



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DETECCIÓN Y EXTRACCIÓN DE SEÑALES TRANSIENTES EN EL NORTE DE CHILE

Por: Lorenzo Andrés Jara Anabalón

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al título de Geofísico

Noviembre 2023

Concepción, Chile

Profesor Guía: Matthew Miller

Profesor Co-Guía: Marcos Moreno

Profesor Comisión: Arturo Belmonte

© 2023, Lorenzo Andrés Jara Anabalón

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



DETECCIÓN Y EXTRACCIÓN DE SEÑALES TRANSIENTES EN EL NORTE DE CHILE

Por: Lorenzo Andrés Jara Anabalón

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al título de Geofísico

Noviembre 2023

Concepción, Chile

Profesor Guía: Matthew Miller

Profesor Co-Guía: Marcos Moreno

Profesor Comisión: Arturo Belmonte

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a el Proyecto NCN19_167, "Núcleo Milenio Ciclo Sísmico a lo largo de Zonas de Subducción (CYCLO)", por ayudar con financiamiento mi trabajo de tesis.

Agradecer también a Marcos Moreno que ha sido mi profesor guía, que ha confiado en mí, me ha motivado y con quién ya llevamos varios semestres trabajando juntos logrando buenas cosas, tanto en los ramos de la carrera, como durante mi tesis. También a Jonathan Bedford, por estar tan dispuesto a responder mis dudas y a apoyar mi trabajo cuando lo he necesitado. Agradecer a Matthew Miller por el apoyo brindado, sus correcciones y su calidad humana como profesor. También a Arturo Belmonte por sumarse a el equipo y por compartir su experiencia durante los ramos de carrera.

Mis más grandes y sinceros agradecimientos a mis padres Carmen Anabalón y Pedro Jara que han sido durante toda mi vida los que me han cuidado, protegido y amado, y quienes han permitido realizarme en los diferentes ámbitos de mi vida, sin realizar ninguna imposición y brindándome de el ejemplo y los valores que llevo en mí. A mi abuela Sonia Reyes que ha sido una persona increíble en mi vida, brindadora de un ejemplo intachable de como se deben hacer las cosas, que me ha apoyado por cada paso que he dado y de la que he aprendido lecciones que me acompañaran durante toda mi vida. Mis hermanos Isidora y Alonso, que me han apoyado y me han prestado el hombro en varias ocasiones cuando estuve pasando malos momentos, muchas gracias los amo mucho a todos ustedes.

A mis amigos, primos y mi pareja que me han estado apoyado y dado fuerza en innumerables ocasiones, cuando las cosas se complicaron.

A todos ustedes, muchas gracias.

Resumen

Las deformaciones transientes las podemos definir como acumulaciones de esfuerzos en la corteza que no tienen relación con la tendencia normal ni la podemos asociar a una periodicidad en el tiempo. Detectar estas señales tiene una gran relevancia en el estudio de terremotos, poder monitorearlos y detectar su comienzo, nos permitiría realizar predicciones sobre el posible comportamiento y la peligrosidad que podría tener la zona. Aquí, aplicamos el código Gratsid (Greedy automatic signal decomposition) desarrollado por Bedford, J., & Bevis, M. (2018) en series sintéticas y en el norte de Chile previo al Terremoto de Iquique-Pisagua del año 2014, donde diversos estudios han expuesto sobre el comienzo de una transiente dos meses previos al terremoto ocurrido el 1 de abril 2014 y que se ven intensificados luego de una actividad precursora, que comienza el 16 de marzo del 2014 con un sismo de 6.7 Mw. Nuestro objetivo principal fue detectar el inicio de esta deformación transitoria y analizar su evolución. Además, evaluamos cómo la presencia o ausencia de saltos en los datos afecta la capacidad de Gratsid para identificar estas deformaciones.

Los objetivos de nuestra investigación se lograron exitosamente, ya que identificamos la deformación transitoria previa al terremoto de Iquique-Pisagua y también en las series sintéticas. Además observamos que la presencia de saltos en los datos influye en la capacidad de Gratsid para detectar eventos transitorios. Por último, para analizar la disminución en la velocidad antes del terremoto de Iquique-Pisagua, es esencial considerar los saltos en las predicciones, ya que son los procesos dominantes en los desplazamientos en la zona, siendo una transiente principalmente sísmica.

Palabras claves – Terremotos lentos, deformaciones transientes, sismos precursores, detección de transientes.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1 Introducción	1
1.1 Hipótesis	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivos Generales	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 Marco Teórico	5
2.1 Datos GNSS	5
2.2 Método de trayectoria extendido	6
2.3 Deformaciones Transientes	7
2.4 Métodos para detectar transientes	10
2.5 Microsismicidad	13
2.6 Trabajos previos en la zona de estudio	13
2.7 Inversiones y señales sparse	14
2.8 Greedy Automatic Signal Decomposition (Gratsid)	16
2.9 Modo Común de error	19
3 Datos	20
3.1 Datos sintéticos	20
3.2 Datos reales Iquique-Pisagua	24
4 Metodología	29
5 Resultados	33
5.1 Resultados series sintéticas	33
5.1.1 Modelo considerando transientes + componente lineal, conjunto de datos sintéticos	41
5.2 Resultados series reales	43
5.2.1 Sismicidad en el norte de Chile, 2010-2014	44
5.2.2 Resultados con archivo de saltos (2,2,2) mm	46
5.2.3 Modelo considerando transientes + componente lineal, conjunto (2-2-2)mm	53

5.2.4	Modelo considerando transientes + componente lineal + saltos, conjunto (2-2-2) mm	56
5.2.5	Resultados con archivo de saltos (4,4,5) mm	60
5.2.6	Modelo considerando transientes + componente lineal, conjunto (4-4-5) mm	67
5.2.7	Modelo considerando transientes + componente lineal + saltos, conjunto (4-4-5) mm	69
6	Discusión	73
6.1	Análisis a resultados sintéticos	73
6.2	Análisis a resultados de series previas al terremoto de Iquique-Pisagua	74
6.3	Comentarios finales: Gratsid encontrando transientes	78
7	Conclusión	81
	Referencias	84
	Apéndices	85
A	Figuras estaciones de Iquique-Pisagua, conjunto (2-2-2) mm	85
B	Figuras estaciones de Iquique-Pisagua, conjunto (4-4-5) mm	94
C	Figuras estaciones sintéticas	103
D	Modo común de error	114
C0.1	Modo común de error caso sintético	115
C0.2	Modo común de error conjunto (2-2-2) mm	116
C0.3	Modo común de error conjunto (4-4-5) mm	117

Índice de figuras

Figura 3.1.1: Dislocación sintética y estaciones GNSS	21
Figura 3.2.1: Estaciones GNSS Iquique-Pisagua	25
Figura 5.1.1: Las figuras 5.1.1a, 5.1.1b, 5.1.1c, 5.1.1d y 5.1.1e están compuestas por un panel 3x3 de imágenes donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). En la primera columna, se muestra el ajuste del modelo a los datos. En la segunda columna, se pueden ver tres componentes: el color mostaza representa la componente estacional, el color verde representa la componente de saltos o escalones, y el color azul representa la suma de dos componentes, la polinómica (que en este caso es una componente lineal) y las transientes encontradas (sin incluir los saltos). Por último, la tercera columna presenta los residuales del modelo. En estas imágenes, se pueden observar ciertas rectas verticales segmentadas, donde el color magenta indica el comienzo de un evento transitorio. Conjunto de datos sintéticos.	37
Figura 5.1.2: Compacto de todas las mejores soluciones para los datos sintéticos, luego de remover la pendiente. En color rojo se puede ver el ajuste del modelo. Las líneas verticales de color magenta indican el comienzo de eventos transientes. Conjunto de datos sintéticos.	40
Figura 5.1.3: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.	41
Figura 5.1.4: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días. Conjunto de datos sintéticos.	42
Figura 5.1.5: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días. Conjunto de datos sintéticos.	43

Figura 5.2.1: Sismicidad entre los -18° y -21.5° de latitud. Los sismos se han categorizado por color y tamaño. Los sismos de color cian oscuro corresponden a magnitudes superiores a 3 pero inferiores a 4, los de color naranja oscuro son eventos con magnitudes superiores a 4 e inferiores a 5, mientras que los de color rosa oscuro abarcan magnitudes entre 5 y 5.9, y finalmente, los de color magenta oscuro representan terremotos con magnitudes superiores a 6.	45
Figura 5.2.2: Momento sísmico y número de eventos por latitud. Para realizar esta figura se utilizaron los mismos sismos de la figura 5.2.1. Se definieron 15 valores de entre los -18.0° y -21.5° grados de latitud (resultando cada 0.25°), con esos límites definidos se clasificaron por segmentos cada uno de los eventos. Luego se calcularon los puntos medios de cada segmento y se graficaron sobre ellos.	46
Figura 5.2.3: Las figuras 5.2.3a, 5.2.3b, 5.2.3c, 5.2.3d y 5.2.3e están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estas imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente.	49
Figura 5.2.4: Las estaciones de la figura 5.2.4a, 5.2.4b, 5.2.4c están ubicadas de norte a sur, siendo el eje vertical la posición de la estación en <i>mm</i> y en el eje horizontal tenemos el tiempo en años. Las líneas verticales representan los saltos y comienzos de transientes, en color rojo está el modelo obtenido con los parámetros calculados eliminando la pendiente y la componente estacional de los datos, y las columnas representan el eje a partir de las coordenadas locales Este, Norte y Vertical respectivamente. Conjunto (2-2-2) <i>mm</i>	52

Figura 5.2.5: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.	54
Figura 5.2.6: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.	55
Figura 5.2.7: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.	56
Figura 5.2.8: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal + saltos. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.	57
Figura 5.2.9: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.	58
Figura 5.2.10: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.	59
Figura 5.2.11: En las figuras 5.2.11a, 5.2.11b, 5.2.11c, 5.2.11d, 5.2.11e, cada fila representa una componente (Este, Norte y Vertical respectivamente). La primera columna muestra el ajuste del modelo a los datos. La segunda columna contiene la componente estacional en color mostaza, en verde la componente de saltos y en color azul la adición de la componente lineal (polinómica) con la componente de transientes. Por último los residuales están en la tercera columna.	63

Figura 5.2.12: Las estaciones de las figura 5.2.12a, 5.2.12b, 5.2.12c están ubicadas de norte a sur, siendo el eje vertical la posición de la estación en <i>mm</i> y en el eje horizontal tenemos el tiempo en años. Las líneas verticales representan los saltos y comienzos de transientes, en color rojo está el modelo obtenido con los parámetros calculados eliminando la pendiente y la componente estacional de los datos, y las columnas representan el eje a partir de las coordenadas locales Este, Norte y Vertical respectivamente. Conjunto (4-4-5) mm.	66
Figura 5.2.13: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.	67
Figura 5.2.14: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.	68
Figura 5.2.15: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.	69
Figura 5.2.16: velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal + saltos. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.	70
Figura 5.2.17: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.	71
Figura 5.2.18: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.	72

- Figura A0.1: Las figuras están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estas imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente. 93
- Figura B0.1: Las figuras están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estas imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente. 102

- Figura C0.1: Las figuras están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estas imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente. 113

Capítulo 1

Introducción

Los terremotos son eventos naturales que liberan una gran cantidad de energía en forma de ondas sísmicas, esta energía viene de la ruptura de una zona en la corteza de la Tierra, a esa localización se le llama falla y existen de tres tipos: inversas, directas y transformantes. Existen causas específicas para cada lugar donde se producen estos eventos sísmicos y la intensidad en superficie es multifactorial, depende de la distancia a la fractura, la magnitud del evento, el tipo de suelo y el mecanismo focal, entre otras.

En Chile, han ocurrido grandes terremotos como consecuencia de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, proceso que se desarrolla a una velocidad de 6.5 cm/año (*Barrientos, 2014*). Entre los ejemplos notables en Chile se encuentran el Terremoto de Valdivia de 1960 (Mw=9.5), del Maule 2010 (Mw=8.8) (*Kanamori, 1977*), (*Derode et al., 2021*) y de Iquique-Pisagua 2014 (Mw=8.1) (*Yagi et al., 2014*).

Así como experimentamos deslizamientos que ocurren con una fuerte actividad sísmica, también podemos encontrar evidencia de la ocurrencia de deslizamientos sin sismicidad y de larga duración, los conocemos como terremotos lentos (slow slip). Estos terremotos lentos los podemos reconocer como una deformación transitoria continua, que engloba tanto la propagación de la ruptura sísmica como eventos asísmicos de diferentes tamaños (*Jolivet and Frank, 2020*).

Las deformaciones transientes las podemos definir como acumulaciones de esfuerzos en la corteza que no tienen una relación con la tendencia normal, ni tienen un periodicidad en el tiempo, por lo que algunas de estas deformaciones se pueden deber

a terremotos lentos o condiciones locales específicas sin relación con la tectónica. La robusta implementación de estaciones GNSS en superficie ha permitido la realización de diferentes publicaciones sobre este tipo de eventos ocurridos: en Cascadia (*Wech and Bartlow, 2014*), (*Crowell et al., 2016*), en Japón (*Obara, 2002*), (*Hirose et al., 1999*), Nueva Zelanda (*Wallace and Beavan, 2006*), México (*Lowry et al., 2001*) y Chile previo al terremoto de Pisagua 2014 (*Ruiz et al., 2014*), de Quirihue 2010 (*Bedford et al., 2020*), este último también sobre el terremoto de Tohoku-Japón.

Los datos obtenidos de las estaciones GNSS proporcionan información crucial sobre la posición de estas estaciones, y al seguir las mediciones a lo largo del tiempo, podemos utilizar modelos que se ajusten a la trayectoria de la estación. Estudiar esta trayectoria es fundamental para obtener información sobre lo que ocurre en las profundidades, ya que la subducción provoca un patrón de deformación que es medible en la superficie gracias a las estaciones GNSS. El modelo de trayectoria extendido (*Bevis and Brown, 2014*) realiza un modelo de la posición de una estación a partir de datos recopilados por estaciones GNSS, considerando cuatro componentes que, cuando se combinan forman un modelo de predicción de la posición de la estación. Estas componentes incluyen: una componente lineal que tiene relación con la velocidad de la estación durante la ventana de tiempo, una componente estacional que considera las variaciones que se generan por las estaciones del año, una componente de saltos o escalones que ajusta a los desplazamientos que producen los sismos y mantenciones en las estaciones, y finalmente una componente logarítmica posterior a la ocurrencia de fuertes terremotos que es dominada por el desplazamiento tardío en la falla y las condiciones viscoelásticas del manto.

Aunque este modelo es bastante completo, nos queda un factor por agregar y es que no tiene una componente que ajuste eventos transientes. Mejorar este modelo tiene una gran dificultad, ya que para poder ajustar las deformaciones transientes nos enfrentamos a dos problemáticas: definir el inicio de estos eventos y lidiar con el ruido inherente en las series de tiempo.

Un método que se utiliza para eliminar el ruido es utilizando filtros. Esto se puede hacer sumando los residuos diarios de todas las estaciones en cada componente durante el período de estudio. Luego se aplica el filtro pasabajo, dejando pasar los procesos de bajo periodo (o alta frecuencia), para posteriormente eliminar el

ruido de alta frecuencia extraído de los residuales a los datos, como se demostró en un estudio realizado en el sur de California ([Wdowinski et al., 1997](#)).

Hay muchos métodos que se están utilizando para encontrar señales transientes. Algunos utilizan PCA (Principal Components Analysis) ([Kositsky and Avouac, 2010](#)), otras que ocupan ICA (Independent Components Analysis) ([Gualandi et al., 2016](#)), existe también un método que las complementa PICCA ([Donoso et al., 2021](#)), la que toma como hipótesis que la señal transiente será encontrada por ICA o PCA. Hay métodos como M-SSA (Multichannel Singular Spectrum Analysis) ([Walwer et al., 2016](#)) con el que se puede extraer tanto la señal transiente, como la componente estacional y el ruido inherente en los datos GNSS. También ([Riel et al., 2014](#)) propone un método que prueba un diccionario de diferentes funciones no ortogonales que se asemeja a eventos transientes. Otro método que detecta transientes es Gratsid (Greedy automatic signal decomposition) ([Bedford and Bevis, 2018](#)), principalmente lo nuevo que trae este método en comparación con el modelo de trayectoria extendido ([Bevis and Brown, 2014](#)) es una componente extra que se encargará de ajustar eventos transientes, utilizando una suma de funciones de decaimiento exponencial. Gratsid entrega un modelo de predicción de la trayectoria de la estación a partir de los datos entregados, pero también nos entrega como salida la señal descompuesta en una componente de saltos, una estacional, polinómica y de transientes.

En este contexto, hemos introducido la importancia en el estudio y extracción de señales transientes en series de tiempo, las que permiten estudiar eventos precursores y terremotos lentos. Los desafíos son grandes ya que la escala en que se mueven estos eventos son bastante amplias, algunos pueden ser de pocos milímetros a decenas de estos. Por esta razón, es crucial eliminar el ruido de las series de tiempo. En este trabajo de tesis se ocupará el código Gratsid ([Bedford and Bevis, 2018](#)) con el objetivo de encontrar el comienzo de señales transientes en diferentes series de tiempo, se comenzará probando el método utilizando datos sintéticos, luego se ejecutará para encontrar la transiente previa al terremoto de Pisagua 2014. Donde diversos estudios han expuesto sobre el comienzo de una transiente dos meses previos al terremoto ocurrido el 1 de abril 2014, que se ve intensificada luego de una actividad precursora, que comienza el 16 de marzo del 2014 con un sismo de 6.7 Mw ([Ruiz et al., 2014](#)), ([Barrientos, 2014](#)).

1.1. Hipótesis

Las estaciones GNSS registran el cambio de posición que presenta la estación con el paso del tiempo. Gracias a esto, podemos estudiar varios fenómenos que ocurren en zonas afectadas por terremotos. Los terremotos lentos se presentan como una deformación transitoria en los datos y se han visto muchos casos donde han sido precursores de grandes terremotos. Identificar estos eventos transitorios es difícil, ya que la escala en que se mueven es muy amplia.

Las hipótesis a investigar son las siguientes:

- Gratsid es un método suficiente y efectivo para poder encontrar eventos transientes en datos GNSS.
- El archivo de saltos entregado a priori tiene gran relevancia en las transientes encontradas.
- El movimiento transiente que se produjo previo al terremoto de Iquique-Pisagua fue principalmente sísmica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo principal es identificar deformaciones transientes y/o terremotos lentos en datos de estaciones GNSS utilizando el método Gratsid, asegurando que tengan una consistencia espacio-temporal con las estaciones cercanas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Configurar y condicionar series de tiempo para que Gratsid encuentre señales transientes.
- Identificar la deformación transiente en una serie de datos sintéticos.
- Detectar la deformación transiente previa al terremoto de Pisagua del año 2014.
- Evaluar la relevancia que tienen los archivos de saltos utilizando diferentes configuraciones de saltos.

Capítulo 2

Marco Teórico

En esta sección se dará a conocer los conceptos y publicaciones que se tomaron en consideración para realizar esta investigación, incluyendo trabajos anteriores realizados en la zona de estudio.

2.1. Datos GNSS

Los datos GNSS han adquirido una gran importancia en el siglo XXI. Conocer la posición de un dispositivo nos permite monitorear su trayectoria a lo largo del tiempo. Además, con la proliferación del uso de estos dispositivos en diversos campos, como la ciencia, la navegación, proyectos de construcción, infraestructuras y servicios personalizados basados en la ubicación, su precisión también ha mejorado significativamente gracias al aumento de la red de satélites y la mejora en la instrumentación.

Una de las áreas donde esta herramienta resulta de gran utilidad es en la investigación científica. Los datos GNSS nos permite cuantificar con gran precisión la deformación de la corteza terrestre y la actividad sísmica en una localidad. La red de estaciones GNSS es amplia y robusta, abarcando la mayoría de los continentes e incluso algunas áreas oceánicas donde es crucial obtener información. En particular, en regiones de subducción, la densidad de estaciones se incrementa significativamente con el propósito de estudiar la deformación causada por la subducción de una placa bajo otra.

Los datos de GNSS han realizado aportes significativos, permitiendo la

confirmación de hipótesis científicas fundamentales. Estos han sido clave para validar la existencia de fenómenos importantes, como los terremotos lentos (Obara, 2002), los patrones de deformación post-sísmica (Shen et al., 1994), los movimientos del fondo oceánico posterior a un terremoto utilizando GNSS submarinos (Sun et al., 2014), o la evaluación del acoplamiento en una zona (Moreno et al., 2010). Situaciones donde la sismología no entregaba la suficiente información, ya que los sismos son uno de los varios procesos que ocurren en zonas de contacto de placas.

Las estaciones registran la posición de manera periódica, recopilando información al recibir señales de un conjunto de satélites. Los instrumentos utilizados poseen una alta precisión y exactitud, ya que se busca detectar movimientos en la escala de milímetros. Sin embargo, a pesar de esto, existen errores inherentes tanto a las mediciones como a la órbita de los satélites, los cuales deben ser tomados en cuenta al desarrollar los modelos de trayectoria.

2.2. Método de trayectoria extendido

El trabajo realizado por (Bevis and Brown, 2014) nos permite obtener una predicción de la posición de una estación, determinando valores óptimos que se puedan ajustar a las serie de tiempo. Por lo tanto, la posición de la estación quedará definida por:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^{n_{P+1}} \mathbf{p}_i (t - t_R)^{i-1} + \sum_{j=1}^{n_J} \mathbf{b}_j H(t - t_j) + \sum_{k=1}^{n_F} \mathbf{s}_k \sin(\omega_k t) + \mathbf{c}_k \cos(\omega_k t) + \sum_{i=1}^{n_T} \mathbf{a}_i \log(1 + \Delta t_i / T_i) \quad (2.2.1)$$

Se buscará resolver este problema, con el fin de obtener los parámetros $\mathbf{p}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{s}$, $\mathbf{c}$, $\mathbf{a}$, quienes componen el vector $\mathbf{m}$, de manera que $G\mathbf{m} = d_{pred}$, siendo este último la predicción del modelo. En la ecuación 2.2.1 $\mathbf{p}_i$ contiene la tendencia de la estación, $\mathbf{b}_j$ será un vector con los valores de todos los saltos durante el periodo t , $\mathbf{s}_k$ y $\mathbf{c}_k$ serán las amplitudes de la componente estacional, y por último $\mathbf{a}_i$ contendrá a la componente obtenida del post-sísmico después de un gran terremoto (si es que

existe).

Para la obtención de los mencionados parámetros, existen diversos métodos de inversión diseñados para resolver un problema de minimización de norma L_n de la siguiente manera:

$$\mathbf{min} ||d - d_{pred}||^n \quad (2.2.2)$$

El valor de n determinará el grado de la norma que se minimizará. Obtener la solución a este problema de minimización afecta notablemente en el costo computacional dependiendo la norma utilizada.

La solución a la minimización de la norma L_2 al resolver el problema inverso, está dado por:

$$\mathbf{m} = (G^T C_{diag}^{-1} G)^{-1} G^T C_{diag}^{-1} d \quad (2.2.3)$$

Donde G es la matriz de diseño en función del tiempo, C_{diag} es la diagonal de la matriz de covarianza de nuestros parámetros y d son las observaciones de los GNSS. Esta minimización también es conocida como mínimos cuadrados y tiene un costo computacional menor a otros métodos de inversión.

2.3. Deformaciones Transientes

El modelo de trayectoria extendido realiza un ajuste muy preciso a los datos; de hecho, se han llevado a cabo investigaciones que utilizan métodos de inversión más avanzados, logrando mejorar aún más los resultados. No obstante, a pesar de estos esfuerzos, la incorporación de componentes para ajustar transientes sigue siendo un tema controvertido debido a que las deformaciones a esta escala pueden ser extremadamente pequeñas, y determinar su inicio resulta una tarea ardua.

En el contexto de las series GNSS, nos referimos a transientes cuando se encuentran procesos que se salen de la tendencia y periodicidades de estacionales. Las acumulaciones de esfuerzos en la corteza terrestre pueden dar lugar a deformaciones, las cuales pueden ser causadas por terremotos, terremotos lentos o condiciones locales específicas sin relación con la tectónica. Estas condiciones locales pueden ser

el resultado de la actividad humana cercana o condiciones atmosféricas especiales.

Se han realizado numerosas publicaciones que documentan eventos de este tipo en diversas partes del mundo. Por ejemplo, en Japón, (*Obara, 2002*), (*Hirose et al., 1999*) reportaron una serie de eventos de temblores profundos asociados a la subducción en una región sin presencia de volcanes. Estos eventos incluyen temblores posteriores a sismos de magnitud 4 y otros que ocurren varias veces al día sin relación aparente con otros sismos. Además, en una segunda publicación, se informaron eventos con deslizamientos posteriores a los terremotos ocurridos entre 1996 y 1997, que tuvieron magnitudes de 6.0 y 6.7.

Otros trabajos de investigación bien documentados se llevaron a cabo en los Estados Unidos, específicamente en la zona de Cascadia (*Wech and Bartlow, 2014*). En este caso, se realizó una estimación de la dislocación causada por un terremoto lento en 2011, que ocurrió desde el 24 de junio hasta el 5 de agosto. Es interesante destacar que se observó una secuencia de temblores que migraron en diferentes direcciones a lo largo de los años. Durante 2009, la migración se movió hacia el sur, en 2010, se desplazó desde el centro hacia los lados, y en 2011, la migración fue muy diferente, comenzando en los lados para luego moverse hacia la zona central, con la particularidad de que hubo áreas sin actividad sísmica entre los focos.

Nueva Zelanda también ha presentado un terremoto lento en la región de Manawatu (*Wallace and Beavan, 2006*). Este evento comenzó a principios de 2004 con actividad entre 60 y 35 km de profundidad, para luego migrar hacia la zona entre los 35 y 25 km de profundidad. Durante un período de aproximadamente un año y medio, se observó una dislocación de alrededor de 300 mm. En contraste con lo observado en Cascadia, donde la migración ocurrió en la dirección del rumbo de la falla (movimiento horizontal), en Manawatu la migración ocurrió en dirección vertical del plano de la falla, involucrando fallas normales e inversas.

La misma hipótesis de que algunos terremotos pueden ser precedidos por una etapa precursora de terremotos lentos es sugerida en un estudio realizado por (*Bletery and Nocquet, 2020*), estudio que también se realiza en Vancouver Island (Cascadia). Durante un terremoto lento ocurrido en 2013, se observaron picos elevados en el deslizamiento registrado en las estaciones. Estos picos estuvieron relacionados con un aumento en la frecuencia de los temblores entre los meses de

septiembre y octubre.

En Chile, también se han detectado deformaciones transientes. Previo al terremoto de Iquique-Pisagua 2014, se registró una actividad precursora sísmica que comenzó dos semanas antes del terremoto M8.2 ocurrido el 1 de abril del mismo año. Esta secuencia de eventos sísmicos comenzó con un terremoto de magnitud 6.7 el 16 de marzo, seguido de otro evento al día siguiente de magnitud 6.4. Esto siguió unos días después, el día 22 y 23 de marzo, con magnitudes de 6.2 y 6.3 respectivamente. Nueve días después, ocurre el terremoto principal (*Ruiz et al., 2014*). A pesar de esta serie de sismos, no todo el desplazamiento ocurrido en superficie se puede justificar con estos eventos sísmicos. Por lo que surge una hipótesis de la existencia de una transiente asísmica en el lugar (*Bedford et al., 2015*).

Otro ejemplo fue para el terremoto de Maule-Quirihue del 2010, que también experimentó dos terremotos transientes previos al gran terremoto. La hipótesis formulada en (*Bedford et al., 2020*) sugiere que el aumento de la tracción en la placa Sudamericana provocó un hundimiento y posterior oscilación en la componente este-oeste. Luego la situación se normalizó y transcurrió un tiempo antes de que comenzara el segundo terremoto lento. Esto se debería a que la subducción seguía a la misma velocidad y la tracción se veía acelerada. Además de lo mencionado, se observó actividad sísmica en las capas someras y muy profundas de la subducción (a profundidades menores o iguales a 40km y mayores o iguales a 80km).

En el mismo contexto, en el estudio de (*Peña et al., 2021*), se analizan las deformaciones transitorias y el estrés inducido por el terremoto del Maule-Quirihue en 2010 en el segmento de Illapel. En cuanto a las deformaciones transitorias, se recomienda el uso de modelos reológicos de ley de potencia en lugar de modelos de reología lineal. En cuanto a los cambios de estrés, se señala que hubo un cambio en el factor de seguridad de Coulomb acumulado en la región al sur del segmento del terremoto de Illapel (al norte del segmento del terremoto Maule-Quirihue), lo que produjo dieciséis eventos sísmicos con cambios positivos en el factor de seguridad de Coulomb. Sin embargo, en la zona cercana al epicentro, los cambios en el factor de seguridad de Coulomb no fueron significativos, lo que sugiere que el terremoto Maule-Quirihue no desencadenó el terremoto de Illapel.

En esta misma publicación se establecen comparaciones con lo sucedido en Tohoku, Japón, donde gracias a una extensa red de estaciones GNSS se pudo observar

el cambio en la dirección del desplazamiento en la superficie como resultado del evento transitorio durante el período inestable previo al gran terremoto. También se plantea la hipótesis de un aumento en la tracción de la placa Sudamericana, pero con una componente vertical fuerte y una oscilación en la componente este-oeste (similar a lo que ocurrió antes del terremoto de Maule-Quirihue), junto con una actividad sísmica ocurrida 60 días antes del terremoto a una profundidad de igual o superior a 80 km cerca del epicentro.

Por otro lado, el estudio de (*Peña et al., 2021*), analiza las deformaciones transitorias y el estrés inducido por el terremoto de Maule-Quirihue en 2010 en el segmento de Illapel. En relación a las deformaciones transitorias, se recomienda el uso de modelos reológicos de ley de potencia en lugar de modelos de reología lineal. Respecto a los cambios en el estrés, se señala que se produjo un cambio en la transferencia de esfuerzos de Coulomb (CFS) acumulados en la región al sur del segmento del terremoto de Illapel (al norte del segmento del terremoto Maule-Quirihue), lo que resultó en dieciséis eventos sísmicos con cambios positivos en el CFS. Sin embargo, en la zona cercana al epicentro, los cambios en el CFS no fueron significativos, lo que sugiere que el terremoto Maule-Quirihue no desencadenó el terremoto de Illapel.

2.4. Métodos para detectar transientes

Se ha mencionado ya la dificultad que se tiene en detectar series transientes y la importancia de encontrarlas. Diferenciar los artefactos de los terremotos lentos es una tarea difícil, por eso existen diferentes métodos cada uno con sus pros y contras para poder resolver esta problemática. Varios estudios se han realizado tanto utilizando datos sintéticos como datos reales, un ejemplo de simulaciones fue lo se realizó en (*Carr Agnew, 2013*) donde se demuestra como los datos bien simulados pueden ayudar en mejorar los métodos de procesamiento de datos geodésicos, ya que fakenet puede simular diferentes señales transientes y al comparar hacer mejoras a la detección en datos reales. Además, incluye tres tipos de aleatoriedades a la predicción para inducir ruido. También agrega aleatoriedades entre estaciones utilizando un modo común de error y variaciones en las componentes seculares, por lo que realiza un completo abanico de posibilidades que inducen error en los datos.

Network inversion filter (*Segall and Matthews, 1997*), permite obtener una predicción de la evolución temporal de los procesos a partir de la red GNSS, definiendo la dislocación a partir de funciones bases que varían en el tiempo, esto es muy importante ya que las discontinuidades en los desplazamientos se asumirán como deformaciones efectivas (por lo que las transientes se verían como aceleraciones en un modelo estocástico, que deben ser cercanas a cero para una velocidad constante). Lo otro interesante de este estudio es el uso de un filtro Kalman el cual va suavizando la señal a partir de una primera estimación de un valor y una covarianza asociada a este y donde los próximos valores se irán relacionando con los primeros.

Hay métodos para encontrar señales transientes que utilizan PCA (Principal Components Analysis) (*Kositsky and Avouac, 2010*), que es una técnica que descompone la señal en un conjunto de señales ortogonales, donde el primer vector base va en la dirección de mayor variación y los siguientes vectores base serán ortogonal a este. El objetivo es encontrar señales gaussianas no correlacionadas.

Otros ocupan ICA (Independent Components Analysis) (*Gualandi et al., 2016*) que también descompone la señal, pero a diferencia del PCA, no requiere ortogonalidad entre las componentes. En su lugar, se busca que las componentes sean estadísticamente independientes. Esto se utiliza para identificar señales que no sigan una distribución gaussiana.

PICCA es un método que las complementa (*Donoso et al., 2021*). Toma la hipótesis que la señal transiente será encontrada por ICA o PCA, maximizando la correlación entre las series de tiempo y las componentes de PCA e ICA identificando los movimientos anómalos. PICCA fue aplicado en datos reales y sintéticos de estaciones GNSS en Chile, con algunos resultados con altas correlaciones entre estaciones, pero que son altamente dependiente de la cantidad de días para la ventana ocupada.

Dentro de las conclusiones llegadas es que los eventos transientes de mayor duración temporal son mejor detectados por métodos PCA y los de menor duración por los ICA, pero lo más importante es la confirmación de la hipótesis inicial de que la señal transiente es encontrada al complementar los métodos, esto fue logrado tanto en las series sintéticas, como en el caso de Iquique-Pisagua(2014), Valparaíso(2017) e Illapel(2015).

Hay otros métodos como M-SSA (Multichannel Singular Spectrum Analysis) (*Walwer et al., 2016*), este puede extraer tanto la señal transiente, como la componente estacional y el ruido inherente en los datos GNSS. Lo interesante de este método es que realiza una correlación espacio temporal en un set de estaciones, proponiendo funciones bases que estén correlacionadas con las variaciones.

También (*Riel et al., 2014*) propone un método que utiliza un diccionario de funciones no ortogonales que se asemeja a eventos transientes, probando con funciones de diferente duración y tiempos de partida para estos eventos.

Incluso se han intentado mezclar conocimientos de otras disciplinas como es el caso de lo visto en (*Crowell et al., 2016*), donde utilizaron un indicador llamado relative strength index (RSI), que es altamente ocupado en el análisis de acciones para intentar determinar si estas van a subir o bajar en los siguientes días. Esto funciona indicando la rápida divergencia del comportamiento normal y funciona sobre una corta ventana de tiempo continua, determinando si se está sobre-vendiendo o sobre-comprando.

Para aplicar esto en la detección de transientes que se escapan del comportamiento "normal", se realiza una minimización con reducción de kurtosis para determinar la probabilidad de que sea efectivamente una transiente a partir de su RSI, contando los puntos con un porcentaje mayor al 95 %. Todo esto se aplicó en Cascadia en series GNSS entre el 2005 y 2016, obteniendo buenos resultados en la detección de eventos ETS (episodic tremor and slip) y de una forma automatizada.

Greedy Automatic Signal Decomposition (Gratsid) (*Bedford and Bevis, 2018*), es un código que ajusta series de tiempo de estaciones GNSS. Este método toma de base lo desarrollado en el método de trayectoria extendido (*Bevis and Brown, 2014*) y entrega una solución para el ajuste de señales transientes.

Gratsid realiza inversiones y calcula correlaciones en un ciclo de iteraciones, determinando las mejores combinaciones de configuraciones de multitransientes. Cada multitransiente incluye una combinación de tres funciones bases independientes que pueden comenzar a diferentes tiempos.

2.5. Microsismicidad

En varios de los eventos transitorios registrados en la sección 2.3, se observó una secuencia de temblores que en varios casos migraron y cambiaron su posición focal antes de la ocurrencia de terremotos de alta magnitud o terremotos lentos. Esto ocurrió por ejemplo en Cascadia (*Wech and Bartlow, 2014*), (*Bletery and Nocquet, 2020*) donde la migración de los temblores ocurrió en la dirección del rumbo. En Nueva Zelanda (*Wallace and Beavan, 2006*), o en Chile previo al terremoto de Iquique-Pisagua con sismos precursores (*Ruiz et al., 2014*) y también previo al terremoto de Illapel (*Peña et al., 2021*).

La microsismicidad parece desempeñar un papel que aún no se comprende completamente, pero existen investigaciones que intentan probar algunas hipótesis. Un ejemplo es el estudio realizado en (*Sippl et al., 2021*), donde recopilaron datos de 8,750 sismos a menos de 60 km de profundidad, ocurridos entre abril de 2014 y diciembre de 2018 en Chile central, entre las latitudes 29°S y 35°S. En base a estos datos, propusieron tres semi-elipses de zonas acopladas adyacentes. Alrededor de estas semi-elipses se registró una serie de microsismos antes de eventos importantes, como el terremoto de Illapel al sur de la zona de dislocación y el terremoto de Valparaíso en 2017, al norte de la zona dislocada. Resultados similares sobre estas semi-elipses se registraron en el estudio de (*Schurr et al., 2020*), antes del terremoto de Iquique-Pisagua en 2014.

2.6. Trabajos previos en la zona de estudio

Desde el terremoto de 1877, que alcanzó una magnitud 8.8, no se había registrado un gran terremoto en el norte de Chile. Trabajos antes del año 2014 ya advertían sobre el alto acoplamiento que existía en la zona. Por ejemplo, en el estudio de (*Métois et al., 2013*) ya preveían un terremoto de magnitudes de 8.0-8.3 para la el segmento del cerro Paranal o del Río Loa. Finalmente a la altura de Iquique-Pisagua el año 2014 ocurrió un terremoto de M_w 8.1. Este evento generó informes técnicos y numerosas publicaciones, ya que se trató de un terremoto de gran magnitud que presentó situaciones muy interesantes, como eventos transientes y sismos precursores. Además, el crecimiento de la red GNSS en Chile después del terremoto Maule-Quirihue permitió realizar estudios más exhaustivos sobre este

evento.

El informe técnico presentado en (*Barrientos, 2014*), poco después del terremoto, ya mencionaba la existencia de un sismo precursor de magnitud 6.7 que ocurrió dos semanas antes del evento principal, junto con una secuencia de temblores en la zona. Sin embargo, la publicación de (*Ruiz et al., 2014*) reveló que una señal transitoria había comenzado a manifestarse desde enero de 2014, y esta señal se intensificó con el paso de los meses, especialmente durante marzo del mismo año debido a una serie de sismos. Incluso realizaron inversiones para estimar la dislocación ocurrida entre el 10 y el 31 de marzo, y compararon estos resultados con los producidos por el sismo precursor de magnitud 6.7. Esto les permitió evaluar la magnitud del terremoto lento.

Otro estudio que respalda la existencia de un evento transitorio fue el realizado en (*Bedford et al., 2015*). En este estudio, demostraron que la dislocación asísmica detectada por los receptores GNSS fue principalmente el resultado de las réplicas en forma de dislocación tardía.

El estudio realizado por (*Schurr et al., 2020*) indagó en la sismicidad previa al terremoto de Iquique-Pisagua, y propone la formación de semi-elipses previas al fenómeno principal. La secuencia comenzó con un aumento en la actividad sísmica bajo y a los lados de la aspereza entre los -19.5° y -20.2° . Esto permitió que la placa se deslizara en todas las áreas excepto en la aspereza, que estaba fuertemente trabada debido al alto grado de acoplamiento. En este contexto, la primera falla que cedió se encontraba en la placa superior y generó el sismo de magnitud 6.7. Este evento activó la parte superior de la zona de contacto entre ambas placas, desencadenando el sismo de magnitud 6.3 al día siguiente. La aspereza altamente acoplada que continuamente fue debilitándose debido a la alta sismicidad que la rodeaba, culminó con el terremoto de magnitud 8.1 dos semanas después.

2.7. Inversiones y señales sparse

Hablamos de problemas inversos cuando no conocemos los parámetros del problema, pero sí tenemos mediciones disponibles, por lo que a partir de ellos buscamos los parámetros que se ajustan a los datos. Resolver este tipo de problemas son comunes en ciencia, por ejemplo, cuando se quiere determinar la dislocación ocurrida en un terremoto. No tenemos la oportunidad de medir a lo largo del

plano de subducción, pero las estaciones GNSS nos permiten tomar mediciones en superficie, con lo que mediante métodos inversos podemos obtener la dislocación resultante. Además, en este tipo de ejemplos es común la falta de mediciones para resolver el número de ecuaciones incógnitas, para estas matrices subdeterminadas se utilizan métodos de regularización, donde se agregan submatrices de ceros y no nulas con el fin de poder resolver estas ecuaciones.

Las señales sparse contienen menos información de la que se esperaría por su dimensión, lo que se hace es aprovechar matrices donde solo unos pocos coeficientes son distinto de cero y la gran mayoría son cero. Esto permite identificar las variables relevantes y facilita mucho las operaciones computacionales (*Needell et al., 2008*).

Si x es una señal en $\mathbb{R}^N$ y definimos la cuasi-norma l_0 como:

$$\|x\|_0 = |\text{supp}(x)| = |\{j : x_j \neq 0\}| \quad (2.7.1)$$

Todos los términos $x_j \neq 0$ se definirán como el soporte de x , cuando $\|x\|_0 \leq s$, lo que significa que la señal x es s -sparse, ya que $|\text{supp}(x)|$ tiene menos elementos que s .

También existe el concepto de compresibilidad, donde una señal p -compresible si:

$$|x|_{(i)} \leq R \cdot i^{-1/p} \quad \text{for } i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.7.2)$$

Esto significa que una señal es p -compresible por una magnitud R si al ordenar los componentes de la señal x , estos decaen a la tasa ya mencionada.

Otro concepto necesario es el de recuperación de una señal, tal que sea Φ una matriz de $m \times N$, se puede recuperar la señal cuando el número de elementos m es prácticamente lineal en s .

$$m = s \log^{O(1)}(N) \quad (2.7.3)$$

La notación O se refiere a el *BigO* que establece los límites superiores en el crecimiento de una función, además $O(1)$ se refiere a que está acotada por una constante.

Las ventajas de la convexidad son significativas. En primer lugar, conduce a una

eficiencia computacional notable, lo que significa que los algoritmos de optimización pueden converger de manera más rápida y efectiva. Además, la convexidad aporta estabilidad numérica, lo que se traduce en soluciones más precisas y confiables. Un aspecto crucial es que los problemas convexos tienen un único mínimo global, lo que implica que cualquier mínimo local es también el mínimo global.

Por otro lado, los problemas no convexos pueden ser más desafiantes. Pueden tener múltiples mínimos locales, lo que dificulta la búsqueda del mínimo global. Además, las soluciones obtenidas en problemas no convexos a menudo no son tan estables ni precisas como las de problemas convexos.

Cuando se trata con Normas L_0 los costos computacionales aumentan en gran medida, existen métodos con lo que se pueden lograr llegar a soluciones de problemas altamente no-convexos, resolviendo la norma L_1 si se cumple una condición "stronger":

$$\min \|z\|_0 \quad \text{conforme a } \Phi z = \Phi x, L_0 \quad (2.7.4)$$

equivalente a:

$$\min \|z\|_1 \quad \text{conforme a } \Phi z = \Phi x, L_1 \quad (2.7.5)$$

La incoherencia es una medida que evalúa qué tan diferentes son las columnas de la matriz Φ con respecto a las bases de las señales sparse. La condición stronger se cumple si la incoherencia entre la matriz de medición y la base de las señales sparse son bajas.

2.8. Greedy Automatic Signal Decomposition (Gratsid)

Gratsid, desarrollado en (Bedford and Bevis, 2018), será el método que se aplicará en este trabajo para encontrar las señales transientes en los datos GNSS. El propósito de esta sección es proporcionar una descripción más detallada de Gratsid y ampliar la comprensión de su funcionamiento, complementando la información presentada anteriormente en la sección 2.3.

