



# Evaluación de magnitudes de los tensores de estrés en el Volcán Villarrica (Chile) mediante GNSS entre el año 2016 y 2022, empleando soluciones semanales SIRGAS

José Antonio Tarrío Mosquera<sup>1x</sup>, Valeria Vásquez Tejo<sup>1</sup>, Jesarella Inzunza Muñoz<sup>1</sup>, Catalina Caceres Venegas<sup>1</sup>, Marcelo Caverlotti Silva<sup>1</sup>, Fernando Isla Rodríguez<sup>1</sup>, Cristian Mardones<sup>2</sup>



<sup>1</sup>Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico USC  
Universidad de Santiago de Chile





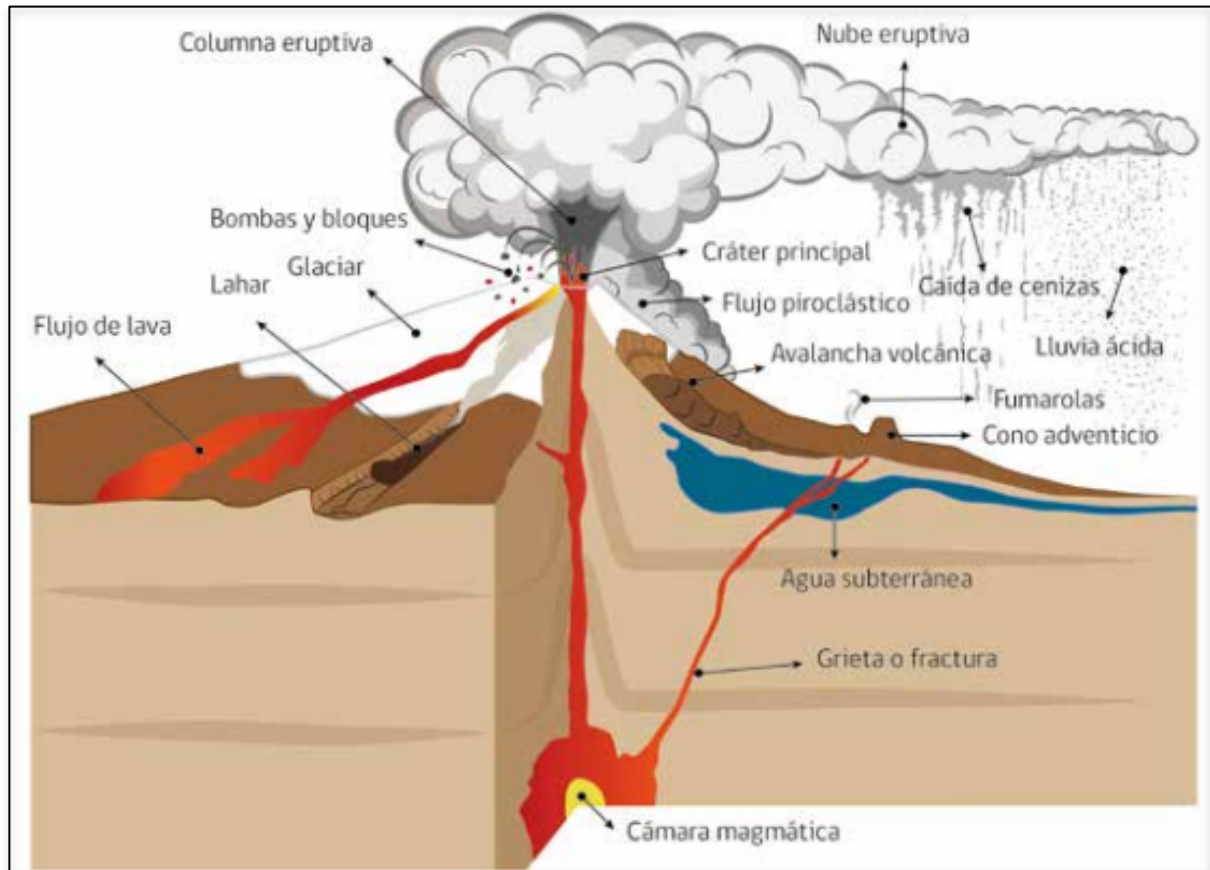
1. Introducción:
2. Volcán Villarrica:
  1. OVDAS
  2. Campañas GNSS
    1. Procesamiento de datos
3. Tensores:
  1. Desplazamientos ENU y variación de vectores
4. Desplazamiento de puntos pasivos
5. GNSS en la Erupción de 2015
6. Conclusiones y Observaciones

## Antecedentes: Introducción

Aunque relativamente recién llegado a vulcanología, el GPS se ha ganado rápidamente un nicho para entre las principales técnicas de monitoreo de volcanes.

Los levantamientos geodésicos son componentes esenciales de un programa integral de monitoreo de volcanes, que se puede esperar que produzcan nuevos fundamentos conocimientos sobre cómo operan los volcanes ([Dzurisin, 2003](#)).

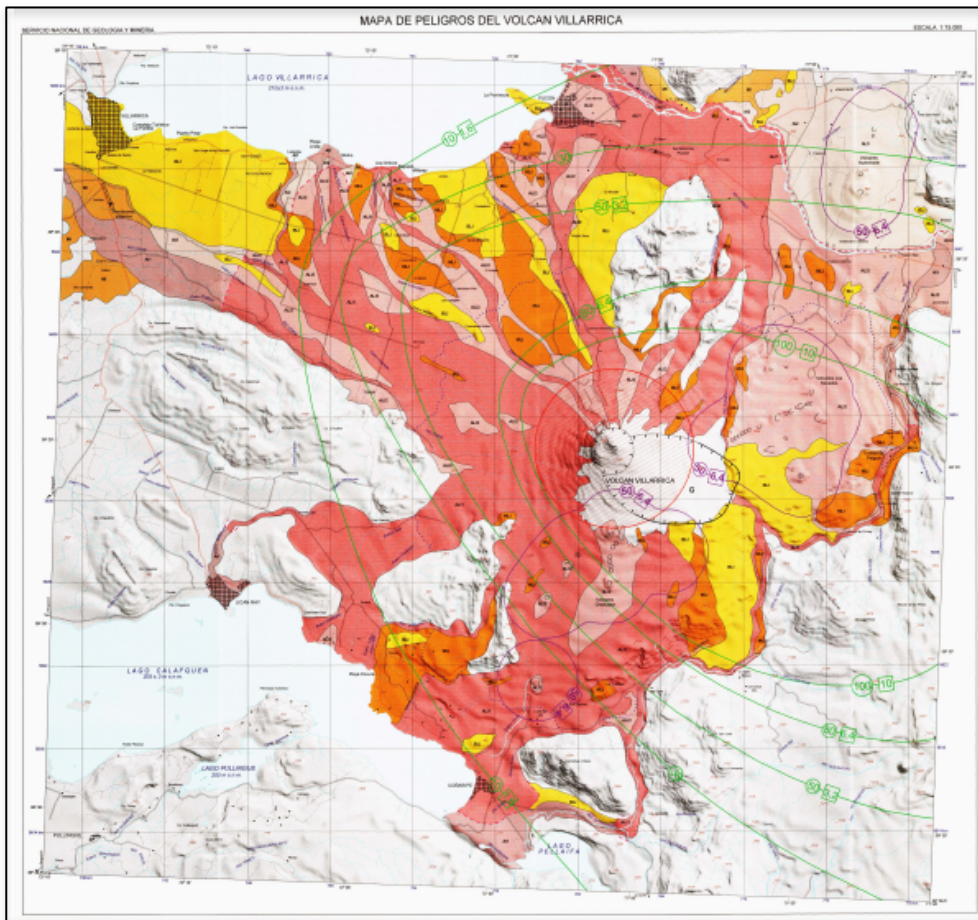
Los registros continuos también ofrecen la oportunidad de reconocer inmediatamente eventos de deformación a corto plazo, como terremotos lentos, que podrían de lo contrario, pasar desapercibido o ser reconocido solo después el



Esquema sobre procesos volcánicos.

