmente, acurácia de centímetros a decímetros (KING *et al.*, 2002; GRINTER & ROBERTS, 2011), o que se adequa a aplicações de monitoramento de movimentos crustais, como é o caso dos terremotos. As configurações utilizadas no pós-processamento dos dados estão apresentadas também na tabela 2.

Tabela 2 – Configurações de processamento e arquivos utilizados no RTKpost.

CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTO	
Modo de Posicionamento	PPP estático e cinemático
Frequências / Observável	L1 + L2 / Livre de ionosfera
Filtro de Kalman	Forward
Constelação	GNSS
Resolução de ambiguidades	Não (float)
Correção Troposférica	Estimativa do ZTD (<i>Zenith Tropospheric Delay</i>)
Correção Ionosférica	Observável Combinada Livre de Ionosfera com L1 e L2
Máscara de Elevação	10°
Efemérides	Transmitida + Precisa Final (IGS)
Intervalo de Amostragem	30 segundos
Demais correções	IERS Convention (2010)

Fonte: Autores (2025).

O filtro de Kalman *forward* é aplicável para contextos de monitoramento em tempo real, desta forma foi a escolha para o pós-processamento dos dados deste trabalho, fornecendo uma perspectiva de como seria o monitoramento no momento do evento. O leitor interessado poderá obter mais detalhes no manual do programa RTKLIB em Takasu (2013), inclusive sobre as respectivas formulações matemáticas aplicadas. Foram desconsiderados os efeitos de 2ª e 3ª ordem da refração ionosférica, os quais representam menos de 1% do efeito ionosférico total, bem como efeitos de carregamentos oceânico não maré, atmosférica maré e não maré e hidrológico (SANZ SUBIRANA *et al.*, 2013; PETIT & LUZUM, 2010).

2.2.1 Cálculo das discrepâncias planimétricas nas coordenadas estimadas

As diferenças absolutas, denominadas nesta pesquisa por discrepâncias, foram calculadas para identificação da variação posicional das coordenadas nas estações geodésicas estudadas. O cálculo das discrepâncias se realizou através da diferença entre as coordenadas calculadas e as coordenadas de referência, conforme Almeida & Dal Poz (2016), presente nas equações 1 e 2. Considerou-se como coordenada de referência os valores calculados para o dia 26 de fevereiro de 2010 (em PPP no modo estático) e as coordenadas estimadas dos valores calculados no dia da ocorrência do terremoto, dia 27 (em PPP no modo cinemático). Em relação a esta solução de referência foram analisadas as variações das coordenadas em termos de latitude e longitude para o terremoto de Maule e Iquique.

$$\Delta\phi_{rad} = |\phi_{calc} - \phi_{ref}|, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{rad} = |\lambda_{calc} - \lambda_{ref}|, \quad (2)$$

Onde,

- $\Delta\phi_{rad}$ e $\Delta\lambda_{rad}$ são as discrepâncias geodésicas calculadas, em radianos;
- ϕ_{ref} e λ_{ref} são as coordenadas geodésicas de referência, em radianos;
- ϕ_{calc} e λ_{calc} são as coordenadas geodésicas estimadas, em radianos.

Para conversão destes valores em metros utilizou-se das seguintes equações (TORGE, 2001):

$$\Delta\phi_{(m)} = M * \Delta\phi_{rad}, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_{(m)} = N * \Delta\lambda_{rad} * \cos\phi, \quad (4)$$

Sendo M o raio de curvatura da seção meridiana e N o raio de curvatura (em metros) da seção primeiro vertical para um dado elipsóide de referência, calculados por:

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\phi)^{3/2}}, \quad (5)$$

$$N = \frac{a}{(1-e^2\sin^2\phi)^{3/2}}. \quad (6)$$

Para o caso do GRS80 tem-se:

- $e^2 = 2,0067395$ (segunda excentricidade);
- $a = 6.378.137,000$ m (semi-eixo maior do GRS80);
- $b = 6.356.752,314$ m (semi-eixo menor do GRS80).

2.2.2 Conteúdo Total de Elétrons da Ionosfera (TEC)

Para o cálculo do TEC ionosférico foi empregado o software GPS-TEC, desenvolvido por Gopi Seemala no Boston College. Este programa é uma ferramenta útil e simples para derivar o TEC ionosférico de dados GPS através dos arquivos de observação RINEX (SEEMALA, 2023). O programa obtém os valores do TEC absoluto, minimizando a variabilidade do TEC através da utilização das tendências de hardware, do satélite e do receptor, disponibilizados pela Universidade de Berna (VALLADARES *et al.*, 2009).

A análise do TEC foi realizada em cada satélite visível em três diferentes momentos: nos dias anteriores, nos dias posteriores e nos dias de fato da ocorrência dos terremotos. A fim de analisar a influência da atividade geomagnética e da cintilação ionosférica nos valores de TEC durante os eventos, foram consideradas as influências do índice diário de atividade geomagnética (Σkp) (OIWAKE CHO & KU, 2021) e do índice de cintilação ionosférica S4 (quarto harmônico).

O Σkp estima o nível de atividade geomagnética para o respectivo dia. Segundo Perevalova *et al.* (2014) quando $\Sigma kp \leq 16$ as condições do dia são consideradas de baixa atividade geomagnética, enquanto que acima disso (Σkp variando entre 17 e 40) as condições do dia são consideradas de moderada à forte atividade geomagnética. O índice S4 mapeia a intensidade da cintilação ionosférica e é calculado através da formulação presente na página da Scintec Project (www.inpe.br/scintec/pt/scintil.php). De acordo com Tiwari *et al.* (2011) este índice pode ser classificado em categorias dependendo da intensidade do sinal que ocorreu no dia e no local em questão em: forte ($S4 \geq 1.0$), moderado ($0.5 \leq S4 \leq 1.0$), fraco ($0 \leq S4 \leq 0.5$).