Gratsid modifica el modelo de trayectoria propuesto por Brevis & Brown (*Bevis*

and Brown, 2014), cuya predicción está dada por 2.2.1 donde np definía el grado del polinomio que se usará para determinar la tendencia, en Gratsid se fuerza a que sea un polinomio que no sufra aceleraciones, de manera de poder describir la linealidad en base a una tendencia m y una constante d de esta manera:

$$\mathbf{x}(t) = mt + d + \sum_{j=1}^{n_J} \mathbf{b}_j H(t - t_j) + \sum_{k=1}^{n_k} \mathbf{s}_k \sin(\omega_k t) + \mathbf{c}_k \cos(\omega_k t) + \sum_{r=1}^{n_r} \sum_{i=1}^{n_i} [\mathbf{a}_i (1 - e^{-(t-t_r/T_i)})] + \xi(t) \quad (2.8.1)$$

Otro cambio es la transiente logarítmica con que se modela el impacto de una transiente post-sísmica en ETM (2.2.1), en Gratsid se cambio esta función de decaimiento logarítmica por una exponencial como se puede ver en 2.8.1. El motivo de este cambio es que la suma de funciones exponenciales tienden a una asíntota y con esto poder aproximar los movimientos finitos de varias señales transientes. Esto nos permite formar multitransientes, las que se forman por tres transientes simples e independientes entre ellas. $\xi(t)$ es el ruido en los datos, que se estima que están normalmente distribuidos.

Por lo que Gratsid primero calcula las componentes permanentes, como la componente estacional debida por ejemplo a la carga fluvial, otra componente respecto a la tendencia (que ya mencionamos que iba a ser de primer grado), y la de saltos debida a movimientos bruscos que se vio afectada la estación como en un sismo o en una mantención. Por lo que luego el objetivo es encontrar el mínimo número de multitransientes que mejor se ajusten a los datos evaluados y a las componentes permanentes ya obtenidas.

Los métodos de regularización L_1 a veces necesitan de un diccionario de funciones sparse. Gratsid aprovecha estos diccionarios para determinar la mejor combinación de multitransientes en una serie de iteraciones, realizando inversiones y correlaciones entre los datos (Needell et al., 2008), hasta la convergencia y minimizando el número de multitransientes.

Gratsid itera diferentes combinaciones de dos conjuntos de transientes (funciones bases), que son parte de un diccionario de curvas tipo y selecciona la que disminuye más los residuales por cada iteración. Estos diccionarios son obtenidos de la norma

L_1 , este método necesita estos diccionarios para realizar la inversión, por lo que Gratsid los aprovecha guardándolos para crear los conjuntos de transientes. La forma de las multitransientes está dada por una exponencial como se pudo ver en 2.8.1 y los tiempos de decaimiento (T_i) son un argumento de entrada y tienen valores por defecto de 10^1 , 10^2 o 10^3 .

La convergencia se llega cuando el set de transientes sigue siendo el mismo dentro del margen de iteraciones que predefinimos.

La inversión realizada por Gratsid tiene la siguiente forma:

$$m = (G^T G + I \cdot \epsilon^2)^{-1} G^T d \quad (2.8.2)$$

Donde m representa los parámetros invertidos por la norma L_2 , G son las funciones bases, d los datos a los que se quiere ajustar, I corresponde a la matriz identidad y finalmente ϵ^2 es la amortiguación de Tikhonov.

Gratsid necesita como entrada algunos hiperparámetros que manualmente se entregarán, como el valor de ϵ^2 (amortiguación de Tikhonov), la constante de decaimiento T_i , la tolerancia con que el modelo debe mejorar para aceptar un nuevo conjuntos de transientes y el número de convergencias a las que debe llegar el modelo dentro del margen de iteraciones.

Gratsid también define un factor de similitud(S) que se encarga de minimizar las diferencias entre las curvas transientes (M) que son extraídas. De este modo el conjunto de transientes en cada iteración es el más similar al resto de curvas transientes guardadas en las anteriores iteraciones.

$$S_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n ||M_i - M_j||^2} (i \neq j) \quad (2.8.3)$$

Este procedimiento consiste en la sumatoria en norma 2 de la resta de diferentes grupos de transientes. De manera que la transiente que tenga la similitud (S) más parecida a las demás será la escogida. Finalmente se obtiene las soluciones entregadas por Gratsid, donde para cada estación tenemos una componente de

residuales, la componente estacional y una que contiene el movimiento producido por la tendencia de primer orden, los saltos y las transientes.

2.9. Modo Común de error

Los residuales del modelo se obtienen al restar nuestra predicción con los datos obtenidos por los GPS de la siguiente manera: $Res = d - dpred$. Estos serán de mucha importancia para poder obtener el modo común de error (CME) asociado a la red GNSS (r_{Red}), ya que nosotros podemos cuantificar el error como: $\mathbf{r} = r_{\sigma} + r_{Red}$. En esta ecuación r_{σ} es el término asociado a los errores instrumentales de cada GNSS con valores particulares para cada día y r_{Red} los errores producto de la trayectoria de los satélites.

Entonces al recuperar los residuales por componentes de cada estación, realizamos promedios diarios para la ventana completa de tiempo entre el primer día de estudio hasta el último. Estos promedios diarios fueron rellenados con un ruido gaussiano con media nula para los tiempos donde la estación no rescató datos y finalmente fueron filtrados (lo que se conoce como CMF) con la intención de rescatar la mayor cantidad de ruido de alta frecuencia y disminuir los residuales asociados a información geodésica, que son procesos de baja frecuencia. El CMF y CME son una matriz de $3 \cdot n_{\text{días}}$ ya que se cuenta con tres componentes (este, norte y vertical) y son las mismas para todas las estaciones perteneciente al estudio, la diferencia entre CME y CMF es que el último es el CME pero filtrado.

Luego el ruido de la red GNSS obtenido con el CMF son sustraídos de los datos de todas las estaciones. Con esto ya obtenemos los datos limpios para ser usados por Gratsid y encontrar las soluciones finales.

Capítulo 3

Datos

En esta sección se describirá los datos utilizados para ejecutar Gratsid. Se utilizaron dos conjuntos de datos: uno de datos sintéticos y otros previo al terremoto de Iquique-Pisagua del 2014.

La metodología utilizada para el procesamiento de los datos, se dará a conocer en la siguiente sección 4.

3.1. Datos sintéticos

Con el fin de probar la metodología implementada y la eliminación de avalores atípicos, se probó primero sobre datos sintéticos. Estos presentan un comportamiento parecido al ocurrido en el terremoto de Iquique-Pisagua, tienen una longitud temporal de 3 años y presentan tanto una componente estacional, como procesos seculares, además tienen inherente un ruido para intentar simular lo mayor posible a la realidad, como lo que es un modo común de error y un ruido individual para cada estación.

La dislocación generada fue de 0.03m y de una magnitud 7.0, que fue distribuida en 14 días comenzando en el día 1,082 (de un total de 1,095 días). Estos datos también tienen un dato diario y las tres componentes para determinar la posición. Además, como son datos sintéticos no presentan errores por medición instrumental, lo que nos permite calibrar nuestros métodos para detectar transientes.

El origen de estas series de tiempo son de la publicación realizada por F. Donoso en (*Donoso et al.*, 2021) y la selección de estaciones fue para la zona de Chile

entre los -35.5 y -40.5 grados de latitud, dejando un total de 20 estaciones.

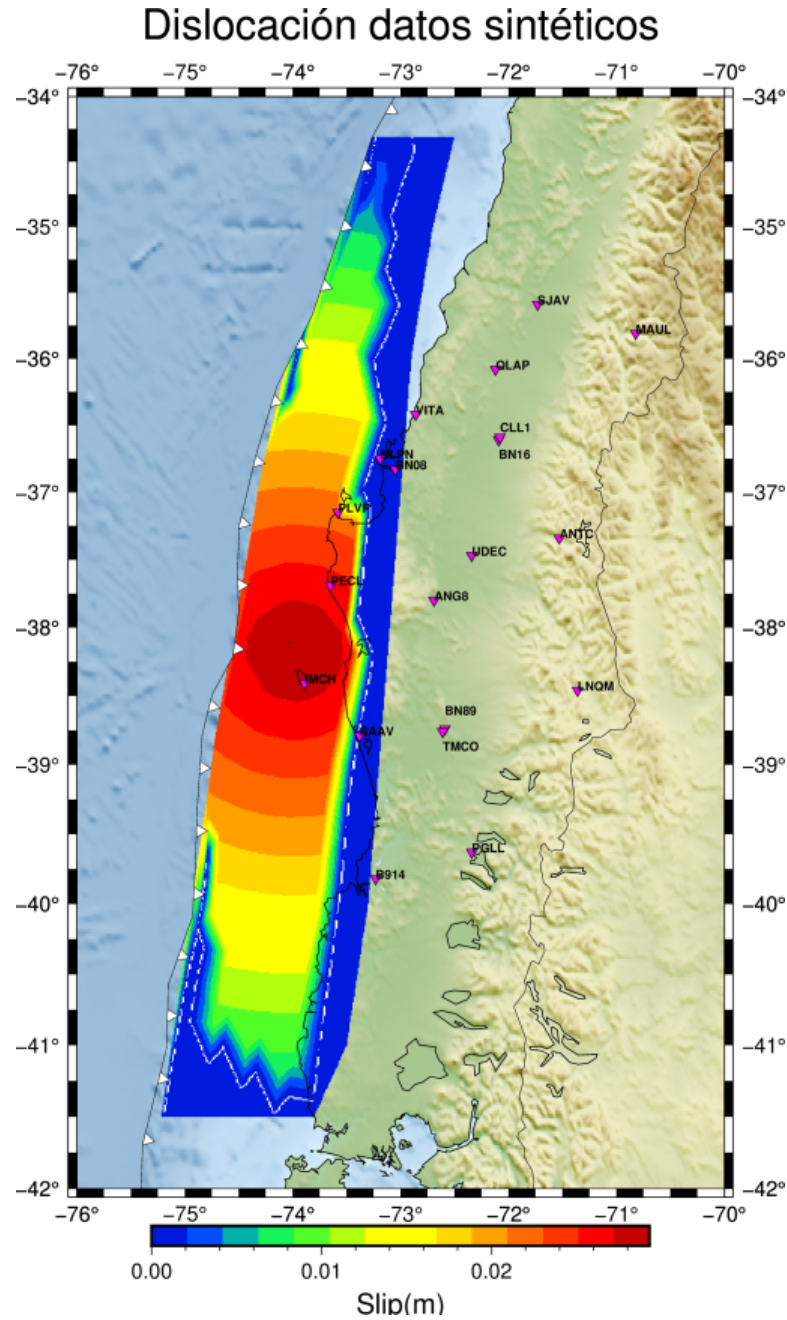
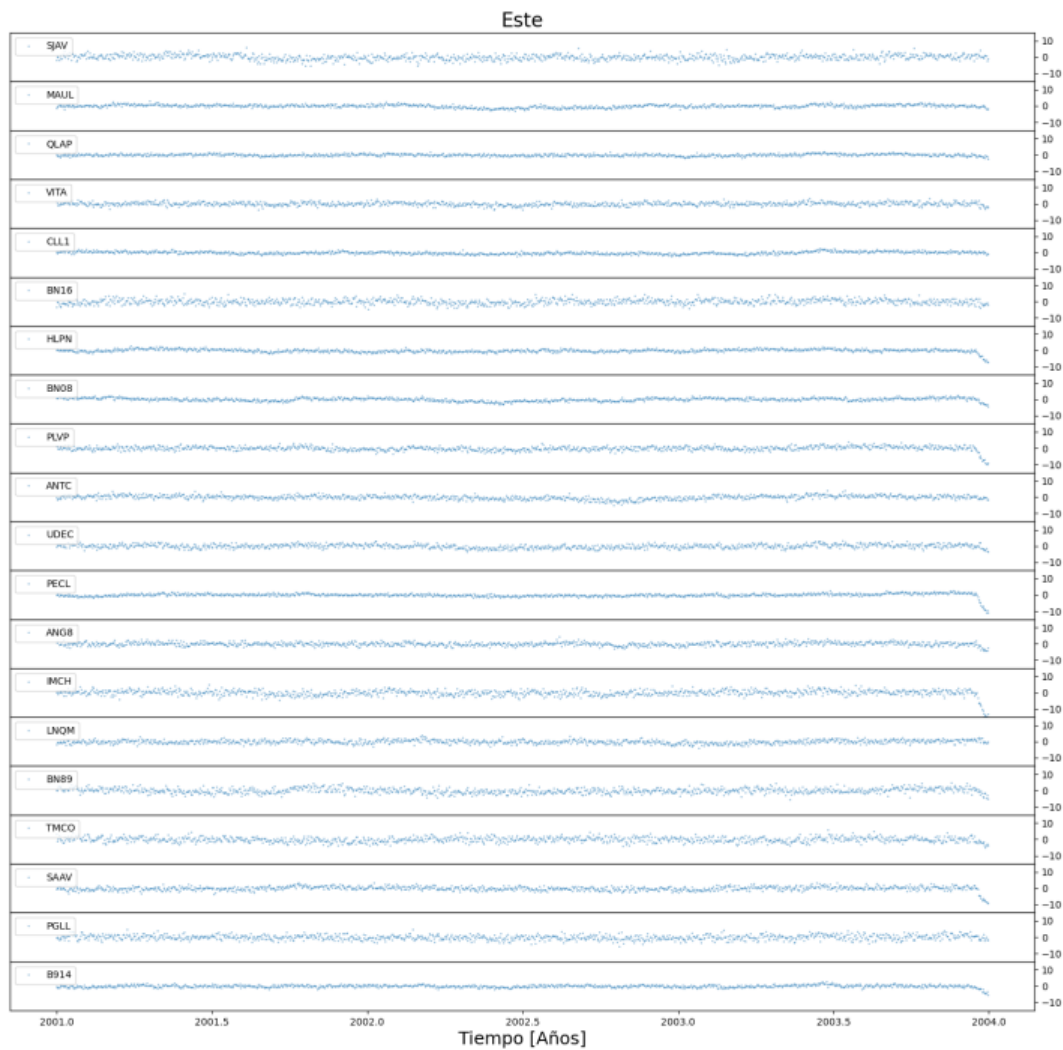
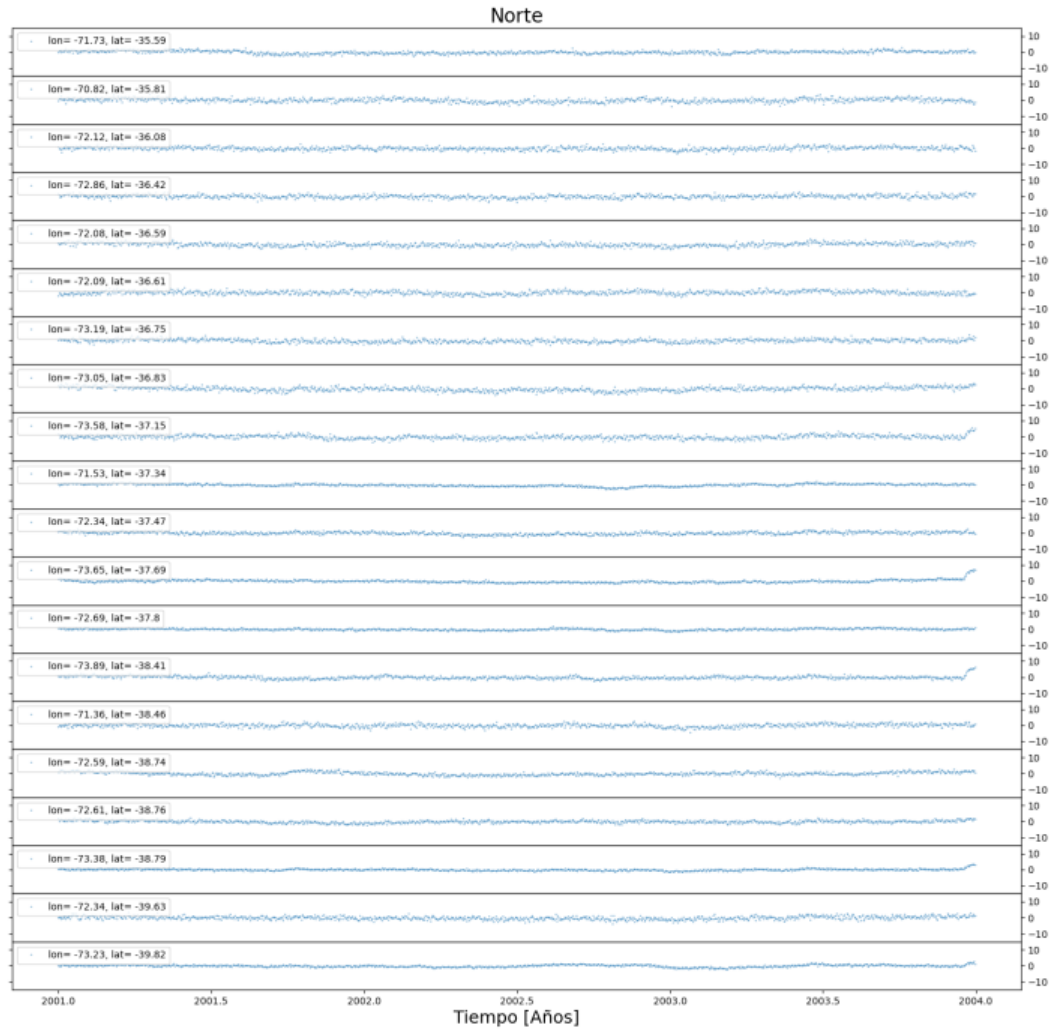


Figura 3.1.1: Dislocación sintética y estaciones GNSS

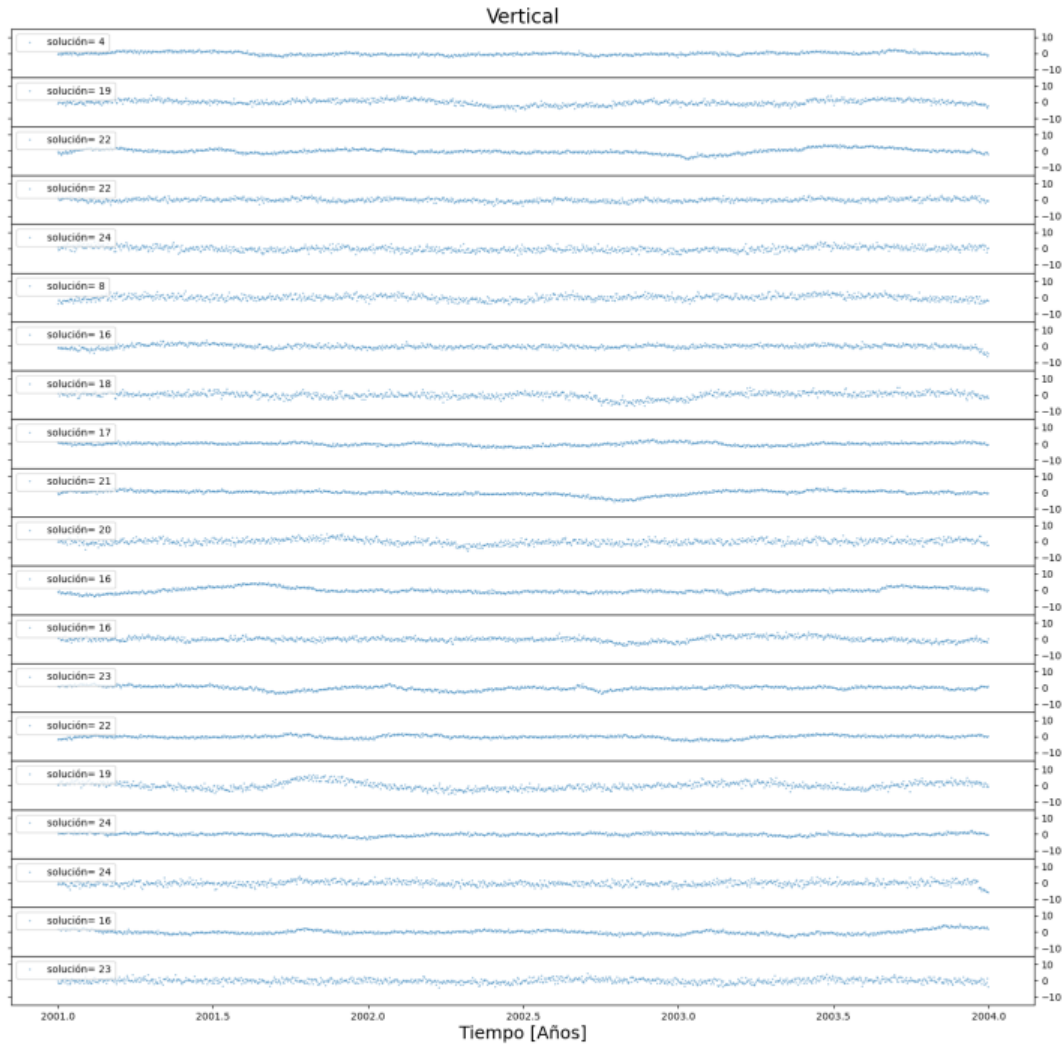
Las siguientes imágenes muestran las series de tiempo sin pendiente, de 20 estaciones localizadas al centro-sur de Chile, luego de eliminar los valores atípicos utilizando una ventana de 6 días y filtrando variaciones diarias superiores a 2 mm en las diferentes componentes, lo que se puede ver más detalladamente en la metodología 4.



(a) Series de tiempo, componente Este



(b) Series de tiempo, componente Norte



(c) Series de tiempo, componente Vertical

3.2. Datos reales Iquique-Pisagua

Por otro lado los datos GNSS Utilizados en el norte de Chile fueron procesados por Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC), institución de convenio Europeo-Sudamericano que estudian y distribuyen instrumentación en el margen Chileno, para estudiar la deformación y los terremotos. Los datos de series de tiempo contienen la posición en tres componentes: norte-sur, este-oeste y vertical, los errores instrumentales para cada componente anterior y el día que fue tomada la medición.

Se ocuparon series de tiempo que tienen un dato diario, y que se encontraban entre los -18° y -20° de latitud. Las series fueron cortadas desde el 1/1/2010 al

31/3/2014, este último es el día previo al terremoto de Iquique-Pisagua, además se agregó la condición que tenga un largo de por lo menos tres años de mediciones diarias en una ventana de cuatro años y tres meses.

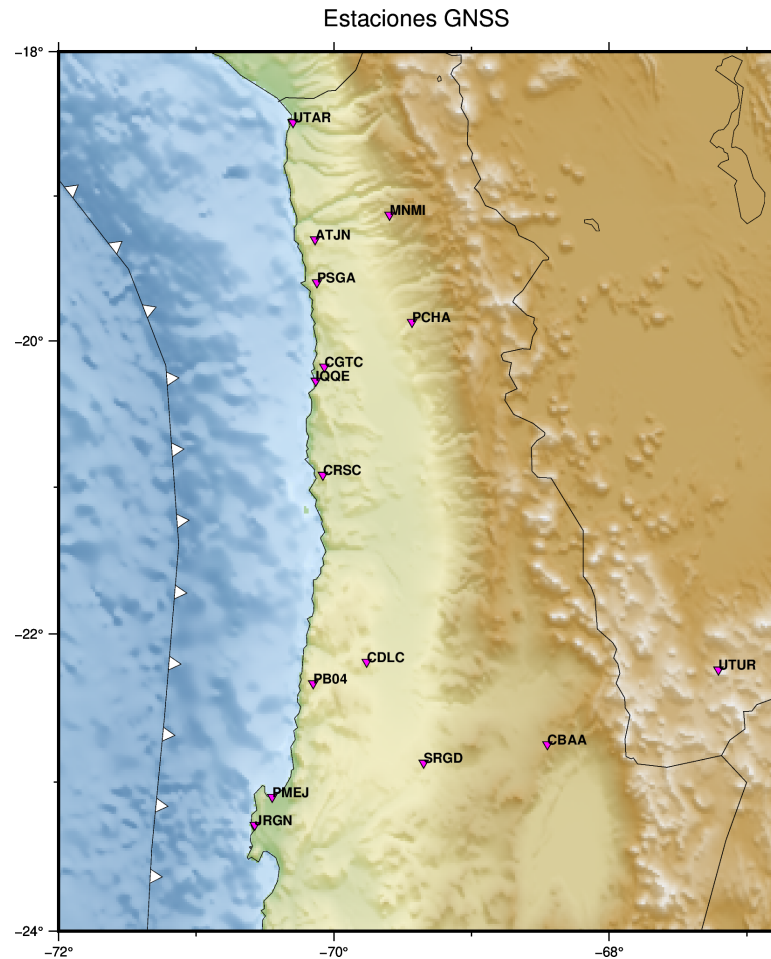
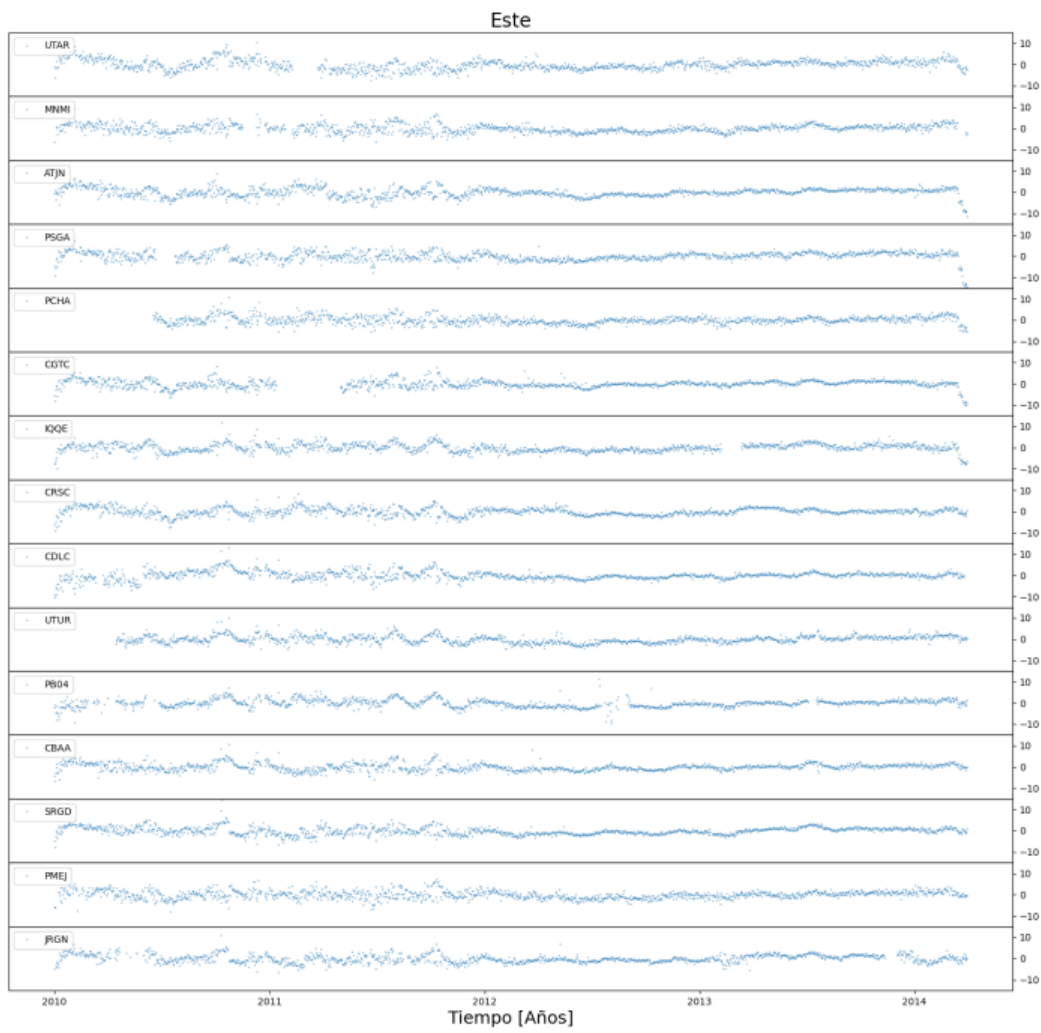
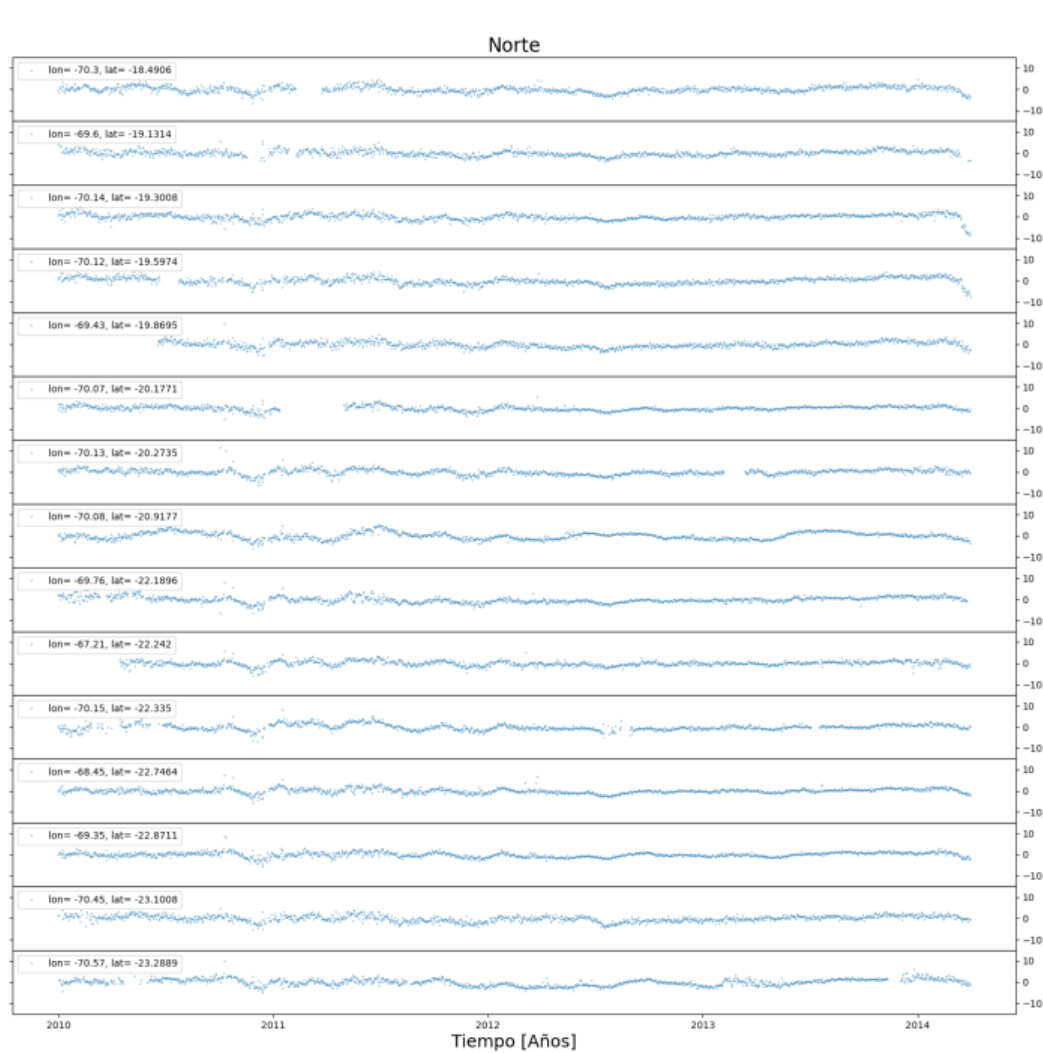


Figura 3.2.1: Estaciones GNSS Iquique-Pisagua

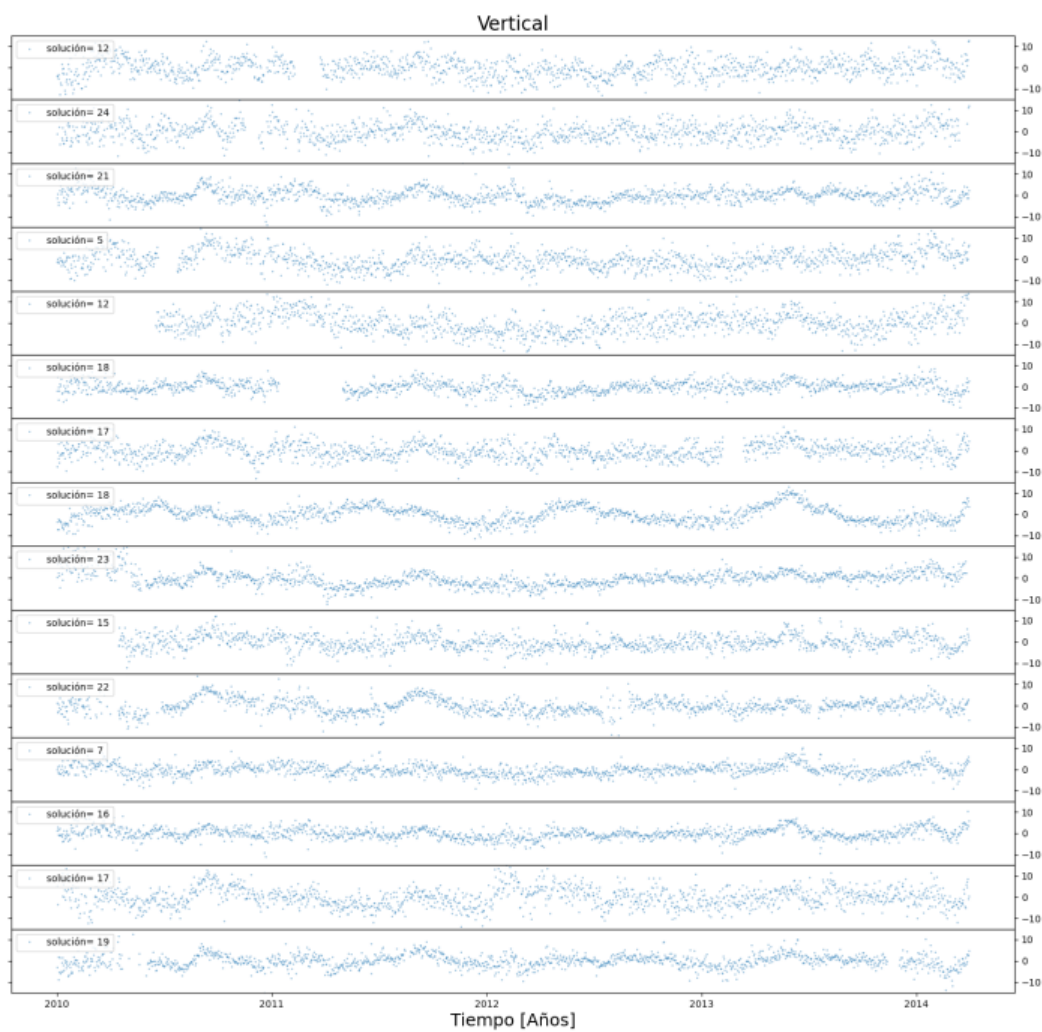
Las siguientes imágenes muestran las series de tiempo sin pendiente de las 14 estaciones del norte de Chile, luego de eliminar los valores atípicos utilizando una ventana de 6 días y filtrando variaciones diarias superiores a 2 mm en las diferentes componentes, como se puede ver en la metodología 4.



(a) Series de tiempo, componente Este



(b) Series de tiempo, componente Norte



(c) Series de tiempo, componente Vertical

Capítulo 4

Metodología

El procedimiento utilizado a grandes rasgos, para poder ejecutar Gratsid y obtener los resultados finales son los siguientes:

1. Preprocesamiento de datos.
2. Preparación del archivo de saltos y terremotos.
3. Definir hiper-parámetros de Gratsid.
4. Ejecutar Gratsid.
5. Visualizar y seleccionar las mejores soluciones por estación.
6. Obtención de residuales para la mejor solución de cada estación.
7. Cálculo del modo común de error filtrado (CMF) a partir del conjunto de residuales.
8. Ejecución de Gratsid considerando el CMF.
9. Selección de las mejores soluciones para las estaciones.

La Figura 3.2.1 muestra la ubicación de las estaciones utilizadas para el estudio del período previo al terremoto de Iquique-Pisagua. Como se mencionó anteriormente, estas series de tiempo proporcionan información en coordenadas locales, incluyendo componentes este, norte y vertical.

En primer lugar, es necesario preparar los datos antes de ingresarlos a Gratsid. Para lograrlo, se realizó un proceso de limpieza de datos en las series de tiempo. Se identificaron y eliminaron los valores atípicos en aquellos puntos donde la

pendiente entre dos puntos adyacentes superaba el umbral de 25mm. Esto implica que si en una serie de tiempo $\psi_{(t)}$ se encuentra un par de puntos ψ_k y ψ_{k+1} con una diferencia absoluta mayor a 25mm, se eliminan los datos correspondientes al día $k + 1$. Esto se hace asumiendo que las mediciones con una variación tan grande están afectadas por errores de medición.

Además, se aplicó un filtro Hampel a la señal con una ventana de 6 días con el objetivo de eliminar valores atípicos presentes en los datos. Se eligió una ventana de 6 días para no interferir significativamente con posibles eventos transitorios que puedan estar presentes en las estaciones. El filtro Hampel reemplaza los valores atípicos por valores más representativos al calcular la mediana dentro de la ventana de datos, contribuyendo así a suavizar la señal sin exagerar la eliminación de valores extremos.

El segundo paso sería crear los archivos de saltos para Gratsid. Estos archivos tienen un formato de cuatro columnas de la siguiente forma: año | mes | día | hora. Cada estación debe tener su respectivo archivo de saltos, y estos archivos se utilizan para incorporar funciones de escalón en los cálculos, como se menciona en la sección 2.8.1.

Para generar estos archivos se ocupó una base de datos de saltos creada por Nevada Geodetic Laboratory, el cual detecta un potencial salto cuando la distancia de la estación al epicentro (x) es $x < 10^{(\frac{M}{2}-0,79)}$. Pero debido a que el número de saltos en ciertos casos era muy seguido, se implementaron dos archivos de saltos para cada estación tomando en cuenta la magnitud del salto en sus tres componentes.

Para lograr esto, se calculó la primera derivada de cada serie de tiempo y se identificaron los valores que superaban un umbral en las componentes este, norte y vertical. Estos valores se cruzaron con las fechas de la base de datos de Nevada. De esta manera, se pudo seleccionar los saltos que representaran cambios significativos en la estación en cuestión.

Por lo que en definitiva para cada estación y conjunto se aplicó un filtro Hampel con valores de 2 mm para cada componente (este, norte y vertical). Sin embargo, los valores mínimos para la primera derivada que se consideraron como saltos fueron diferentes entre los dos casos. En el primer caso, se estableció un umbral de (2, 2, 2) mm (para este, norte y vertical), mientras que en el segundo caso se utilizó un umbral de (4, 4, 5) mm. Es fundamental señalar que los datos son

idénticos en ambos casos, y la única diferencia radica en el archivo de saltos a priori utilizado.

Luego tenemos que definir los hiperparámetros. El valor de la amortiguación de Tikhonov (ϵ^2) fue para todos los casos de 10^{-5} y la tolerancia aplicada fue de 0.01 para todos los casos, estos valores son utilizados en (Bedford and Bevis, 2018). El número de convergencias fue configurado a 25 convergencias y se definió a 15 el valor máximo de inicios de eventos transientes. Todos los eventos que se detectaron son de tipo multitransientes, esto significa que las funciones de escalón agregadas se limitaron únicamente a las que se encuentran en el archivo de saltos entregado previamente.

Con todos estos pasos completados, pudimos obtener las primeras soluciones de nuestro modelo de trayectoria con ajuste de transientes mediante un algoritmo "Greedy". Además, realizamos una selección visual cuidadosa, teniendo en cuenta las estaciones cercanas, para elegir las soluciones que mejor se adaptaran a los eventos transientes presentes en los datos. Esto permitió lograr un equilibrio entre el ajuste normal y el sobreajuste que el modelo tiende a realizar al intentar minimizar los residuales del modelo previo.

A continuación, nos enfocaremos en mejorar las soluciones propuestas por Gratsid al reducir el ruido de alta frecuencia. Para lograr esto, utilizaremos el Modo Común de Error (CME), diseñado específicamente para eliminar el ruido originado por errores en la trayectoria de los satélites. Para calcular el CME, necesitaremos los residuales de la solución de cada estación.

Como se mencionó previamente en la sección 2.9, los residuales del modelo se obtienen al restar nuestras predicciones de los datos obtenidos por los receptores GPS de la siguiente manera: $Res = d - d_{pred}$.

Por lo que ahora buscamos obtener el CME y posterior CMF a partir de los residuales de las estaciones. El procedimiento consiste seleccionar los paquetes de residuales por componentes (este, norte y vertical) y apilar los residuales de todas las estaciones por componente, de manera que tendremos tres matrices de tamaño $N_{estaciones} \cdot N_{días}$. Normalmente las series de tiempo no vienen completas, ya sea por la falta de medición o por datos mal obtenidos, por lo que un método utilizado es rellenar con un ruido gaussiano y media nula los datos de días donde la estación no tiene datos.

Posteriormente, se calcula el promedio diario para cada componente, lo que resulta en tres vectores de tamaño $1 \times N_{\text{días}}$. Estos vectores se someten a un proceso de filtrado con el propósito de preservar la mayor cantidad posible del ruido de alta frecuencia y reducir los residuales asociados a información geodésica, que generalmente consiste en procesos de baja frecuencia.

Para los datos reales del norte de Chile, la ventana correspondió desde el 1 de enero del año 2010 hasta el 31 de abril del año 2014. A pesar de que se ocuparon solamente estaciones que tenían más de 1,095 días (tres años de datos) fue necesario rellenar las matrices de residuales apilados, luego se aplicó un filtro "Lanczos" que funciona como un pasa bajo en función del periodo, que comienza desde los 45 días hasta los 91 días, por lo que todos los procesos que corresponden a periodos menores a 45 días se mantienen intactos, llegando al peak a los 91 días y continuando hasta el final de los días de medición, esto significa que todos los procesos de bajos periodos se mantendrán. Esto se hace para poder realizar la sustracción a los datos de los procesos tectónicos útiles dejando como resultado el ruido de alta frecuencia de los promedios obtenidos en el paso anterior.

Con estos datos procesados, es posible ejecutar Gratsid teniendo en cuenta el CMF obtenido. Esto se logra restando el CMF a los datos GNSS. Se mantuvieron los mismos hiperparámetros que se utilizaron en el paso 3, lo que permitió calcular nuevas soluciones y seleccionar aquellas que mejor se ajustaban a los datos y presentaban la menor cantidad de artefactos. Estas soluciones se presentarán en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Resultados

En la sección 2 revisamos como trabaja Gratsid para obtener las diferentes soluciones que determinan la trayectoria en las series de tiempo, además de encontrar eventos transientes en ellos. En la sección 4 se explicaron los procedimientos de una forma detallada, para finalmente llegar a dar a conocer los resultados. En la sección 3 explicamos el origen de los datos GNSS sintéticos usados y también de los datos GNSS reales IPOC para alimentar Gratsid.

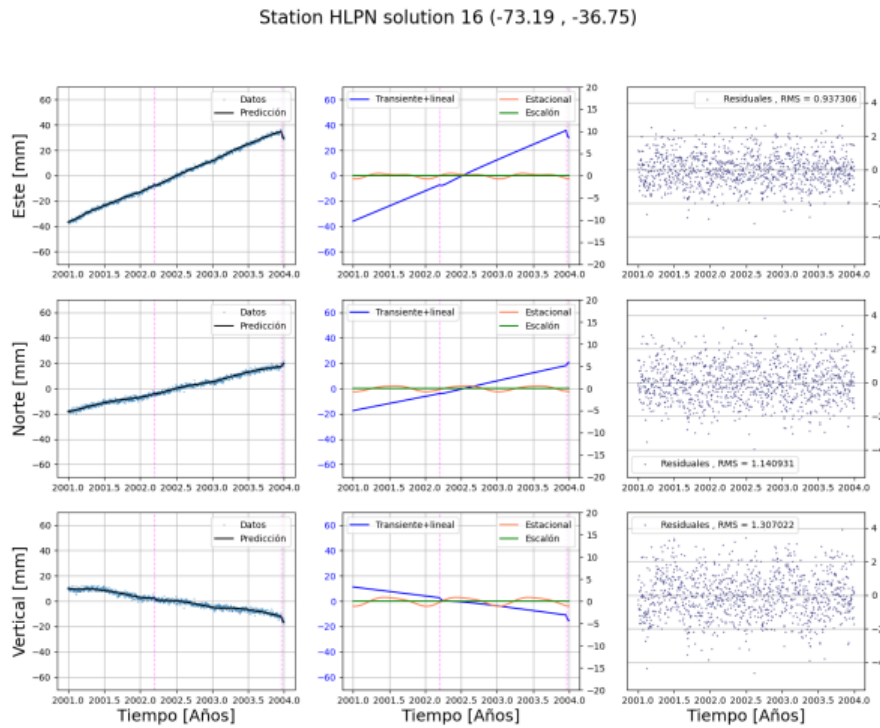
Los procedimientos para obtener los resultados de las series sintéticas fueron equivalentes a los aplicados en las series reales, y estas series sintéticas sirvieron como una validación de la metodología utilizada.