Fuente: SERNAGEOMIN. 2018. [Chile: territorio volcánico](#). Servicio Nacional de Geología y Minería.

## OVDAS: Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur



Mapa de peligro del volcán Villarrica SERNAGEOMIN.

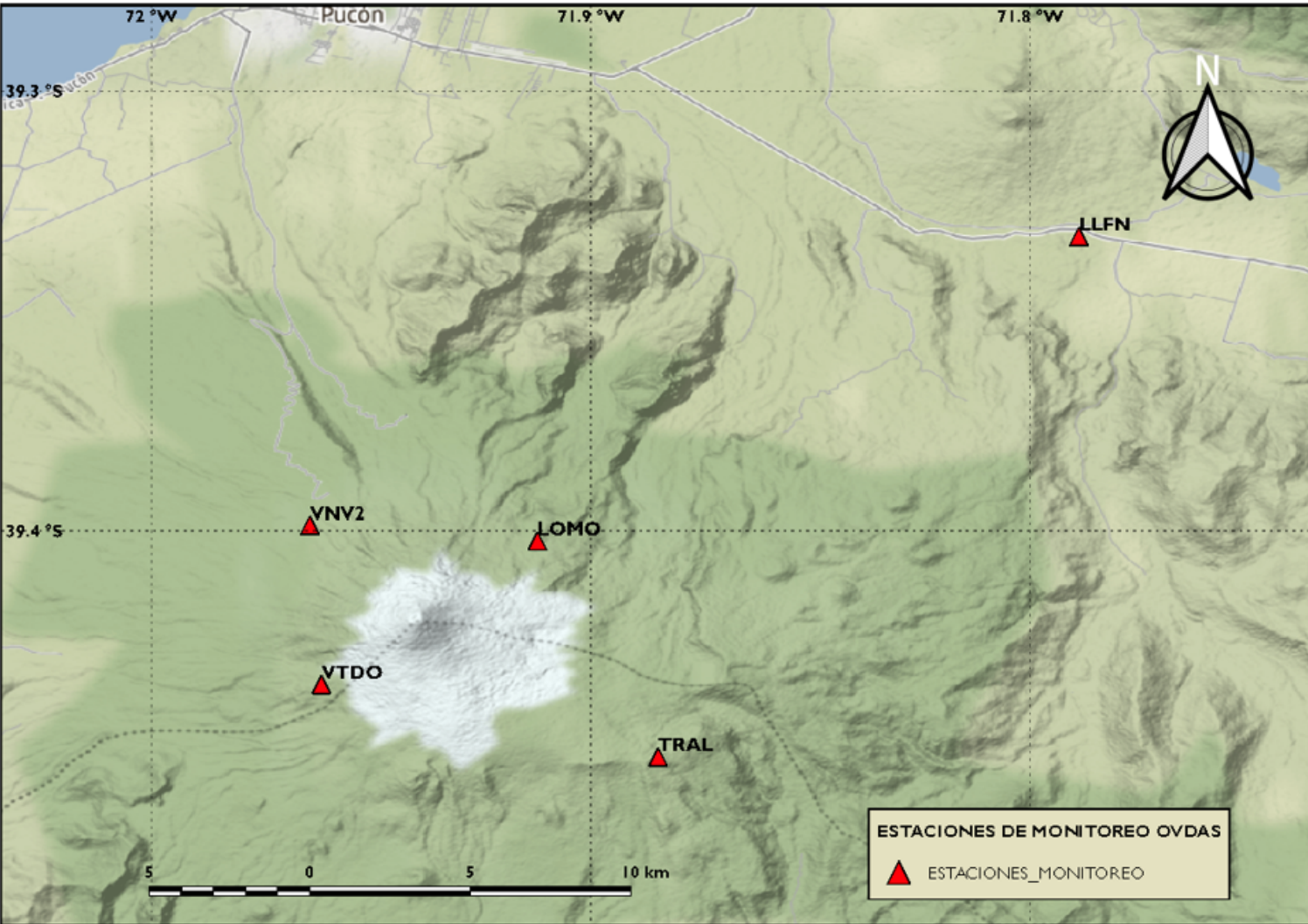
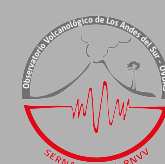
Fuente: [Mapas de amenaza o peligro volcánico.](#)

SERNAGEOMIN.

- Ubicado en el sur de Chile, entre las regiones IX(Araucanía) y X(Los Lagos), entre los lagos Villarrica y Calafquen.
- El volcanismo andino es consecuencia de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamérica .
- Pertenece a la Zona Volcánica del Sur (ZVS), que es una de las más activas a nivel mundial, con 1400 km de longitud
- Tipo estratovolcán, forma cónica casi perfecta, con una superficie de 400 km<sup>2</sup>
- El cono principal está constituido en el borde noroccidental de una caldera volcánica elíptica de 6.5 x 4.2 km.
- Desde 1558 hasta 1984-1985 ha registrado 60 erupciones importantes, lo que lo sitúa como el volcán más activo de los Andes, y el más activo y peligroso en Chile.



# Volcán Villarrica: OVDAS



Debido a lo anterior el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, realiza regularmente monitoreos con GNSS, inclinómetros y Sismógrafos, mediante el OVDAS (Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur).