3. Resultados e discussão

3.1 Terremoto de Maule

3.1.1 Variação Posicional

Os resultados do pós-processamento PPP do RTKlib para os eventos de Maule estão dispostos na figura 3. Observa-se que em todas as estações observadas é perceptível uma descontinuidade nos dados devido à ruptura do terremoto (horário do terremoto). Essa descontinuidade ocorre no intervalo entre 6 e 7 UTC, sendo o horário oficial registrado do terremoto de Maule às 6:34 UTC.

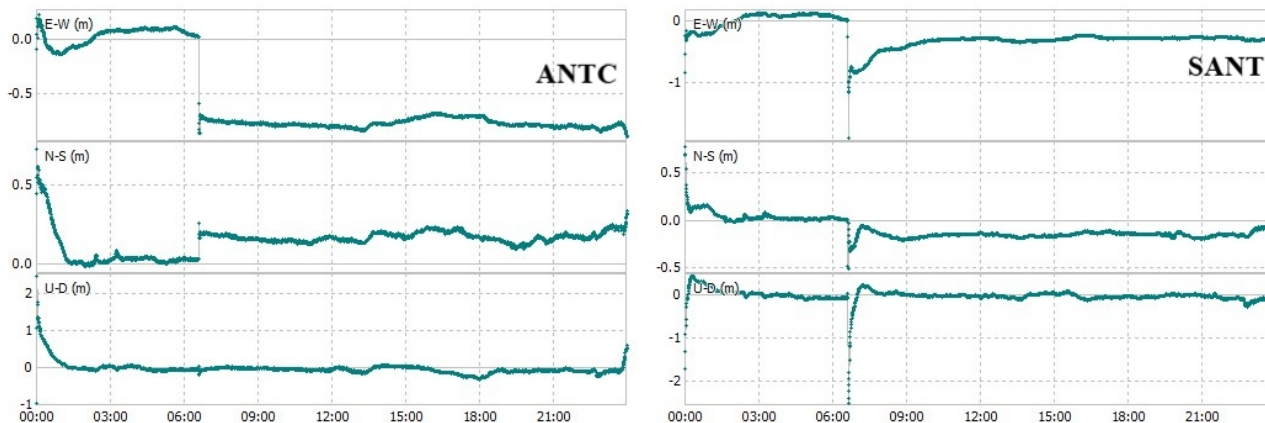


Figura 3 – Gráficos de pós-processamento obtidos através do RTKplot das estações ANTC (esquerda) e SANT (direita) para o dia 27 de fevereiro de 2010.

Fonte: Autores (2025).

Os comportamentos da variação latitudinal e longitudinal são similares considerando a descontinuidade próximo ao horário de ruptura do terremoto, no entanto a componente longitudinal (E-W) apresenta variações mais significativas na discrepância planimétrica quando comparada à componente latitudinal (N-S), como constatado também por Montecino *et al.* (2017) em seu estudo. Este comportamento traz os primeiros indícios para a inferência da direção de movimentação crustal, além de quantitativamente indicar os valores para esta movimentação, e pode estar associada à direção de subducção da placa de Nazca em relação a placa Sul-Americana, que movimenta-se sentido leste (HAYES *et al.*, 2017). Pirti (2024) também apresenta resultados de movimentação, das mesmas estações para o mesmo evento, que indicam que no momento do terremoto de Maule há uma significativa movimentação sudeste e sudoeste, apresentando uma maior interferência nas componentes horizontais.

Entre os intervalos de 6 e 7 UTC também é possível observar que a descontinuidade que ocorre no momento da ruptura para a estação ANTC se faz permanente no período posterior, enquanto que para a estação SANT há uma redução da diferença criada pela descontinuidade.

Para uma observação mais aproximada dos dados, tendo em vista que o tempo de convergência dos dados ocorreu brevemente, especificamente para o terremoto de Maule, foi realizado um recorte nesta série temporal e os gráficos estão dispostos na figura 4. As soluções são apresentadas, exibindo os valores das discrepâncias planimétricas, em metros, para as estações SANT e ANTC.

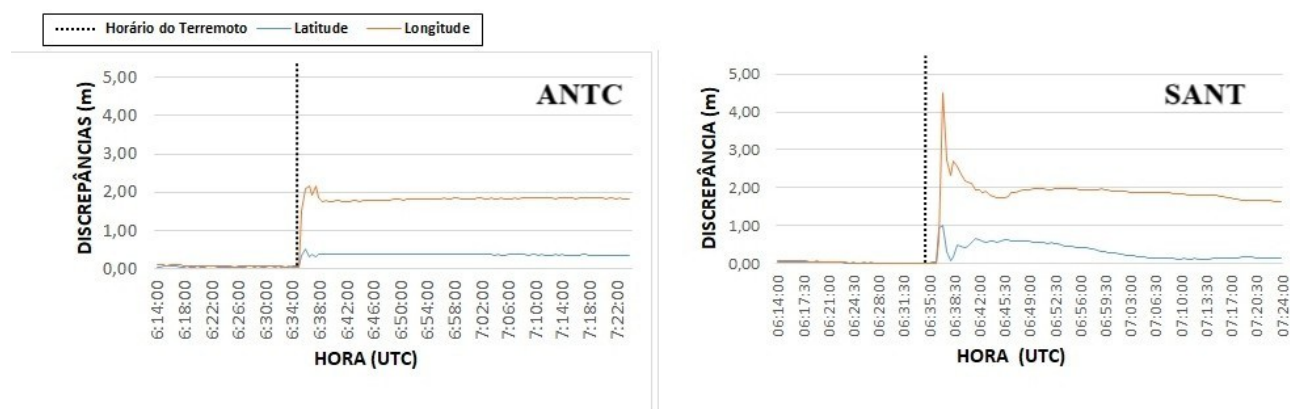


Figura 4 – Gráficos de recorte temporal das discrepâncias planimétricas obtidas através das soluções RTKlib para estação ANTC (esquerda) e SANT (direita) para o dia 27 de fevereiro de 2010.