5.1. Resultados series sintéticas

En la sección de 4, se describió el procedimiento para las estaciones sintéticas. La configuración de Gratsid fue idéntica a la ocupada para los datos reales, aunque se presentan ciertas diferencias en los datos. Por ejemplo, que la ventana de tiempo es de tres años para los datos sintéticos y para los reales fue de cuatro años. Otra importante diferencia es que los datos sintéticos no presentan saltos en cambio los datos reales si tienen saltos por sismicidad y/o mantención de estaciones GNSS.

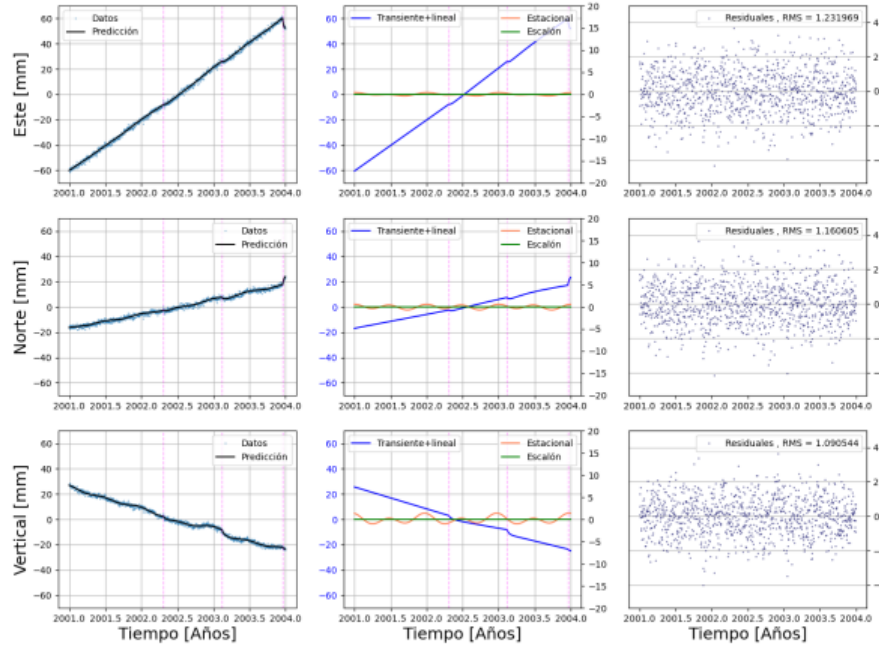
Debido a que no se presentan saltos, el modelo utilizado para la generación de vectores de desplazamiento y velocidad considerará las transientes encontradas más la componente lineal, dejando sin uso la componente de saltos utilizada en los datos reales.

Se trabajó con un conjunto de veinte estaciones, cuyas ubicaciones pueden apreciarse en la imagen 3.1.1. Se obtuvieron veinticinco soluciones para estas estaciones, y, de manera similar a los datos reales, se seleccionaron las soluciones que mejor se ajustaban a la trayectoria y presentaban una separación adecuada por componentes. A continuación, se mostrarán cinco de las veinte estaciones, dispuestas en orden de norte a sur.



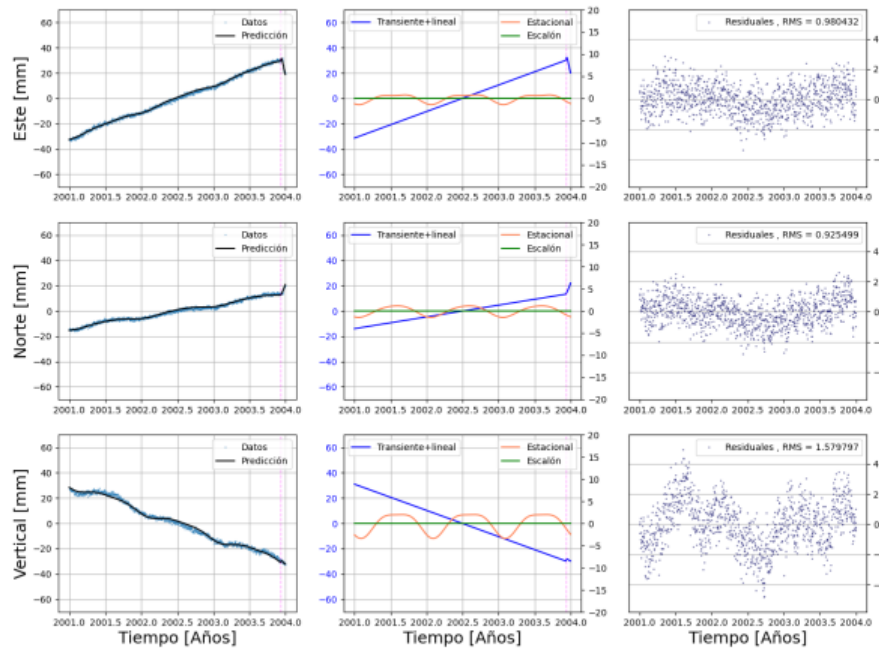
(a) Solución N°16 con CMF aplicado, estación HLPN.

Station PLVP solution 17 (-73.58 , -37.15)

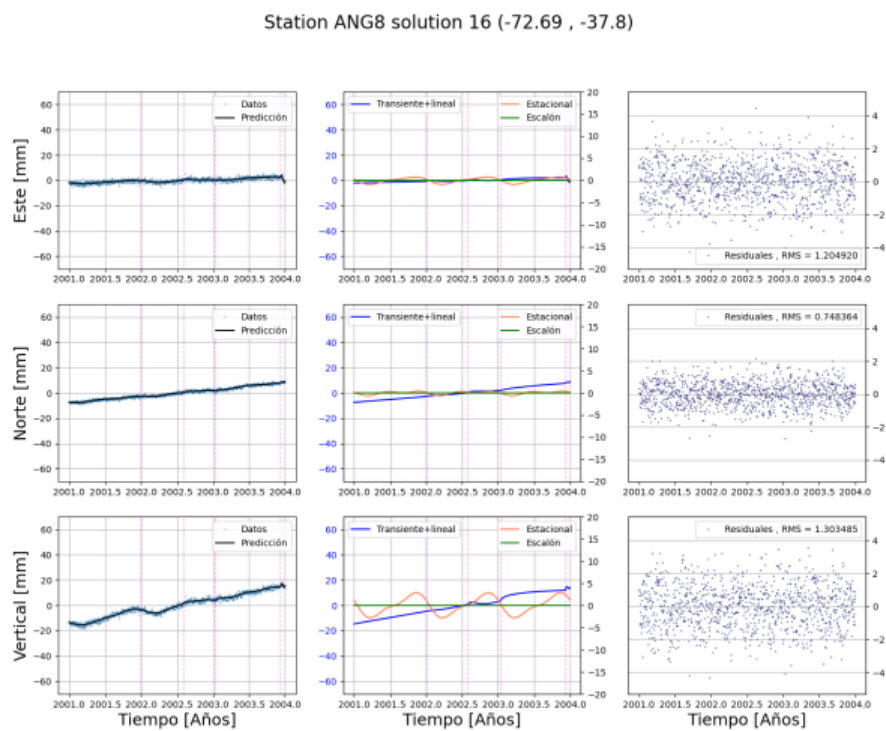


(b) Solución N°17 con CMF aplicado, estación PLVP.

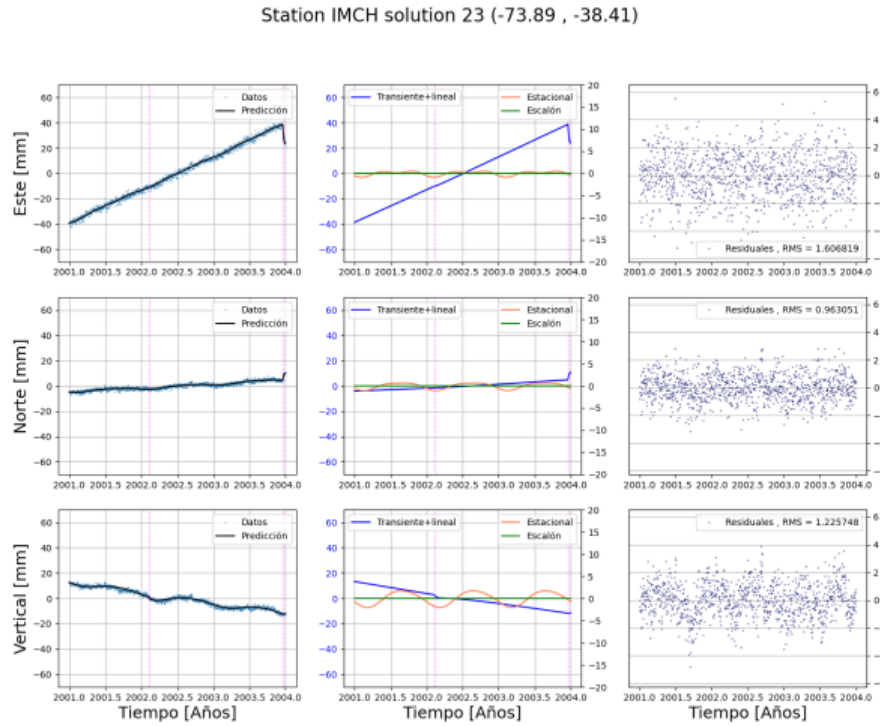
Station PECL solution 16 (-73.65 , -37.69)



(c) Solución N°16 con CMF aplicado, estación PECL.



(d) Solución N°16 con CMF aplicado, estación ANG8.

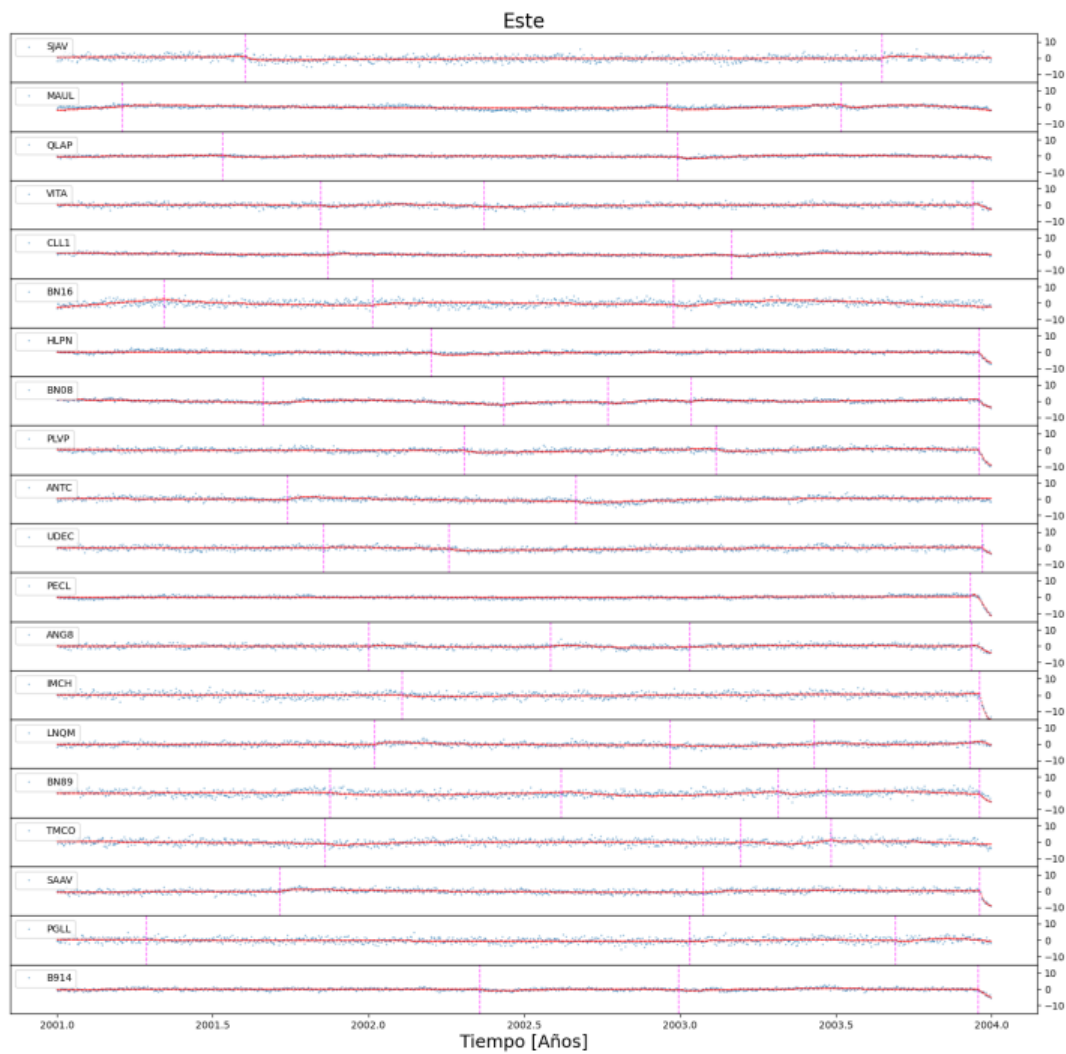


(e) Solución N°23 con CMF aplicado, estación IMCH.

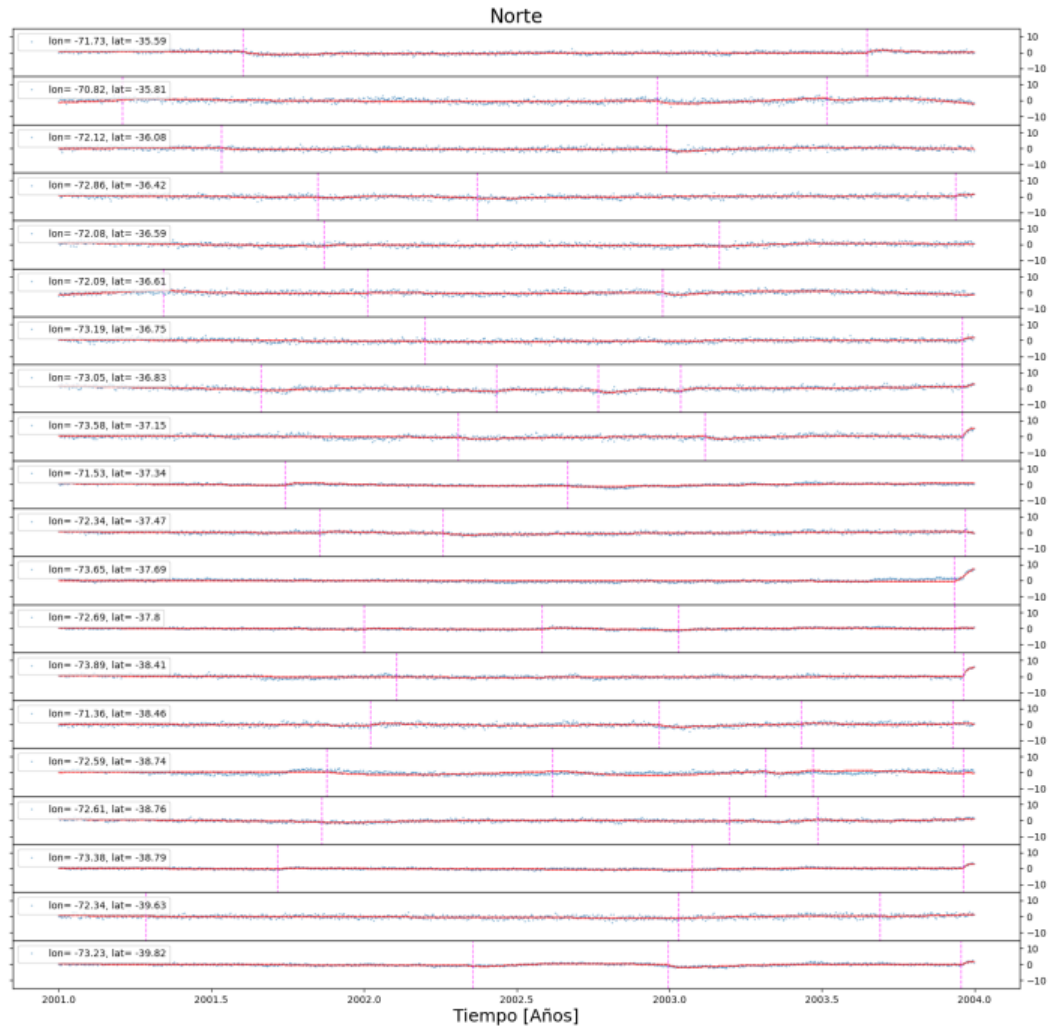
Figura 5.1.1: Las figuras 5.1.1a, 5.1.1b, 5.1.1c, 5.1.1d y 5.1.1e están compuestas por un panel 3x3 de imágenes donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). En la primera columna, se muestra el ajuste del modelo a los datos. En la segunda columna, se pueden ver tres componentes: el color mostaza representa la componente estacional, el color verde representa la componente de saltos o escalones, y el color azul representa la suma de dos componentes, la polinómica (que en este caso es una componente lineal) y las transientes encontradas (sin incluir los saltos). Por último, la tercera columna presenta los residuales del modelo. En estas imágenes, se pueden observar ciertas rectas verticales segmentadas, donde el color magenta indica el comienzo de un evento transitorio. Conjunto de datos sintéticos.

En 3.1 se dijo que los datos sintéticos presentan una transiente que comienza en el día 1,082 y termina en el 1,095. En los resultados obtenidos se puede observar que Gratsid detecta el comienzo de las transientes para muchas estaciones, destacando la estación PECL (5.1.1c) que detecta con éxito la transiente buscada. Sin embargo, para el resto de las estaciones, se encontraron eventos en el día 1,082, pero también se detectaron otros artefactos inherentes al ruido de la estación.

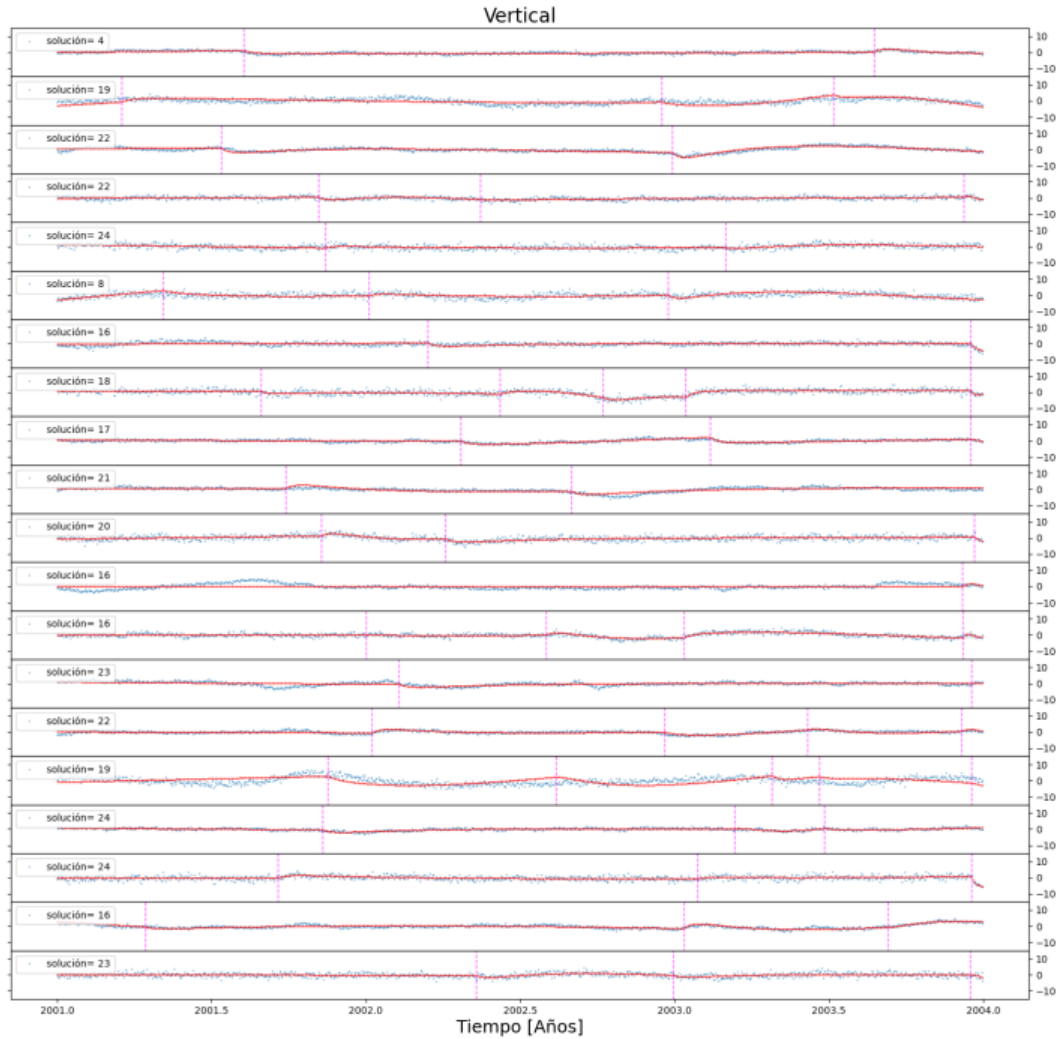
En la siguiente figura, se puede ver las soluciones elegidas para cada estación, con sus ajustes respectivos luego de eliminar la pendiente:



(a) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, componente Este.



(b) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, componente Norte.



(c) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, componente Vertical.

Figura 5.1.2: Compacto de todas las mejores soluciones para los datos sintéticos, luego de remover la pendiente. En color rojo se puede ver el ajuste del modelo. Las líneas verticales de color magenta indican el comienzo de eventos transientes. Conjunto de datos sintéticos.

La detección de transientes es para gran parte de las estaciones utilizadas, en los casos donde gratsid no encuentra el comienzo para el día 1,082, se debe a estaciones ubicadas muy lejos de la costa a excepto de TMCO.

5.1.1. Modelo considerando transientes + componente lineal, conjunto de datos sintéticos

El siguiente campo de velocidades 5.1.3 se realizó considerando el modelo de transientes más la componente lineal, pero extrayendo la pendiente de esta última.

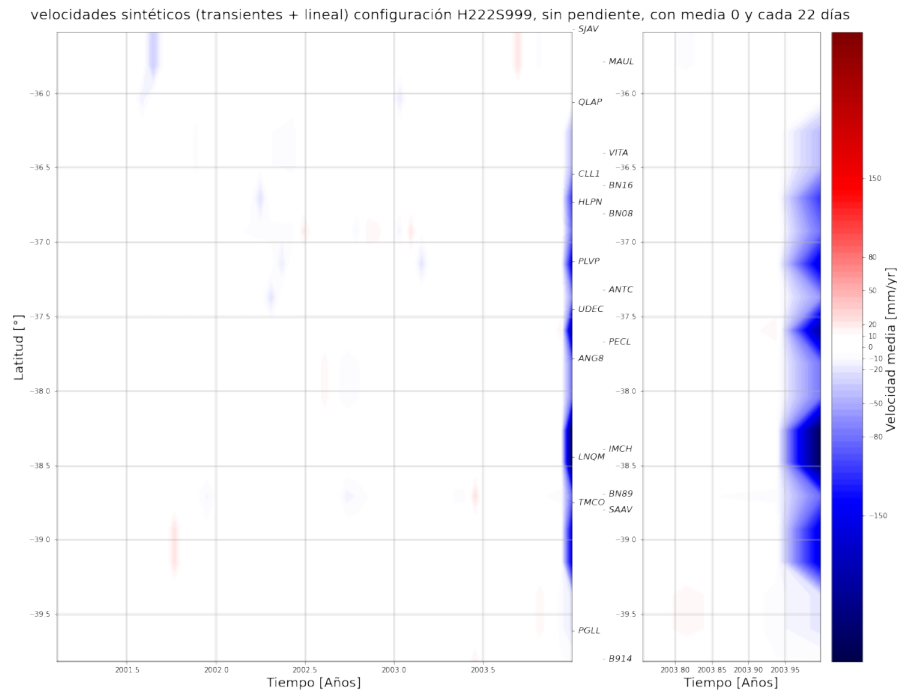


Figura 5.1.3: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.

Se puede observar la clara caída en la velocidad media de las estaciones afectadas por la transiente en el caso sintético para el final del periodo (desde el 2003.95). Esto es especialmente evidente en la zona de la estación IMCH, que muestra un desplazamiento significativo, como se apreciará en las siguientes figuras.

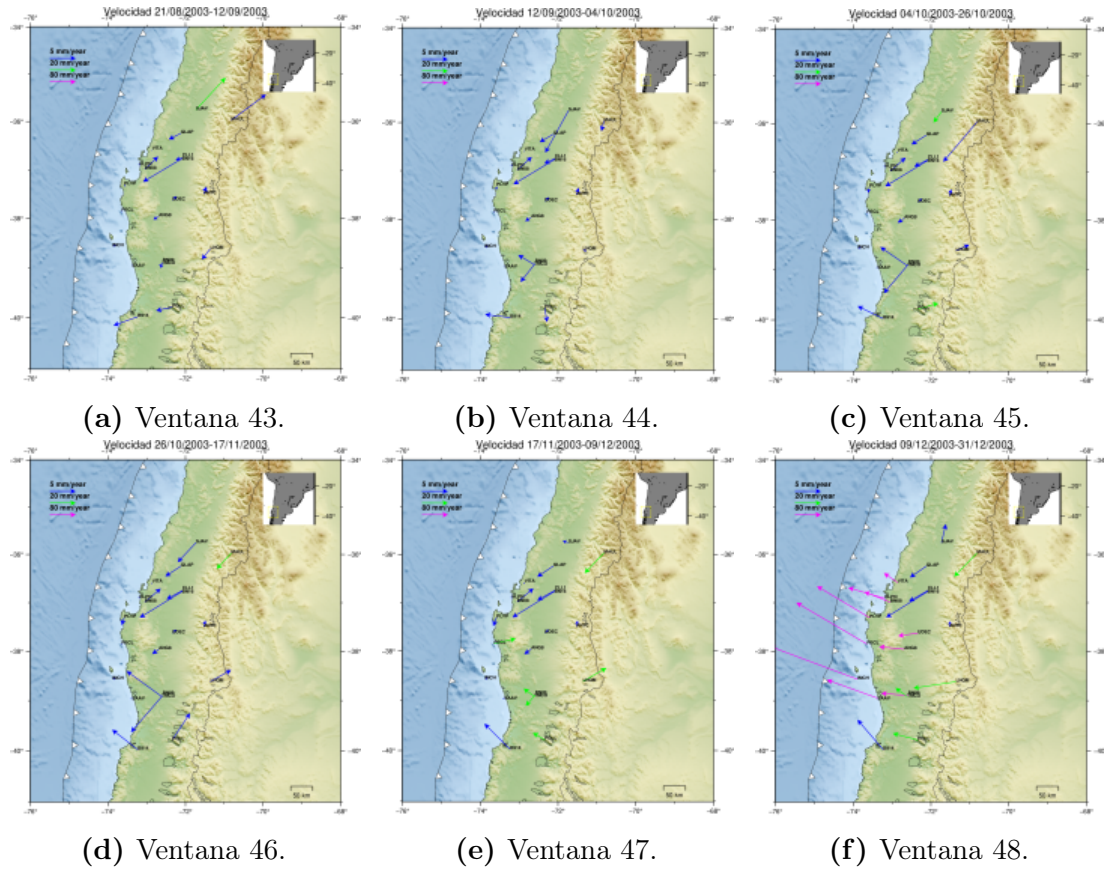


Figura 5.1.4: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días. Conjunto de datos sintéticos.

Para la ventana 48 5.1.4f el cambio en la magnitud y dirección es claro, y como la ventana es cada 22 días esta última contiene el cambio en la velocidad por la transiente generada. Sin embargo, es interesante notar que en ventanas anteriores también se observan disminuciones en la velocidad en dirección al océano, lo que no parece estar relacionado con la transiente del día 1,082.

Si ahora consideramos los desplazamientos de las estaciones GNSS:

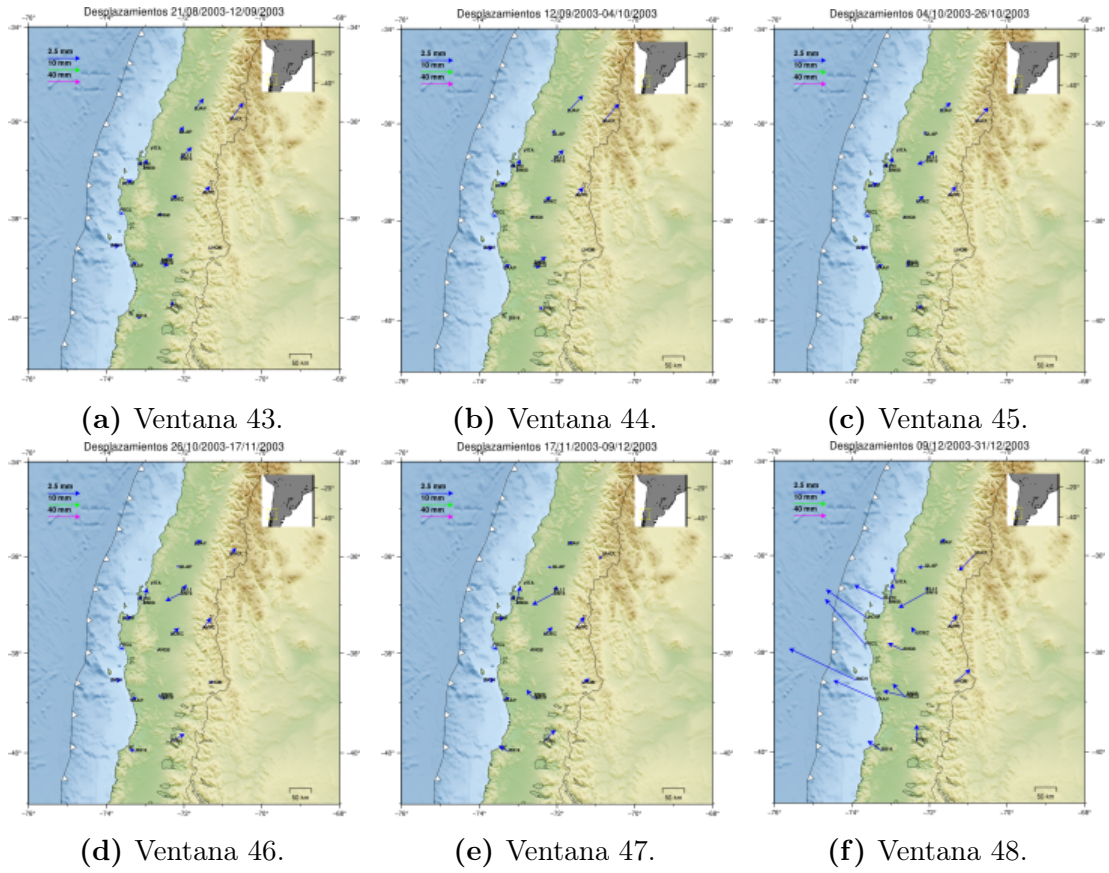


Figura 5.1.5: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días. Conjunto de datos sintéticos.

Para la ventana 48 de la figura 5.1.5f al igual que con las velocidades 5.1.4f, se puede ver el gran desplazamiento que presentan las estaciones GNSS. También para las ventanas anteriores notamos que los desplazamientos se ven bastante normales en magnitud y dirección considerando las pequeñas diferencias en el tiempo de comienzo de los eventos transientes.

5.2. Resultados series reales

Tal como fue visto en la sección 4 el procedimiento para las estaciones reales afectadas por el terremoto de Iquique-Pisagua constó con dos configuraciones diferentes en la componente de saltos, considerando para el primer caso una mayor cantidad de saltos que en el segundo. La finalidad de esto es notar las diferencia en la detección de eventos transientes, al verse afectado por sismos, ya que no se sabe a priori cuanto del desplazamiento en superficie fue producto de el evento

sísmico y cuanto fue por un supuesto evento asísmico.

En total se analizaron 14 estaciones GNSS, y se obtuvieron 25 soluciones para cada una de las configuraciones. De las 25 soluciones obtenidas se guardaron las que mejor se ajustaban a la trayectoria y que no sobre-ajustaran a los resultados, con el fin de disminuir los errores, esto se realizó mediante una inspección visual que consideró: el número de transientes, el WRMS (error cuadrado medio con pesos), el análisis en diferentes componentes y la cercanía de las estaciones.

5.2.1. Sismicidad en el norte de Chile, 2010-2014

Tal como se mencionó en la sección 2.5 existen varios trabajos que han intentado entender la relación de la microsismicidad y eventos transientes, junto a la aparición de semi-elipses en zonas de desacoplamiento. Trabajos como el realizado en (*Sippl et al., 2021*) compiló 8,750 sismos en Chile central entre el 2014-2018, pero previamente el mismo autor en (*Sippl et al., 2018*) ya se había realizado un catálogo pero para el norte de Chile para un periodo de 8 años, abarcando el terremoto de el año 2007 en Tocopilla y el de Iquique-Pisagua 2014.

En este trabajo utilizamos el catálogo proporcionado en el trabajo de (*Sippl et al., 2018*) y realizamos una imagen (5.2.1) que considera los eventos ocurridos por latitud en función del tiempo para el periodo entre el 2010 y el 2014 previo al terremoto de Iquique-Pisagua, junto con eso se realizó un gráfico (5.2.2) que considera el número de eventos y el momento sísmico acumulado por latitud entregando resultados interesantes.

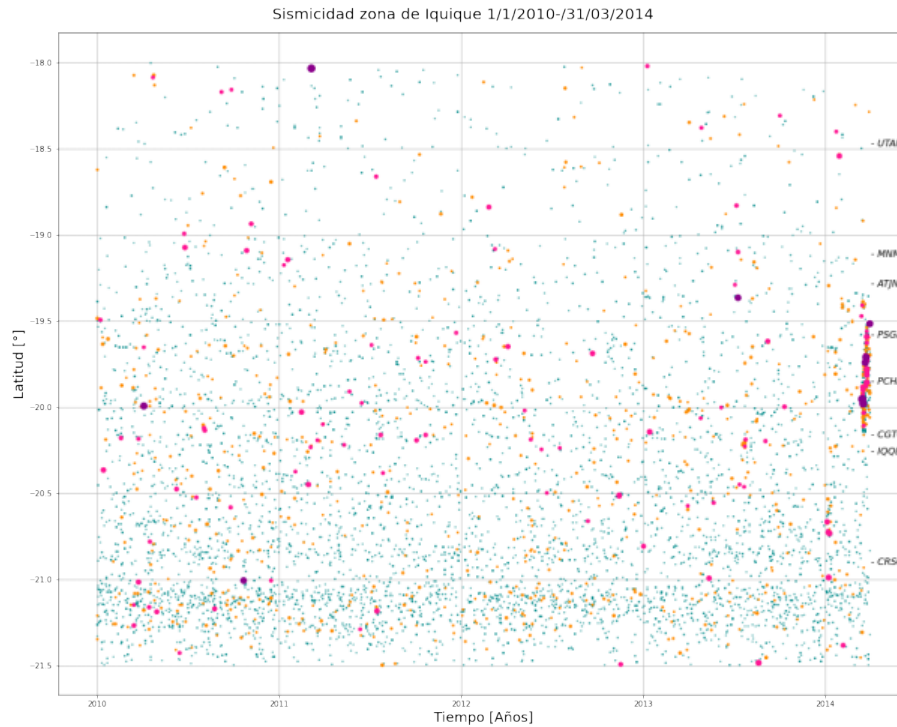


Figura 5.2.1: Sismicidad entre los -18° y -21.5° de latitud. Los sismos se han categorizado por color y tamaño. Los sismos de color cian oscuro corresponden a magnitudes superiores a 3 pero inferiores a 4, los de color naranja oscuro son eventos con magnitudes superiores a 4 e inferiores a 5, mientras que los de color rosa oscuro abarcan magnitudes entre 5 y 5.9, y finalmente, los de color magenta oscuro representan terremotos con magnitudes superiores a 6.

En esta figura, se observa un claro aumento en la magnitud y frecuencia de los eventos en un corto periodo de tiempo para la zona que se iba a ver afectada por el terremoto de Iquique-Pisagua, especialmente entre los -19.5° y -20.2° de latitud, observación que se ve apoyada por la figura 5.2.2, donde se aprecia una marcada cresta en el momento sísmico acumulado en la misma área, a pesar de que el número de eventos es relativamente bajo, siendo inferior a 600.

Además, resulta relevante señalar que se registró un elevado número de eventos sísmicos en la zona comprendida entre las latitudes -21° y -21.5° , donde se contabilizaron más de 1,200 sismos. No obstante, a pesar de esta alta frecuencia de eventos, el momento sísmico acumulado en esta área supera solo ligeramente a lo obtenido en otras latitudes que registraron un número significativamente

menor de sismos. Estos resultados proporcionan información valiosa para una mejor comprensión de la actividad sísmica en la región.

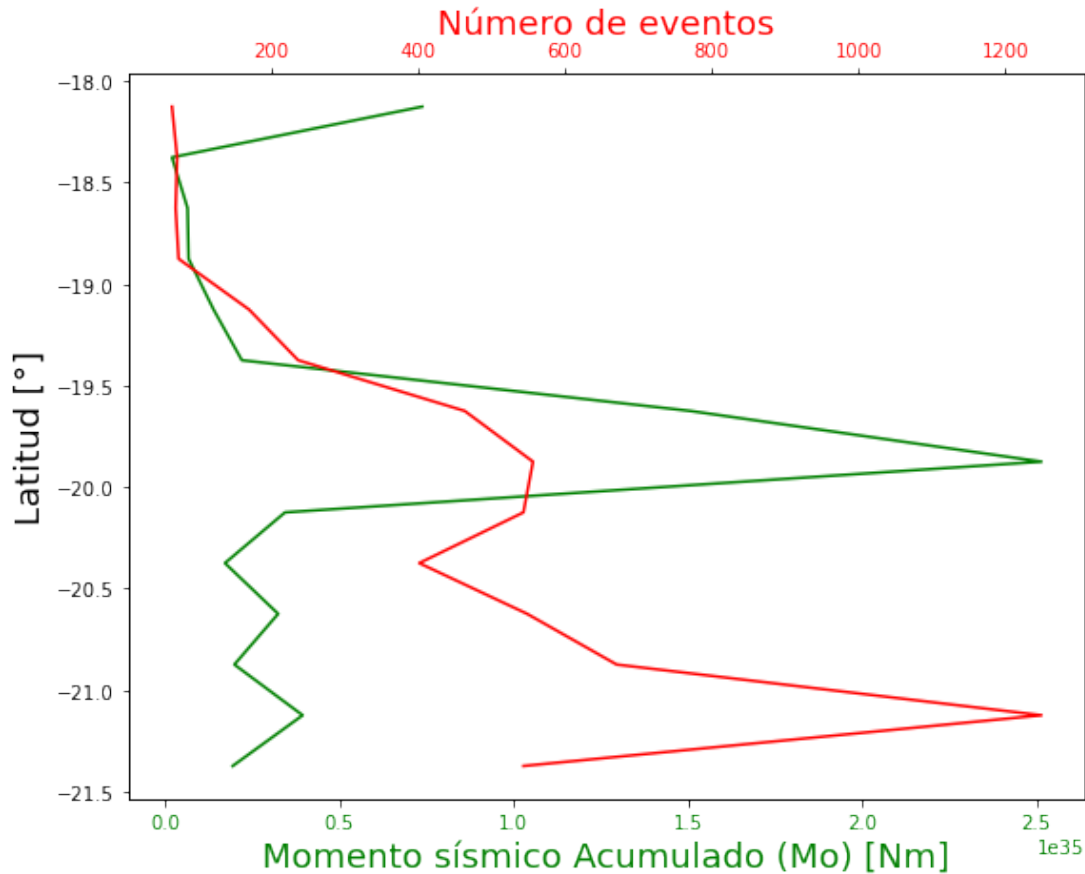


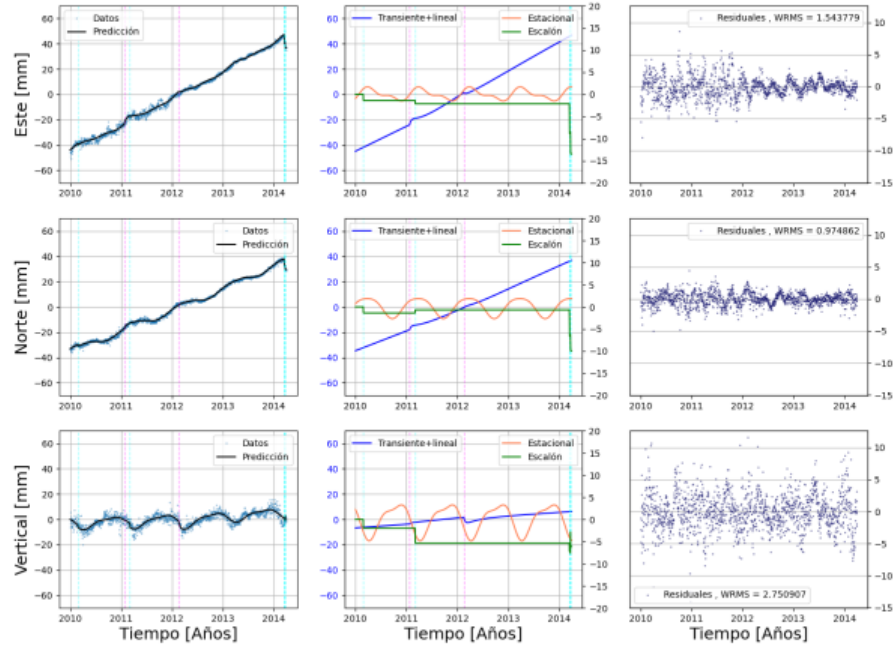
Figura 5.2.2: Momento sísmico y número de eventos por latitud. Para realizar esta figura se utilizaron los mismos sismos de la figura 5.2.1. Se definieron 15 valores de entre los -18.0° y -21.5° grados de latitud (resultando cada 0.25°), con esos límites definidos se clasificaron por segmentos cada uno de los eventos. Luego se calcularon los puntos medios de cada segmento y se graficaron sobre ellos.