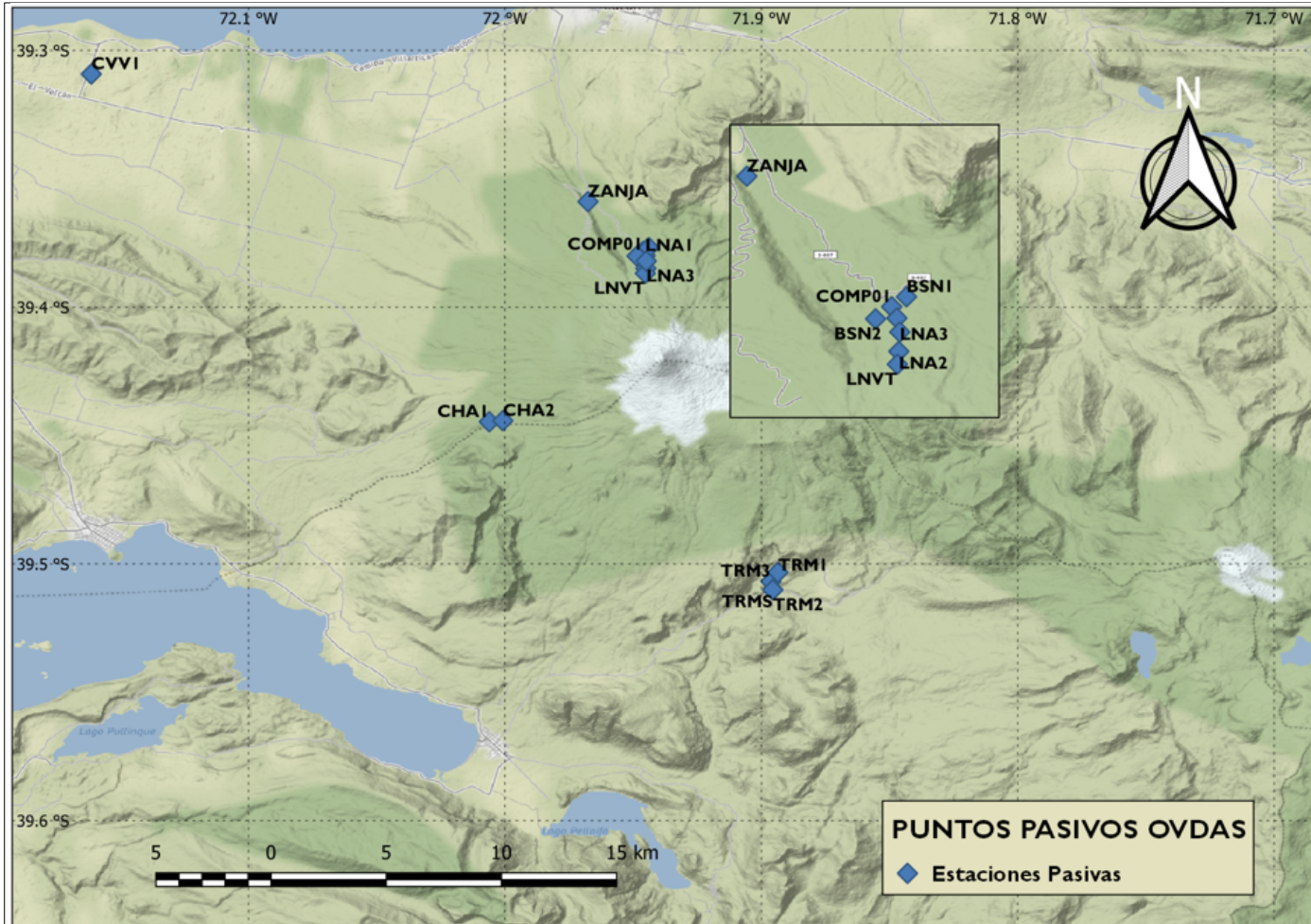
Desde mayo de 2017, la Universidad de Santiago de Chile, apoya con campañas geodésicas y cálculos geodésicos los trabajos del OVDAS.

Para la realización del monitoreo Volcánico continuo, en el Volcán Villarrica el OVDAS cuenta con 5 CORS:

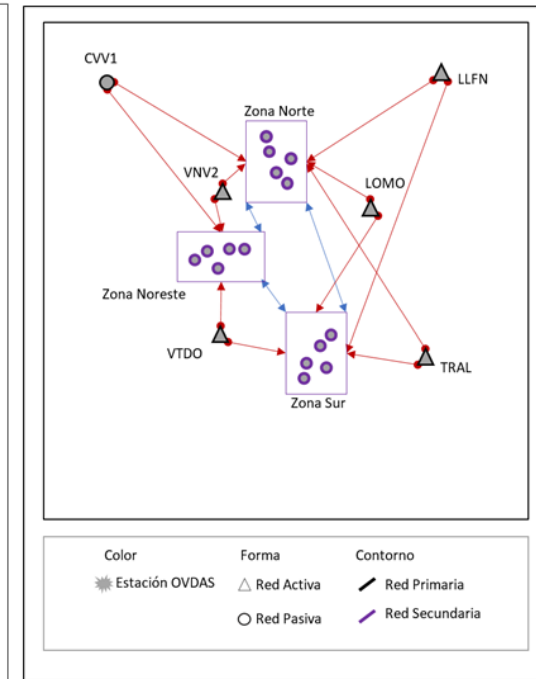
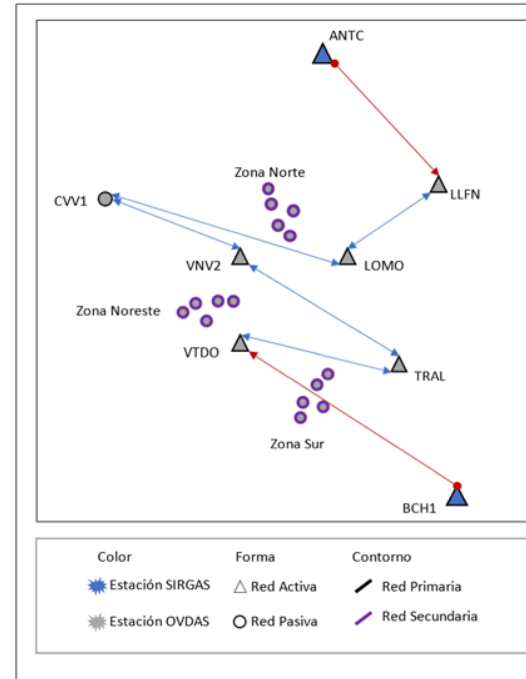
- Una externa a las deformaciones (LLFN) empleada como punto fiducial LLFN (Referencia Central Andes Proyecto-Instituto

# Volcán Villarrica: OVDAS

Para la realización del monitoreo Volcánico pasivo, en el Volcán Villarrica el OVDAS cuenta con 10 puntos pasivos medidos semestralmente:



- Zona norte:
- ZNJA
- BSN1
- BSN2
- LNA1
- LNA2
- LNA3
- LVNT
- CVV1
- Zona Sur:
- TRM1
- TRM2
- TRMS
- Zona Oeste:
- CHA1
- CHA2



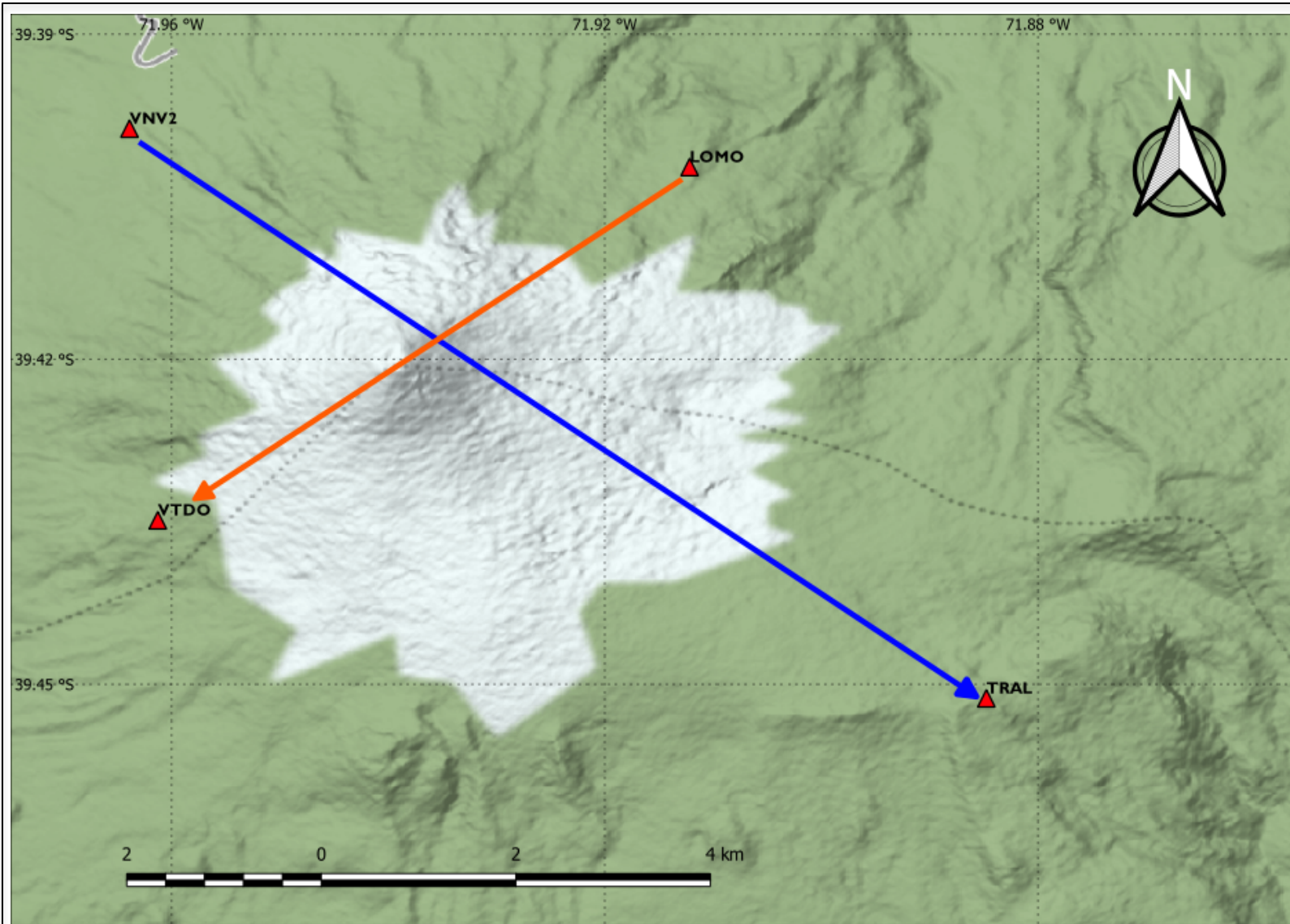
Sobre todas ellas se realizan nivelaciones de precisión.