Fonte: Autores (2025).

Conforme observado nos gráficos da figura 4, as soluções para as componentes horizontais em ANTC apresentaram variação para a componente E-W de aproximadamente 2,2 m, enquanto para a componente N-S as variações ficaram entre aproximadamente 0,4 m. O desvio padrão médio para estas componentes foram computadas com uma acurácia de 3-4 cm. O pico ocorre aproximadamente 1 minuto após a ruptura (06:35 UTC). Os valores de discrepância absoluta apresentados não necessariamente indicam a variação real que a estação geodésica ANTC sofreu, mas sim a diferença entre a posição de referência da estação geodésica (obtida com os valores de posicionamento no dia anterior do terremoto) e posição estimada (em PPP cinemático no dia do evento) exatamente no momento de ruptura do terremoto. Sendo assim, após o evento existe a possibilidade de que a estação que sofreu maiores variações no momento da ruptura não mantenha essa diferença da posição nos dias seguintes.

As discrepâncias das soluções em SANT apresentadas se assemelham ao comportamento observado na estação ANTC (salto próximo ao momento do terremoto). A maior variação continua a ser na componente E-W e ocorre às 06:36 UTC com amplitude de aproximadamente 4,5 m. Sendo assim, os gráficos expostos caracterizam o momento em que ocorre a influência da ruptura no posicionamento, sendo que o atraso dessa caracterização possivelmente está relacionado à

distância da estação ao epicentro do terremoto. A estação ANTC, se encontra a 180 km do epicentro, sofre a influência pelo menos 1 minuto antes que a estação SANT, que fica a 387 km do mesmo.

Uma outra forma de visualização da movimentação do evento é através de vetores de deslocamento, a figura 5 apresenta a plotagem dos vetores, os quais demonstram as direções planimétricas de movimentação das estações geodésicas próximas ao epicentro do tremor para os dias 26, 27 e 28 de fevereiro de 2010.

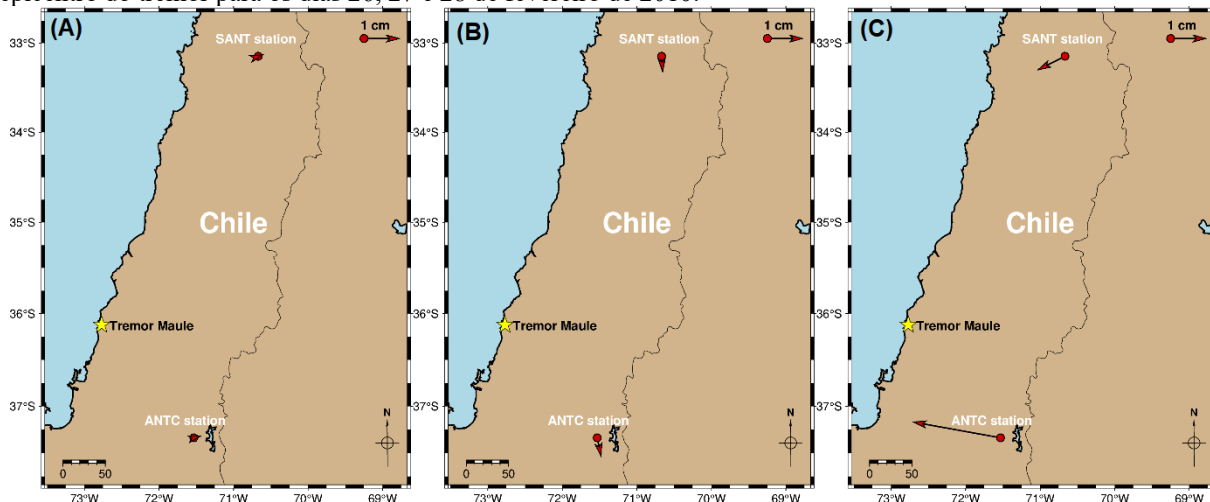


Figura 5 – Vetores de direção de deslocamento das estações geodésicas próximas ao terremoto de Maule para os dias 26 (A), 27 (B) e 28 (C) de fevereiro de 2010.

Fonte: Autores (2025).

A estação mais próxima ao epicentro do terremoto de Maule foi a estação ANTC, que no dia do terremoto apresentou uma maior variação posicional permanente (Figura 5.B.). É ainda mais aparente a sua movimentação através dos vetores calculados um dia após o terremoto (5.C.). É esperado que as estações mais próximas ao terremoto apresentem variações posicionais mais significativas, quando comparadas às outras estações, pois a energia mecânica produzida por tal evento é dissipada ao longo da distância entre o epicentro e o terremoto.

3.1.2 TEC ionosférico

No mínimo 6 satélites estavam “visíveis” no momento do terremoto de Maule para as estações ANTC e SANT. Nesta seção serão apresentados somente os resultados de estimativa de TEC para os satélites que evidenciam possíveis distúrbios co-sísmicos (PRN20/23) ou até mesmo que foram analisados em outros trabalhos, como é o caso do PRN20 que foi analisado por Perevalova *et al.* (2014) quando fez a análise de dados da estação CONZ, atualmente desativada, e por isso não utilizada nesta pesquisa.

Observando os resultados dos mesmos satélites nas duas estações escolhidas, nas figuras 6 e 7, estão dispostos os gráficos que indicam os comportamentos das curvas do TEC ionosférico no dia anterior (26 de fevereiro de 2010), posterior (28 de fevereiro de 2010), e no dia de fato da ocorrência do terremoto (27 de fevereiro de 2010). A comparação entre os dias possui o objetivo de verificar também como seria o comportamento do TEC em condições “normais”, ou seja, condições em que não tenha havido a influência do terremoto e suas repercussões no conteúdo total de elétrons da ionosfera.