5.2.2. Resultados con archivo de saltos (2,2,2) mm

Los siguientes resultados consideraron un archivo obtenido luego de intersectar la base de datos de terremotos de Nevada Geodetic Laboratory con los desplazamientos ocurridos para el día del evento señalado por Nevada. Para esta selección, se tomaron en cuenta únicamente aquellos eventos que mostraban un desplazamiento superior a 2 mm en las componentes Este-Norte-Vertical. Los siguientes gráficos, están dispuestas en orden geográfico, de norte a sur. Se exhibirán cinco de las catorce estaciones obtenidas, utilizando las estaciones más

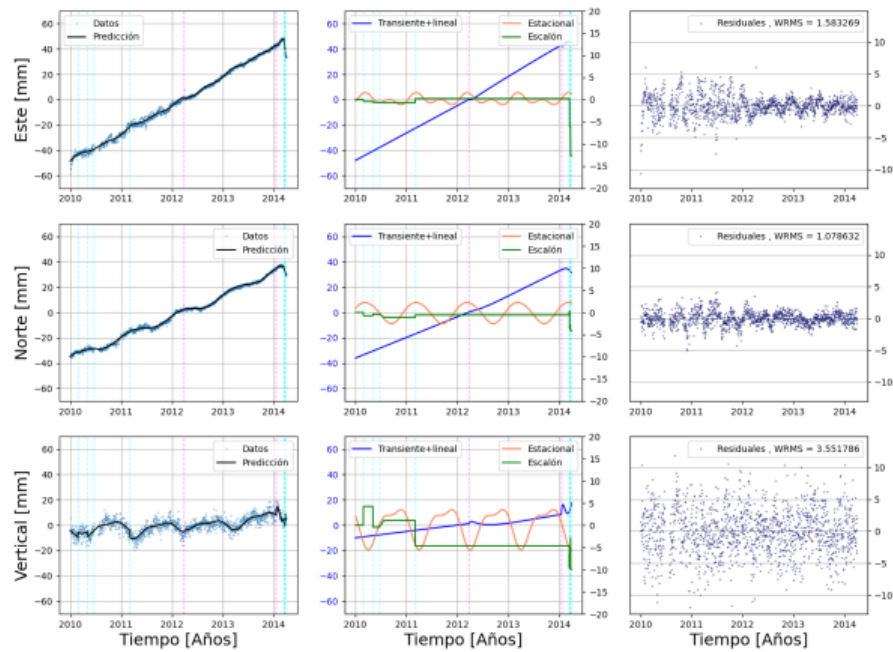
cercanas a el evento sísmico.

Station ATJN solution 21 (-70.1368 , -19.3008)

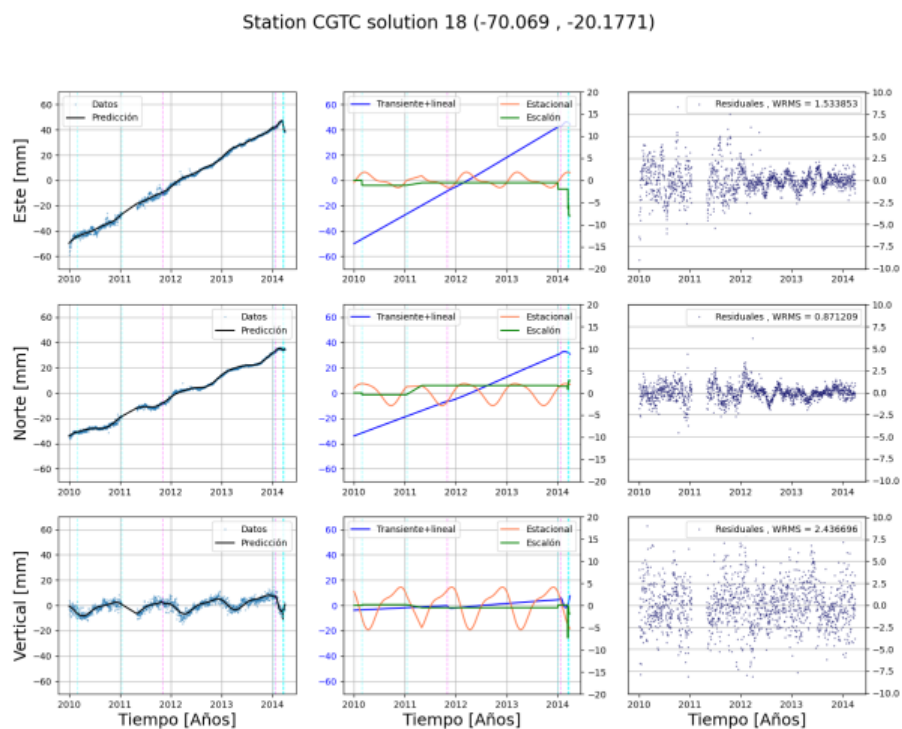


(a) Solución N°21 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación ATJN.

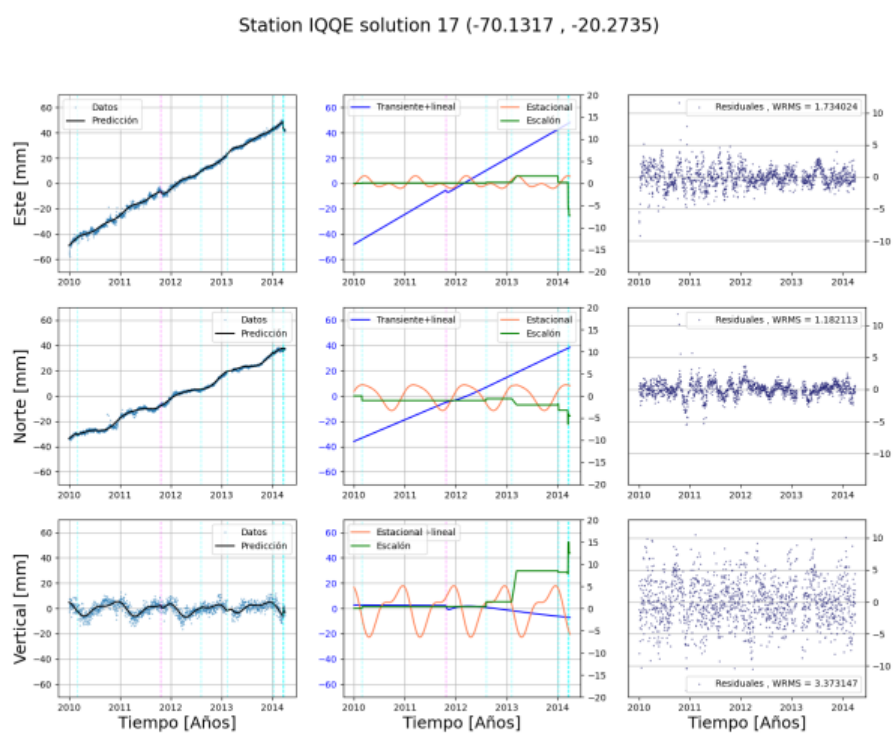
Station PSGA solution 5 (-70.123 , -19.5974)



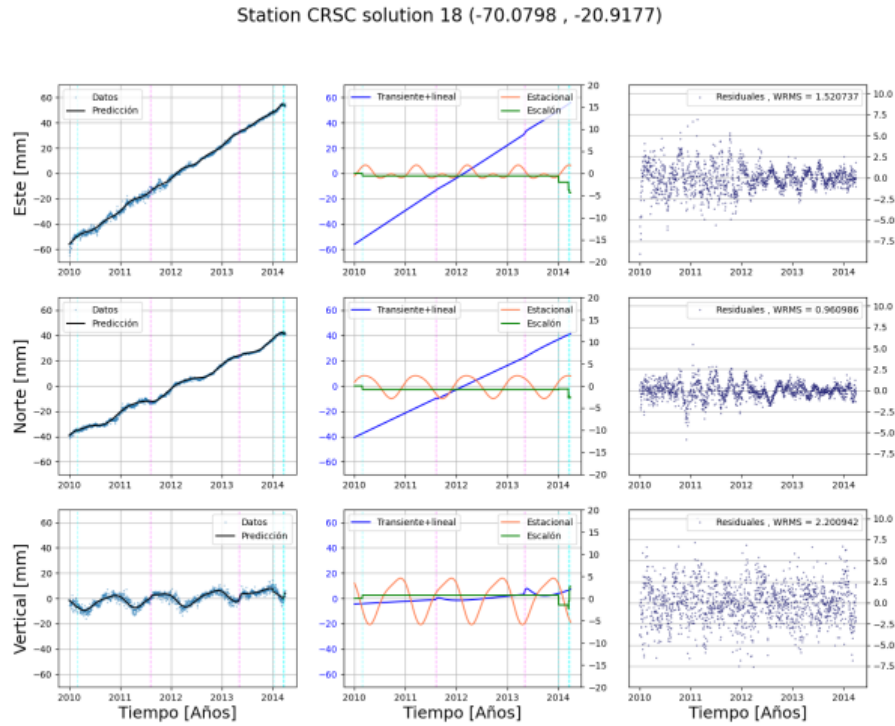
(b) Solución N°5 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación PSGA.



(c) Solución N°18 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación CGTC.



(d) Solución N°17 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación IQQE.



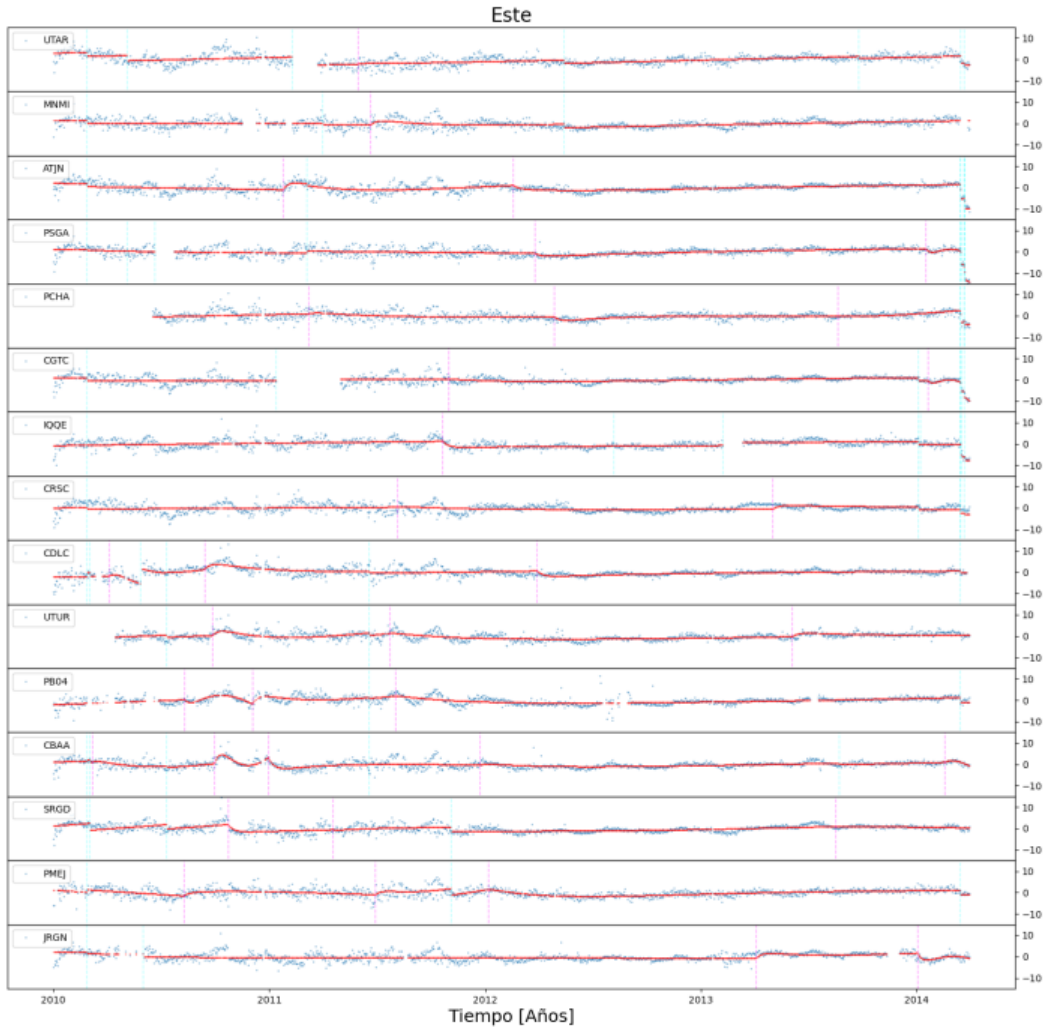
(e) Solución N°18 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación CRSC.

Figura 5.2.3: Las figuras 5.2.3a, 5.2.3b, 5.2.3c, 5.2.3d y 5.2.3e están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estas imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente.

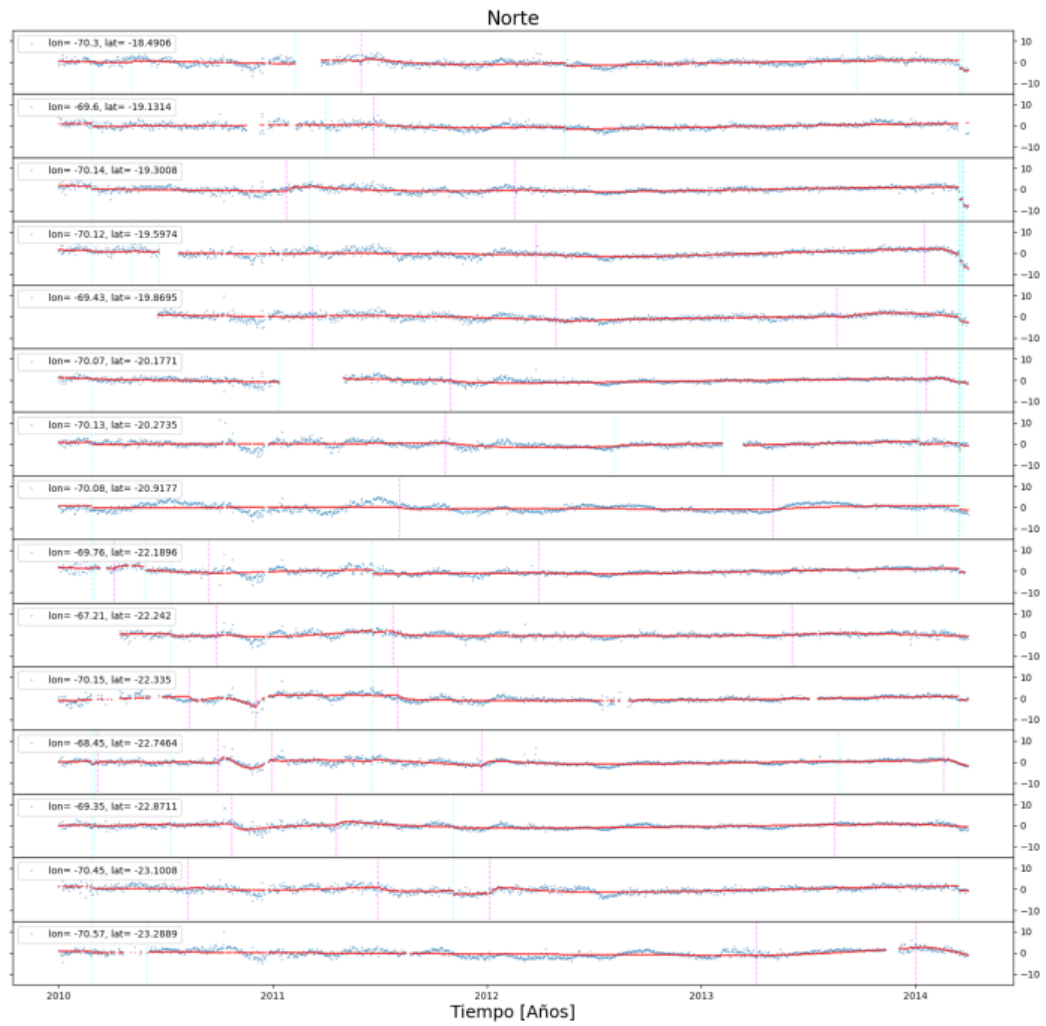
Los resultados detectan desde uno a dos eventos transientes, teniendo una coincidencia durante los primeros meses del 2012 o previo a este y a comienzo del 2014. Siendo el evento de principios del 2014 el de mayor interés ya que se encuentra más cerca al día del terremoto. Hay estaciones que no detectan un evento transiente durante el 2014 como la estación ATJN (5.2.3a) o la IQQE (5.2.3d), donde la componente de saltos ha predominado por sobre un evento transiente como en las demás estaciones.

Se puede observar de mejor manera el ajuste por componente de todas las

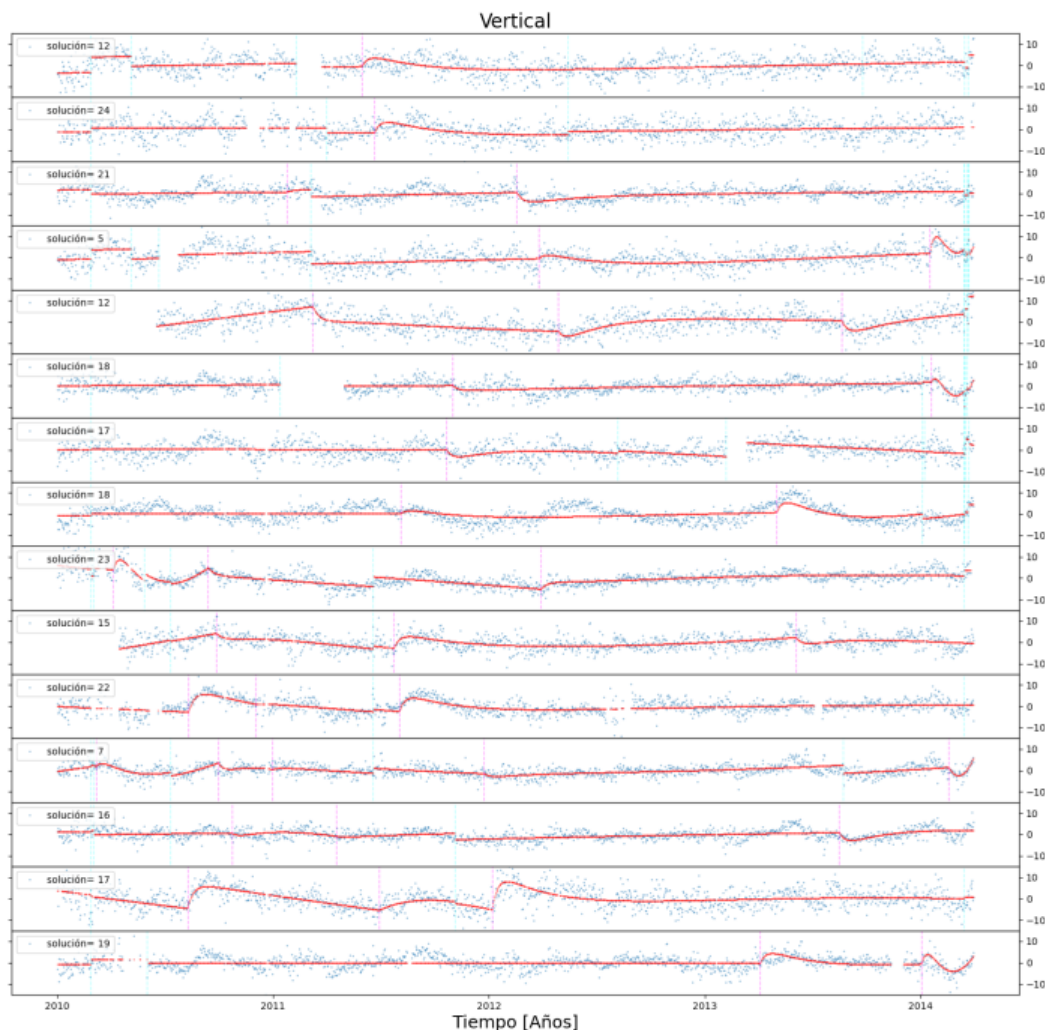
estaciones, con la siguiente figura:



(a) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, para la configuración de saltos (2-2-2) mm, componente Este.



(b) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, para la configuración de saltos (2-2-2) mm, componente Norte.



(c) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, para la configuración de saltos (2-2-2) mm, componente Vertical.

Figura 5.2.4: Las estaciones de la figura 5.2.4a, 5.2.4b, 5.2.4c están ubicadas de norte a sur, siendo el eje vertical la posición de la estación en *mm* y en el eje horizontal tenemos el tiempo en años. Las líneas verticales representan los saltos y comienzos de transientes, en color rojo está el modelo obtenido con los parámetros calculados eliminando la pendiente y la componente estacional de los datos, y las columnas representan el eje a partir de las coordenadas locales Este, Norte y Vertical respectivamente. Conjunto (2-2-2) mm.

Los resultados revelan la presencia de una transiente a principios de 2014, así como varias transientes de origen local de menor magnitud, lo cual es coherente con la escala y sensibilidad de lo que se está buscando. Algunas de estas estaciones se ven más afectadas por los saltos generados durante los eventos sísmicos que ocurrieron dos semanas antes del gran terremoto.

A partir de los resultados de la figura 5.2.4a , 5.2.4b, 5.2.4c se generaron campos de velocidades las que se presentarán a continuación en las figuras 5.2.5 y 5.2.8, donde el eje horizontal representa el paso del tiempo en años y el eje vertical la latitud en grados.

Se han generado dos tipos de imágenes: en las primeras, no se consideran los saltos como una componente adicional, mientras que en las segundas sí se incluyen. Para el primer tipo, se graficará la suma de la componente lineal y la de transientes. En el segundo caso, se añadirá también la componente de saltos. A estas velocidades se han ajustado al eliminar la pendiente y restarles su media, con el objetivo de obtener las pequeñas variaciones.

5.2.3. Modelo considerando transientes + componente lineal, conjunto (2-2-2)mm

El siguiente campo de velocidades 5.2.5 se realizó considerando el modelo de transientes más la componente lineal, pero extrayendo la pendiente de este manualmente.

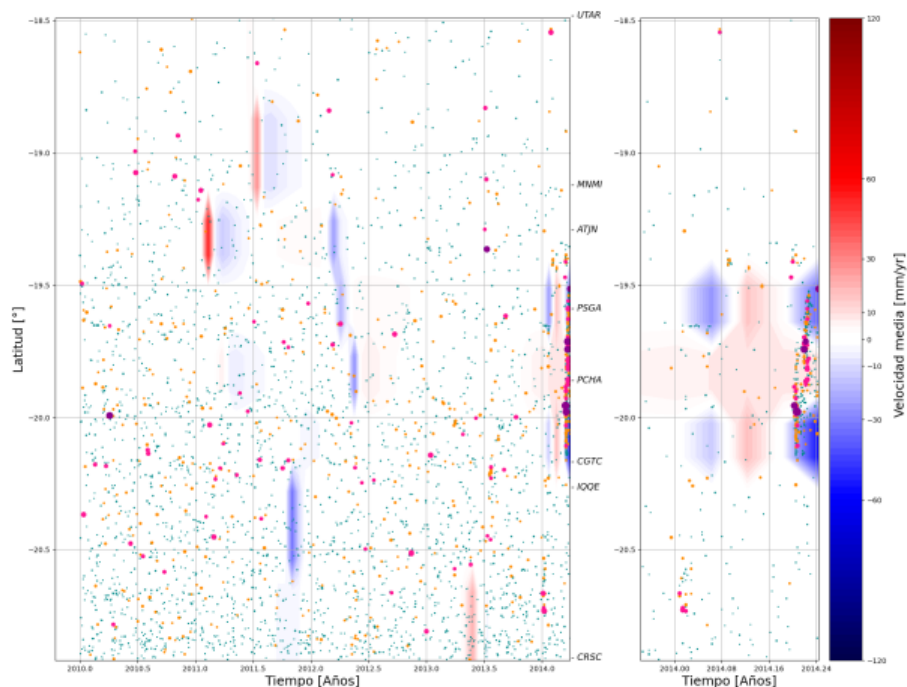


Figura 5.2.5: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.

A comienzos del 2011 y 2012 se puede ver un aumento muy fugaz en las velocidades a los $-19,2^\circ$, región que venía presentando sismos en los meses previos. Sin embargo, la zona más afectada por sismos se encuentra entre los $-19,5^\circ$ y los $-20,2^\circ$ de latitud, aproximadamente un mes antes del terremoto de Iquique-Pisagua. En esta región, se registraron sismos con una frecuencia mucho mayor y algunos de mayor magnitud. Durante 2014, se aprecian desaceleraciones al sur de la zona de dislocación.

Esto resulta consistente con las velocidades y desplazamientos de las estaciones GNSS, las que se pueden observar en la siguientes figuras respectivamente:

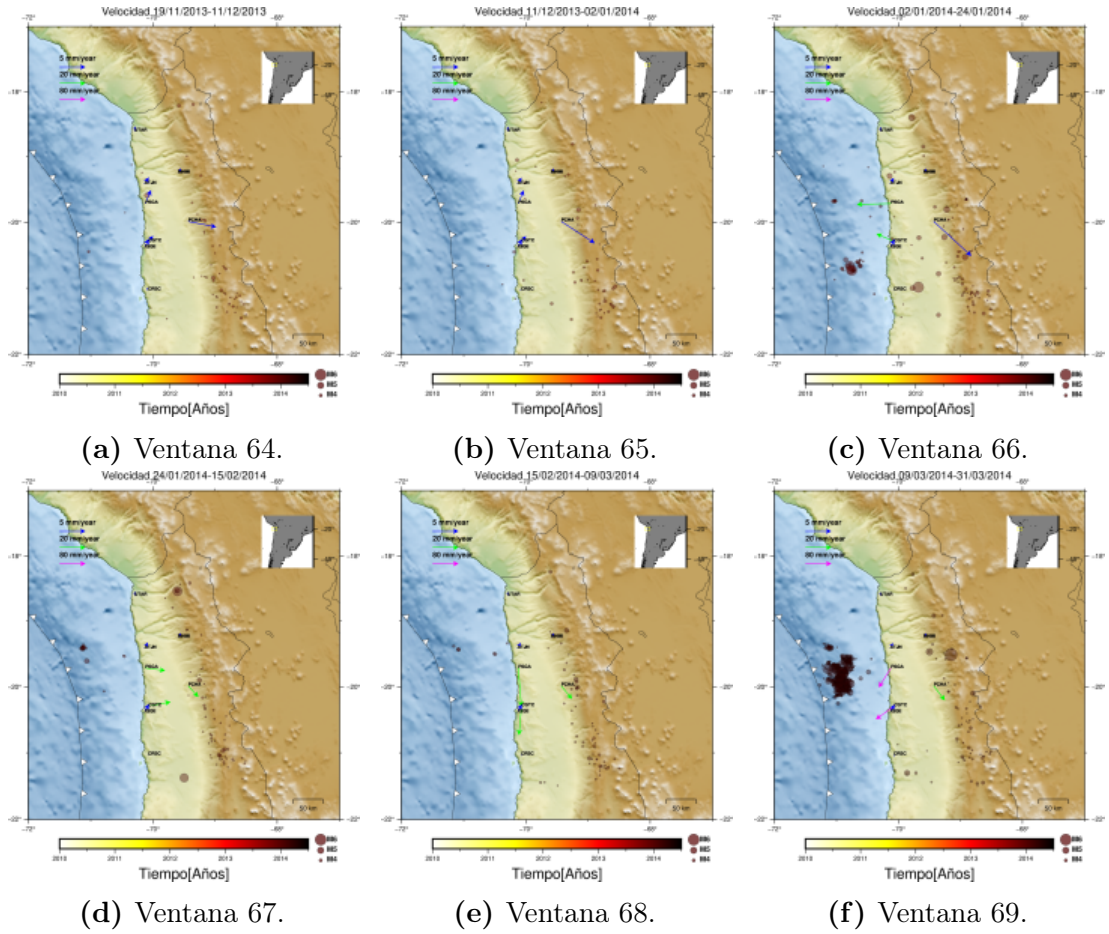


Figura 5.2.6: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.

Podemos observar que las estaciones presentan velocidades bajas, lo que indica que se encuentran en una situación de relativa estabilidad. Sin embargo, a comienzos de 2014, se producen variaciones significativas en los vectores de velocidad, lo que sugiere un cambio en la dinámica de la región. En la última ventana (5.2.6f), se observa un aumento importante en la velocidad, y en las estaciones que detectaron el inicio de una transiente, se puede apreciar claramente una dirección hacia el suroeste.

Si ahora consideramos los desplazamientos de las estaciones GNSS:

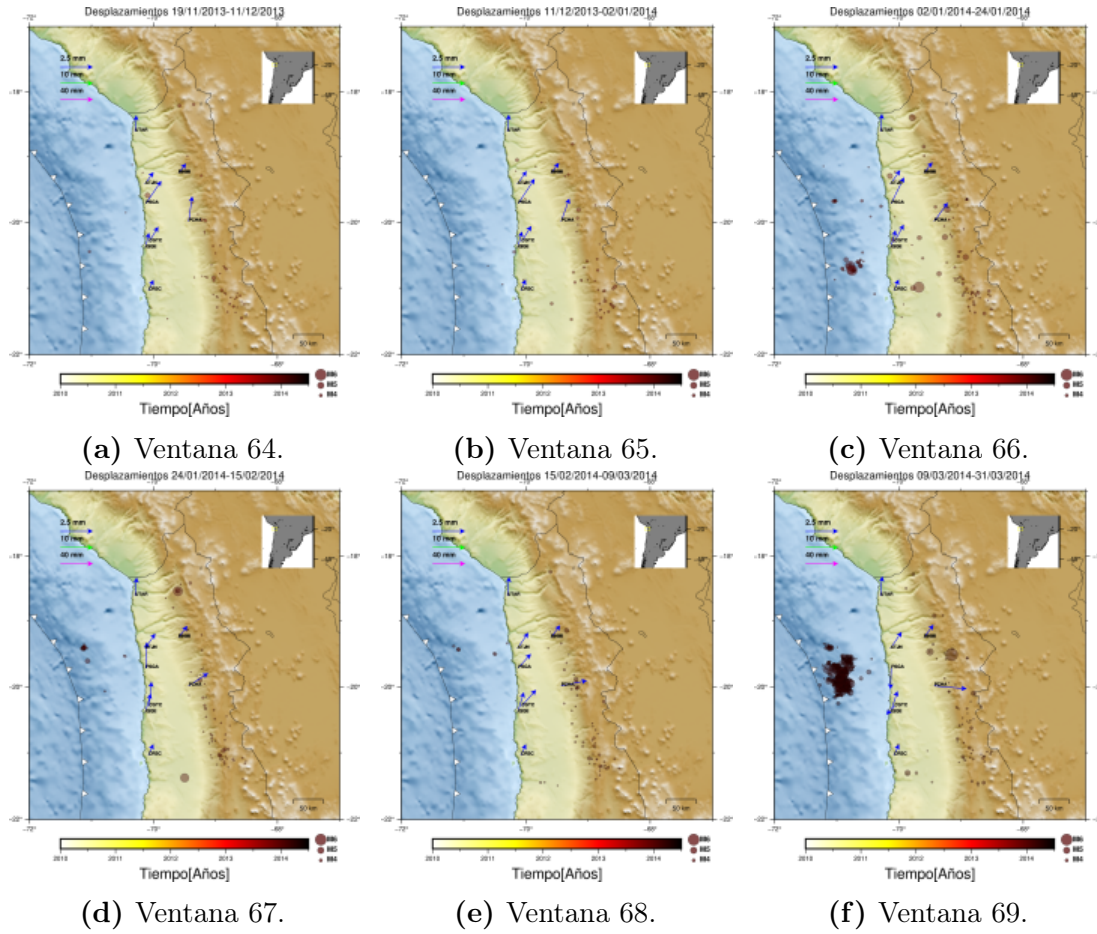


Figura 5.2.7: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.

Los desplazamientos observados son coherentes con las velocidades obtenidas, mostrando movimientos predominantemente hacia el sur y un cambio en la dirección. En general, todos los desplazamientos se dirigían hacia el noreste, pero en el último periodo, las estaciones ATJN y CGTC, que detectaron el inicio de la transiente, experimentaron un cambio ligero hacia el océano. Esto se traduce en una desaceleración importante, que se refleja claramente en las velocidades mostradas en la figura 5.2.9f.

5.2.4. Modelo considerando transientes + componente lineal + saltos, conjunto (2-2-2) mm

El siguiente campo de velocidades se realizó considerando el modelo de transientes más la componente lineal y saltos, pero extrayendo la pendiente de este.

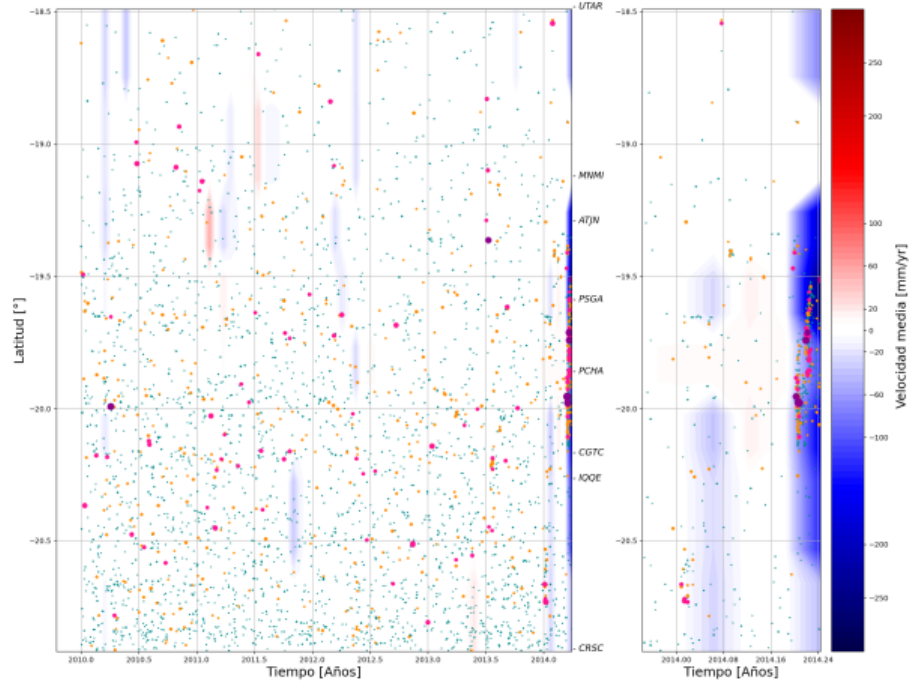


Figura 5.2.8: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal + saltos. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.

Los resultados al agregar los saltos se ven intensificados lo que viene a ser muy lógico al considerar bruscos desplazamientos. Lo que si se puede notar y es muy evidente es lo ocurrido previo al terremoto de Iquique-Pisagua donde la zona presentó una fuerte desaceleración esto es mucho más notorio al considerar los saltos como parte del movimiento presentado. Esto último también se puede ver en los vectores de velocidad de a continuación:

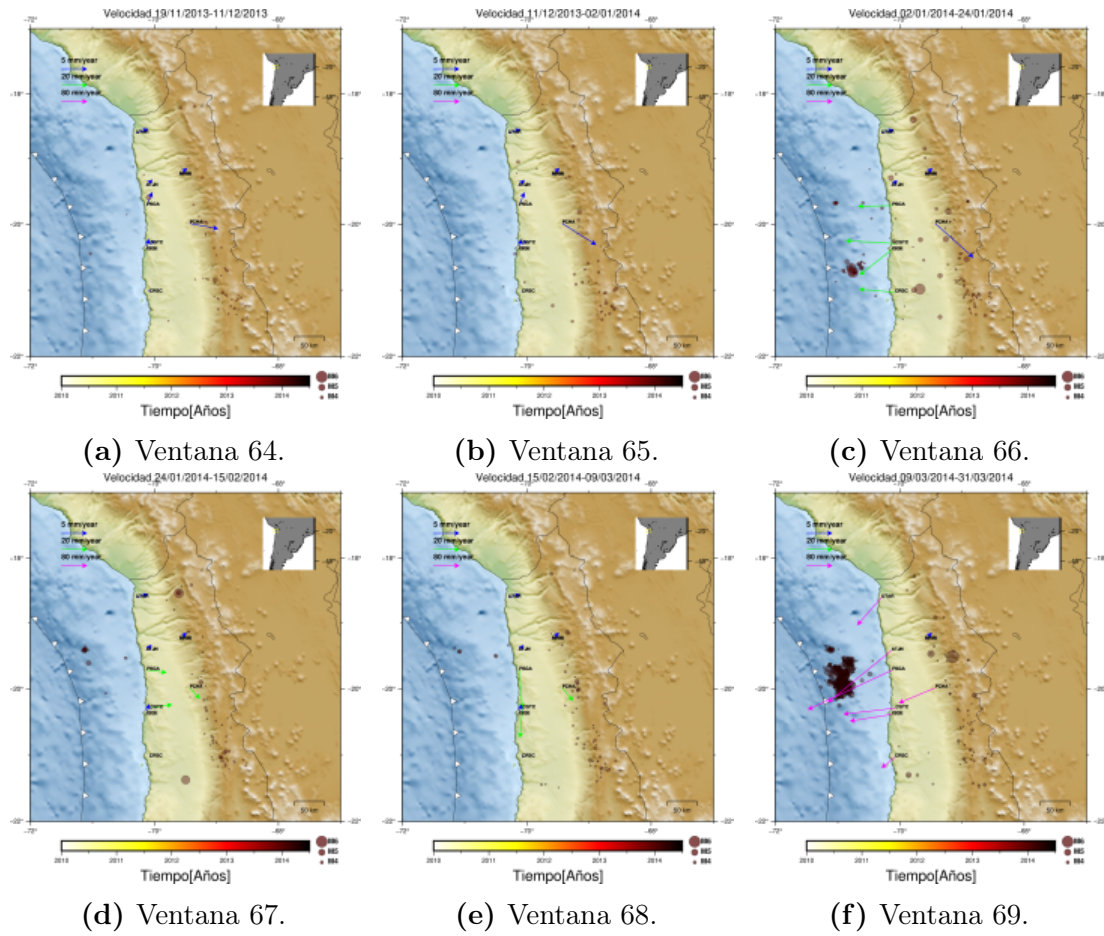


Figura 5.2.9: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.

A partir de la figura 5.2.9c, se aprecia una variación significativa tanto en las magnitudes como en la dirección de las velocidades de las estaciones. Esta tendencia continúa hasta llegar a la última ventana (5.2.9f), donde las estaciones se desplazan claramente hacia el océano, especialmente en la dirección del gran foco de actividad sísmica ubicado a los -20° de latitud.

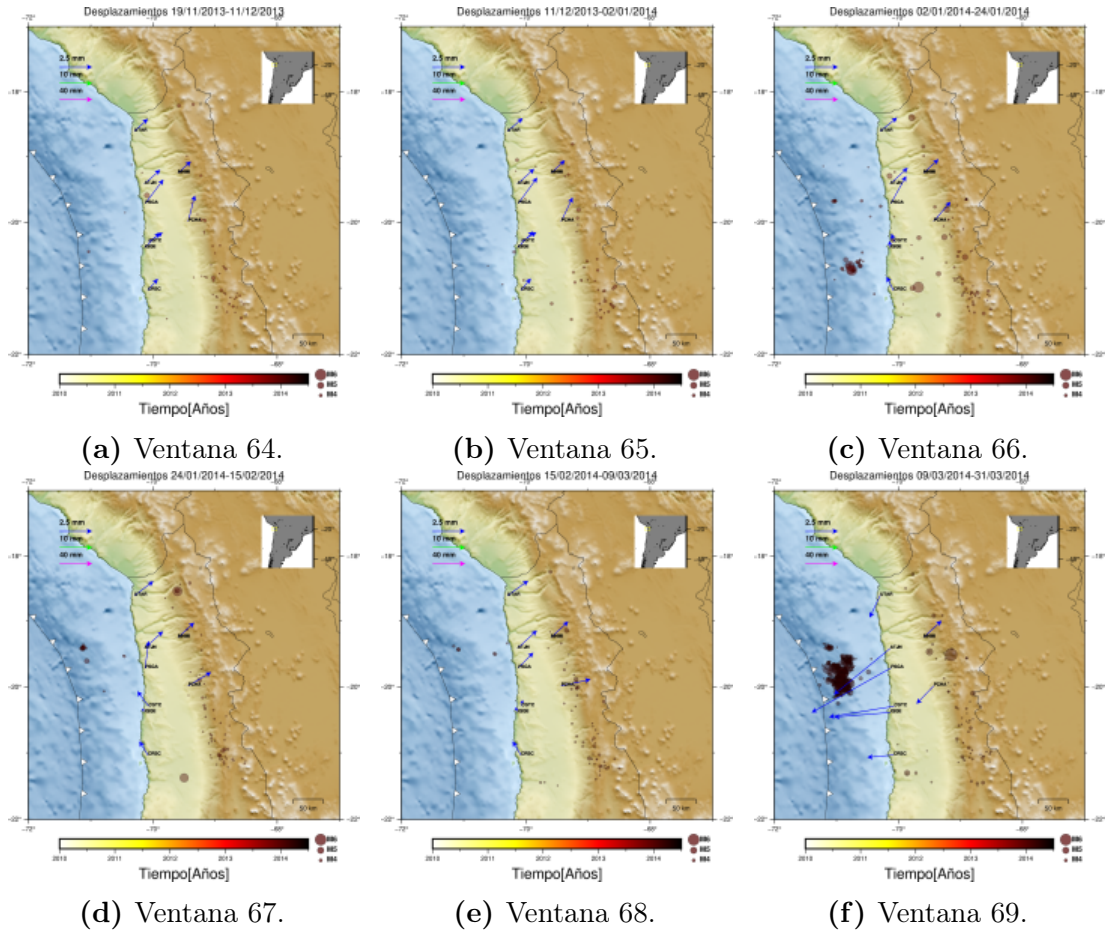
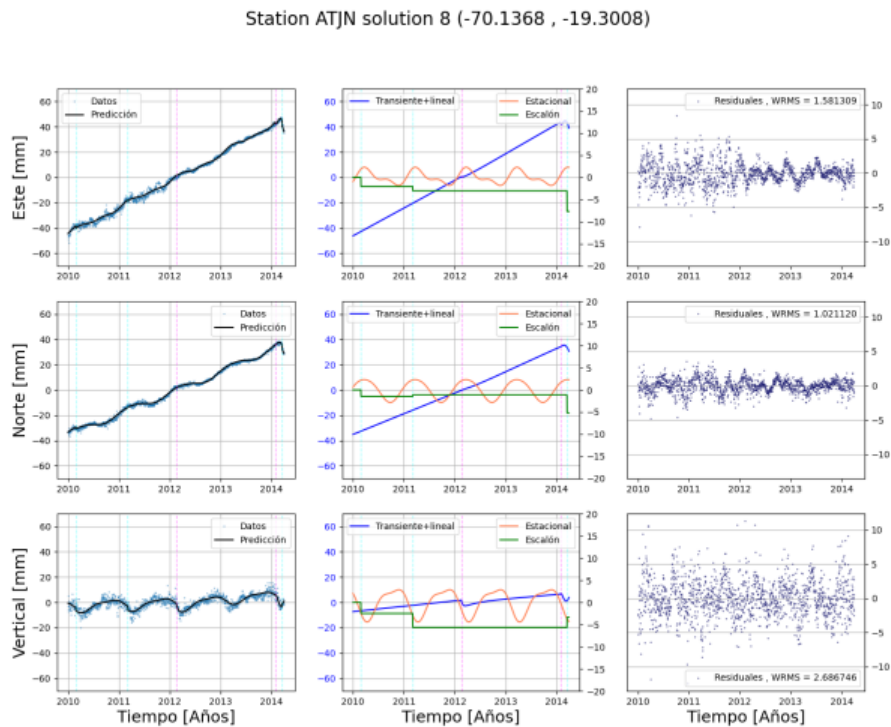


Figura 5.2.10: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (2-2-2) mm.

Los desplazamientos de las estaciones cambian entrando al 2014 lo que se presenta como cambios en la velocidad de la estación. Para la ventana final, los desplazamientos presentan una gran caída en dirección a la fosa y una alta sismicidad localizada a los -20° de latitud.