# Volcán Villarrica: Campañas GNSS

Las estaciones activas se encuentran ubicadas en la dirección de los tensores volcánicos, a fin de poder proveer de datos e información adicional para el monitoreo de volcanes desde la perspectiva de la deformación y movimientos propios del macizo:

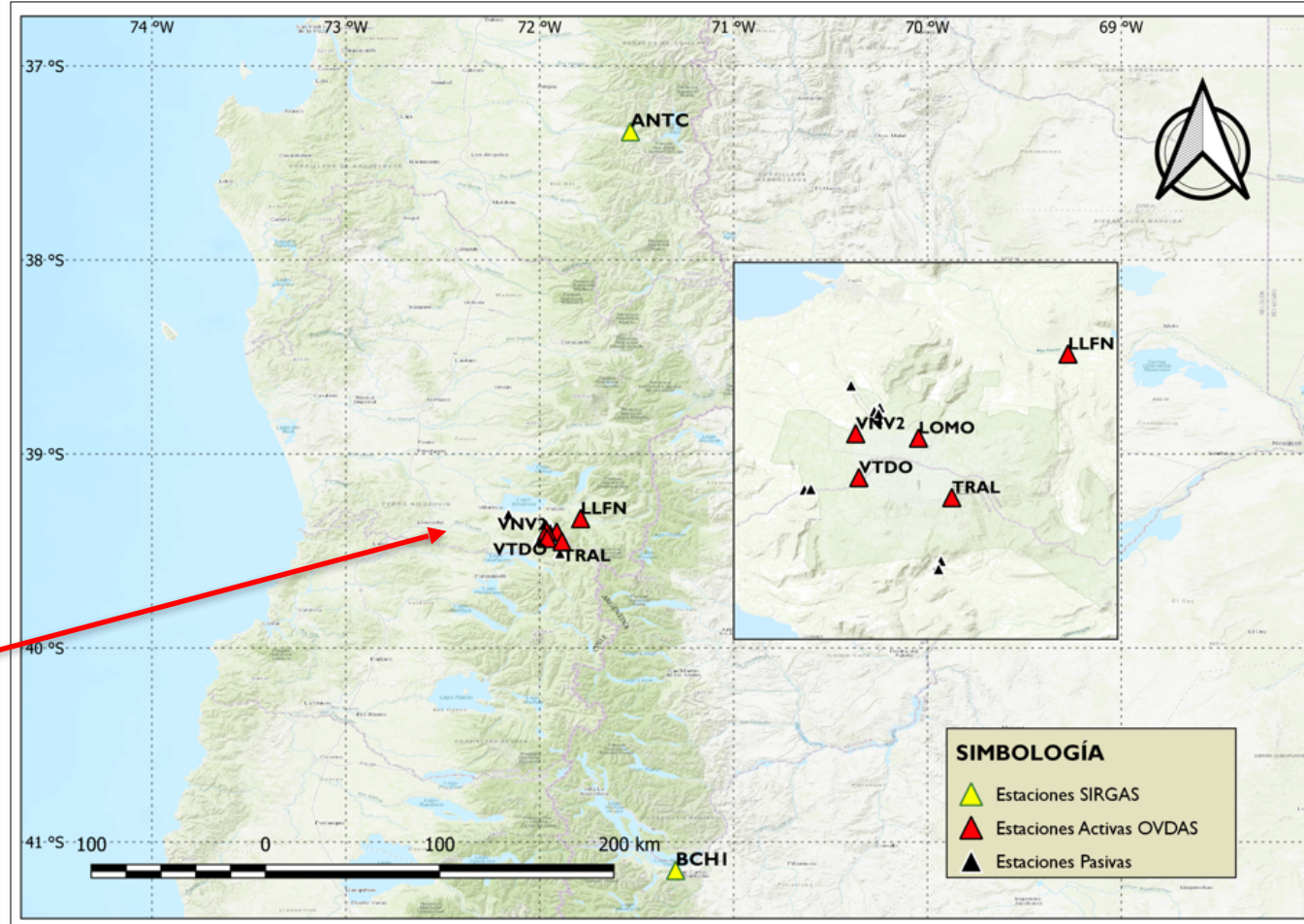
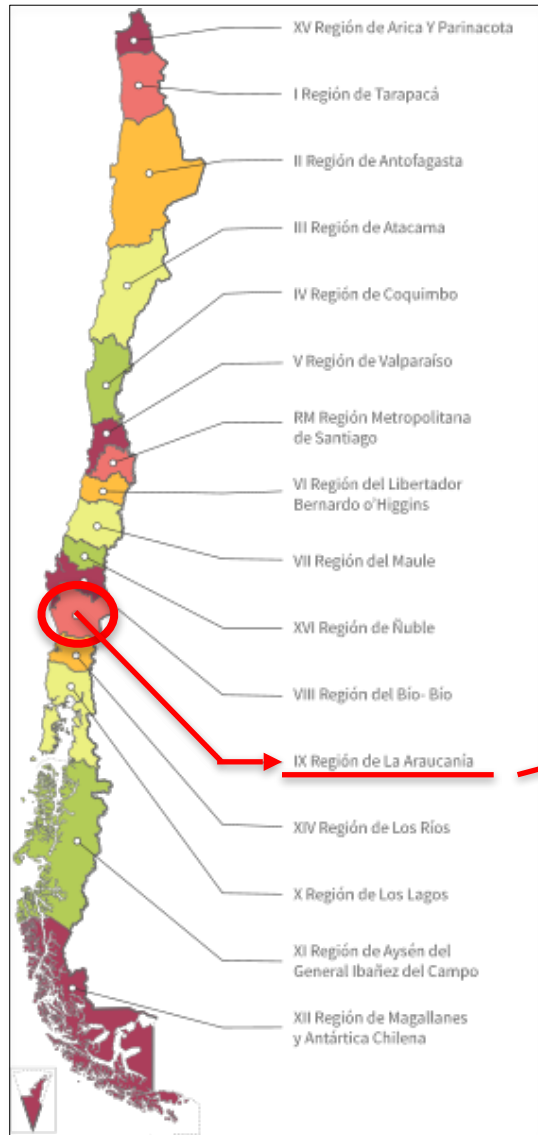
A través del análisis de la variación en la magnitud de los vectores, se puede obtener información sobre la deformación producto de los movimientos volcánicos.