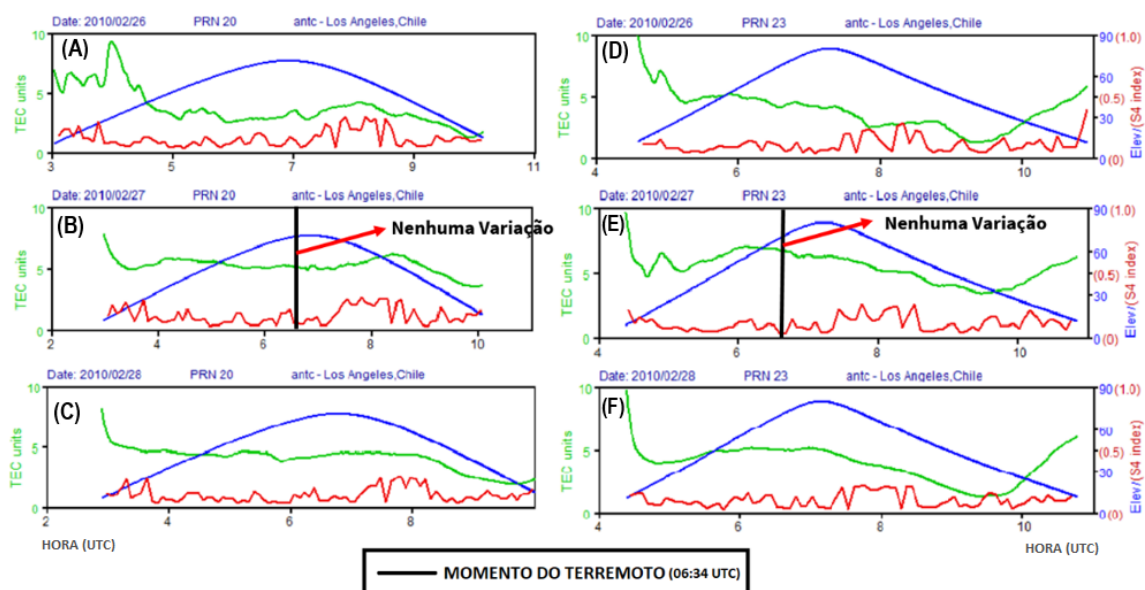


Figura 6 – Comportamento da curva do TEC para os satélites 20 (A, B, C) e 23 (D, E, F) da estação ANTC nos dias 26, 27 e 28/fev/2010, recortes temporais próximos da ocorrência do terremoto.
Fonte: Autores (2025).

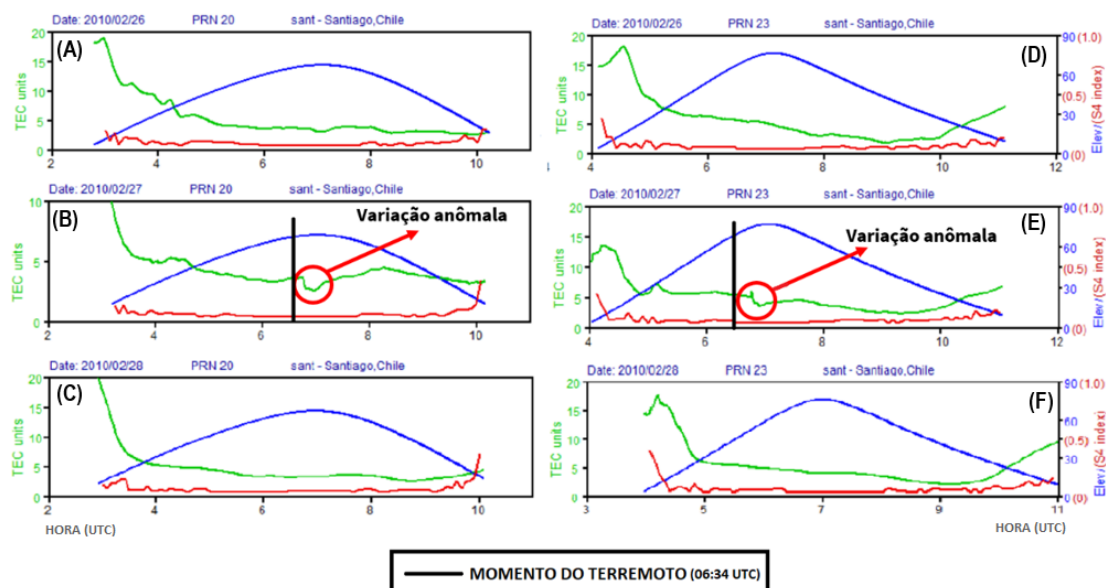


Figura 7 – Comportamento da curva do TEC para os satélites 20 (A, B, C) e 23 (D, E, F) da estação SANT nos dias 26, 27 e 28/fev/2010, recortes temporais próximos da ocorrência do terremoto.
Fonte: Autores (2025).

A linha em verde, nas figuras 6 e 7, indica a variação do TEC ionosférico em TECU. As variações diurnas do TEC ocorrem devido a incidência da radiação solar, tendo seu pico entre 12 e 16 horas do horário local (LT) e um segundo pico ocorre em regiões de baixa latitude, entre 21 e 22 horas (LT). Observa-se também os valores do índice S4 (curva vermelha), que mapeia a intensidade da cintilação ionosférica, quando inferiores a 0,7 permitem afirmar que houve fraca atividade ionosférica no período observado (SOUZA *et al.*, 2015). Utilizando-se da definição de Perevalova *et al.* (2014), que

determinou os limiares de intensidade do índice Σkp , pôde-se considerar que o terremoto de Maule ocorreu sob condições geomagnéticas calmas, o que ocorre devido ao período de baixa atividade solar, sendo o $\Sigma kp = 2$ neste dia.