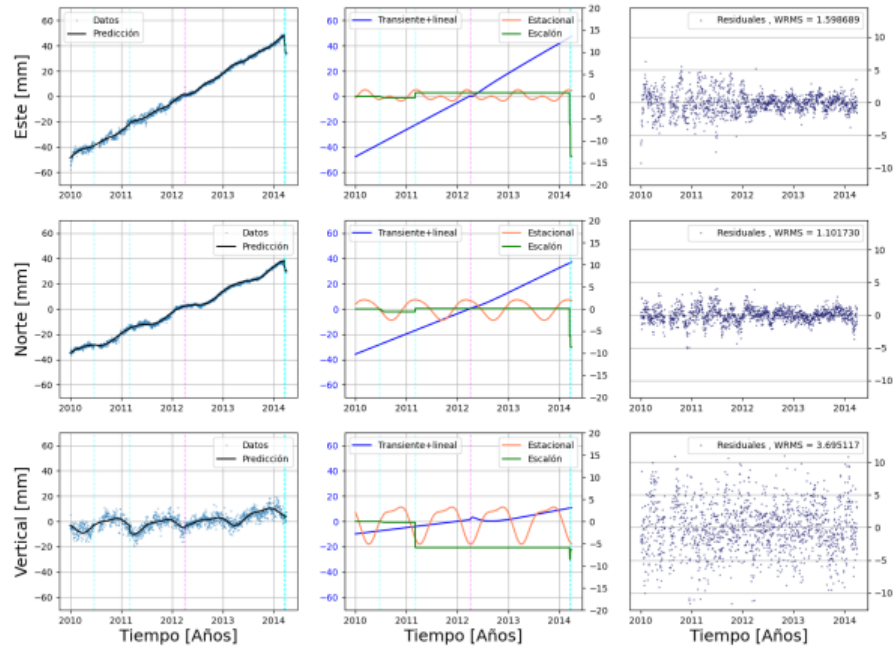
5.2.5. Resultados con archivo de saltos (4,4,5) mm

Los resultados de esta sección se obtuvieron luego de intersectar la base de datos de saltos de Nevada Geodetic Laboratory con los desplazamientos ocurridos para el día registrado por Nevada. En este caso, solo se consideraron los saltos que presentaban un desplazamiento superior a los 4 mm en la componente Este y Norte, y las superiores a 5 mm en la vertical, por lo que el número de eventos se verá disminuido en comparación a la sección anterior con la configuración (2,2,2) mm y se utilizarán las mismas estaciones que en caso anterior.



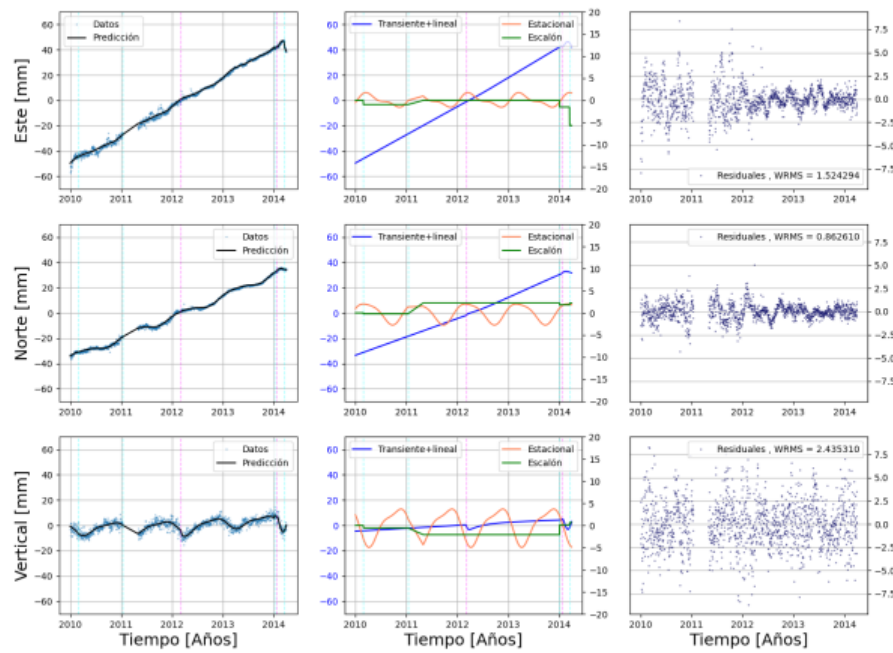
(a) Solución N°8 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación ATJN.

Station PSGA solution 21 (-70.123 , -19.5974)



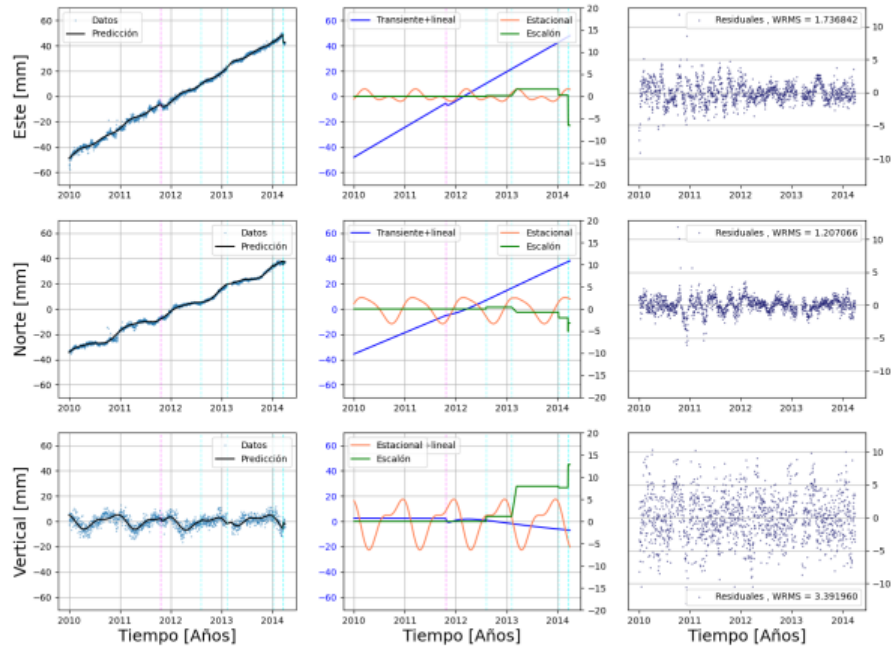
(b) Solución N°21 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación PSGA.

Station CGTC solution 8 (-70.069 , -20.1771)

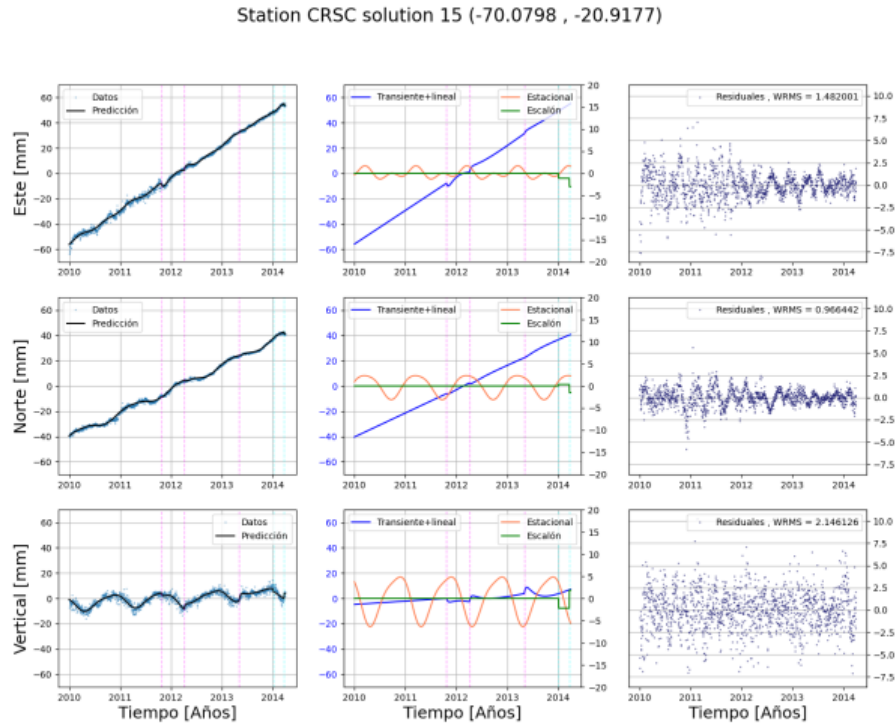


(c) Solución N°8 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación CGTC.

Station IQQE solution 11 (-70.1317 , -20.2735)



(d) Solución N°11 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación IQQE.

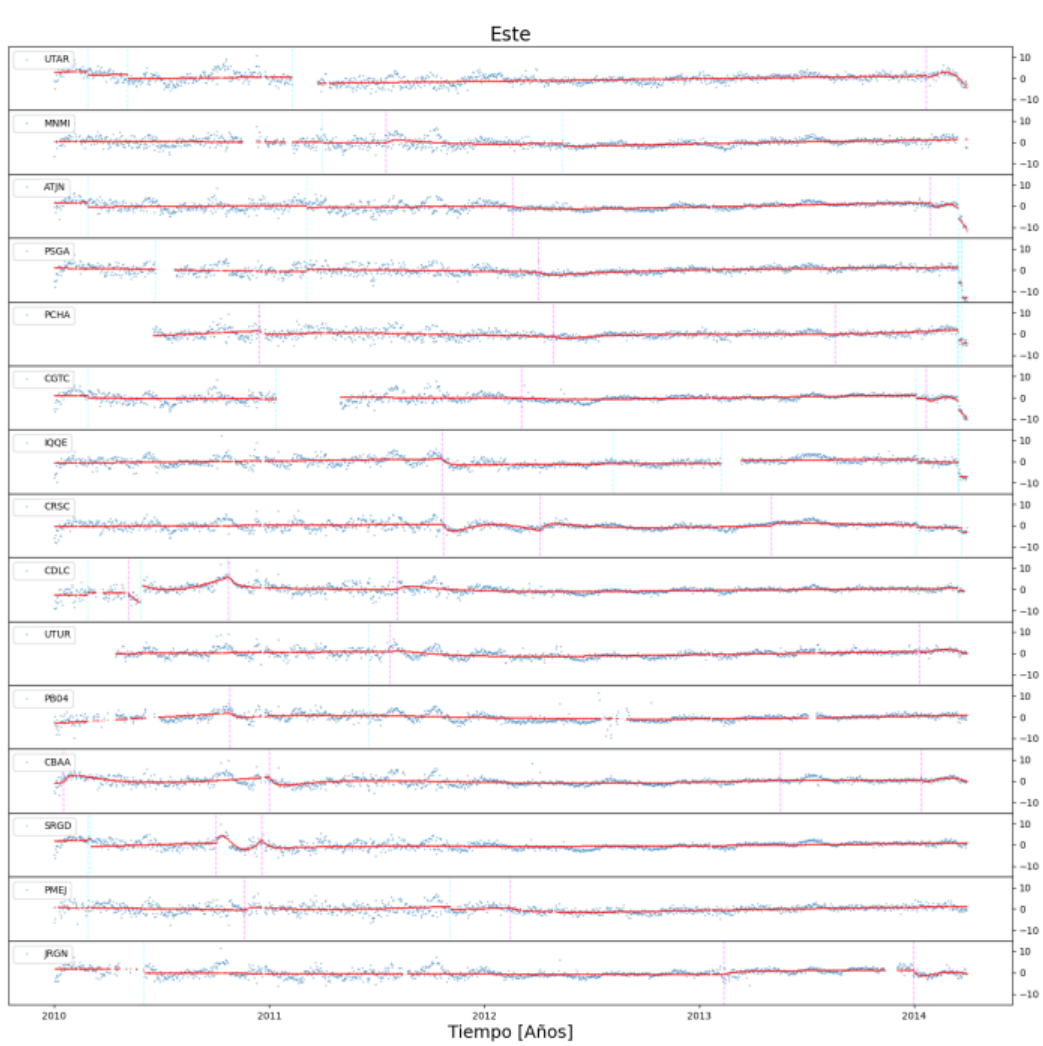


(e) Solución N°15 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación CRSC.

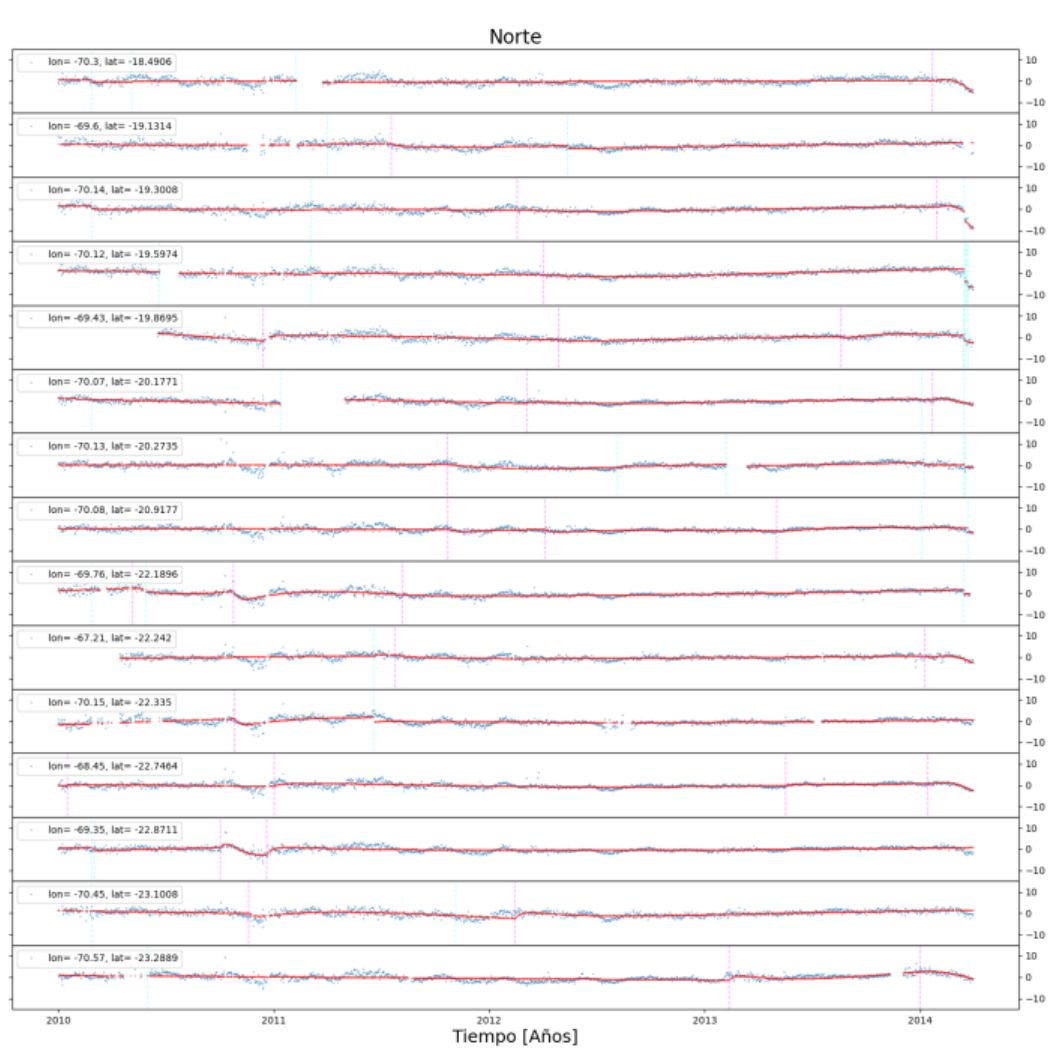
Figura 5.2.11: En las figuras 5.2.11a, 5.2.11b, 5.2.11c, 5.2.11d, 5.2.11e, cada fila representa una componente (Este, Norte y Vertical respectivamente). La primera columna muestra el ajuste del modelo a los datos. La segunda columna contiene la componente estacional en color mostaza, en verde la componente de saltos y en color azul la adición de la componente lineal (polinómica) con la componente de transientes. Por último los residuales están en la tercera columna.

Los resultados en general detectan el comienzo de un evento transiente a comienzos del 2014. Sin embargo, en algunas estaciones, el escalón producido por el sismo precursor toma una gran importancia y evita la aparición del evento transiente del 2014. También se observan comienzos de eventos transientes en los primeros meses del 2012 en algunas estaciones.

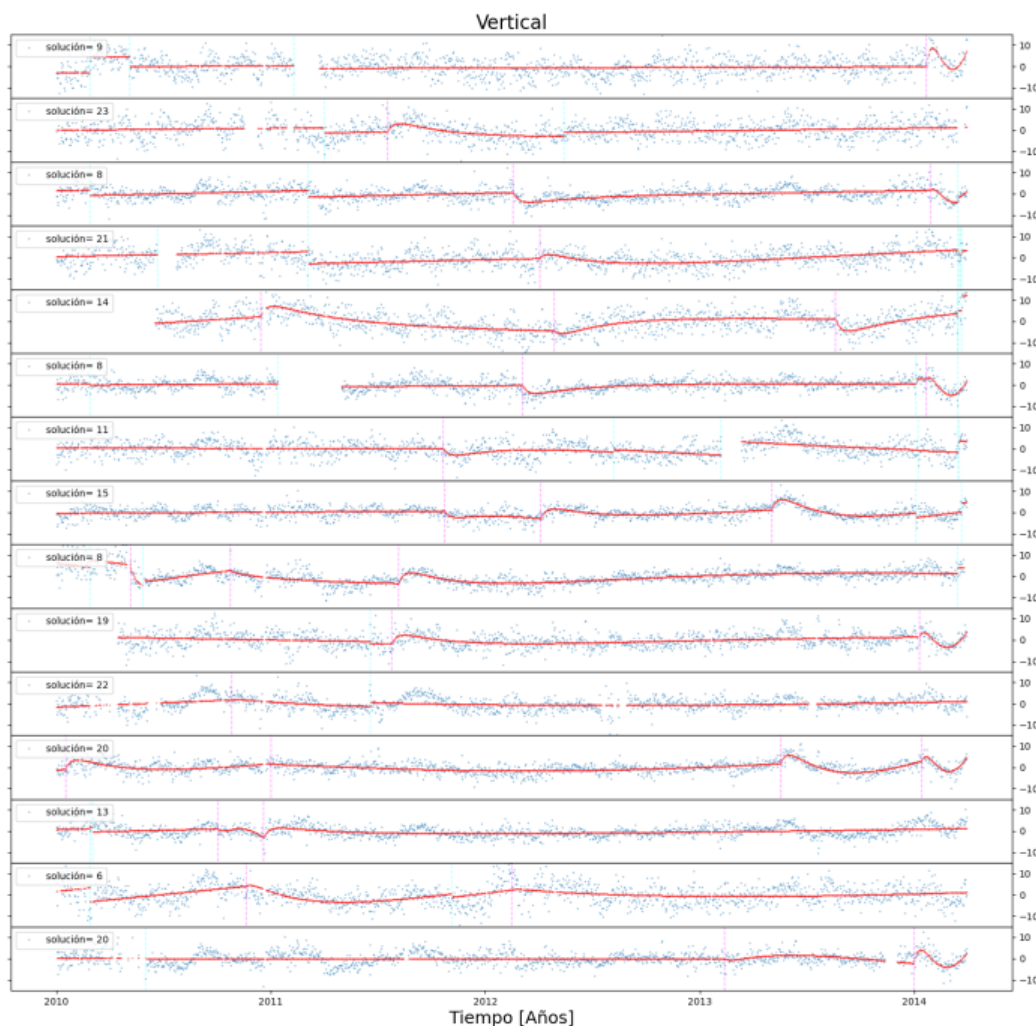
El resto de las soluciones para el resto de estaciones se pueden ver en las figuras 5.2.12a, 5.2.12b, 5.2.12c.



(a) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, para la configuración de saltos (4-4-5) mm, componente Este.



(b) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, para la configuración de saltos (4-4-5) mm, componente Norte.



(c) Compacto de todas las mejores soluciones con CMF aplicado, para la configuración de saltos (4-4-5) mm, componente Vertical.

Figura 5.2.12: Las estaciones de las figura 5.2.12a, 5.2.12b, 5.2.12c están ubicadas de norte a sur, siendo el eje vertical la posición de la estación en *mm* y en el eje horizontal tenemos el tiempo en años. Las líneas verticales representan los saltos y comienzos de transientes, en color rojo está el modelo obtenido con los parámetros calculados eliminando la pendiente y la componente estacional de los datos, y las columnas representan el eje a partir de las coordenadas locales Este, Norte y Vertical respectivamente. Conjunto (4-4-5) mm.

Las estaciones están posicionadas de norte a sur y cada columna corresponde al eje Este, Norte y Vertical respectivamente.

Una observación importante es que al disminuir el número de saltos en las soluciones, se ha permitido que en ciertos lugares donde en el otro caso de

estudio había un salto, ahora aparezca una transiente. Sin embargo, en lugares donde los saltos son más grandes, los cambios no son tan notorios.

5.2.6. Modelo considerando transientes + componente lineal, conjunto (4-4-5) mm

El campo de velocidades de 5.2.13 considera las transientes más la componente lineal, pero sin su pendiente.

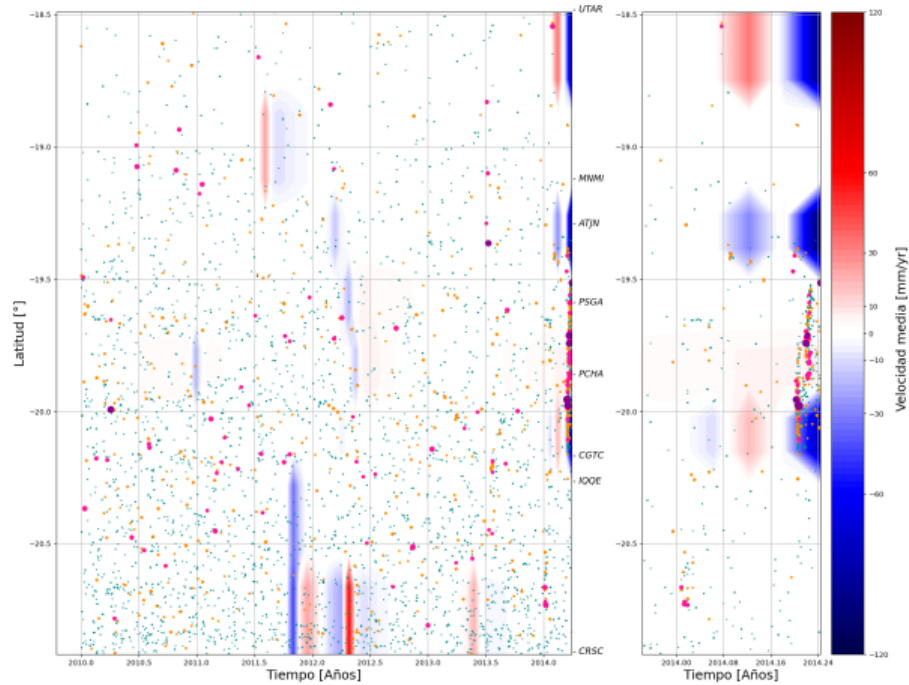


Figura 5.2.13: Velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.

Se puede observar en las imágenes anteriores un ligero aumento en la correlación entre los sismos y las zonas que muestran una desaceleración en la velocidad. Esto tiene sentido ya que algunos sismos no se consideraron como saltos debido a que

las estaciones no experimentaron desplazamientos en superficie lo suficientemente grandes como para cumplir con los requisitos de 4-4-5 mm en los ejes.

Esto es coherente con las velocidades y desplazamientos de las estaciones GNSS, que se pueden observar en las siguientes figuras:

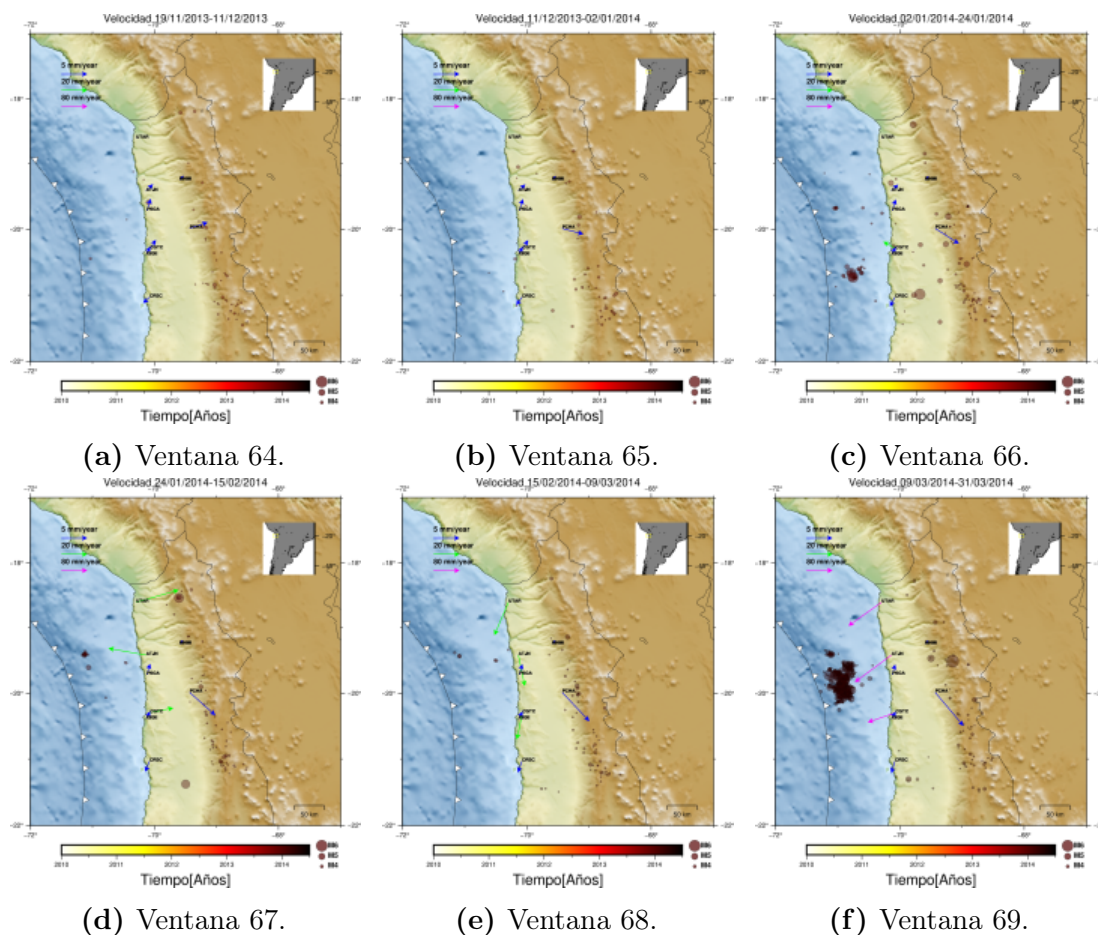


Figura 5.2.14: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.

Se puede observar claramente el aumento de la velocidad y el cambio de dirección en la última ventana para las estaciones que detectan el inicio de la transiente antes de 2014 (ver Figura 5.2.14f). Al considerar los desplazamientos de las estaciones GNSS (ver Figura 5.2.15f), se pueden notar cambios significativos en la dirección de los desplazamientos, especialmente en las estaciones UTAR y ATJN.

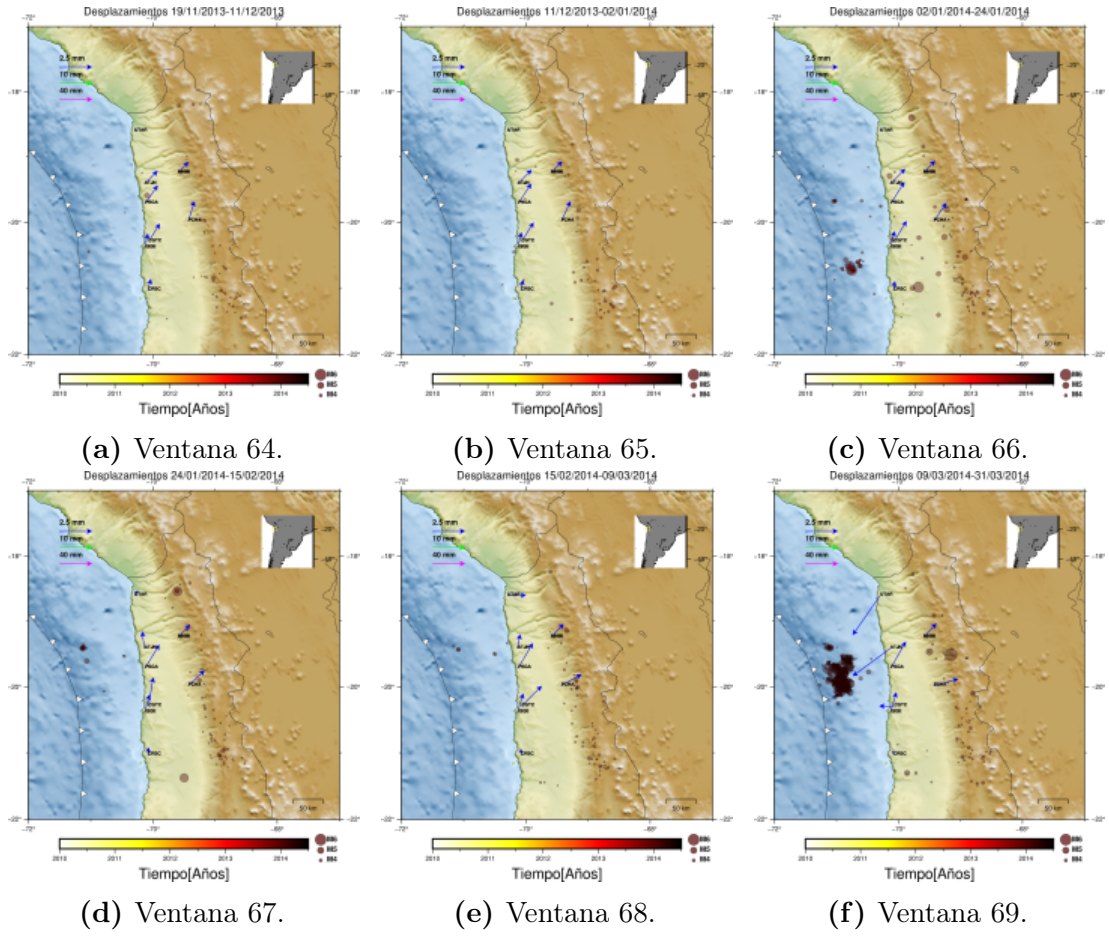


Figura 5.2.15: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.

5.2.7. Modelo considerando transientes + componente lineal + saltos, conjunto (4-4-5) mm

Al igual que para la figura 5.2.8, la 5.2.16 considera las transientes la componente lineal y de saltos, con la pendiente extraída manualmente.

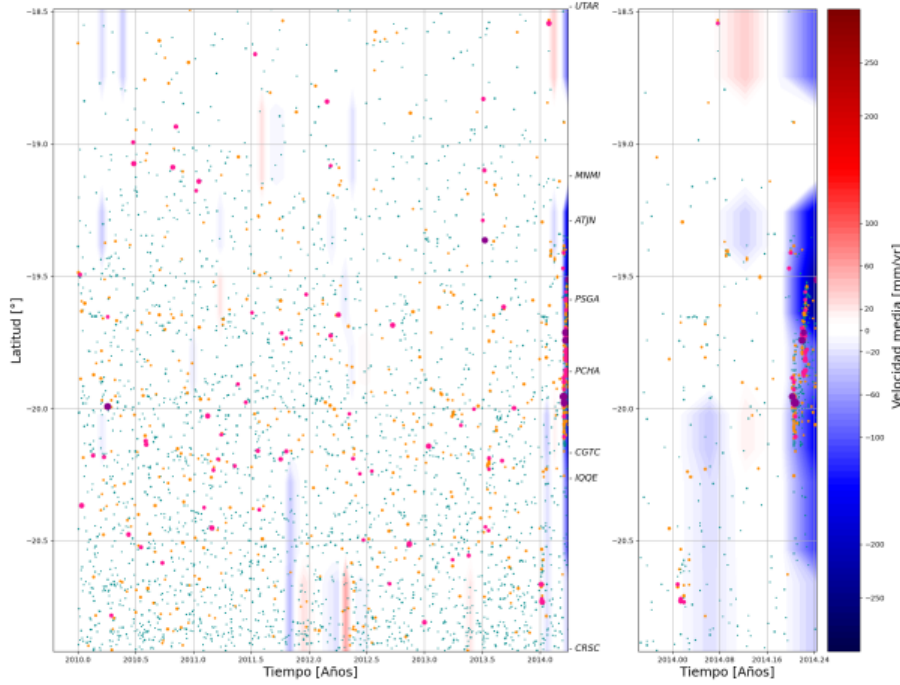


Figura 5.2.16: velocidades y sismicidad Iquique-Pisagua, sin pendiente y con media 0 cada 22 días transiente + componente lineal + saltos. El tamaño de los círculos refleja la magnitud del sismo, el color cyan oscuro para sismos de $3,0 - 3,9M$, el color naranja oscuro para sismos de $4,0 - 4,9M$, el color rosa oscuro para sismos de $5,0 - 5,9M$, y el magenta oscuro para sismos de $6,0 - 6,9M$. Las latitudes que muestran una desaceleración en el tiempo se representan en color azul, mientras que las que presentan aceleración se muestran en color rojo.

El campo de velocidad muestra una fuerte disminución en la velocidad para períodos cercanos al terremoto de Iquique-Pisagua, pero en algunas estaciones ya se pueden detectar a principios de 2014. Esto es consistente con lo observado en los vectores de velocidad de la Figura 5.2.17. Además, los resultados muestran una mayor correlación entre el inicio de eventos transientes y sismos cercanos. La desaceleración es mucho más evidente cuando se consideran los saltos, como se puede observar en el período previo al terremoto de Iquique-Pisagua.

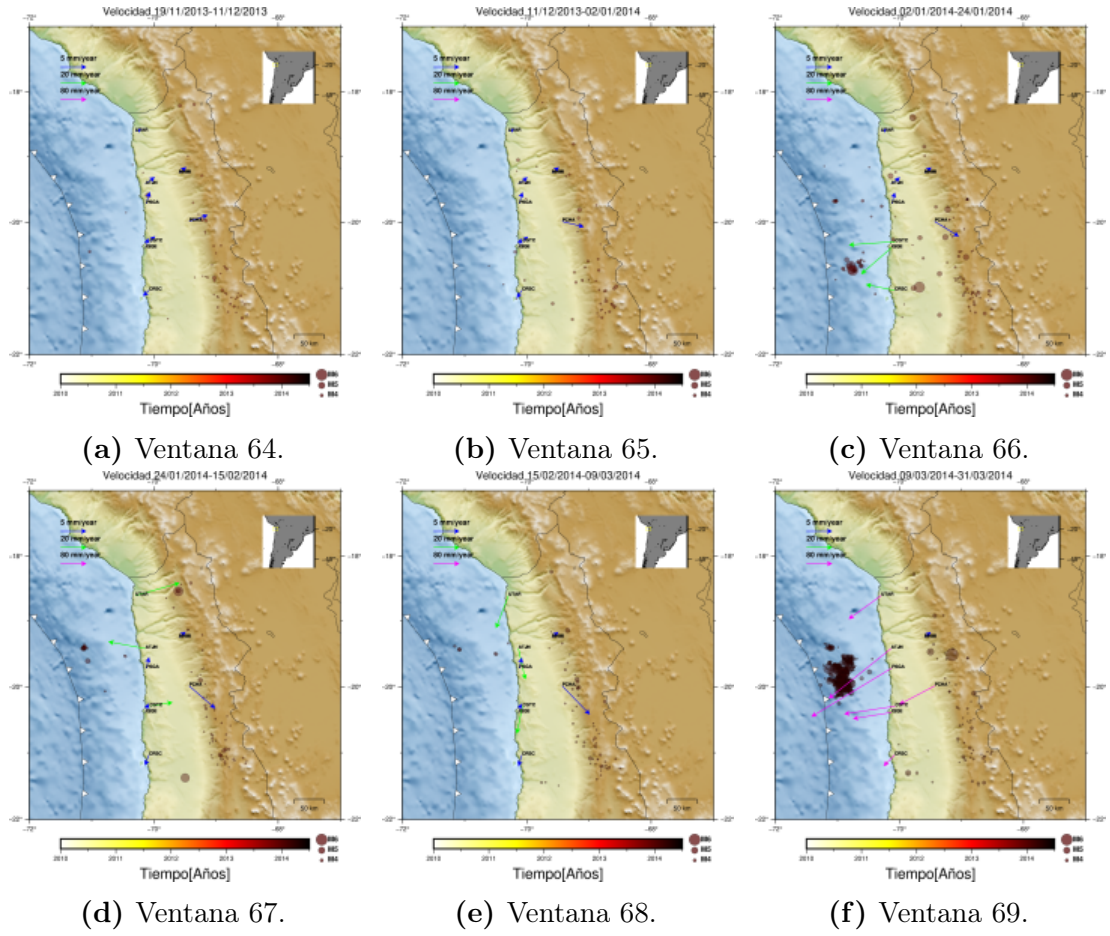


Figura 5.2.17: Velocidades estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.

Las velocidades al considerar los saltos son evidentemente afectadas y la dirección tiene sentido con la alta sismicidad. Lo mismo ocurre con la ultima ventana de desplazamientos de la figura 5.2.18.

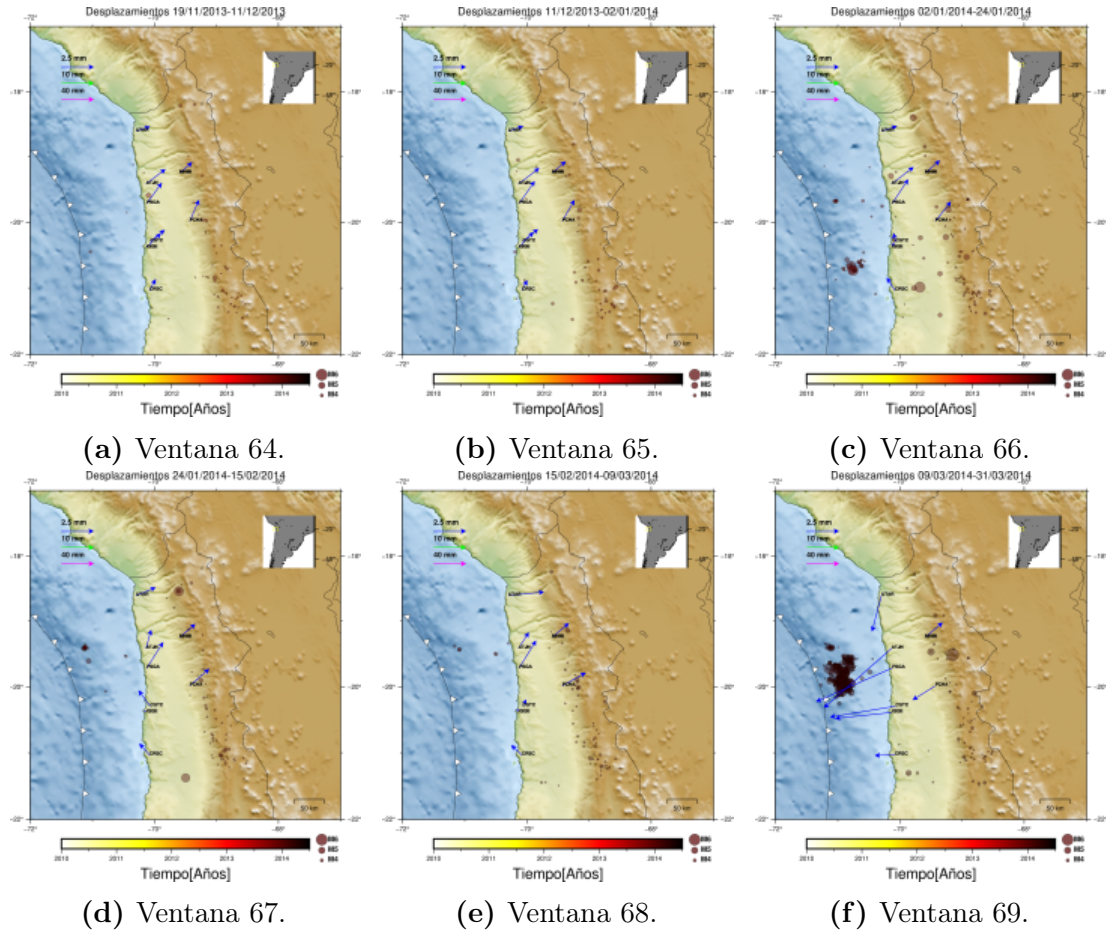


Figura 5.2.18: Desplazamientos estaciones GNSS, modelo transientes + lineal + saltos, cada 22 días, conjunto (4-4-5) mm.

Capítulo 6

Discusión

Dividiremos esta sección en tres partes, la primera analizando los resultados a partir de datos sintéticos, una segunda parte hablando de los resultados de Iquique-Pisagua con la primera y segunda configuración de saltos, y parece necesario también hacer una reflexión sobre el funcionamiento de Gratsid en general, a partir de varias pruebas realizadas a lo largo de la investigación.

6.1. Análisis a resultados sintéticos

Las figuras 5.1.2a, 5.1.2b, 5.1.2c, resume las soluciones definidas para cada una de las estaciones en estudio. Si ahora analizamos la ubicación de estas estaciones 3.1.1 podemos notar que las estaciones SJAV, MAUL, QLAP, CLL1, BN16, ANTC y PGLL se encuentran lejos de la zona donde ocurrió el terremoto lento, que está centrado a los -38° de latitud y abarcando desde los -37° a -39° desde la fosa a la línea de costa, por lo que es bastante esperado que la transiente no se pueda encontrar en esas estaciones. Por otro lado hay estaciones como B914 y VITA, que a pesar de la lejanía a la zona de movimiento Gratsid detecta la transiente, esto se debería a la cercanía que tienen a la línea de costa. Otras estaciones como LNQM que están muy lejos y cerca de la cordillera detecta el comienzo de la transiente a pesar de lo leve que es, parece ser arrastrada por algún ruido no removido cercano a el comienzo de la transiente. Por último la estación TMCO no detecta el comienzo de la transiente pero la estación BN89 si lo hace, esto a pesar de la cercanía entre ambas estaciones, esto se puede deber a que TMCO detecta tres eventos transientes, pero BN89 detecta cinco eventos, por lo que este

último podría estar sobre-ajustando el error en los datos.

A partir de estos resultados se generaron varias figuras, donde se puede observar la caída en la velocidad en comparación a la tendencia de las estaciones GNSS esto se puede ver en 5.1.4 donde para la última ventana la caída es abrupta. Debido a que las ventanas son cada 22 días y la transiente dura 13 días, solo la última de ellas debería contener el efecto del terremoto lento artificial generado. Las imágenes 5.1.5 muestran las magnitudes de los desplazamientos en las estaciones GNSS, los que se ven ampliamente intensificados para la ventana final(5.1.5f) y que se encuentra dentro de los parámetros normales para el resto de las ventanas (alrededor de 2 mm), lo mismo se puede ver si ahora analizamos las velocidades (5.1.4), donde estaciones que presentaban velocidades de menores a 5 mm/yr superaron los 80 mm/yr y se direccionaron a la zona de ocurrencia del terremoto lento. Este aumento considerable se debe a la gran diferencia entre el estado inicial en la situación de la ventana 47 y su cambio para la ventana 48, lo que termina representando una gran pendiente al tomar sus desplazamientos.

6.2. Análisis a resultados de series previas al terremoto de Iquique-Pisagua

La detección de las transientes para las dos soluciones se pueden ver en la figuras ordenadas de norte a sur: 5.2.4a, 5.2.4b y 5.2.4c para el set de saltos (2-2-2) mm, y para el set de datos (4-4-5) mm 5.2.12a, 5.2.12b y 5.2.12c. Al comparar las figuras de la componente este, podemos notar la influencia en agregar más saltos a las soluciones para el caso de Iquique-Pisagua, estaciones como UTAR y ATJN en el set (2-2-2) mm presenta menos cantidad de transientes detectadas en comparación a el set (4-4-5) mm, esto se ve reflejado en una pequeña aceleración previa a la ocurrencia del aumento en la actividad sísmica y en la caída en la velocidad. En otras estaciones como PSGA y CGTC la transiente a comienzos del 2014 fue detectada para el set (2-2-2) mm pero su magnitud es muy baja en comparación a el desplazamiento provocado por los saltos, por lo que no se presentan diferencias claras.