- Tensor VTDO-LOMO: dirección Este-Oeste.
- Tensor VNV2-TRAL: dirección Norte-Sur.





# Volcán Villarrica: Campañas GNSS



Mapa de Chile.

La red principal se compone de las estaciones activas a cargo del OVDAS y aquellas gestionadas por SIRGAS, a fin dar referencia a los datos provistos por estas estaciones.

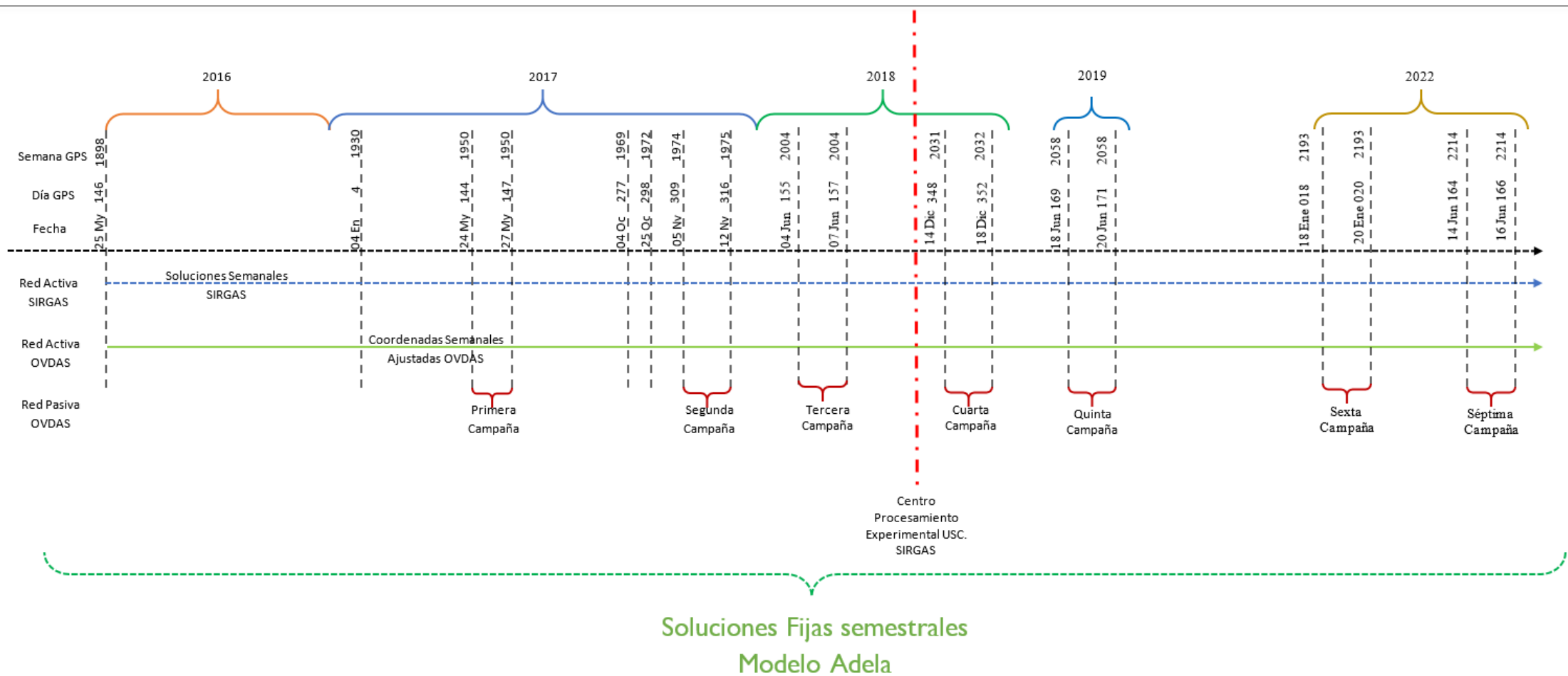
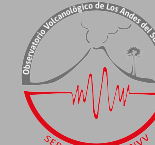
En cuanto a la red secundaria, es conformada por las estaciones o puntos pasivos, que son medidos en cada campaña realizada por la