Na Figura 6 apresenta-se o comportamento do TEC ionosférico observado na estação ANTC em relação aos satélites 20 e 23. Não há nenhum indício de variação anômala que interrompa a continuidade da curva do TEC próximo ao horário do terremoto. Já na Figura 7 apresenta-se o comportamento do TEC ionosférico para os mesmos satélites, porém em relação à estação SANT. Neste caso, a continuidade no comportamento do TEC é interrompida e é possível observar pequenas variações, de aproximadamente 1 TECU para o satélite 20 e 2 TECU para o satélite 23, nas estimativas do TEC próximo ao horário do terremoto.

Jin *et al.* (2015) em sua pesquisa acerca da sismologia ionosférica analisa dois eventos sísmicos: Wechuan Mw 8.0, em 2008 e Tohoku Mw 9.0, em 2011. Para o terremoto de Wechuan amplitudes menores de perturbação são detectadas e seu valor máximo é de 0,5 TECU, com duração curta da perturbação. Enquanto, que para o terremoto de Tohoku os distúrbios sismo-ionosféricos significativos são encontrados acima de 2 TECU. Desta forma, as magnitudes das discontinuidades apresentadas no TEC permeiam valores aceitáveis no meio científico, podendo indicar influência das ondas sísmicas deste terremoto no TEC ionosférico.

3.2 Terremoto de Iquique

3.2.1 Variação Posicional

Os resultados do pós-processamento PPP do RTKlib para os eventos de Iquique estão dispostos na figura 8. Observa-se, assim como no tremor de Maule, a discontinuidade nos dados devido à ruptura do terremoto (horário do terremoto). Essa discontinuidade ocorre entre 23:30 e 24 UTC, sendo o horário oficial do terremoto de Iquique às 23:46 UTC. Na figura 8 são apresentadas as discrepâncias planimétricas para 5 estações GNSS/CSN permanentes mais próximas ao terremoto (ATJN, CGTC, IQQE, PSGA e UTAR).

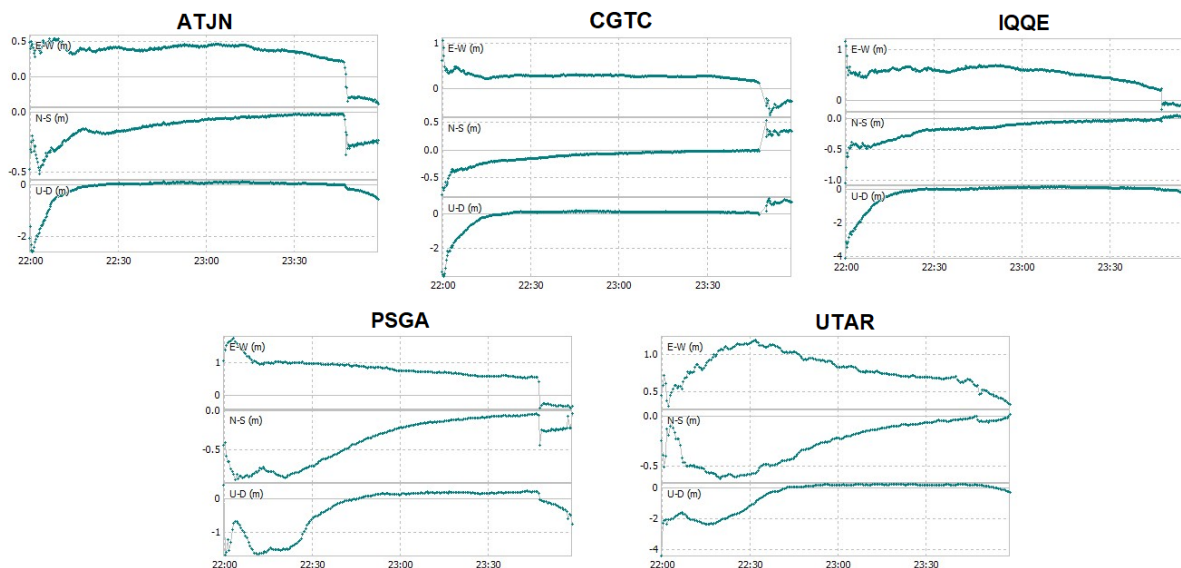


Figura 8 – Discrepância planimétrica para as 5 estações da CSN (ATJN, CGTC, IQQE, PSGA e UTAR) próximas ao tremor de Iquique. Dispostas em um intervalo de 2 horas que engloba o horário do tremor (23:46 UTC).

Fonte: Autores (2025).

O recorte temporal apresentado nos gráficos acima exhibe um intervalo de 2 horas de dados (entre 22-24 UTC). Este tipo de recorte visa observar especificamente o horário que envolveu o evento sísmico. Nota-se a variação posicional das coordenadas nas estações apresentadas próximo ao horário do terremoto. Também é observado que as estações mais

próximas, como PSGA e ATJN, sofreram maiores variações em seu posicionamento, especialmente nas componentes horizontais, apresentando um valor máximo de discrepância de aproximadamente 0,7 metros. O desvio padrão médio para estas componentes foram computadas com uma acurácia de 10-15 cm.

Foram analisados, assim como para o tremor de Maule, os vetores de deslocamento das estações IQQE, CGTC, PSGA, ATJN e UTAR com respeito às posições precedentes ao terremoto. A figura 9 apresenta a visualização dos resultados, os quais demonstram as direções planimétricas de movimentação das estações geodésicas próximas ao epicentro desse terremoto.