En la componente norte, parece ser más claro el comienzo de los eventos transientes ya que los saltos no se ven tan grandes como en el caso de la componente este, por lo que toma más importancia si es detectado o no la transiente, esto se ve

claramente en la estación PSGA donde para el caso (2-2-2) mm la transiente a comienzos del 2014 fue encontrada. Para el set (4-4-5) mm esto no ocurrió, siendo lo contrario de lo esperado ya que se pensaría que a mayor número de saltos se encontraría menor número de transientes. Siguiendo la misma línea de análisis para el caso de las componentes verticales. En la estación CGTC se puede notar que estas soluciones son bastante parecidas, pero si uno considera las imágenes 5.2.3c y 5.2.11c, se ve que en la componente vertical hay un salto bastante grande para el primero pero para el segundo no. Por lo que es muy probable, que la componente vertical esté tomando un papel más importante del que se quisiera. Esto mismo ocurre en otras estaciones, como la PSGA en las figuras 5.2.3b y 5.2.11b donde para el primero el gran número de escalones afecta en el entendimiento de lo que realmente ocurre en esa estación, donde para ciertos sismos la estación sube y para otros baja.

Para los campos de velocidades de las figuras 5.2.5 y 5.2.13, se pueden observar diferencias significativas en las latitudes de las estaciones UTAR, ATJN y PSGA. En las estaciones donde se detectó el inicio de eventos transientes, se presenta una disminución en la velocidad. Además, se observa que, en términos de magnitud, la desaceleración es menor en el conjunto de datos (2-2-2) mm en comparación con los resultados del conjunto de datos (4-4-5) mm, lo cual se refleja en la intensidad de los colores utilizados. Sin embargo, para latitudes más al sur, aproximadamente a partir de los -19.8° , las velocidades son casi iguales en ambos conjuntos de datos, aunque pueden diferir en ciertas sensibilidades de Gratsid.

Esto es coherente con los vectores de velocidad para las diferentes estaciones, para el set (2-2-2) mm 5.2.6 y para el (4-4-5) mm 5.2.14. Los vectores son bastante similares en las ventanas 64, 65 y 66, aunque presentan diferencias en las magnitudes y ligeras variaciones en la dirección. Sin embargo, en la ventana 67, para la estación PSGA en el conjunto de datos (4-4-5) mm, se observa una clara disminución en la velocidad, posiblemente relacionada con la sismicidad en el océano a la misma latitud. En el conjunto de datos (2-2-2) mm, esto no se evidencia de la misma manera. En la ventana 68, ambos conjuntos muestran una clara tendencia hacia el sur. Por último, en la ventana 69, en el conjunto de datos (4-4-5) mm, las velocidades apuntan hacia el océano, mientras que en el conjunto de datos (2-2-2) mm esto no es tan evidente. Esto tiene sentido, considerando que el conjunto de datos (2-2-2) mm contiene más saltos que el conjunto (4-4-5) mm,

y el desplazamiento hacia el océano fue más significativo en las series de tiempo de este último.

Si nos fijamos ahora en los desplazamientos en las figuras 5.2.7 y 5.2.15, notamos que más vectores en la ventana 69 van en dirección al océano para el set (4-4-5) mm que para el set (2-2-2) mm. Recordemos que este último considera más saltos que el set (4-4-5) mm. Para el resto de las ventanas los resultados son bastante similares entre conjuntos. Sin embargo, un cambio en la dirección o magnitud de los desplazamientos puede tener un gran impacto en la velocidad, especialmente al considerar un estado inicial y otro final.

Todo el análisis anterior fue para un modelo que consideraba la componente lineal y de transientes luego de eliminar la pendiente. Esto deja en cero el estado normal de la estación. Si ahora tomamos en cuenta los saltos y lo agregamos a la suma de componentes, obtendremos el análisis de las siguientes figuras.

El campo de velocidades de las figuras 5.2.8 y 5.2.16, son muy parecidos para el periodo posterior al 2014, con ciertas diferencias dependiendo si encuentra transientes o simplemente es totalmente dominada por los saltos. Esto último se puede notar en la figura 5.2.16 donde a los -18.5° hay un sismo que termina afectando en una aceleración en la velocidad media de la zona para el 2014.08. Esta diferencia se debe a que el archivo (4-4-5) mm no incluye saltos para el periodo posterior al 2011, y el archivo (2-2-2) mm si lo contiene para el 17 y 23 de marzo del 2014.

A los -19.5° también se presentan ciertas diferencias aunque muy leves, donde para el caso (2-2-2) mm (5.2.8) ocurre un aumento en la velocidad media que para el (4-4-5) mm (5.2.16) no se puede detectar, todo esto es por la diferencia sutil entre considerar ciertos sismos en los archivos a priori. Al comparar los archivos de saltos para la estación PCHA que está en la latitud en cuestión, notamos que para el mes de marzo del 2014, el archivo (2-2-2) mm contiene eventos de saltos para el 16, 17, 22 y 23. Para el archivo (4-4-5) mm, los saltos son para el 16, 17 y 23 de marzo. La diferencia entonces se puede notar en considerar el evento del 22 de marzo o no. Todo eso es lo que se ve reflejado en el aumento en la velocidad para el caso (2-2-2) mm y la situación de normalidad para el (4-4-5) mm.

Previo al 2014 hay varias zonas con bastantes similitudes. Entre el 2010-2011 la situación es casi la misma a excepción de lo ocurrido para el 2010.3 a los -19° ,

donde se presenta una extensión en la zona de caída de velocidad para el caso (2-2-2) mm y que en el (4-4-5) mm se ven dos zonas. Esto se debe a que el archivo (2-2-2) mm contiene un pequeño salto para el 27 de febrero del 2010 (Terremoto del Maule-Quirihue). Entre el 2011-2012 la situación es similar presentando ciertas diferencias como un aumento en la velocidad para el 2011.1 a los -19.3° debido a dos sismos sobre 5 en magnitud a los -19.2° de latitud.

Para la zona de los -20.7° a -21° la situación entre ambas soluciones difiere bastante a finales del 2011 y mitad del 2012. A diferencia de los casos anteriores donde las diferencias se debían a la presencia de saltos, en este caso para ninguno de los dos conjuntos hay saltos registrados. Por lo que nos queda la opción de la ocurrencia de un terremoto lento o ciertas sensibilidades por el ruido de la estación. Pensar que se puede deber a un terremoto lento sería una conclusión bastante apresurada no teniendo resultados de más estaciones cercanas. En las figuras 5.2.3e y 5.2.11e podemos ver los diferentes ajustes para ambos casos. Según mi análisis previo a el 2012 pareciera verse una caída en el desplazamiento de la estación en la componente Este y Norte, pero los posteriores eventos detectados no parecen ser muy confiables debido a la participación activa y dominante de la componente vertical. Además el alto ruido que tiene la estación previo a el 2012 no ayuda mucho en ver que es lo que está ocurriendo en la estación CRSC.

Los vectores de velocidad de las figuras 5.2.9 y 5.2.17, presentan pequeñas diferencias en la ventana 66 con la estación PSGA. También en la ventana 67 y 68 en las estaciones UTAR, ATJN y PSGA, se presentan ciertos cambios. Todo esto se debe a los saltos del set (2-2-2) mm en comparación a los del (4-4-5) mm. En la ventana 69 los vectores son casi idénticos, tanto en magnitud como en dirección, ya que los saltos para la última ventana no difieren tanto. Esto es consistente con el final del campo de velocidad ya mencionado a principio de este párrafo.

Los vectores de desplazamientos en 5.2.10 y 5.2.18, son casi idénticos, tanto en dirección como en magnitud. Algunas diferencias en la estación UTAR en la ventana 65, y en la PSGA para la ventana 67, pero como ya se mencionó todo es muy similar. Para la ventana 69 el desplazamiento de ambos resultados van en dirección clara hacía el mar, muy dominado por la alta sismicidad presente en esa zona.

6.3. Comentarios finales: Gratsid encontrando transientes

La idea de esta sección es dejar por escrito ciertas impresiones después de utilizar Gratsid. Estas impresiones no están relacionadas directamente con los objetivos específicos de esta tesis, ya que además de los resultados presentados en este trabajo, se llevaron a cabo muchas otras pruebas y experimentos utilizando Gratsid. Estas impresiones adicionales pueden ser útiles para futuros investigadores o para mejorar el uso de Gratsid en investigaciones futuras.

Una buena forma de comenzar es hablar sobre las series de tiempo. Se realizaron varias pruebas utilizando series de tiempo de diferentes longitudes. Después de realizar diversas pruebas y experimentos, se llegó a la conclusión de que utilizar al menos 4 años de datos es una cantidad adecuada para poder identificar y modelar una componente lineal estable en las series de tiempo. Esta estabilidad es crucial si se pretende separar la componente lineal de la componente de transientes. Sin embargo, en la mayoría de los casos, lograr una separación completa entre la componente lineal y la de transientes resulta ser un desafío, por lo que no se recomienda realizar esta separación. En su lugar, se puede considerar el término "movimiento," que es la suma de la componente lineal, las transientes y los saltos, y abordar el análisis de esta manera.

El procesamiento de datos ocupa un lugar importante, si no queremos estar agregando transientes cuando hay ciertos errores en las mediciones, este desafío es muy importante y difícil de sortear cuando se quiere automatizar lo más posible el proceso. Ciertos outliers, o ruido de alta frecuencia que no se pudo remover asociado a la componente estacional, hacen complicado poder ayudar a que Gratsid haga su trabajo de la mejor manera.

Elegir un correcto número de saltos para cada estación es un trabajo en algunos casos de prueba y error, no por culpa de Gratsid si no por que no existe de momento una buena forma de determinar que saltos se deben agregar o no a nuestras ecuaciones. En este trabajo desarrollamos un método que en ciertos casos funcionó como se esperaba pero en otros no de la mejor manera. Este método se podría mejorar de variadas formas como: considerando los errores de medición de las estaciones y con una forma de ponderar las diferentes componentes para no

vernos afectado por las grandes variaciones en la componente vertical.

La idea de buscar saltos que tengan un real impacto en los datos, depende de los procesos que se estén buscando, siendo el caso de las transientes quizás el ejemplo más difícil. Ya que son señales que no se conoce su comienzo ni duración, y cuyas magnitudes pueden variar mucho. Otra consideración importante pareciera ser la zona de estudio, como anticipación a las conclusiones de esta investigación, en el norte de Chile dentro de la ventana de estudio, el desarrollo de esta transiente previa al terremoto de Iquique-Pisagua fue de un evento principalmente sísmico. Entonces si el movimiento experimentado fue principalmente sísmico, no conviene eliminar los saltos de la predicción de transientes a estudiar, ya que terminan entregando mucha información sobre el movimiento de la estación. Lo que puede convenir más sería poder registrarlos y conocer que ese día ocurrió un evento que pudo mover en cierta magnitud la estación. Esta consideración se basa en la idea de que los saltos sin un significado físico claro pueden introducir un grado de complejidad innecesario en nuestras ecuaciones, lo que a su vez podría tener un efecto negativo en la calidad de los resultados obtenidos para otros parámetros calculados.

Las pruebas realizadas en Gratsid incluyeron la aplicación de este método tanto en una componente 1-D, como en 2-D y 3-D. En general cuando se comparaban las transientes obtenidas para cada componente horizontal de una forma independiente, el comienzo de ellas variaba en ciertos días o semanas para eventos transientes más significativos, pero para el resto de transientes encontradas, estas podían variar en gran medida. Por otro lado, al realizar pruebas en 2-D, se obtuvieron resultados más confiables para la mayoría de las estaciones, detectando eventos que en algunos casos eran más evidentes en una componente que en la otra. Las pruebas en 3-D, aunque ofrecieron beneficios al encontrar el día de inicio de los eventos transientes, también presentaron desafíos al amplificar posibles artefactos presentes en las demás componentes, lo que dificultó su discriminación y aumentó el costo computacional.

Dentro de las opciones de Gratsid está el número de soluciones y el parámetro para llegar a la convergencia. Con el primero tendremos un número de soluciones para explorar y determinar cuál es la mejor, esto termina siendo un trabajo largo con mucha inspección visual pero que permite ver como Gratsid va buscando diferentes opciones de combinaciones de multitransientes para cumplir el objetivo.

Con el parámetro de convergencia determinaremos el mínimo valor para llegar a converger y ser una solución. Para trabajos más específicos quizás es un valor que hay que ir modificando y ver el nuevo comportamiento.

Capítulo 7

Conclusión

Varios estudios se han realizado con el fin de dar a conocer y esclarecer la naturaleza de los terremotos lentos y las señales transientes que se observan en los datos de GNSS. Este mismo conocimiento, divulgado por varios científicos dedicados a la investigación de estos fenómenos, han expuesto características particulares de diferentes zonas de subducción. La definición de estos fenómenos, como se presenta en (Jolivet and Frank, 2020), nos acerca a una comprensión más profunda de sus diversas cualidades, que pueden abarcar desde deformaciones continuas hasta eventos que van desde rupturas sísmicas hasta episodios asísmicos con distintas periodicidades y duraciones.

La duda semántica sobre un terremoto no existe, la energía liberada durante un terremoto llega típicamente en una forma clara e impulsiva a superficie y es registrado por muchos instrumentos. Esto mismo no ocurre con los terremotos lentos, los que pueden ser llamados de muchas maneras según sus diferentes características: como dislocación lenta o episodios de microsismicidad y dislocación, o sismos precursores, transientes asísmicas y también dislocación tardía, entre otros nombres.

Tomando lo anterior en cuenta, los objetivos de poder encontrar deformaciones transientes con una consistencia espacio-temporal fue logrado. Ya que, las estaciones cercanas entre ellas presentaban soluciones parecidas previo al terremoto de Iquique-Pisagua y en el caso sintético estas eran aun más parecidas. De esto se desprende el resto de objetivos específicos 1, 2 y 3, como poder configurar Gratsid para encontrar señales transientes tanto en datos sintéticos como en reales en

Iquique-Pisagua.

Sobre el último objetivo de determinar la relevancia de los archivos de saltos, creemos que tienen una gran importancia ya que el número de saltos de cada archivo (archivos de saltos (2-2-2) mm y (4-4-5) mm), en algunos casos determinaba si Gratsid encontraba un evento transiente o no en los datos. Agregar también que el gran número de eventos sísmicos en la zona previa al terremoto de Iquique-Pisagua, hace fundamental poder obtener el registro para intentar esclarecer lo que ocurrió en la zona durante el periodo de estudio.

Sobre hipótesis planteadas en la sección 1.1. Gratsid es un código que logró encontrar los eventos transientes previo al terremoto de Iquique-Pisagua del 2014 y también en los datos sintéticos, por lo que nuestra primera hipótesis es verdadera.

La relevancia del archivo de saltos cayó en que dependiendo de los saltos entregados a priori, Gratsid encontraba o no el comienzo de un evento transiente, lo que tiene gran importancia y hace a esta hipótesis verdadera. A pesar de esto, el movimiento observado fue principalmente sísmico. En las figuras que tomaban el movimiento de la componente lineal más la de transientes (5.2.6 y 5.2.14), se puede ver la caída en la velocidad para ciertas estaciones que encontraron una deformación transiente. Sin embargo, al considerar el factor de los saltos en el movimiento, los resultados entre ambos conjuntos fueron mucho más parecidos entre sí, como mostró las figuras 5.2.9 y 5.2.17. Por lo que la hipótesis final sobre si el terremoto de Iquique-Pisagua fue una transiente principalmente sísmica es verdadera y las figuras que representan la velocidad en la zona lo demuestran, y son corroboradas por los vectores de desplazamientos de las estaciones en estudio 5.2.10 y 5.2.18.

En la sección 6.3, se realizaron comentarios sobre Gratsid y algunas dificultades que se presentan para poder obtener los mejores resultados con este código que puede tener grandes utilidades. Mejorar la eliminación del ruido en los datos y determinar de una manera más efectiva que saltos tienen un efecto significativo en cada estación son algunos de las formas en que posibles estudios futuros tengan resultados aun mejores que los vistos en este trabajo.

Otro aspecto que también puede ayudar a mejorar los resultados es considerar cierta ponderación a cada componente. En otras palabras sería otorgar ciertos pesos a las componentes que consideremos más importantes para cada estación. El objetivo de esto sería especialmente disminuir la influencia que tiene la componente

vertical, ya que con el alto ruido que siempre tiene esta componente amplifica otros procesos que se pueden estar viendo en la Este o Norte. Si revisamos el WRMS en las figuras del apéndice (A y B) podemos notar que la componente norte es en general menos ruidosa que la Este y mucho menos que la Vertical. Definir los valores de esta ponderación tendría que ser de una forma empírica, pero por lo pronto podría ser un mayor peso para la componente Norte, luego la Este y por último la vertical. Especialmente para la vertical otorgar un menor peso y que sea una componente que ayude a determinar el comienzo de eventos transientes con hundimiento o alzamiento (factor determinante en zonas cercanas a la costa) y no si existe o no una transiente (principalmente esperable de la componente Este y Norte).

Todas las medidas mencionadas son con un fin de mejorar los resultados de la investigación. Por lo pronto los pasos a seguir sería mejorar los resultados de esta zona de estudio y realizar comparaciones con zonas de subducción de otras partes de Chile o el Mundo.

Comprender los misterios detrás de los terremotos es crucial para prevenir y estar preparados para futuros desastres. Cada científico dedicado a la investigación busca contribuir con su conocimiento para concienciar sobre los riesgos asociados a estos eventos y proporcionar una mayor seguridad a la población. Esperamos que el futuro por más incierto que sea, sea prometedor en ir resolviendo en los próximos años, todas las dudas y cuestionamientos que tiene la comunidad científica relacionada.

Bibliografía

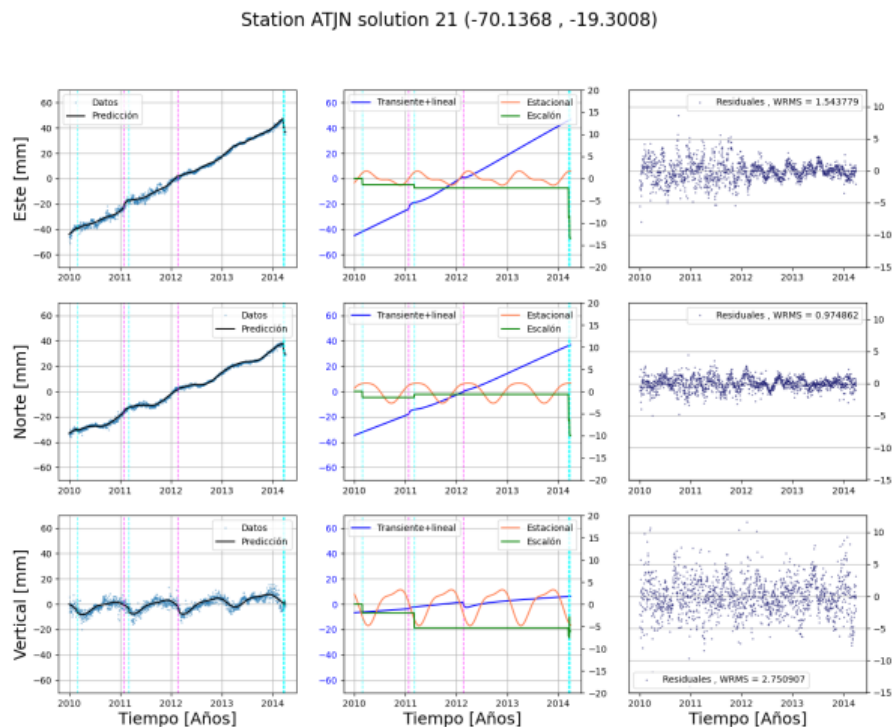
- Barrientos, S. (2014). Informe técnico terremoto de Iquique, Mw= 8.2, 1 de abril de 2014. *Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile*.
- Bedford, J. and Bevis, M. (2018). Greedy automatic signal decomposition and its application to daily GPS time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8):6992–7003.
- Bedford, J., Moreno, M., Schurr, B., Bartsch, M., and Oncken, O. (2015). Investigating the final seismic swarm before the Iquique-Pisagua 2014 Mw 8.1 by comparison of continuous GPS and seismic foreshock data. *Geophysical Research Letters*, 42(10):3820–3828.
- Bedford, J. R., Moreno, M., Deng, Z., Oncken, O., Schurr, B., John, T., Báez, J. C., and Bevis, M. (2020). Months-long thousand-kilometre-scale wobbling before great subduction earthquakes. *Nature*, 580(7805):628–635.
- Bevis, M. and Brown, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*, 88(3):283–311.
- Bletery, Q. and Nocquet, J.-M. (2020). Slip bursts during coalescence of slow slip events in Cascadia. *Nature communications*, 11(1):2159.
- Carr Agnew, D. (2013). Realistic simulations of geodetic network data: The Fakenet package. *Seismological Research Letters*, 84(3):426–432.
- Crowell, B. W., Bock, Y., and Liu, Z. (2016). Single-station automated detection of transient deformation in GPS time series with the relative strength index: A case study of Cascadian slow slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(12):9077–9094.
- Derode, B., Madariaga, R., and Campos, J. (2021). Seismic rate variations prior to the 2010 Maule, Chile Mw 8.8 giant megathrust earthquake. *Scientific reports*, 11(1):1–9.
- Donoso, F., Moreno, M., Ortega-Culaciati, F., Bedford, J., and Benavente, R. (2021). Automatic detection of slow slip events using the PICCA: Application to Chilean GNSS data. *Frontiers in Earth Science*, 9:1271.
- Gualandi, A., Serpelloni, E., and Belardinelli, M. E. (2016). Blind source separation problem in GPS time series. *Journal of Geodesy*, 90:323–341.

- Hirose, H., Hirahara, K., Kimata, F., Fujii, N., and Miyazaki, S. (1999). A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, Southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, 26(21):3237–3240.
- Jolivet, R. and Frank, W. (2020). The transient and intermittent nature of slow slip. *AGU Advances*, 1(1):e2019AV000126.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research*, 82(20):2981–2987.
- Kositsky, A. and Avouac, J.-P. (2010). Inverting geodetic time series with a principal component analysis-based inversion method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3).
- Lowry, A. R., Larson, K. M., Kostoglodov, V., and Bilham, R. (2001). Transient fault slip in Guerrero, southern Mexico. *Geophysical Research Letters*, 28(19):3753–3756.
- Métois, M., Socquet, A., Vigny, C., Carrizo, D., Peyrat, S., Delorme, A., Maureira, E., Valderas-Bermejo, M.-C., and Ortega, I. (2013). Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3):1283–1294.
- Moreno, M., Rosenau, M., and Oncken, O. (2010). 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 467(7312):198–202.
- Needell, D., Tropp, J., and Vershynin, R. (2008). Greedy signal recovery review. In *2008 42nd Asilomar conference on signals, systems and computers*, pages 1048–1050. IEEE.
- Obara, K. (2002). Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in Southwest Japan. *Science*, 296(5573):1679–1681.
- Peña, C., Heidbach, O., Moreno, M., Melnick, D., and Oncken, O. (2021). Transient deformation and stress patterns induced by the 2010 Maule earthquake in the Illapel segment. *Frontiers in Earth Science*, 9:644834.
- Riel, B., Simons, M., Agram, P., and Zhan, Z. (2014). Detecting transient signals in geodetic time series using sparse estimation techniques. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(6):5140–5160.
- Ruiz, S., Métois, M., Fuenzalida, A., Ruiz, J., Leyton, F., Grandin, R., Vigny, C., Madariaga, R., and Campos, J. (2014). Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake. *Science*, 345(6201):1165–1169.
- Schurr, B., Moreno, M., Tréhu, A. M., Bedford, J., Kummerow, J., Li, S., and Oncken, O. (2020). Forming a Mogi doughnut in the years prior to and immediately before the 2014 M8. 1 Iquique, northern Chile, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 47(16):e2020GL088351.

- Segall, P. and Matthews, M. (1997). Time dependent inversion of geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B10):22391–22409.
- Shen, Z.-K., Jackson, D. D., Feng, Y., Cline, M., Kim, M., Fang, P., and Bock, Y. (1994). Postseismic deformation following the Landers earthquake, California, 28 june 1992. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3):780–791.
- Sippl, C., Moreno, M., and Benavente, R. (2021). Microseismicity appears to outline highly coupled regions on the Central Chile megathrust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(11):e2021JB022252.
- Sippl, C., Schurr, B., Asch, G., and Kummerow, J. (2018). Seismicity structure of the northern Chile forearc from >100,000 double-difference relocated hypocenters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(5):4063–4087.
- Sun, T., Wang, K., Iinuma, T., Hino, R., He, J., Fujimoto, H., Kido, M., Osada, Y., Miura, S., Ohta, Y., et al. (2014). Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, 514(7520):84–87.
- Wallace, L. M. and Beavan, J. (2006). A large slow slip event on the central Hikurangi subduction interface beneath the Manawatu region, North Island, New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 33(11).
- Walwer, D., Calais, E., and Ghil, M. (2016). Data-adaptive detection of transient deformation in geodetic networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3):2129–2152.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., and Genrich, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8):18057–18070.
- Wech, A. G. and Bartlow, N. M. (2014). Slip rate and tremor genesis in Cascadia. *Geophysical Research Letters*, 41(2):392–398.
- Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Hirano, S., Yamagami, Y., Endo, S., and Komoro, T. (2014). Rupture process of the 2014 Iquique Chile earthquake in relation with the foreshock activity. *Geophysical Research Letters*, 41(12):4201–4206.

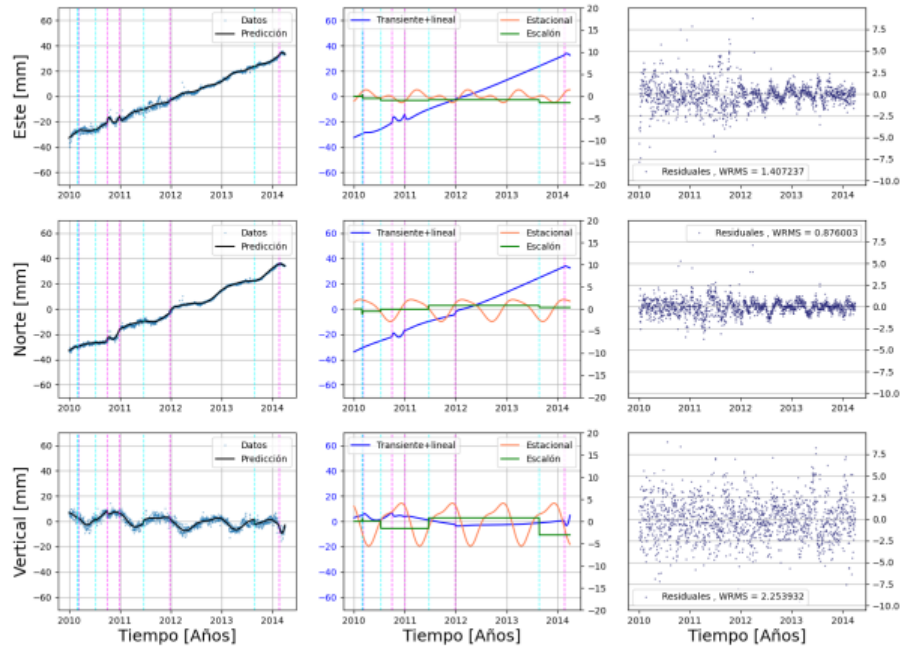
Apéndice A

Figuras estaciones de Iquique-Pisagua, conjunto (2-2-2) mm



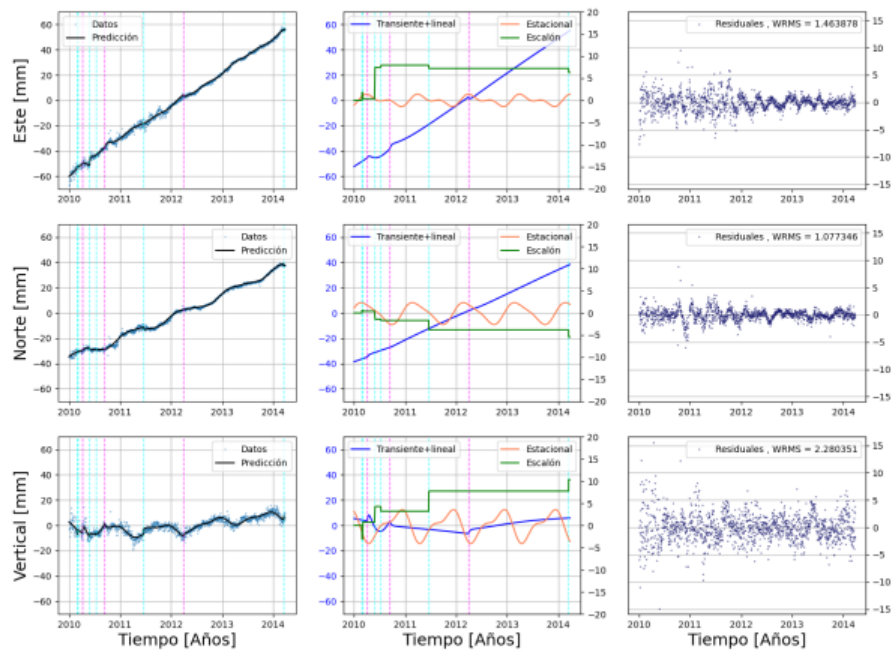
(a) Solución N°21 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación ATJN

Station CBAA solution 7 (-68.4481, -22.7464)



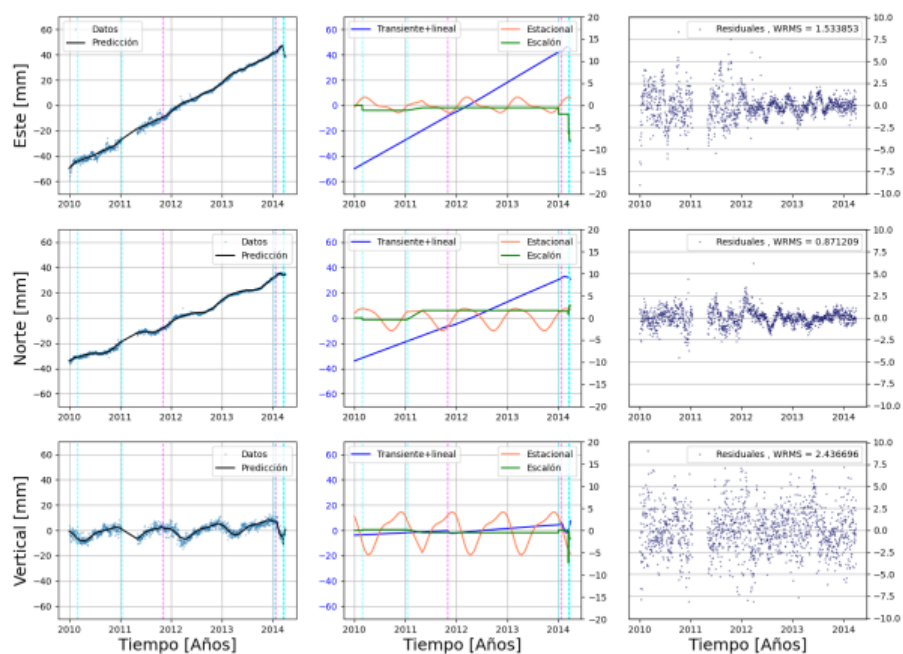
(b) Solución N°7 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación CBAA

Station CDLC solution 23 (-69.7615, -22.1896)



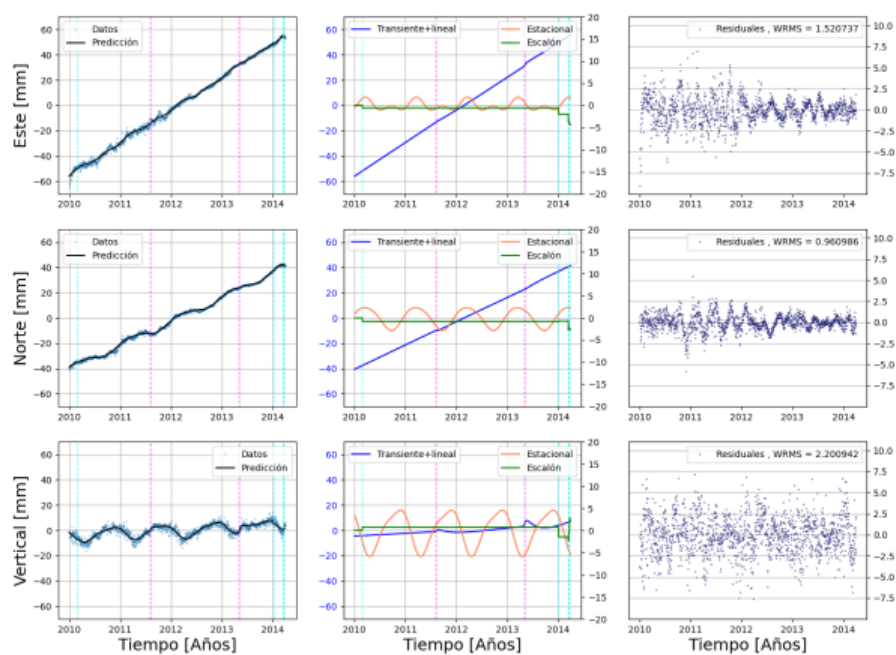
(c) Solución N°23 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación CDLC

Station CGTC solution 18 (-70.069 , -20.1771)



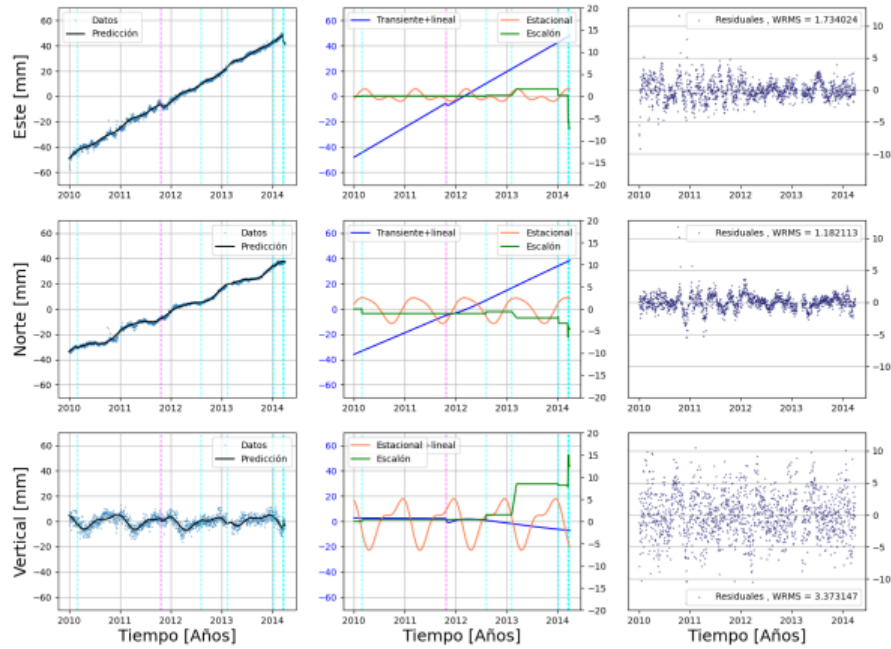
(d) Solución N°18 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación CGTC

Station CRSC solution 18 (-70.0798 , -20.9177)



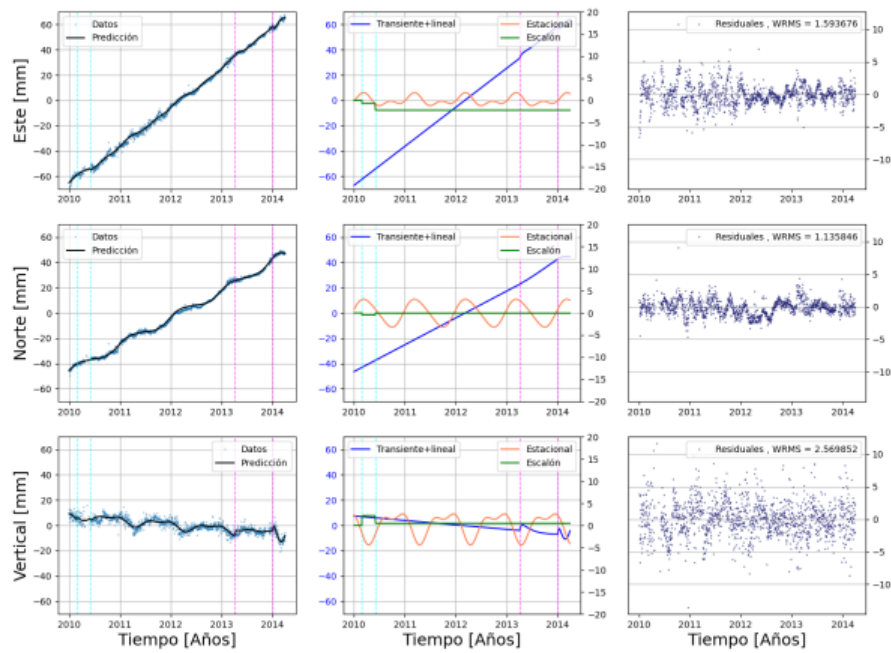
(e) Solución N°18 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación CRSC

Station IQQE solution 17 (-70.1317 , -20.2735)



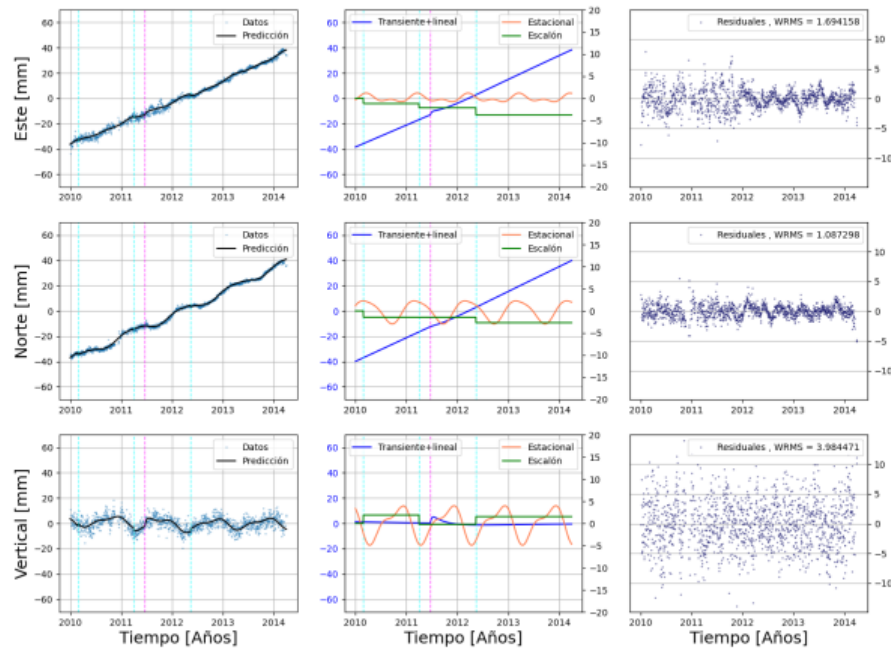
(f) Solución N°17 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación IQQE

Station JRGN solution 19 (-70.5749 , -23.2889)



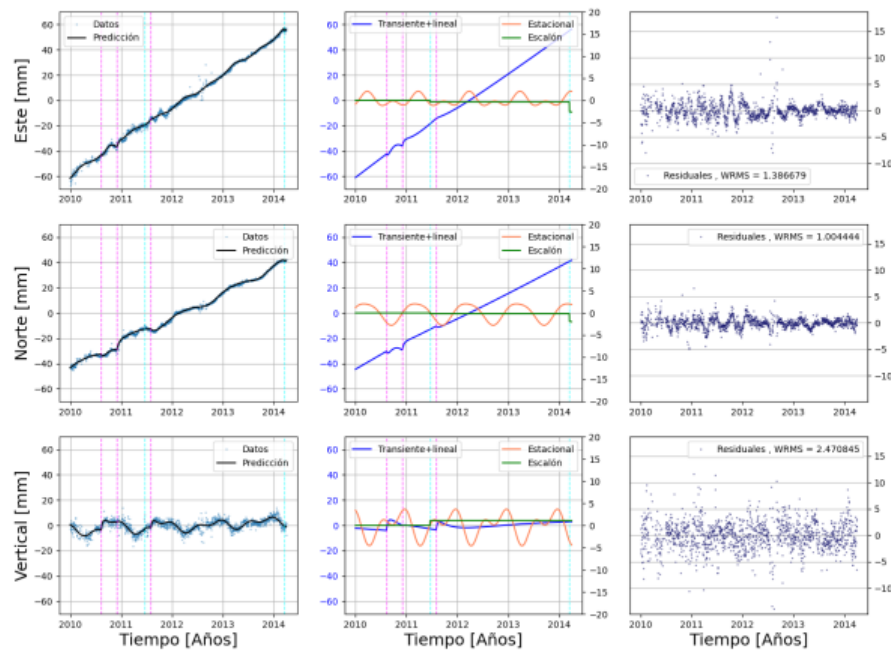
(g) Solución N°19 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación JRGN

Station MNMI solution 24 (-69.5957, -19.1314)



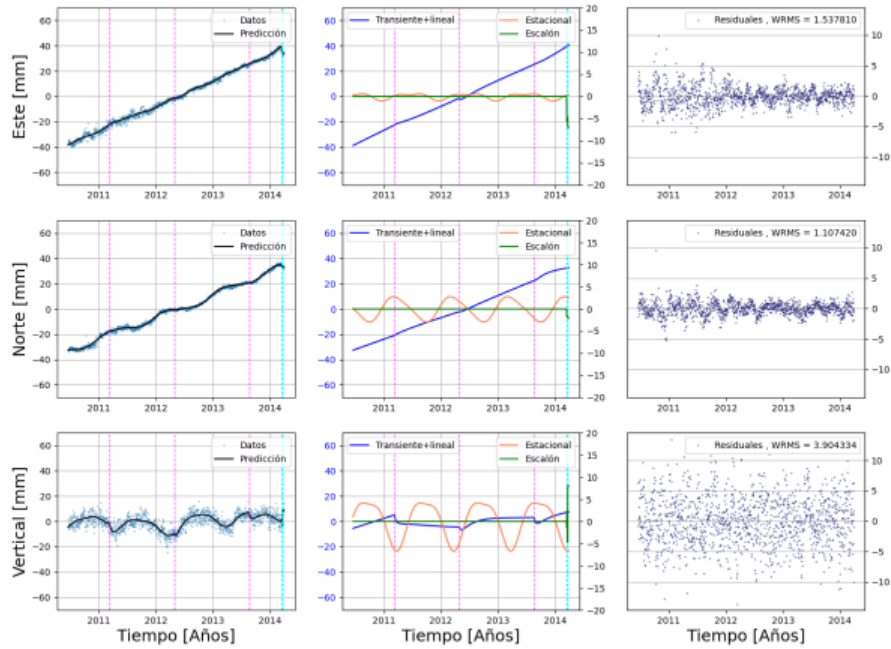
(h) Solución N°24 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación MNMI

Station PB04 solution 22 (-70.1497, -22.335)



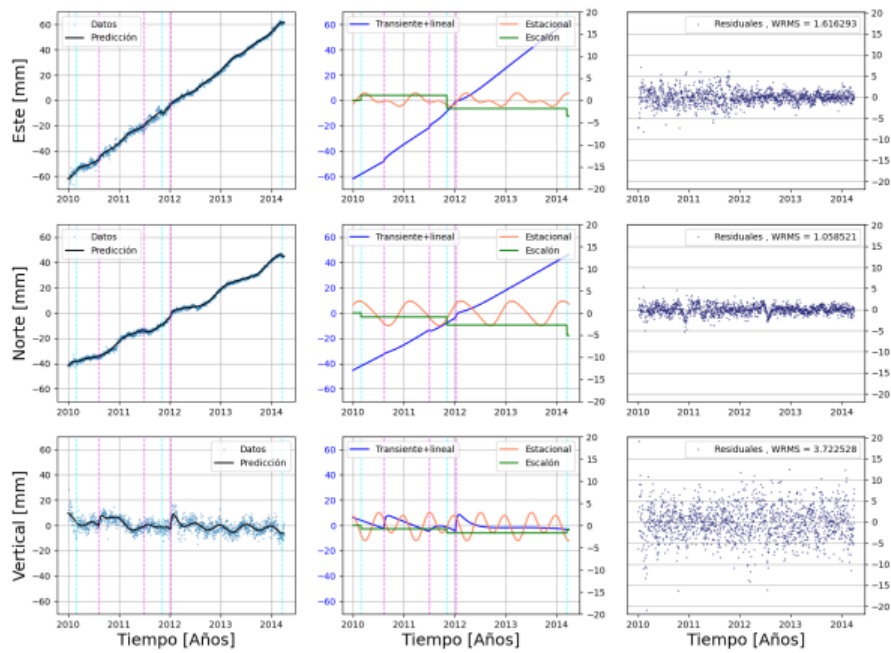
(i) Solución N°22 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación PB04