Universidad de Santiago

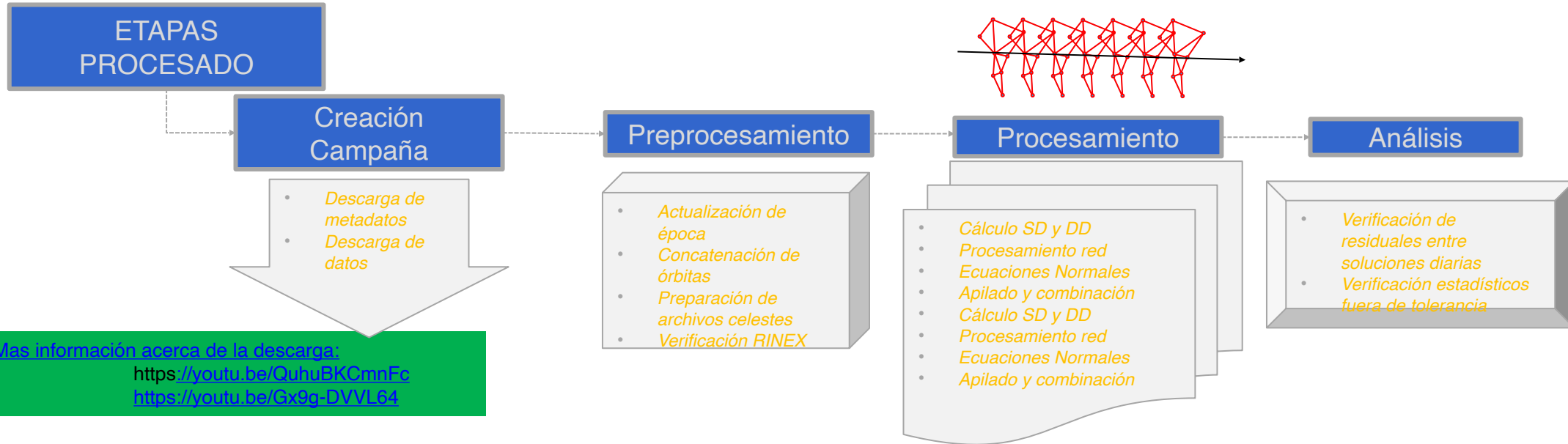




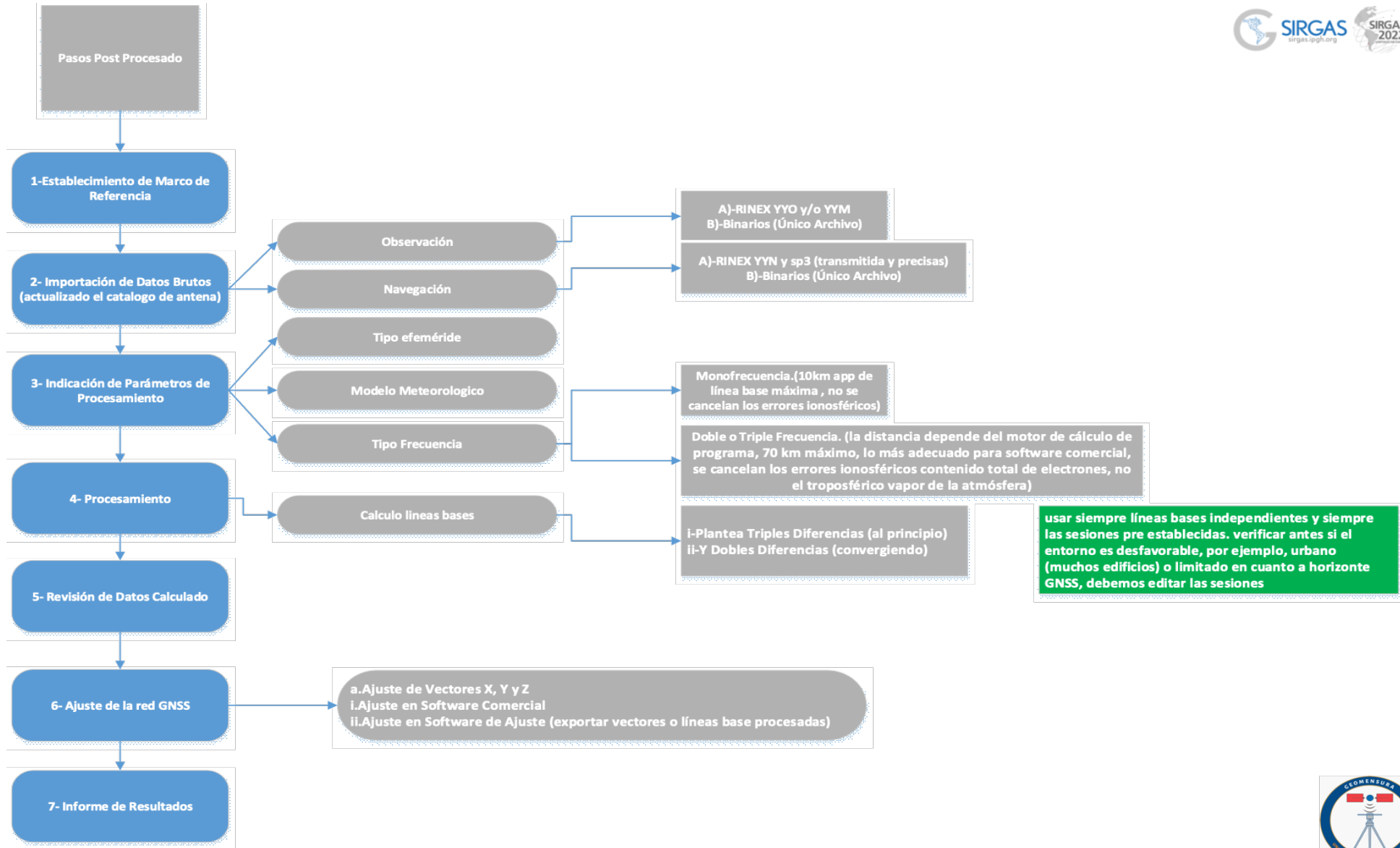
# Volcán Villarrica: Campañas GNSS



Tipo de dato	Tipo de estación	Vértices gestionados por	Productos obtenidos	Red de monitoreo	Épocas de las observaciones	Periodo de recopilación de datos
Soluciones semanales SIRGAS	Activa	IGS-SIRGAS	Series temporales y velocidades	Red Primaria	2016.40 a 2022.00	Aprox 6 años
Soluciones semestrales ajustadas	Activa	OVDAS	Series temporales y velocidades	Red Primaria	2016.00 a 2022.00	6 años
Coordenadas ajustadas	Pasiva	OVDAS	Desplazamientos	Red Secundaria	Todas las campañas pasivas	Campañas puntuales separadas por 5 meses aprox salvo pandemia



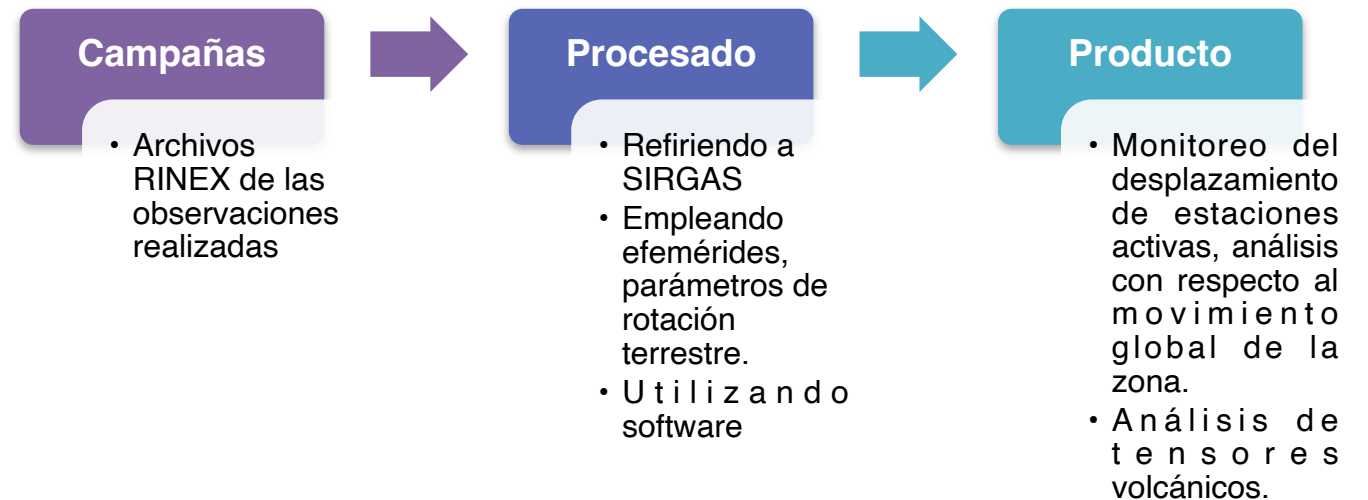
TIPO DE ARCHIVO	PAÍS U ORGANIZACIÓN	FTP/WEB/SFTP	USUARIO	CLAVE	EXT.	NOM.
RINEX v.2xx o v.3xx	VARIOS	VARIOS	XXXXX-XXXX		*.YYO	
PARÁMETROS IONOSFÉRICOS	CENTER FOR ORBIT DETERMINATION IN EUROPE (CODE)	<a href="http://ftp.aiub.unibe.ch/code/2018/">HTTP://FTP.AIUB.UNIBE.CH/CODE/2018/</a>	LIBRE	LIBRE	*.ION	CODWWWWD.ION
GRILLA DE VAPOR DE AGUA	VIENNA MAPPING FUNCTIONS OPEN ACCESS DATA	<a href="http://vme.geo.tuwien.ac.at/trop_products/grid/2.5x2/vmf1/vmf1_op/">HTTP://VME.GEO.TUWIEN.AC.AT/TROP_PRODUCTS/GRID/2.5X2/VMF1/VMF1_OP/</a>	LIBRE	LIBRE	*.GRD	VMFWWWWD.GRD
EFEMÉRIDES PRECISAS	IGS	<a href="#">Repositorio CDDIS entre otros</a>	LIBRE	LIBRE	*.SP3	IGSWWWWD.SP3/ IGLWWWWWD.SP3
PARÁMETROS DE ROTACIÓN DE LA TIERRA	IGS	<a href="#">Repositorio CDDIS entre otros</a>	LIBRE	LIBRE	*.IEP	IGSWWWW7.IEP
CARGAS ATMOSFÉRICAS		<a href="https://geophy.uni.lu/atmosphere/tide-loading-calculator/atm1onlinecalculator/">HTTPS://GEOPHY.UNI.LU/ATMOSPHERE/TIDE-LOADING-CALCULATOR/ATM1ONLINECALCULATOR/</a>	LIBRE	LIBRE	*.ATL	*.ATL
CARGAS OCEÁNICAS	CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	<a href="http://holt.oso.chalmers.se/loading/">HTTP://HOLT.OSO.CHALMERS.SE/LOADING/</a>	LIBRE	LIBRE	*.BLQ	*.BLQ
HISTÓRICOS INFORMACION ESTACIONES	SIRGAS	SERVIDOR SIRGAS	LIBRE	LIBRE	*.STA	*.STA/STATION.INFO
PCV	IGS	<a href="ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/">FTP://FTP.IGS.ORG/PUB/STATION/GENERAL/</a>	LIBRE	LIBRE	*.ATX	lgsYY_www.atx
COORDENADAS SEMANALES	CENTRO PROCESAMIENTO		LIBRE	LIBRE	*.CRD	*.CRD
VELOCIDADES	CENTRO PROCESAMIENTO		LIBRE	LIBRE	*.VEL	*.VEL