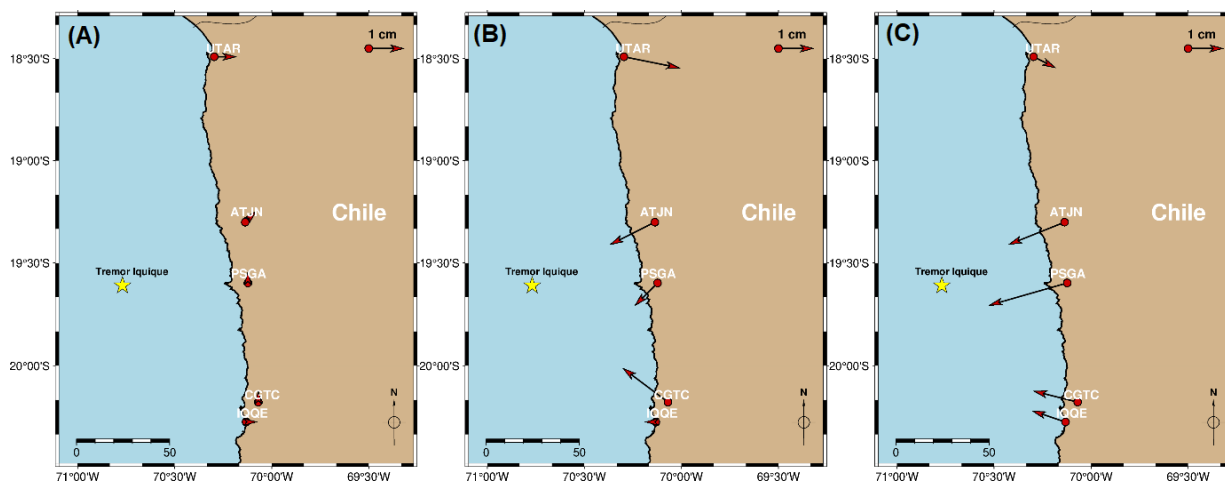


Figura 9 – Vetores de direção de deslocamento das estações geodésicas próximas ao terremoto de Iquique para os dias (A) 31 de março, (B) 1 de abril e (C) 02 de abril de 2014.

Fonte: Autores (2025).

Pode-se observar que a distância entre as estações no terremoto de Iquique é bem inferior à distância entre as estações no terremoto de Maule (Figura 5). As estações mais próximas entre si, não diferem tanto em direção de deslocamento, como é o exemplo das estações ATJN e PSGA e também das estações CGTC e IQQE. No entanto, a estação mais distante, como o exemplo da estação de UTAR, não segue o mesmo padrão direcional para o terremoto de Iquique. Essas mudanças de direção de movimentação das estações são esperadas, tendo em vista que regiões de encontro de placas, especialmente por grandes extensões, podem apresentar pontos com diferentes direções de movimentações relacionadas ao comportamento de falhas menores.

3.2.2 TEC ionosférico

Para as estações próximas ao terremoto, no mínimo 8 satélites “visíveis” envolveram o momento do terremoto. Na figura 10 é possível observar o comportamento do TEC para os satélites de número PRN19 e PRN32, rastreados pela estação IQQE. A figura 11 apresenta os resultados para os satélites PRN19 e PRN23, rastreados pela estação UTAR. Já a figura 12 traz os resultados para os satélites PRN19 e PRN32, rastreados pela estação PSGA.

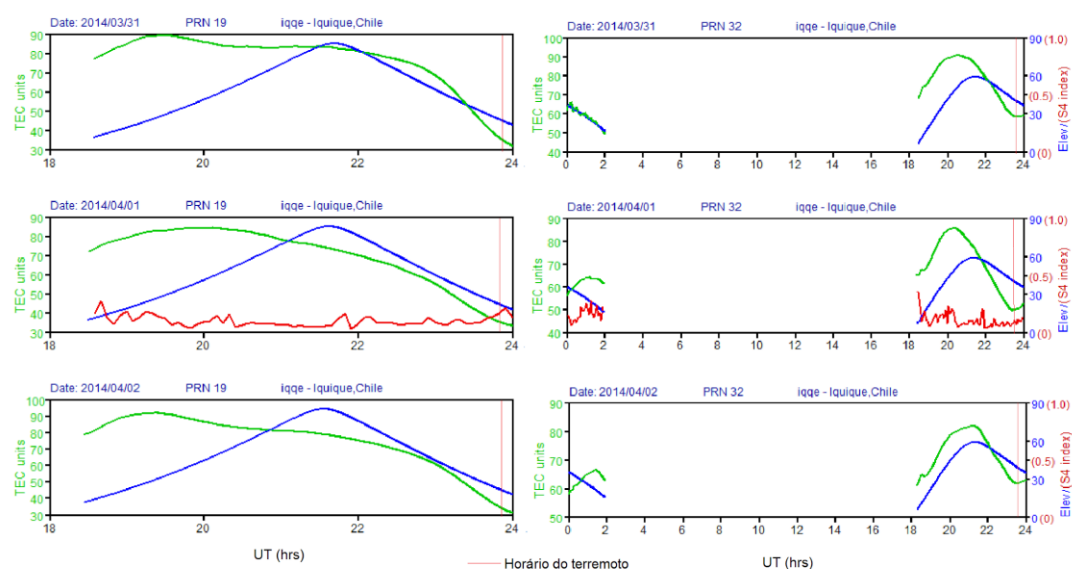


Figura 10 – Comportamento da curva do TEC para o satélite 19 e 32 da estação IQQE nos dias 31/mar e 01, e 02/abril/2014.

Fonte: Autores (2025).