Station PCHA solution 12 (-69.4321 , -19.8695)



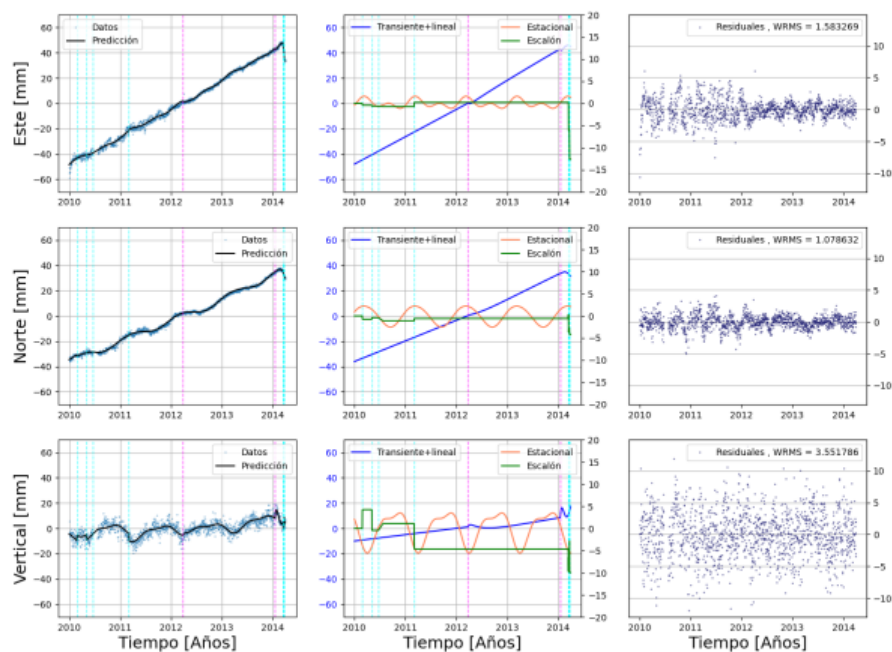
(j) Solución N°12 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación PCHA

Station PMEJ solution 17 (-70.4484 , -23.1008)



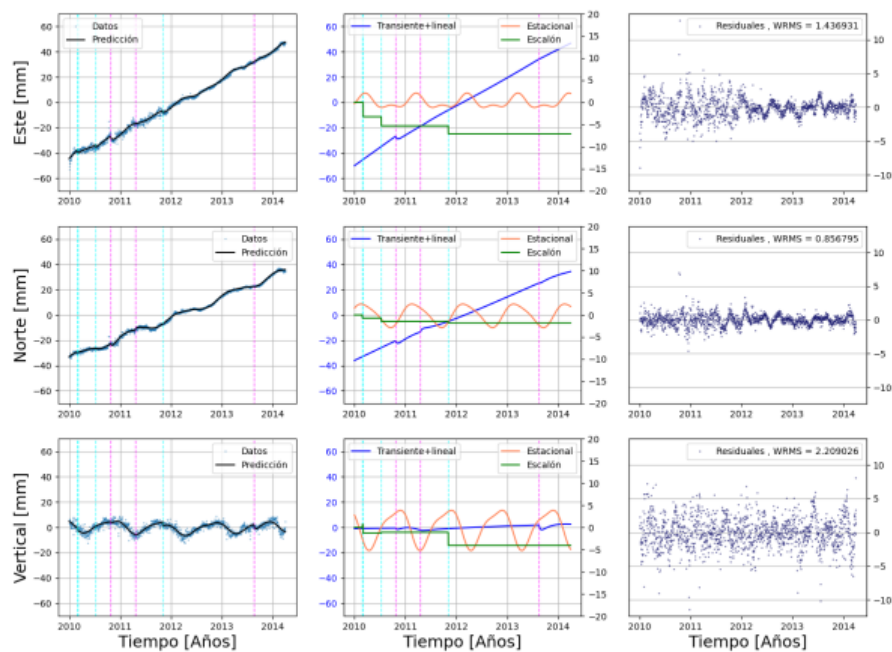
(k) Solución N°17 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación PMEJ

Station PSGA solution 5 (-70.123 , -19.5974)



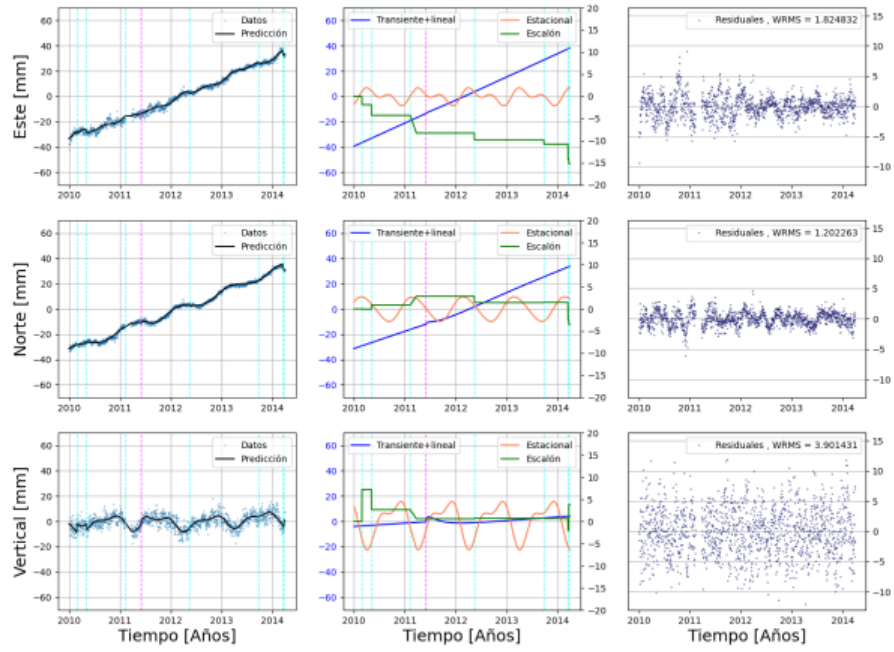
(I) Solución N°5 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación PSGA

Station SRGD solution 16 (-69.3478 , -22.8711)

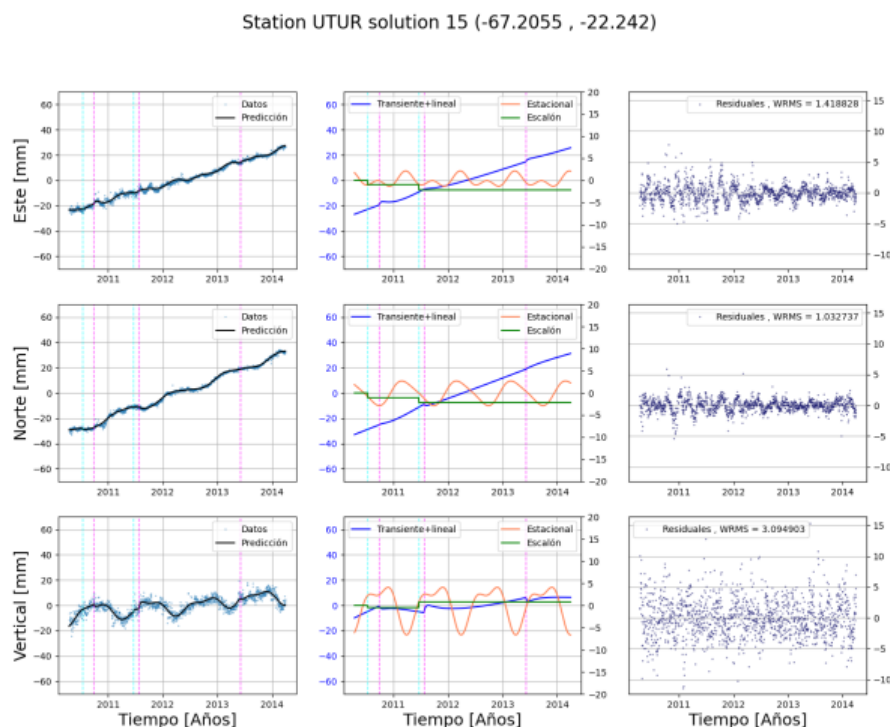


(m) Solución N°16 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación SRGD

Station UTAR solution 12 (-70.2965 , -18.4906)



(n) Solución N°12 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación UTAR

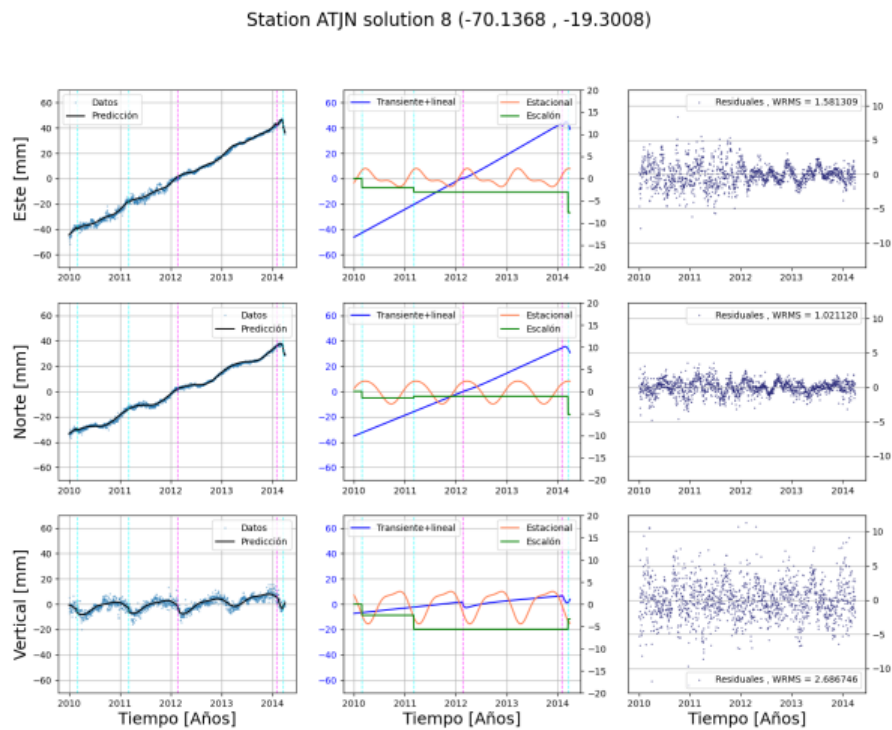


(ñ) Solución N°15 con CMF aplicado, conjunto (2-2-2) mm, estación UTUR

Figura A0.1: Las figuras están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estás imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente.

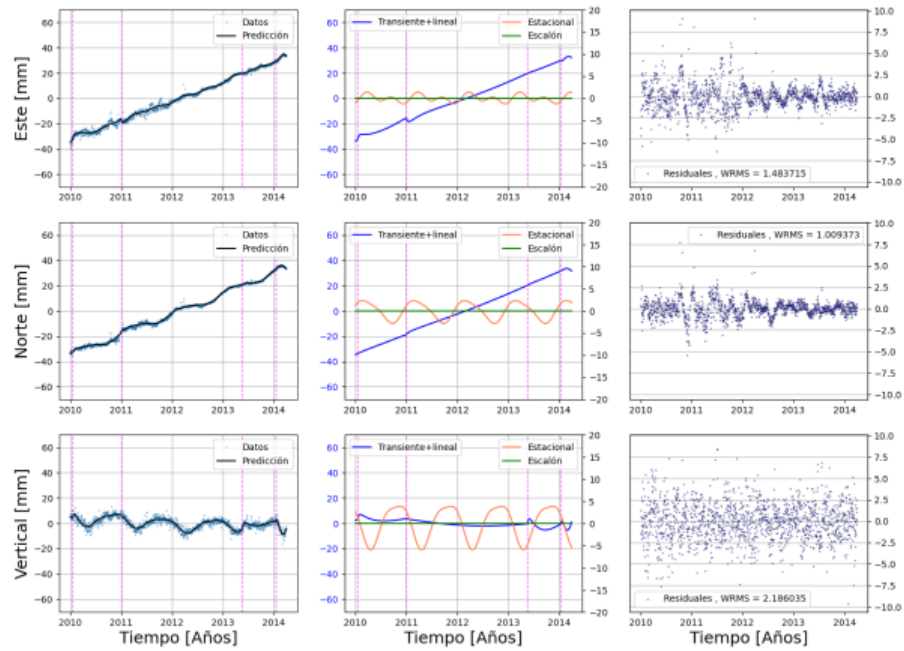
Apéndice B

Figuras estaciones de Iquique-Pisagua, conjunto (4-4-5) mm



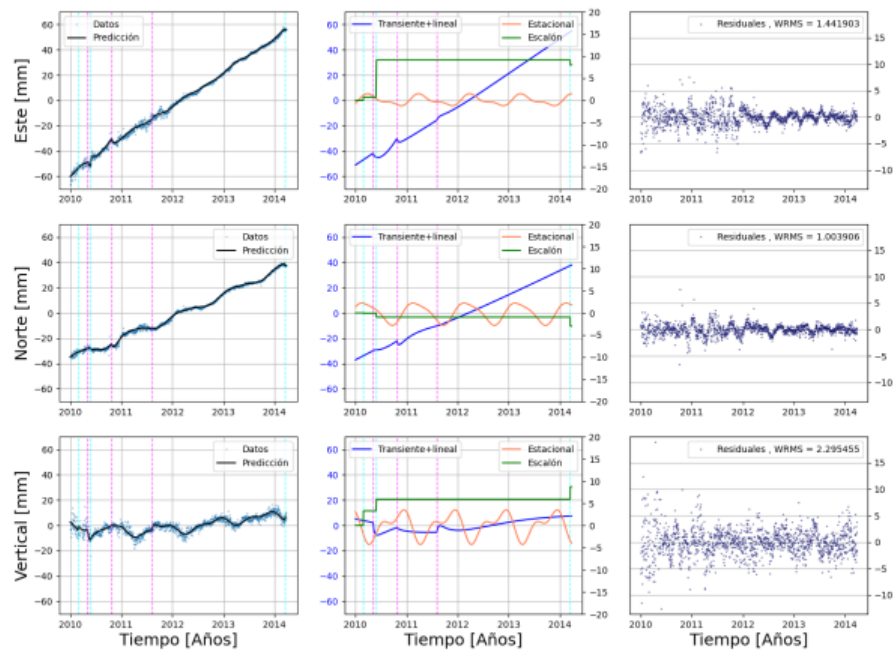
(a) Solución N°8 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación ATJN

Station CBAA solution 20 (-68.4481, -22.7464)



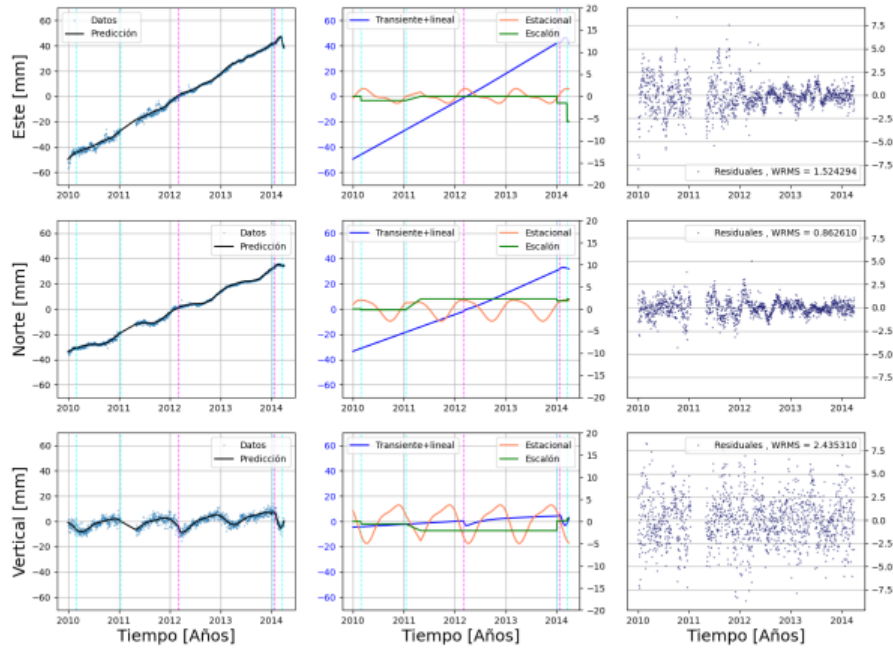
(b) Solución N°20 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación CBAA

Station CDLC solution 8 (-69.7615, -22.1896)



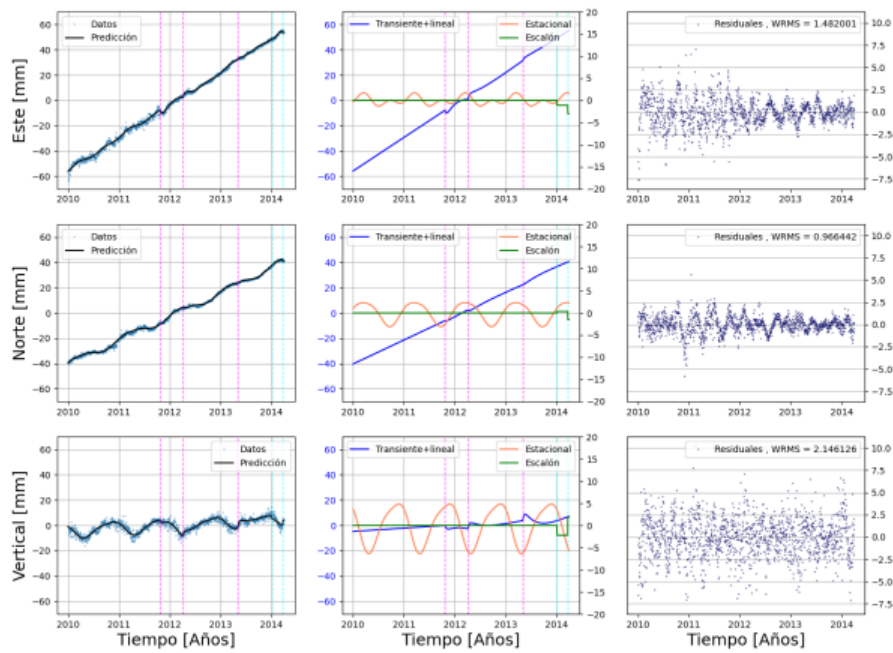
(c) Solución N°8 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación CDLC

Station CGTC solution 8 (-70.069 , -20.1771)



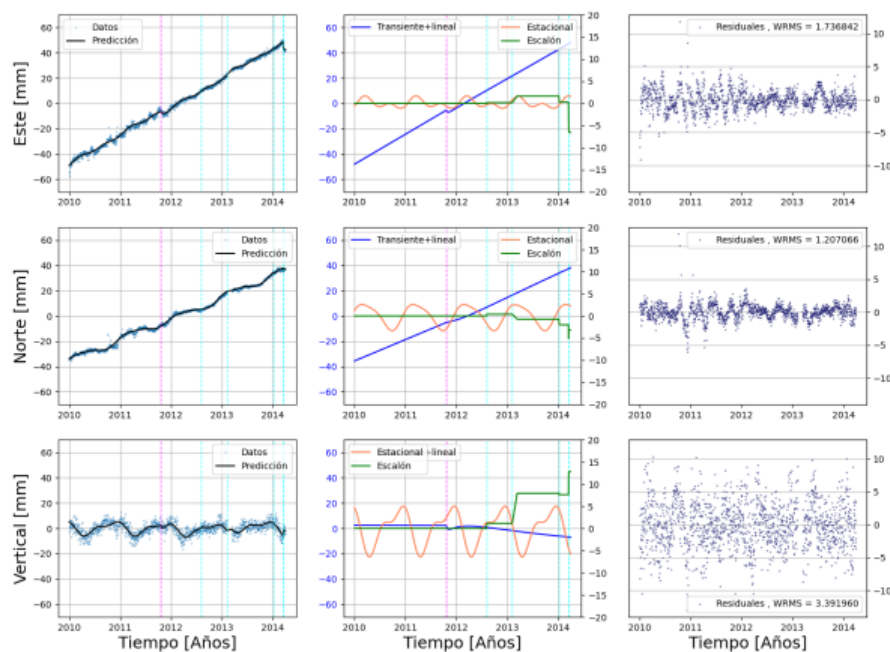
(d) Solución N°8 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación CGTC

Station CRSC solution 15 (-70.0798 , -20.9177)



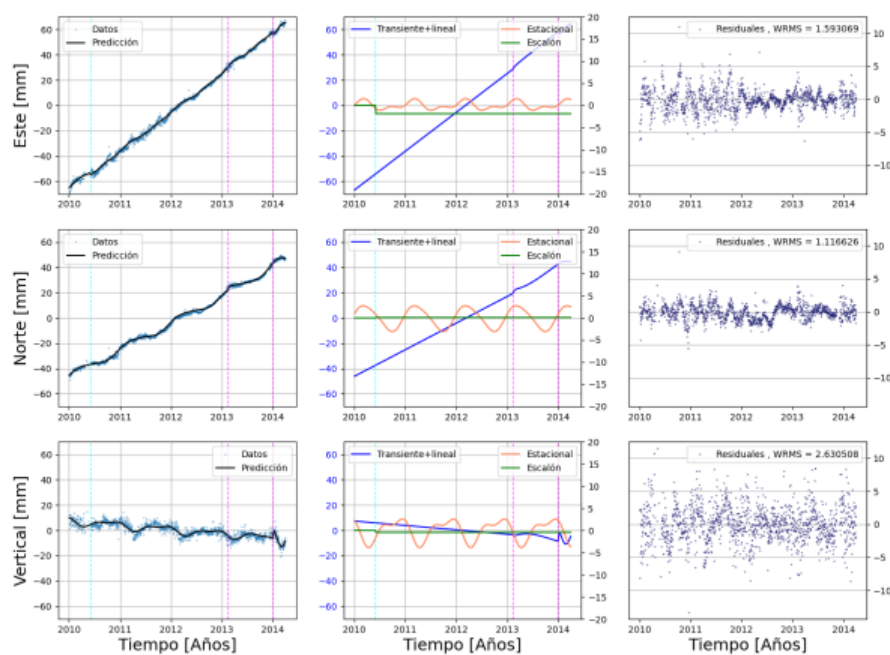
(e) Solución N°15 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación CGTC

Station IQQE solution 11 (-70.1317 , -20.2735)



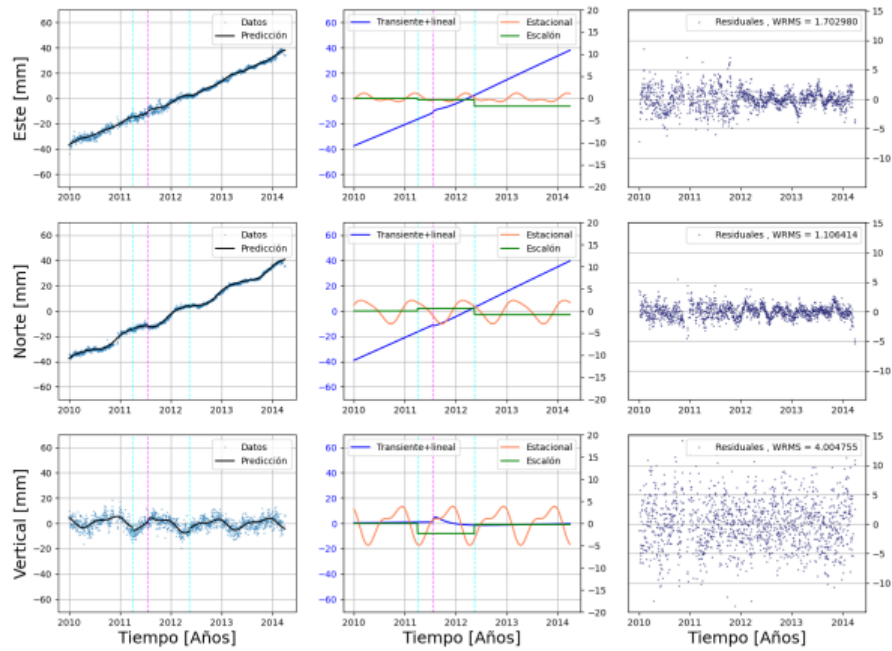
(f) Solución N°11 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación IQQE

Station JRGN solution 20 (-70.5749 , -23.2889)



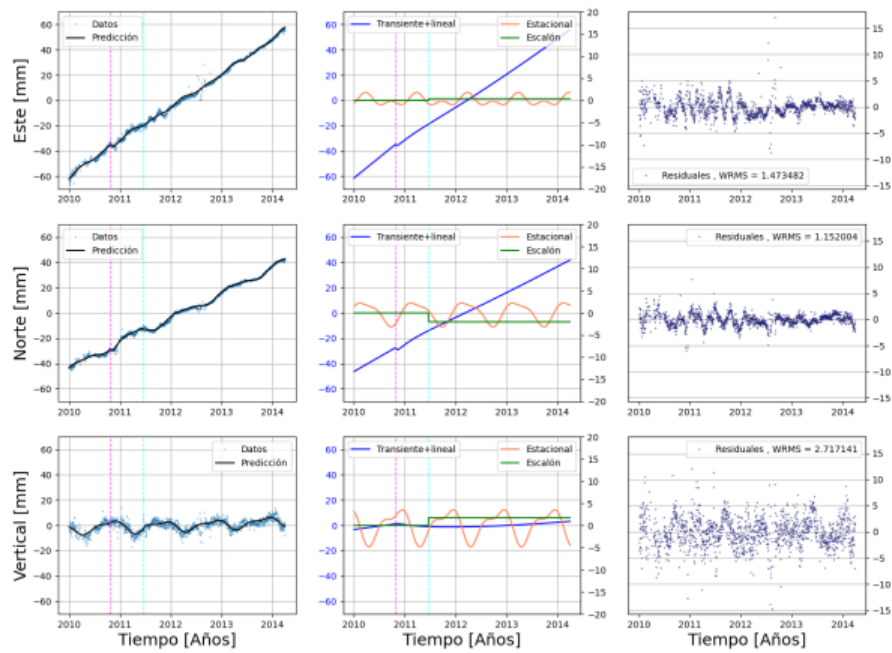
(g) Solución N°20 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación JRGN

Station MNMI solution 23 (-69.5957 , -19.1314)



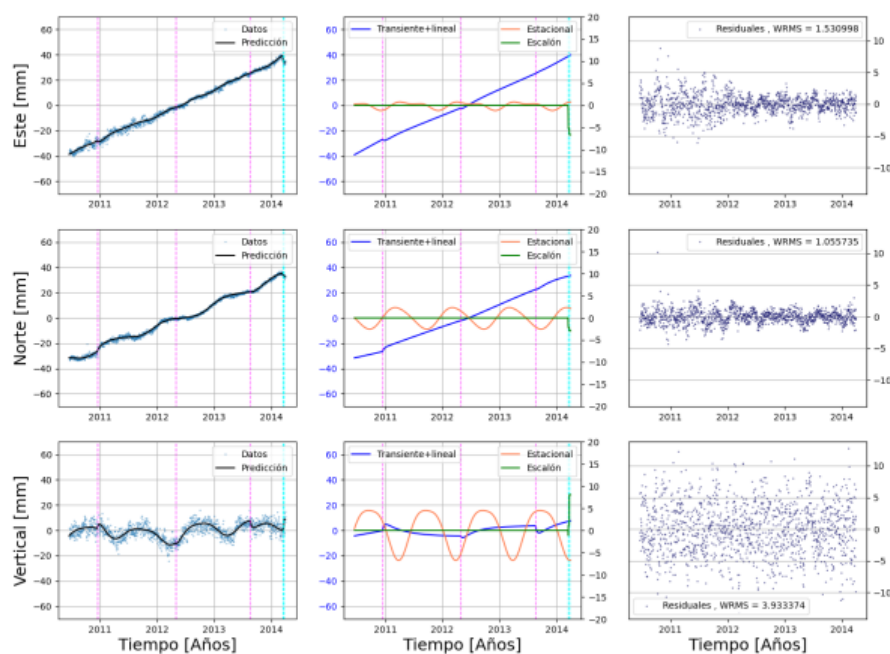
(h) Solución N°23 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación MNMI

Station PB04 solution 22 (-70.1497 , -22.335)



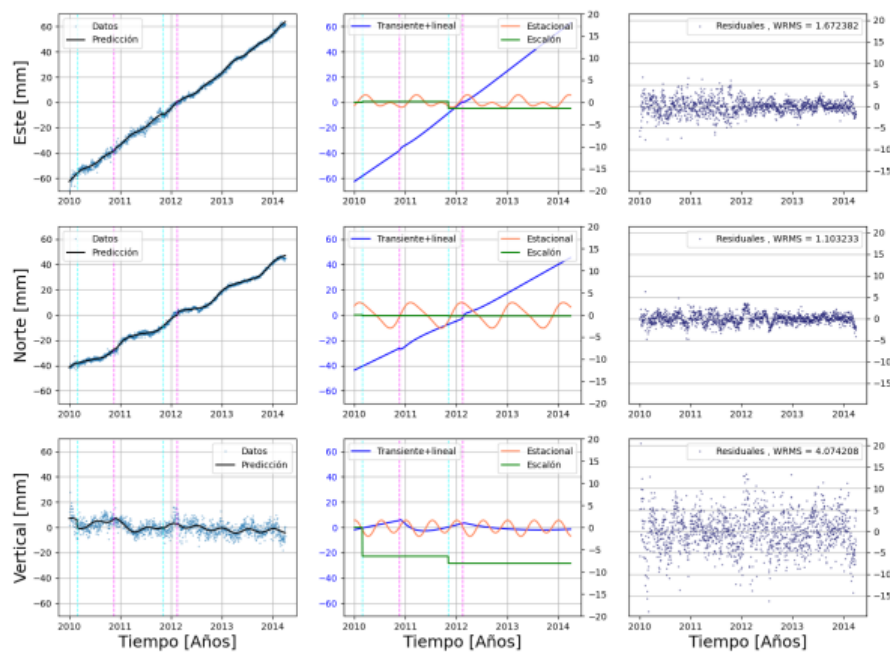
(i) Solución N°22 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación PB04

Station PCHA solution 14 (-69.4321, -19.8695)



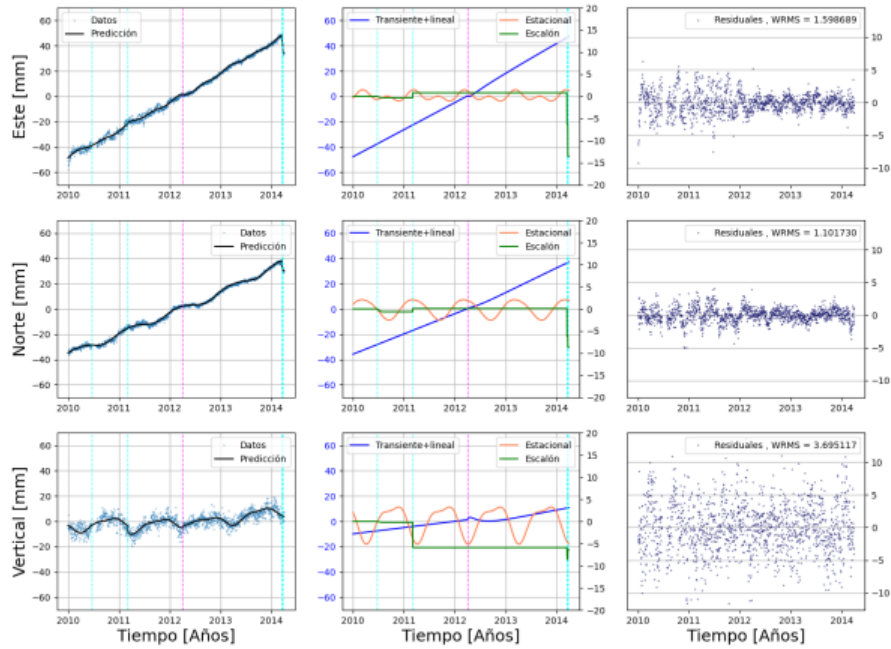
(j) Solución N°14 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación PCHA

Station PMEJ solution 6 (-70.4484, -23.1008)



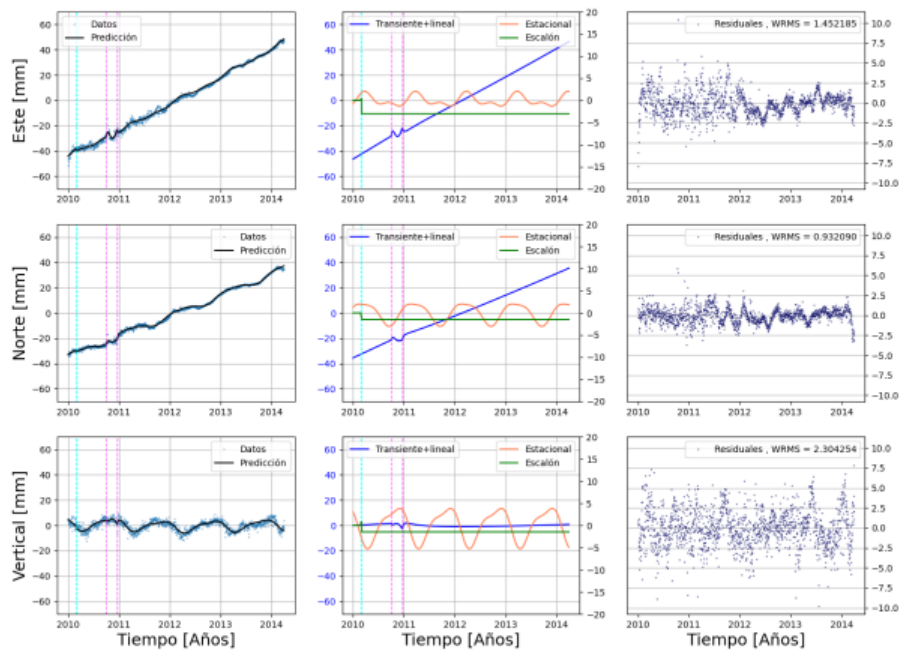
(k) Solución N°6 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación PMEJ

Station PSGA solution 21 (-70.123 , -19.5974)



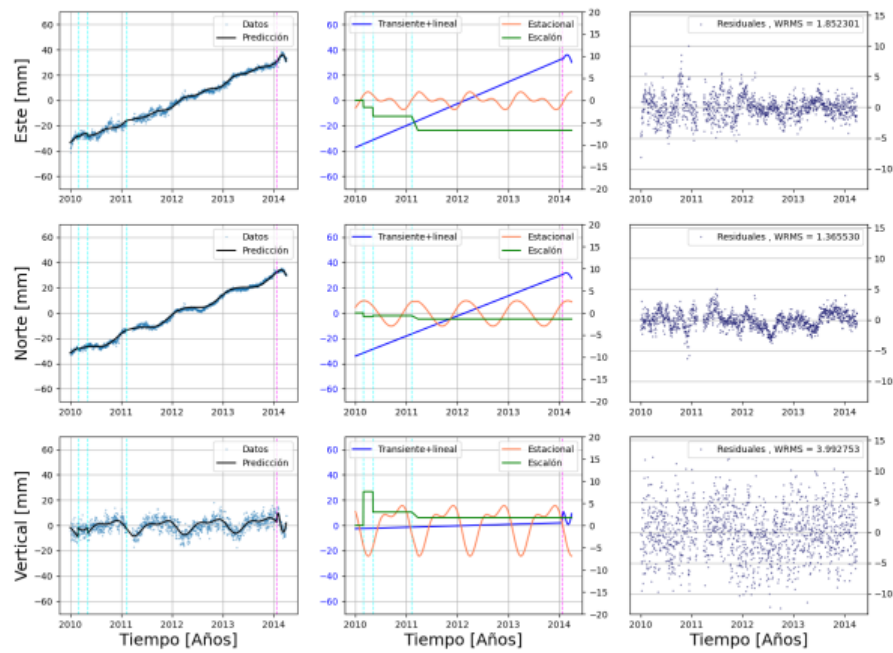
(l) Solución N°21 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación PSGA

Station SRGD solution 13 (-69.3478 , -22.8711)

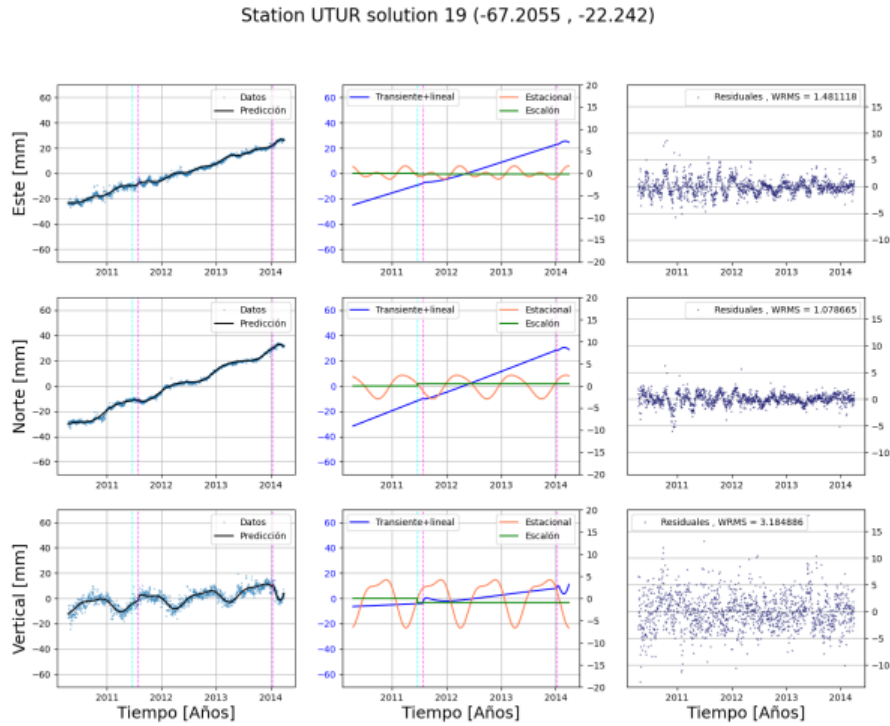


(m) Solución N°13 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación SRGD

Station UTAR solution 9 (-70.2965 , -18.4906)



(n) Solución N°9 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación UTAR

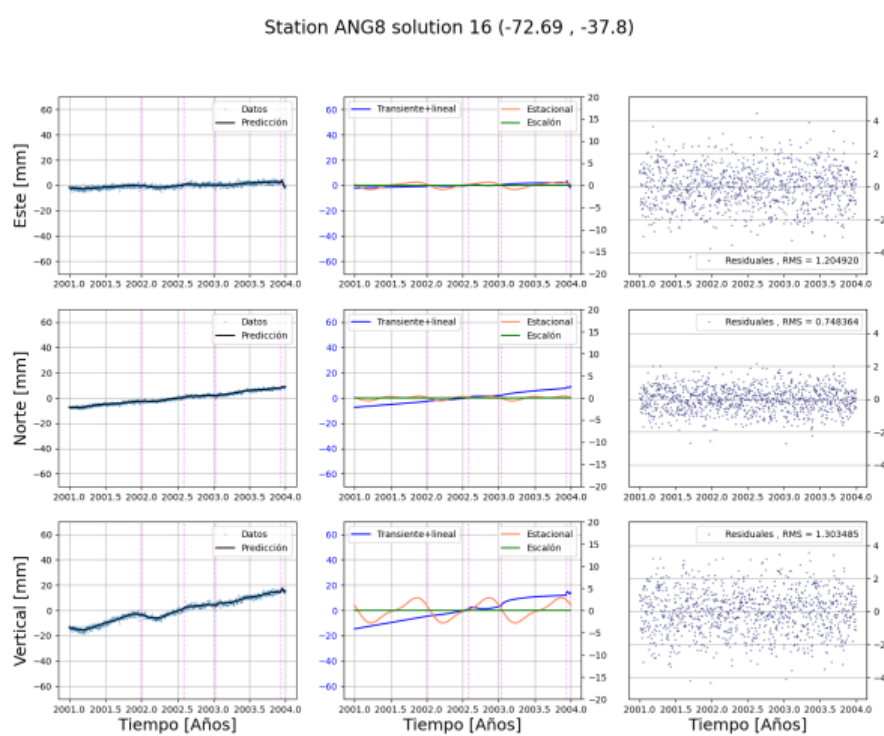


(ñ) Solución N°19 con CMF aplicado, conjunto (4-4-5) mm, estación UTUR

Figura B0.1: Las figuras están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estas imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente.