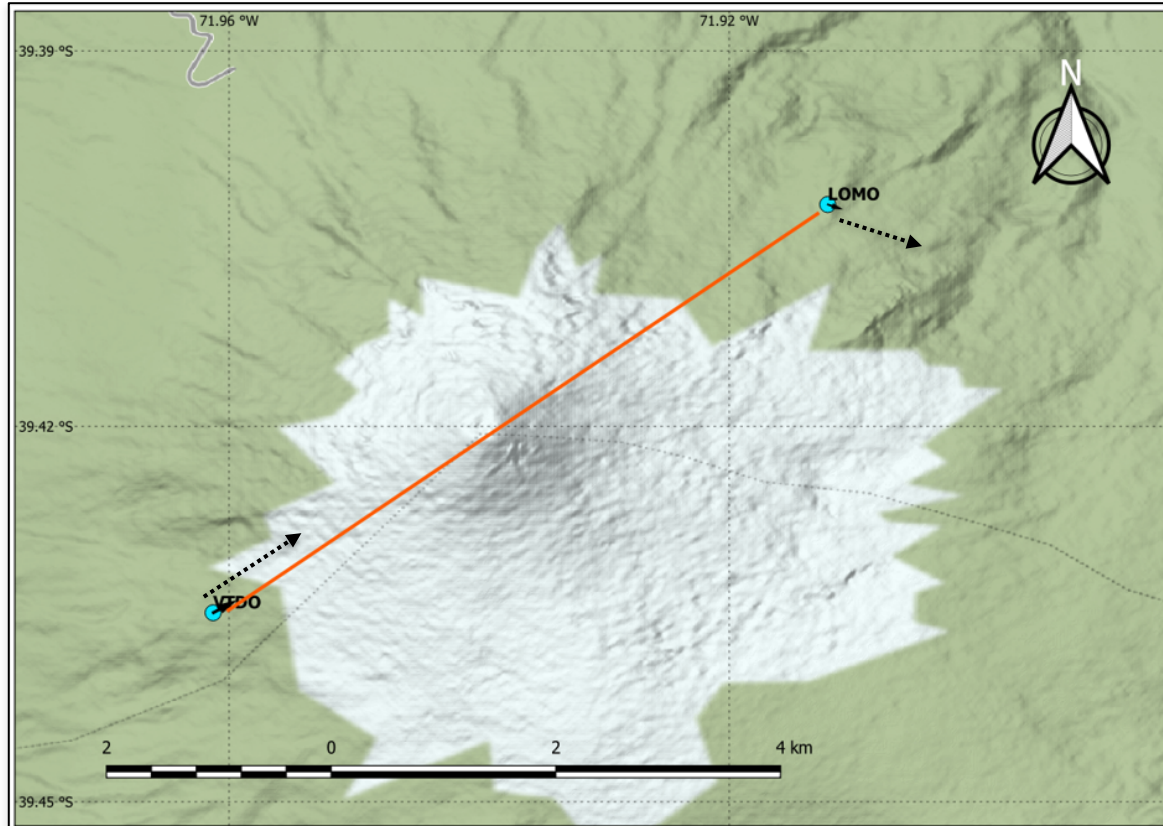
Para obtener las coordenadas de los puntos activos en cada semestre:

- Desde las campañas se obtienen los archivos RINEX de la observación.
- Se procesa en software científico junto con efemérides precisas, parámetros de rotación terrestre y las soluciones generadas por SIRGAS, a fin de emplearlas como puntos fiduciales y referir a ellas las coordenadas de los puntos del monitoreo.
- Con las coordenadas ECEF ajustadas para cada semestre, se calculan las ENU, obteniendo así la magnitud del desplazamiento en cada semestre respecto a la posición en 2022.

- Se quita la influencia de la estación LLFN, buscando analizar la deformación de forma local.
- Finalmente, se calculan las distancias entre las estaciones que componen los tensores volcánicos.