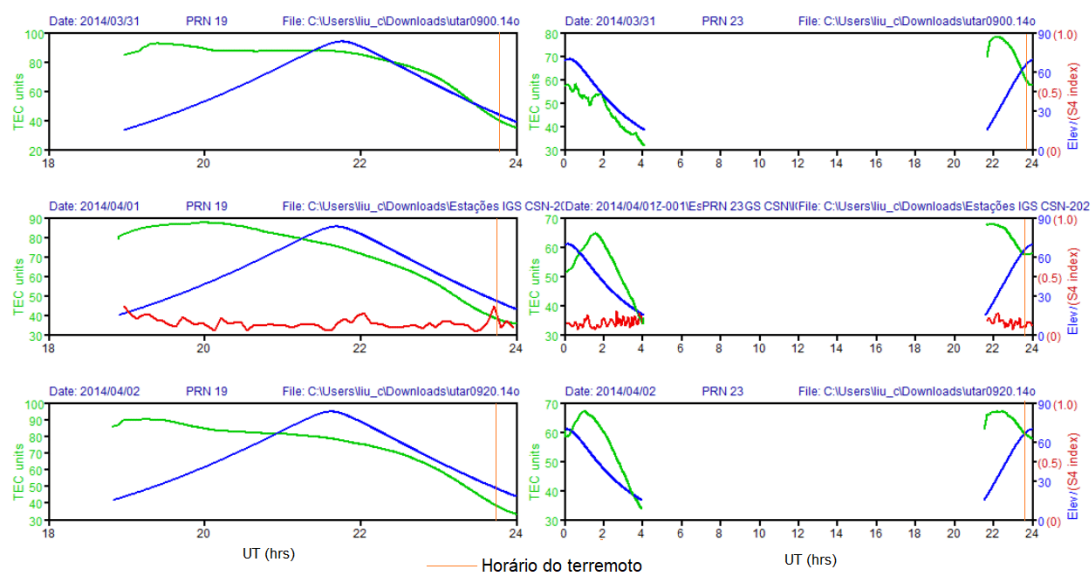


Figura 11 – Comportamento da curva do TEC para os satélites 19 (esquerda) e 23 (direita) da estação UTAR nos dias 31/mar e 01, e 02/abril/2014.

Fonte: Autores (2025).

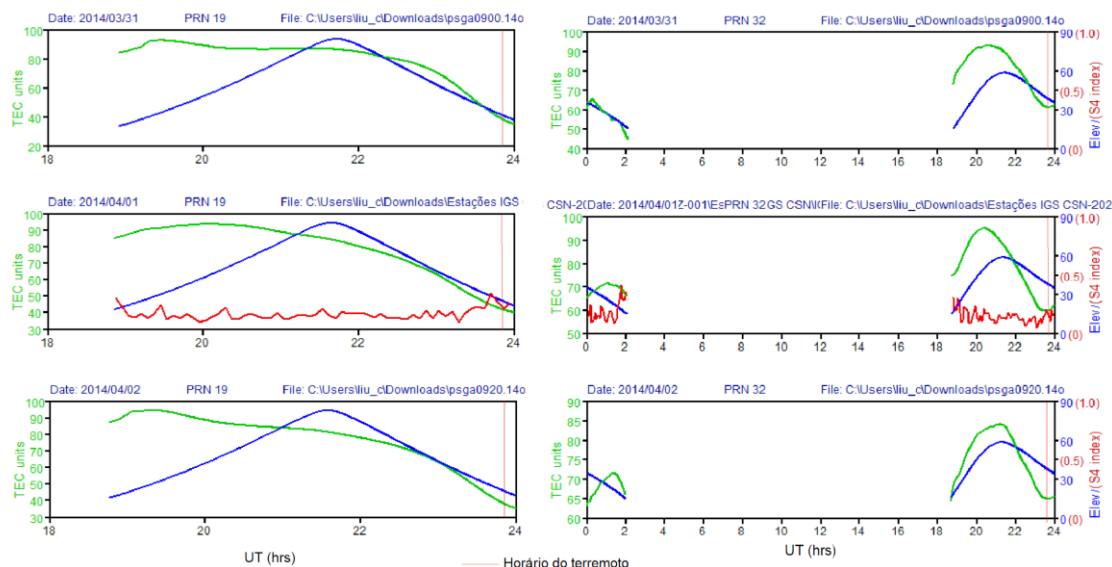


Figura 12 – Comportamento da curva do TEC para o satélite 19 e 32 da estação PSGA nos dias 31/mar e 01, e 02/abril/2014.

Fonte: Autores (2025).

Apesar da ausência de informações em boa parte da amostragem do satélite 32 (PRN 32), o que se levou em consideração para a escolha deste satélite foi o fato deste conter um intervalo de dados suficiente até o horário do tremor, de pelo menos 2 horas antes do tremor.

Com base nos resultados de valores de TEC ionosférico, estimados nas estações mais próximas ao epicentro do terremoto de Iquique, não foi possível identificar variações co-sísmicas evidentemente visíveis do parâmetro ionosférico. É possível que a geometria dos satélites e/ou a disposição das estações em relação ao epicentro do terremoto, ou até mesmo o ângulo de captação destes satélites, tenham dificultado a caracterização do distúrbio, no caso do terremoto de Iquique. Estas são limitações presentes neste tipo de abordagem, principalmente em regiões em que não há uma rede densa de estações.

4. Considerações finais

Os objetivos propostos neste estudo foram parcialmente atingidos, uma vez que algumas aplicações apresentaram limitações, percebidas ao longo da análise dos dados, como por exemplo, as limitações comentadas acerca do GPS-TEC. Por outro lado, esta pesquisa reforçou a aplicabilidade do monitoramento de terremotos através do posicionamento GNSS, especificamente o método PPP cinemático. No que diz respeito a esta abordagem, foi possível computar discrepâncias nas componentes horizontais com acurácia centimétrica. Através da análise das variações planialtimétricas constatou-se ser possível ter uma noção quantitativa das variações posicionais em eventos sísmicos, como abordado nos valores de discrepância estimados. Além disso, foi possível relacionar o efeito resultante das distâncias das estações geodésicas e o epicentro do terremoto, ou seja, quanto mais próxima às estações ao epicentro, mais significativa foi a variação posicional observada. Por fim, foi possível observar os vetores de deslocamento em três diferentes dias, observando assim a direção de movimentação das estações geodésicas.