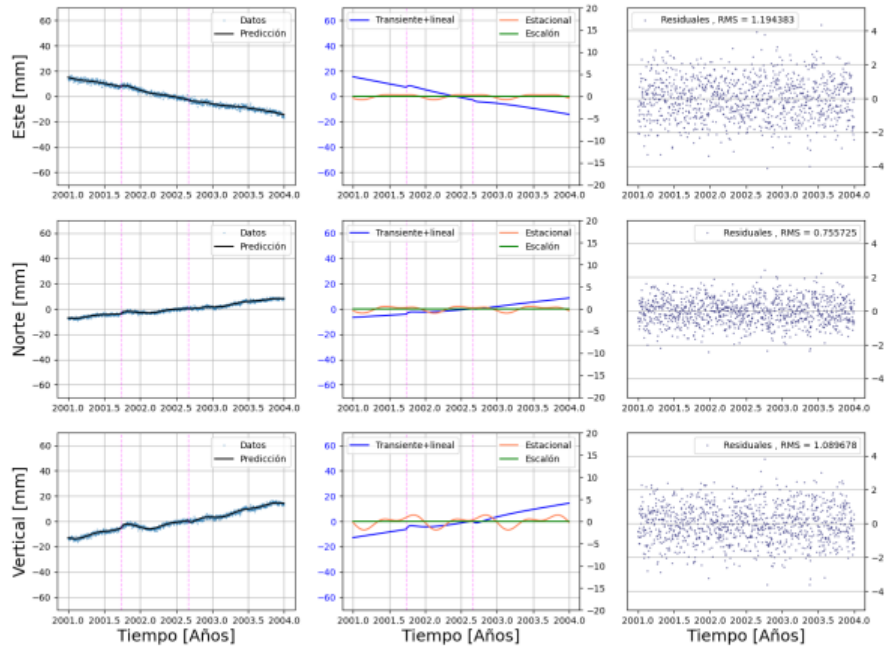
Apéndice C

Figuras estaciones sintéticas



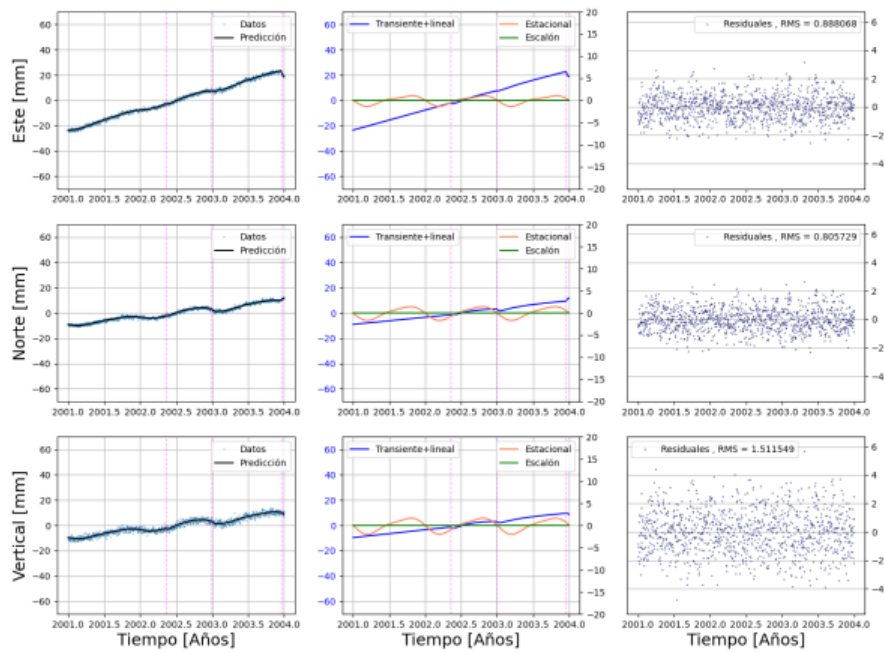
(a) Solución N°16 con CMF aplicado, estación ANG8

Station ANTC solution 21 (-71.53 , -37.34)



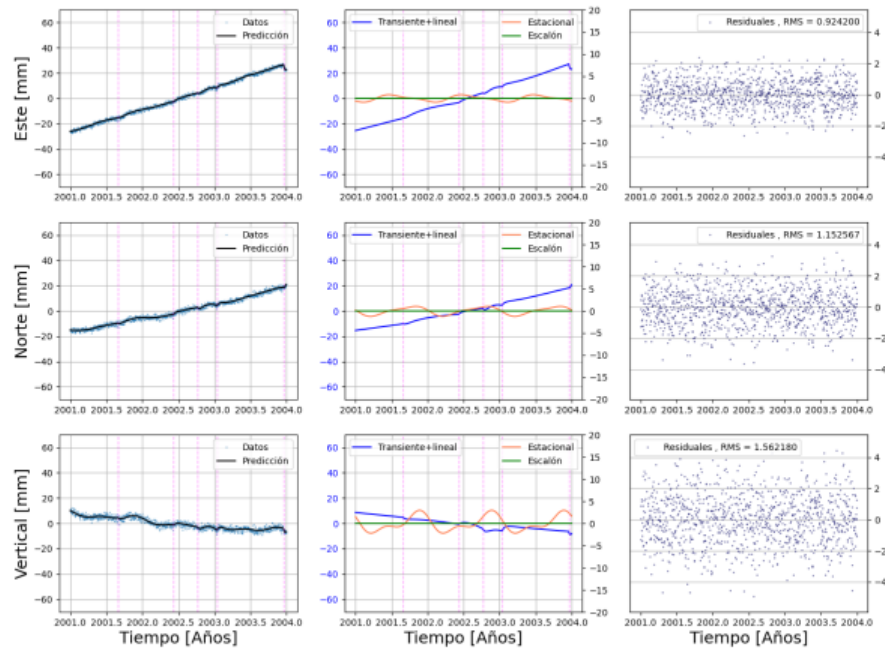
(b) Solución N°21 con CMF aplicado, estación ANTC

Station B914 solution 23 (-73.23 , -39.82)



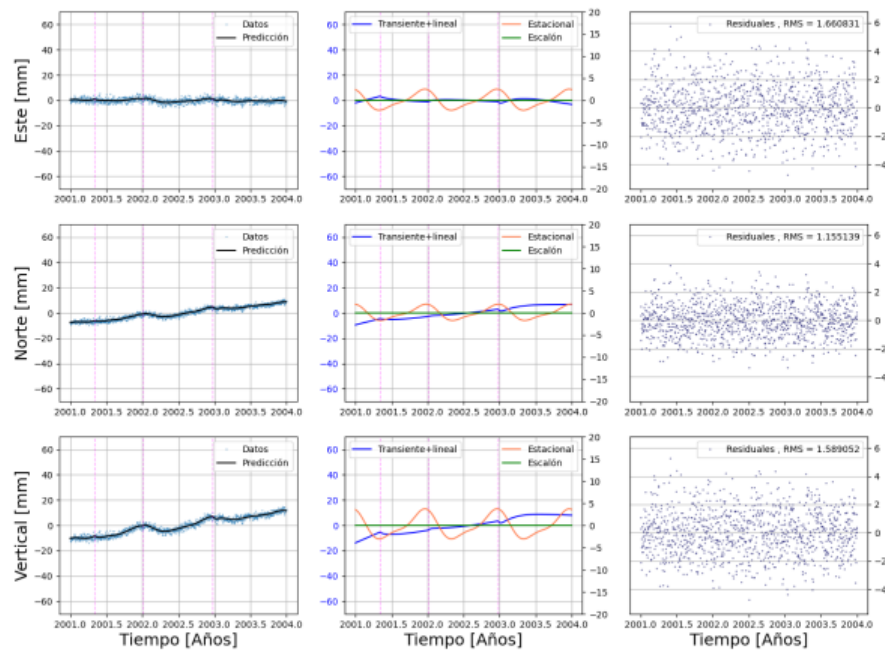
(c) Solución N°23 con CMF aplicado, estación B914

Station BN08 solution 18 (-73.05, -36.83)



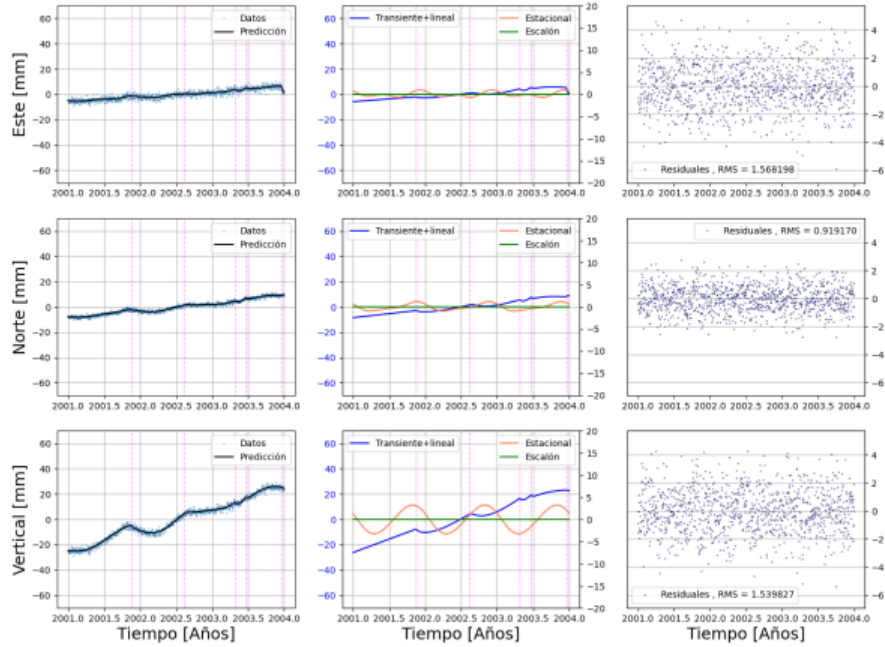
(d) Solución N°18 con CMF aplicado, estación BN08

Station BN16 solution 8 (-72.09, -36.61)



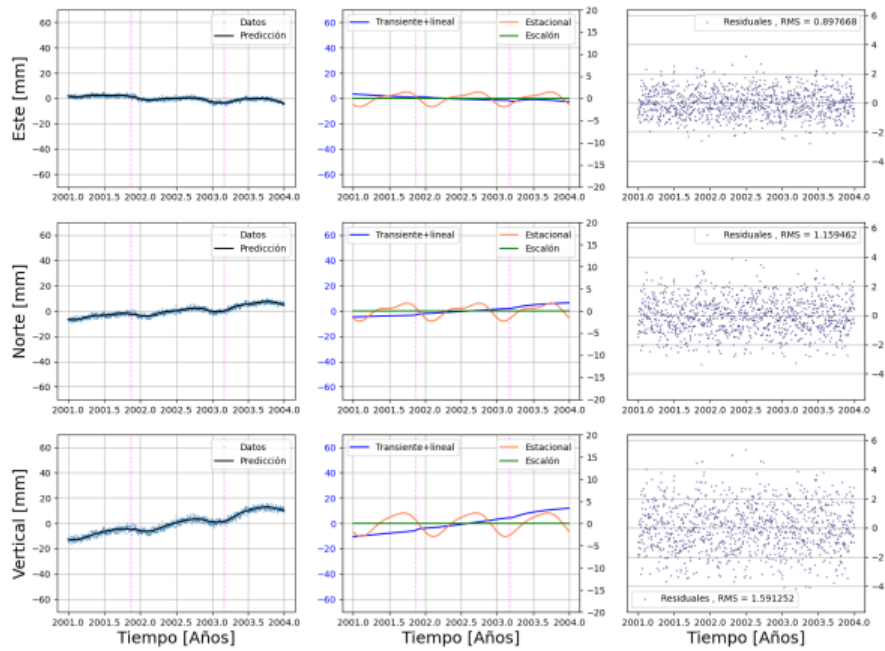
(e) Solución N°8 con CMF aplicado, estación BN16

Station BN89 solution 19 (-72.59 , -38.74)



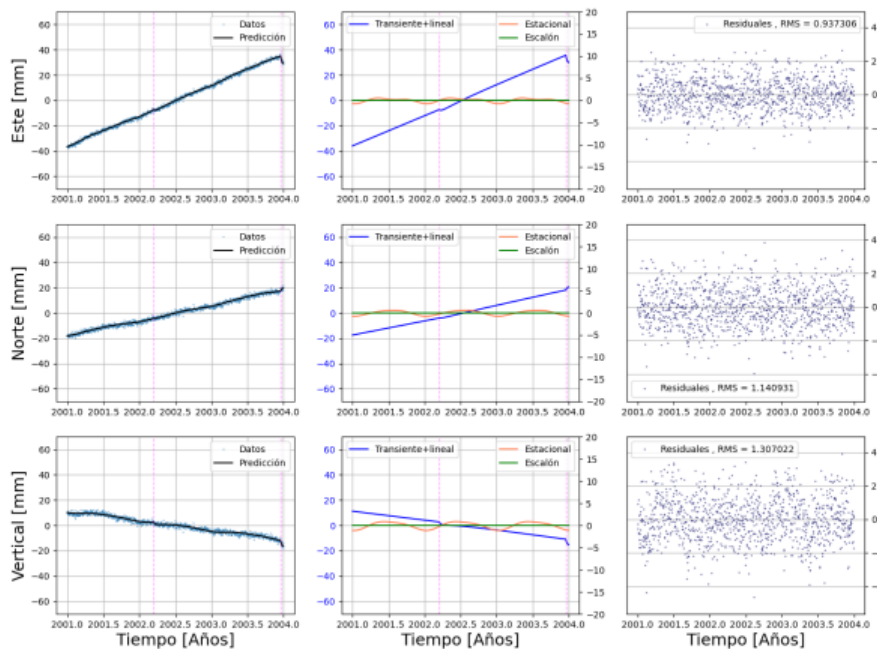
(f) Solución N°19 con CMF aplicado, estación BN89

Station CLL1 solution 24 (-72.08 , -36.59)



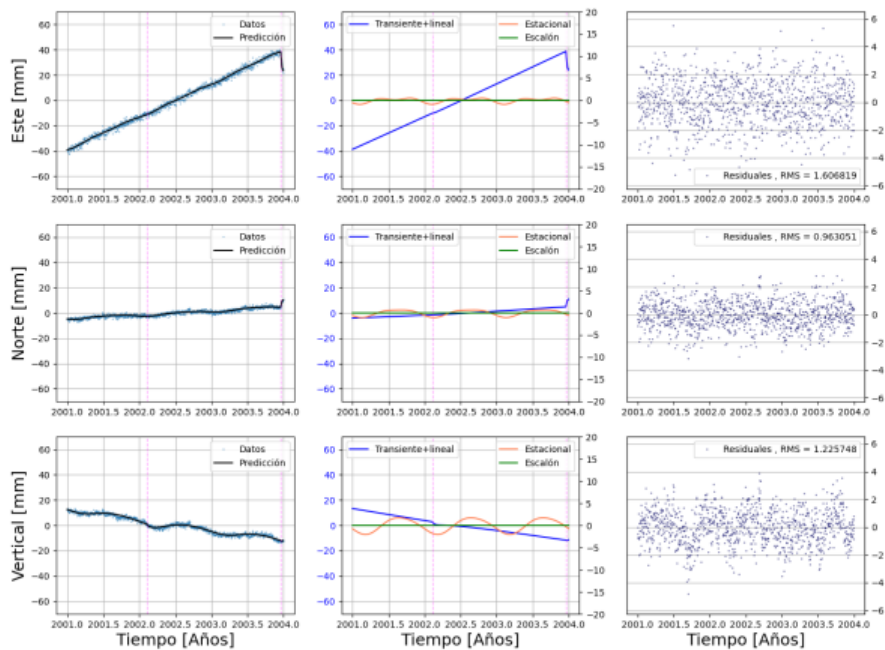
(g) Solución N°24 con CMF aplicado, estación CLL1

Station HLPN solution 16 (-73.19 , -36.75)



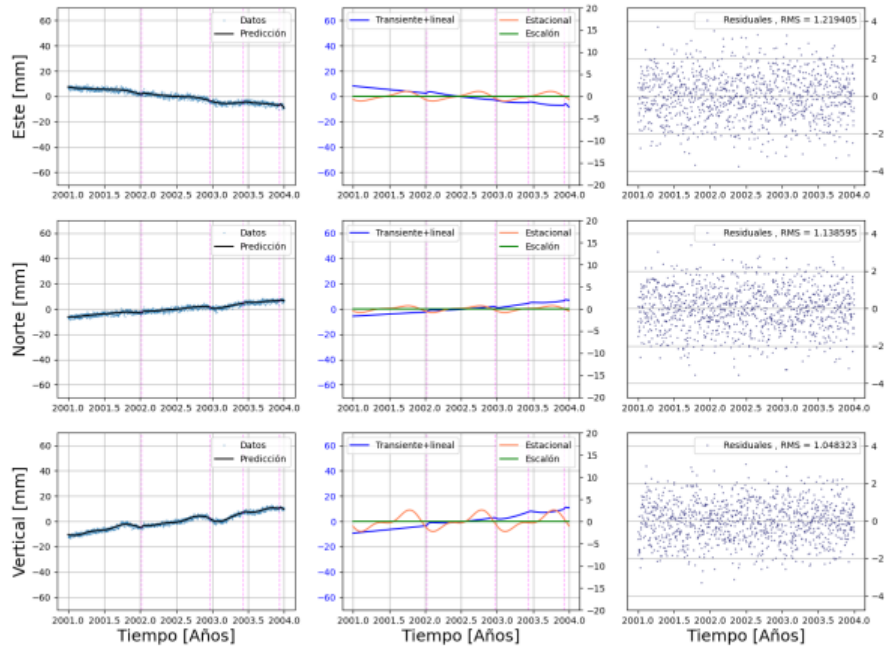
(h) Solución N°16 con CMF aplicado, estación HLPN

Station IMCH solution 23 (-73.89 , -38.41)



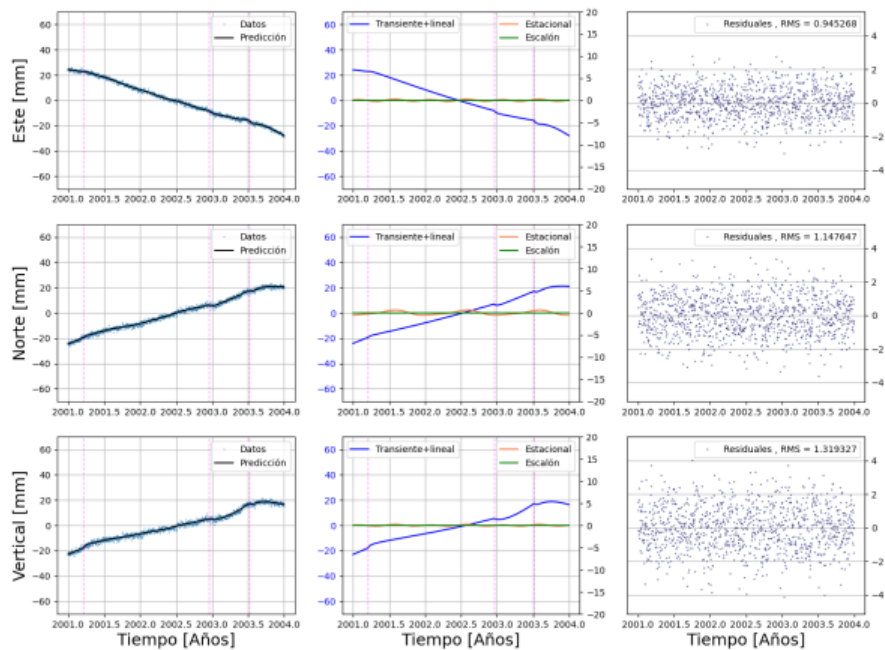
(i) Solución N°23 con CMF aplicado, estación IMCH

Station LNQM solution 22 (-71.36 , -38.46)



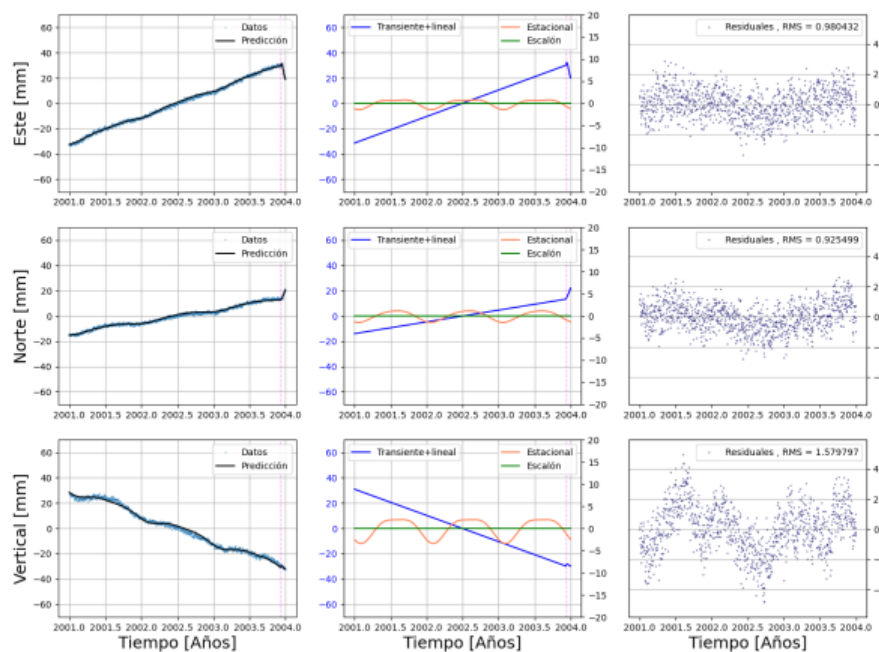
(j) Solución N°22 con CMF aplicado, estación LNQM

Station MAUL solution 19 (-70.82 , -35.81)



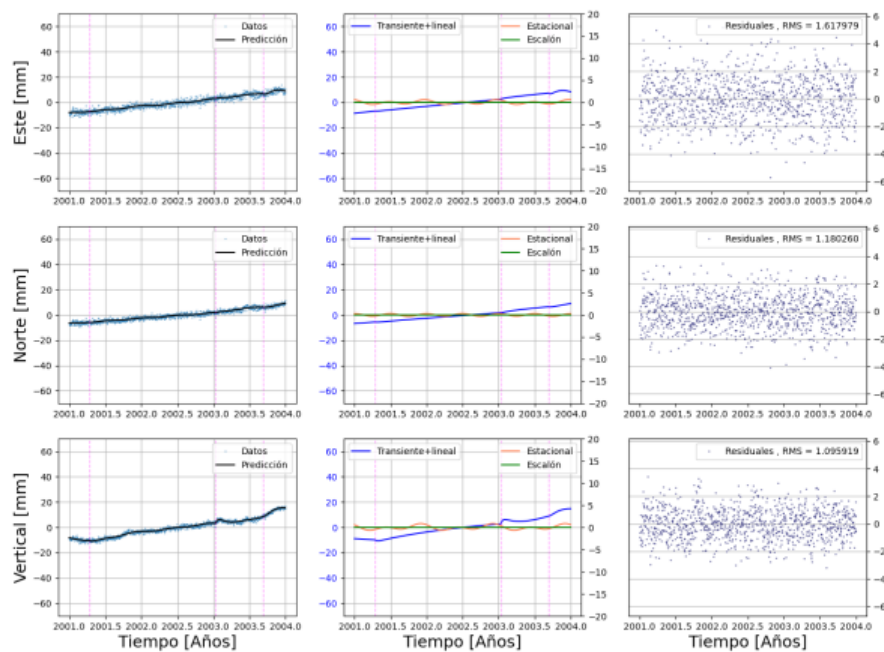
(k) Solución N°19 con CMF aplicado, estación MAUL

Station PECL solution 16 (-73.65 , -37.69)



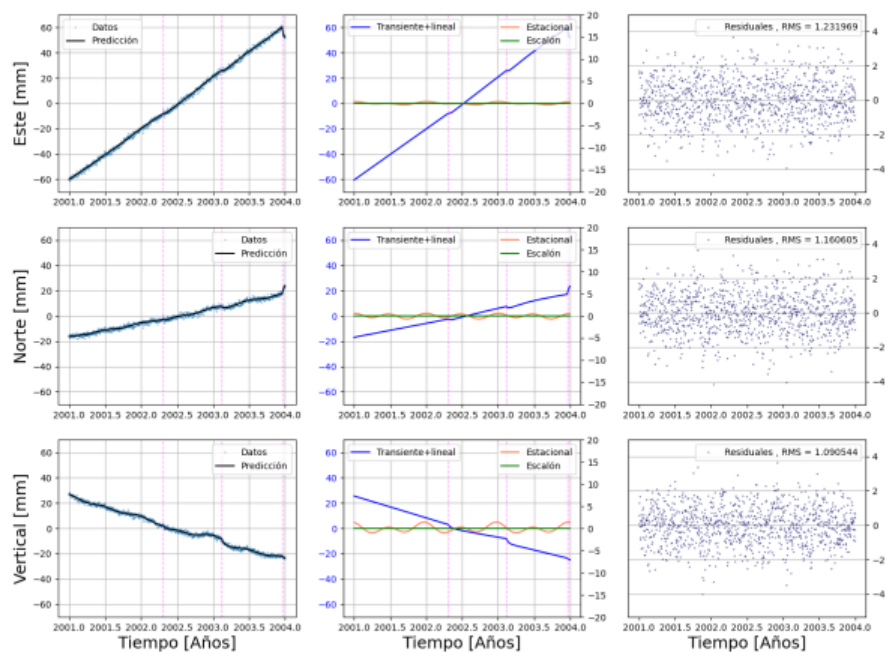
(I) Solución N°16 con CMF aplicado, estación PECL

Station PGLL solution 16 (-72.34 , -39.63)



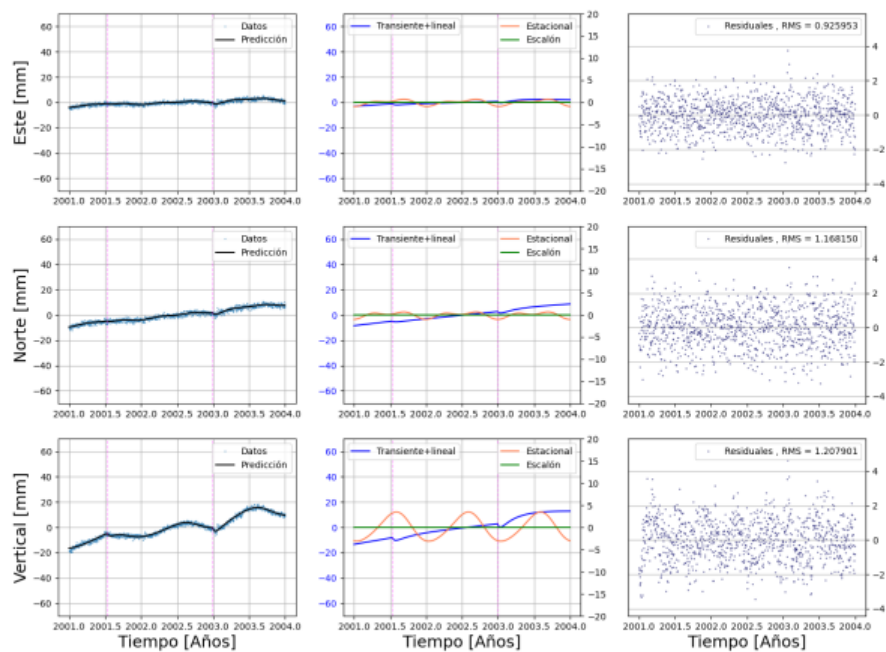
(m) Solución N°16 con CMF aplicado, estación PGLL

Station PLVP solution 17 (-73.58 , -37.15)



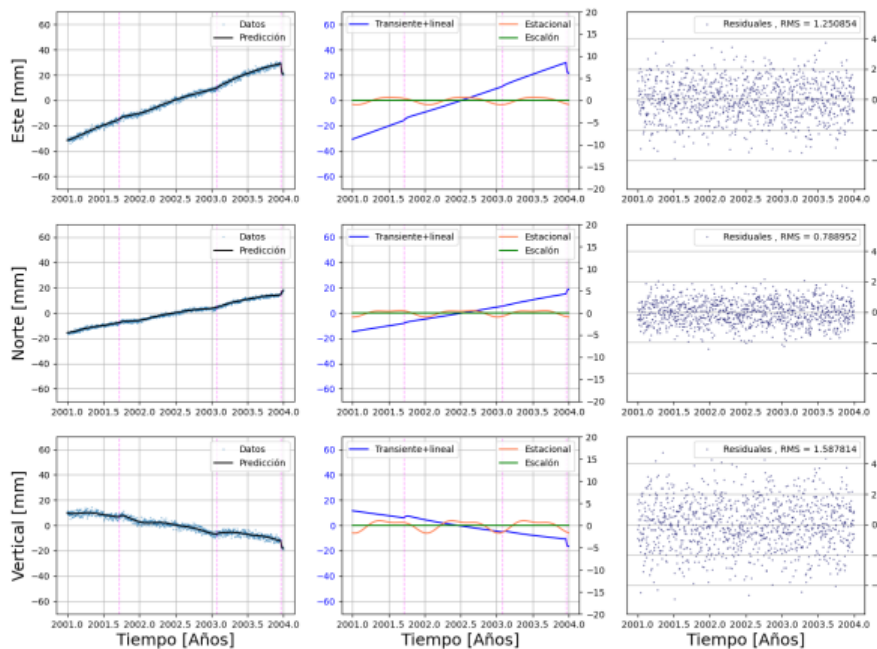
(n) Solución N°17 con CMF aplicado, estación PLVP

Station QLAP solution 22 (-72.12 , -36.08)



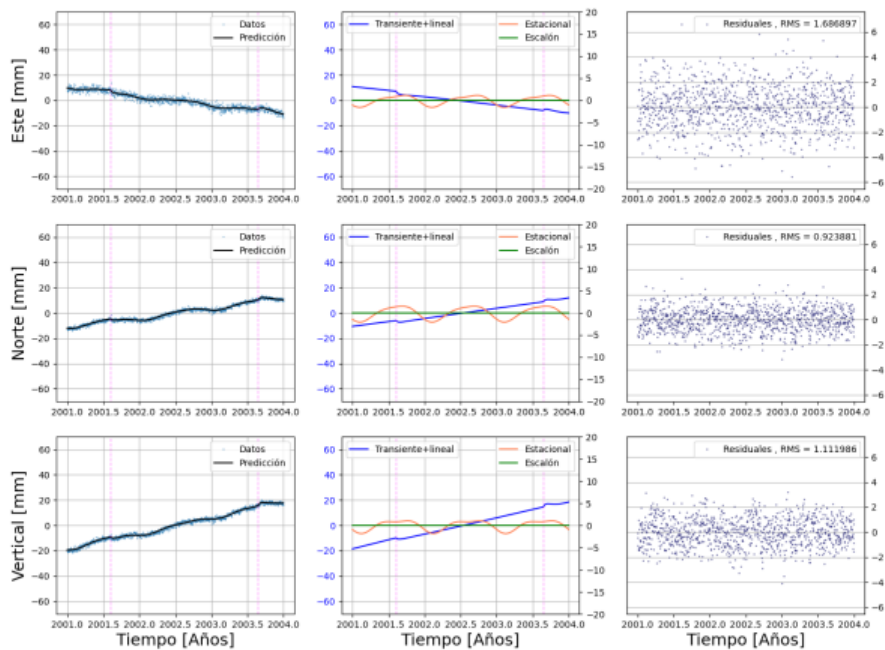
(ñ) Solución N°22 con CMF aplicado, estación QLAP

Station SAAV solution 24 (-73.38 , -38.79)



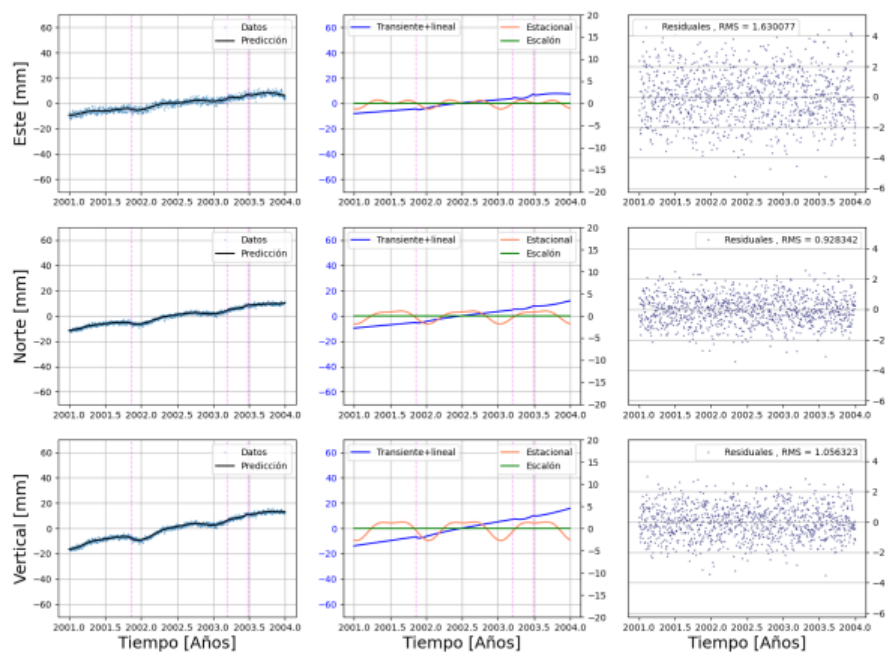
(o) Solución N°24 con CMF aplicado, estación SAAV

Station SJAV solution 4 (-71.73 , -35.59)



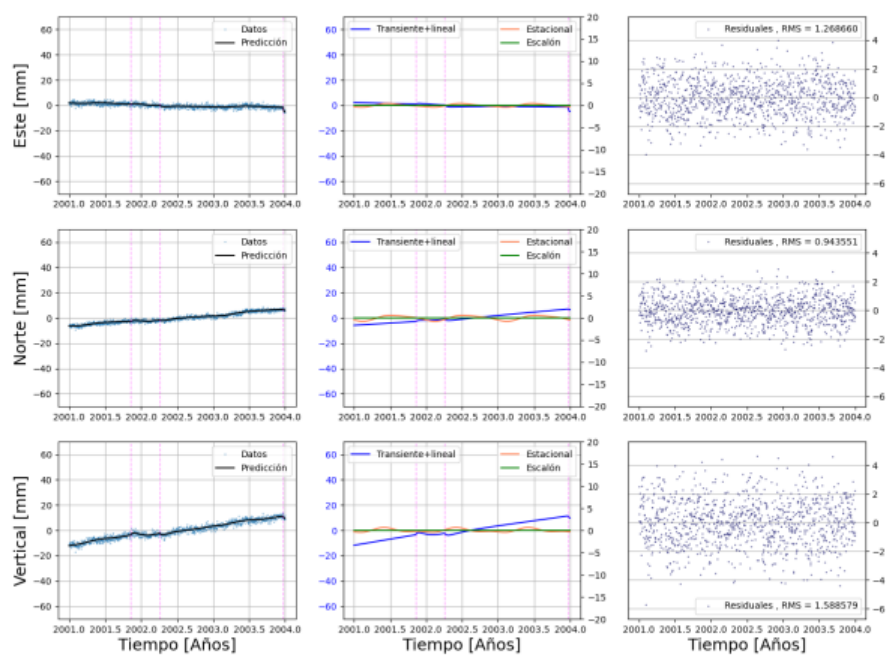
(p) Solución N°4 con CMF aplicado, estación SJAV

Station TMCO solution 24 (-72.61 , -38.76)



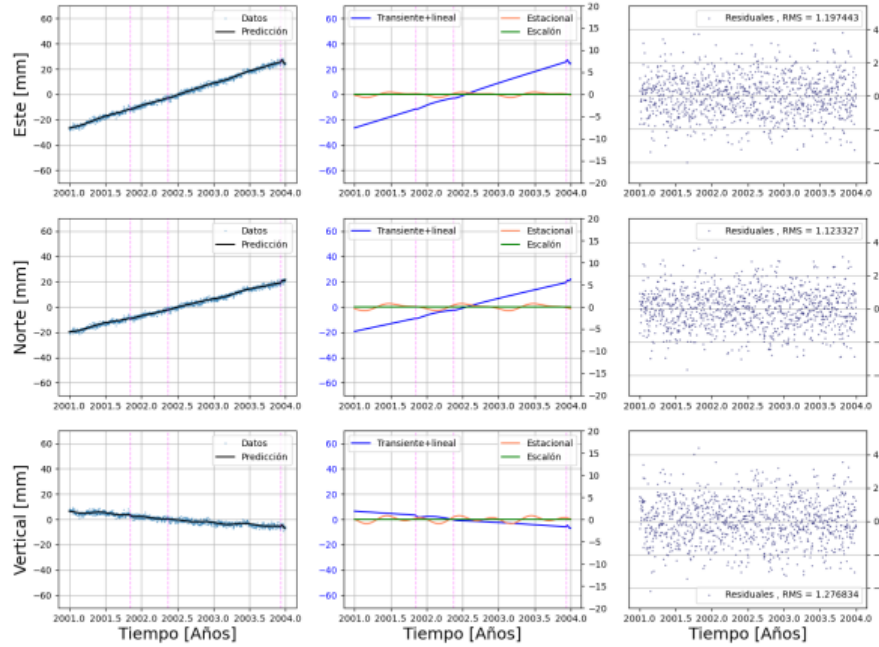
(q) Solución N°24 con CMF aplicado, estación TMCO

Station UDEC solution 20 (-72.34 , -37.47)



(r) Solución N°20 con CMF aplicado, estación UDEC

Station VITA solution 22 (-72.86 , -36.42)



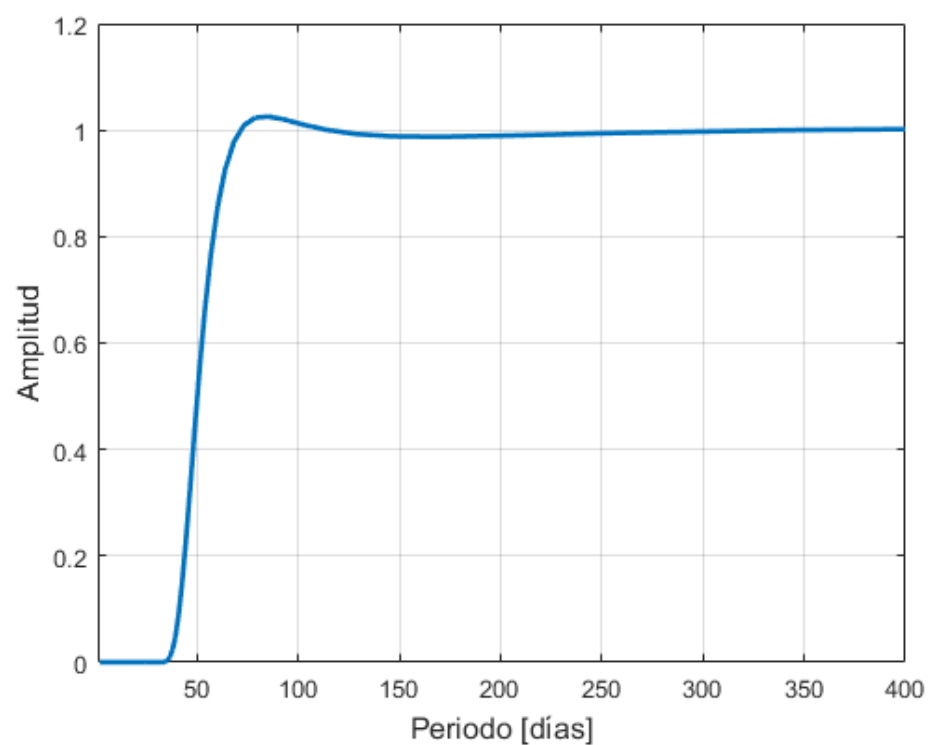
(s) Solución N°22 con CMF aplicado, estación VITA

Figura C0.1: Las figuras están compuestas por un panel 3x3 de imágenes, donde cada fila representa una componente en el eje local (Este, norte y vertical). La primera columna muestra el ajuste de el modelo a los datos, en la segunda columna podemos ver tres componentes siendo el color mostaza la componente estacional, el color verde la componente de escalones o saltos y en color azul la suma de dos componentes, la polinómica que en nuestro caso es una componente lineal y las transientes encontradas (recaltar que los saltos no están agregadas a este último), por último la columna tres presenta los residuales del modelo. En estás imágenes se pueden ver ciertas rectas verticales segmentadas, las de color celeste se refiere a la ocurrencia de un salto en el modelo y de color magenta se puede ver el comienzo de un evento transiente.

Apéndice D

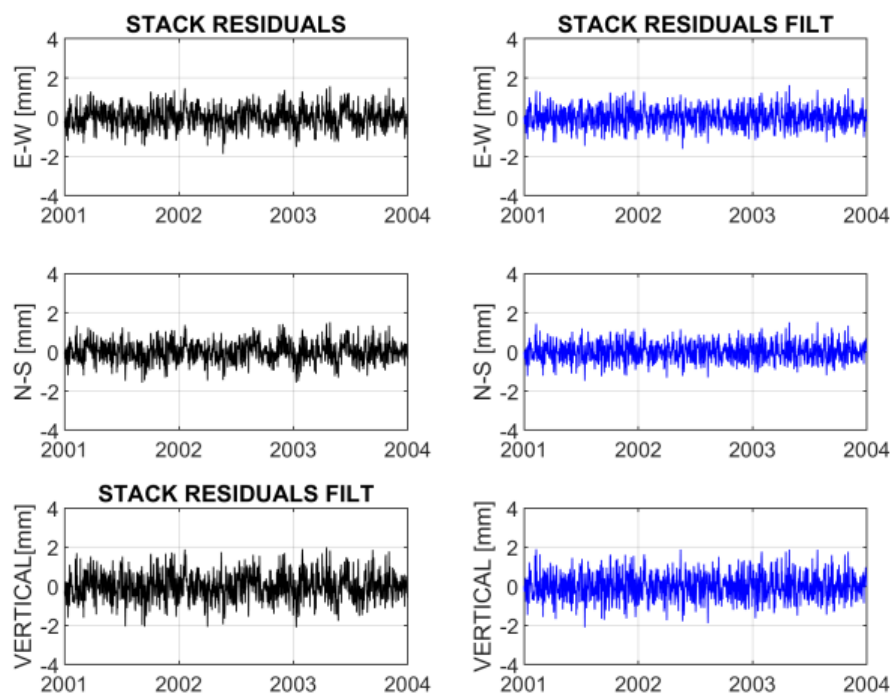
Modo común de error

Las características del filtro usado están descritas en el capítulo de 4. El CMF para los tres casos utilizaron el mismo filtro que se puede ver en la siguiente imagen:



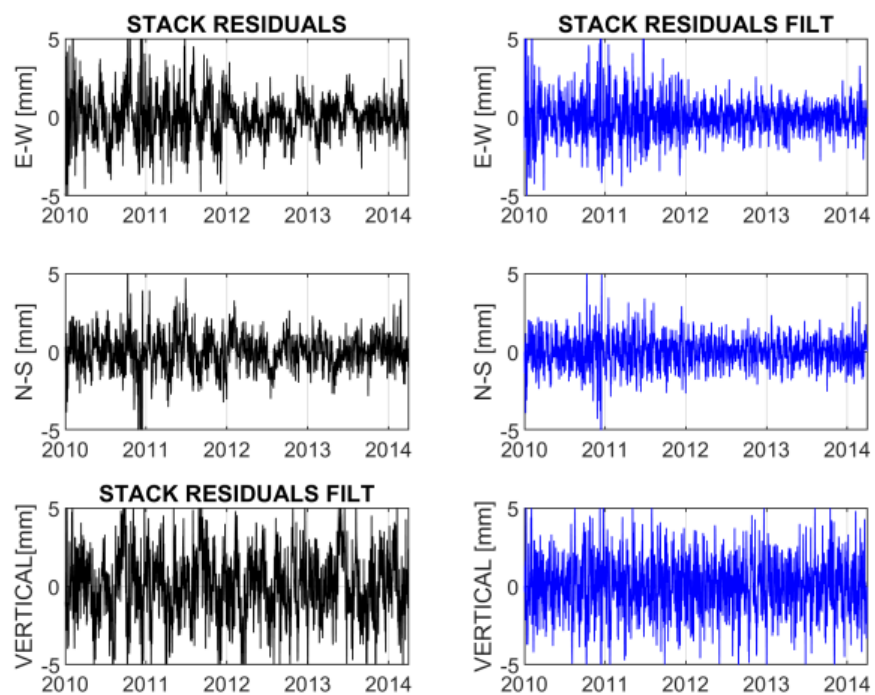
(a) Filtro pasabajo en periodo.

C0.1. Modo común de error caso sintético



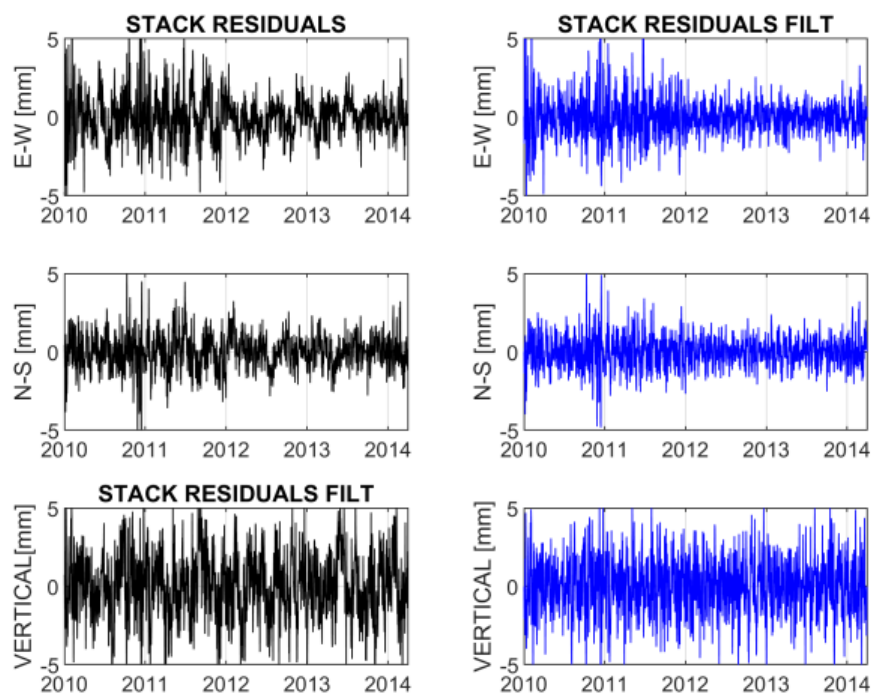
(a) Modo común de error y Modo común de error filtrado caso sintético

C0.2. Modo común de error conjunto (2-2-2) mm



(a) Modo común de error y Modo común de error filtrado conjunto (2-2-2) mm

C0.3. Modo común de error conjunto (4-4-5) mm



(a) Modo común de error y Modo común de error filtrado conjunto (4-4-5) mm