Os resultados do TEC apresentados não evidenciaram um padrão em relação aos terremotos estudados, tendo em vista que apenas uma estação do terremoto de Maule (Estação SANT) apresentou variação possivelmente associada ao evento. Constatou-se desta forma que o TEC é um parâmetro sensível, considerando que as condições externas como atividade geomagnética, cintilação ionosférica e até mesmo a geometria dos satélites e a disposição das estações podem influenciar nos resultados. Os estudos mais recentes que demonstram resultados promissores de caracterização de terremotos através da análise do TEC geralmente contam com uma rede geodésica densa (i. e., aprox. 3000 estações no Japão), o que claramente ajuda na melhor caracterização deste parâmetro. No entanto, a região estudada ainda encara uma certa carência

de estações, tendo em vista a real necessidade do aumento do número de estações geodésicas em regiões de alta atividade tectônica, como o Chile. Reforça-se a importância de desenvolvimento de métodos que possam suprir essa carência, tornando possível o monitoramento de terremotos mesmo em condições inadequadas para garantir a segurança da população que reside em tais regiões.

Em conclusão, este estudo suporta a integração de métodos de posicionamento GNSS e análise da ionosfera (TEC, ionossondas) para o monitoramento de eventos sísmicos, tendo em vista a relação direta que existe entre estas abordagens em contextos de terremotos. Ademais, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de estudos de outros terremotos na América do Sul, dentro das características de intensidade e profundidade epicentral que se assemelham aos eventos aqui estudados, com foco na detecção preventiva das assinaturas co-sísmicas, visando que não foi possível abranger este aspecto nesta pesquisa. Outro aspecto que merece atenção é a busca pela integração de dados geodésicos à dados *in situ*, ou seja, com utilização de registros dos sismógrafos da região que se deseja estudar, cooperando, desta forma, em um melhor entendimento acerca das componentes dos processos de iniciação da ruptura e a sua relação com os fenômenos atmosféricos. Em relação aos efeitos na ionosfera, é de fundamental importância explorar outros recursos disponíveis, como exemplo a realização de estudos que permitam imageamento da ionosfera ou técnicas de representação da ionosfera com maior resolução, tais como mapas ionosféricos (2D) e até mesmo a chamada tomografia ionosférica (3D).

Referências

- ALMEIDA, M. S.; DAL POZ, W. R. *Posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo com GNSS: Qual é o método mais acurado atualmente?* Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 1, p. 175–195, 2016.
- CDDIS. *CDDIS* |. Disponível em: <<https://cddis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 2 out. 2021.
- GRINTER, T.; ROBERTS, C. *Precise point positioning: where are we now*. International global navigation satellite systems society IGSS symposium. Anais...Citeseer, 2011.
- HAYAKAWA, M. et al. *Atmospheric gravity waves as a possible candidate for seismo-ionospheric perturbations*. Journal of Atmospheric Electricity, v. 31, n. 2, p. 129–140, 2011.
- HAYES, G. P. et al. *Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015*. [s.l.] US Geological Survey, 2017.
- JIN, S.; OCCHIPINTI, G.; JIN, R. *GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics*. Earth-Science Reviews, v. 147, p. 54–64, 2015.
- KING, M.; EDWARDS, S.; CLARKE, P. *Precise point positioning: Breaking the monopoly of relative GPS processing*. Engineering Surveying Showcase, v. 10, n. 2002, p. 33–34, 2002.
- LIU, J. Y. et al. *Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements*. 2004.
- MONTECINO, H. D. et al. *Effects on Chilean Vertical Reference Frame due to the Maule Earthquake co-seismic and post-seismic effects*. Journal of Geodynamics, v. 112, p. 22–30, 2017.
- NIKOLAIDIS, R. M. et al. *Seismic wave observations with the Global Positioning System*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 106, n. B10, p. 21897–21916, 2001.
- OIWAKE CHO, K.; KU, S. *WDC for Geomagnetism*, Kyoto. Disponível em: <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- PEREVALOVA, N. P. et al. *Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 108, p. 77–90, 2014.
- PETIT, G.; LUZUM, B. *IERS conventions (2010)*. Tech. Rep. DTIC Document, v. 36, p. 180, 1 jan. 2010.
- PIRTI, A. *Investigation and prediction of the 2010 Maule, Chile earthquake by using GNSS on 25, 26 and 27 February 2010*. Journal of South American Earth Sciences, v. 133, p. 104702, 2024.

PRESS, F. et al. *PARA ENTENDER A TERRA*. 4. ed. [s.l.] Bookman, 2006.

SANZ SUBIRANA, J.; JUAN ZORNOZA, J. M.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. *GNSS Data Processing*, Volume I: Fundamentals and Algorithms. ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, p. 145–161, 2013.

SEEMALA, G. K. Chapter 4 - *Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations*. Em: KUMAR SINGH, A.; TIWARI, S. (Eds.). *Atmospheric Remote Sensing. Earth Observation*. [s.l.] Elsevier, 2023. p. 63–84.

SOUZA, J. S.; ALVES, D. B. M.; VANI, B. C. *Estudo do comportamento da Cintilação Ionosférica em diferentes regiões brasileiras e seu impacto no posicionamento GNSS*. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 1, p. 97–109, 2015.

TAKASU, T. *RTKLIB ver. 2.4. 2 Manual. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*, p. 29–49, 2013.

TAKASU, T. *RTKLIB*. Tokyo, Japan, 29 dez. 2020. Disponível em: <<https://rtklib.com/>>

TEIXEIRA, W. et al. *Decifrando a Terra*. 2009.

TIWARI, R. et al. *WBMod assisted PLL GPS software receiver for mitigating scintillation effect in high latitude region*. 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. *Anais...IEEE*, 2011.

TORGE, W. *Geodesy*, 3a. edição. [s.l.] Walter de Gruyter GmbH & Co, 2001.

VALLADARES, C. E. et al. *Simultaneous observation of traveling ionospheric disturbances in the Northern and Southern Hemispheres*. *Ann. Geophys*, v. 27, n. 4, p. 1501–1508, 2009.