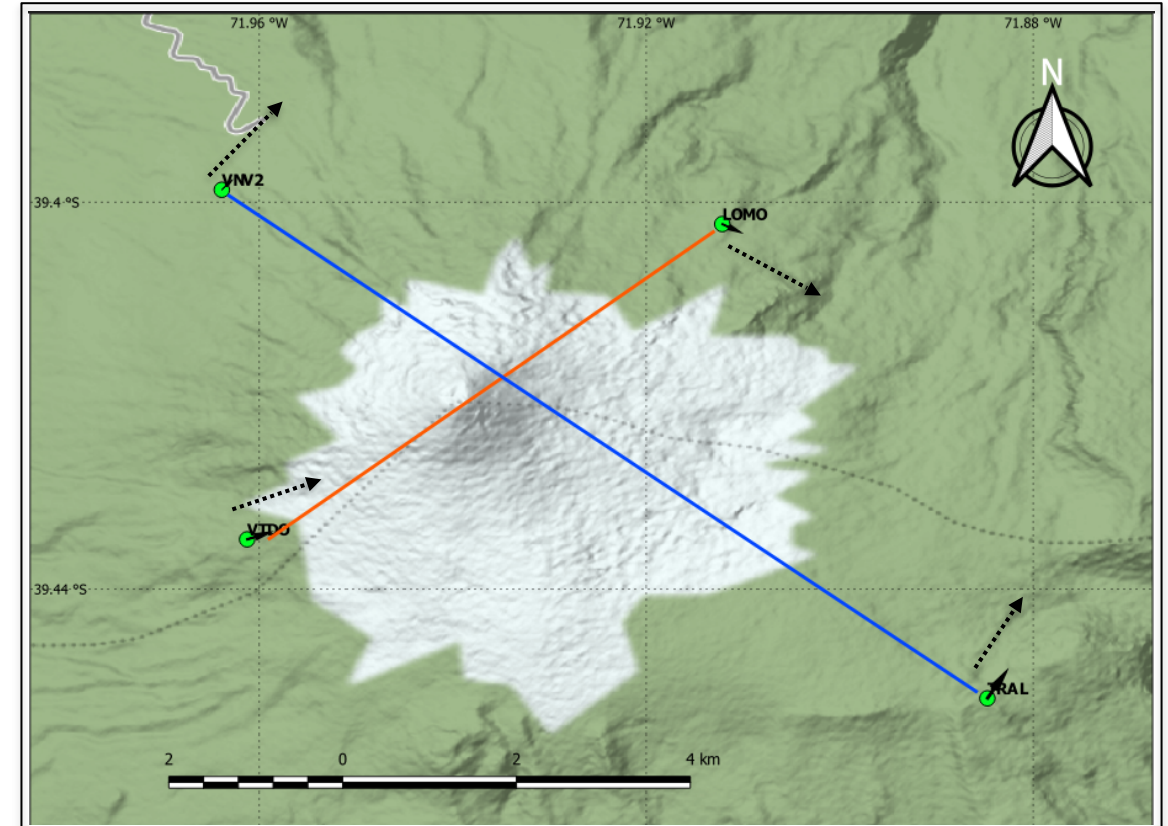


## Desplazamiento 2018.50-2022.00



Vector VTDO-LOMO: presentó una disminución entre 2018.50 y 2019.00 de 3.8 mm.

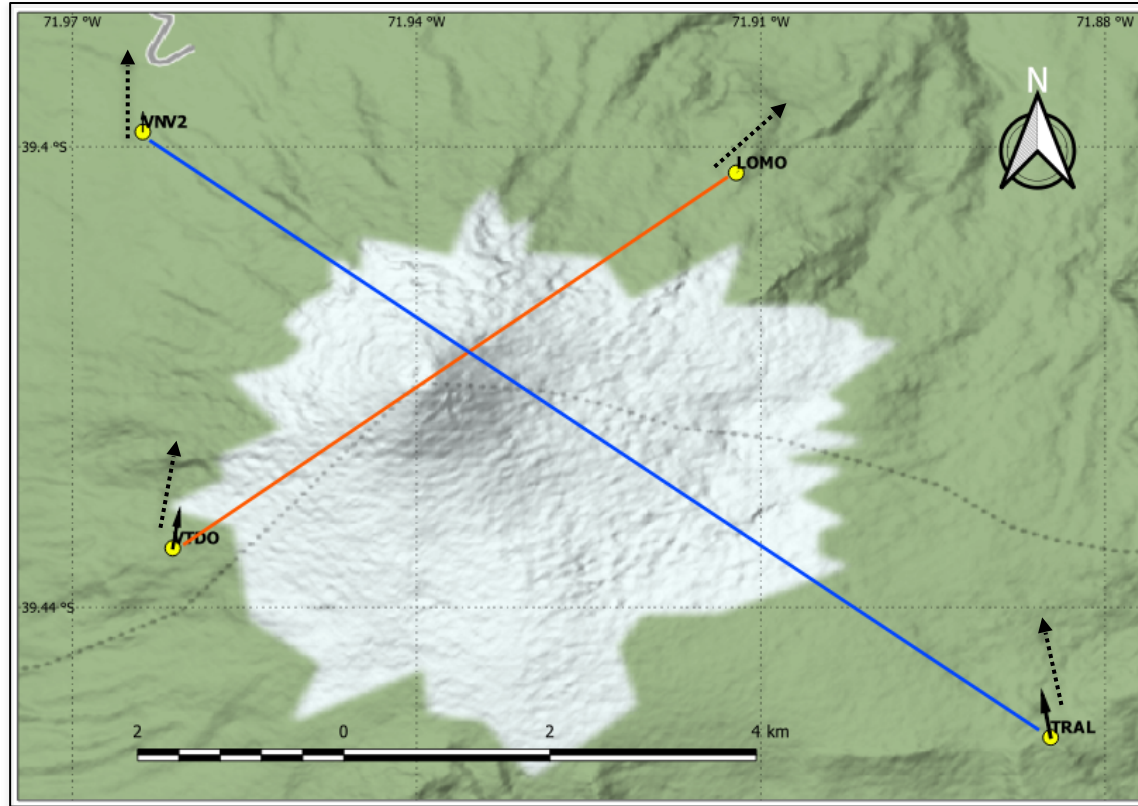
## Desplazamiento 2019.00-2022.00



Vector VTDO-LOMO: disminución entre 2019.00-2019.50 de 8.8 mm.

Vector VNV2-TRAL: aumento entre 2019.00-2019.50 de 1.9mm.

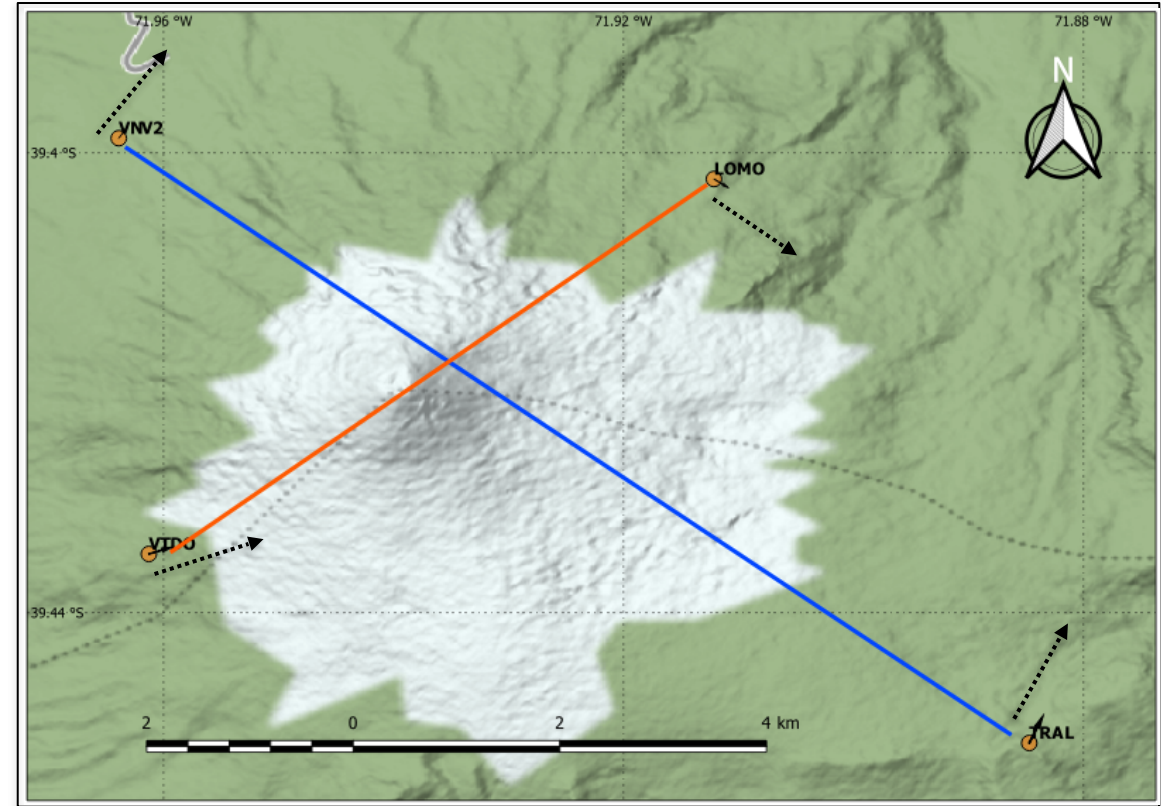
## Desplazamiento 2019.50-2022.00



VTDO-LOMO: aumento entre 2019.50-2020.00 de 11.9 mm.

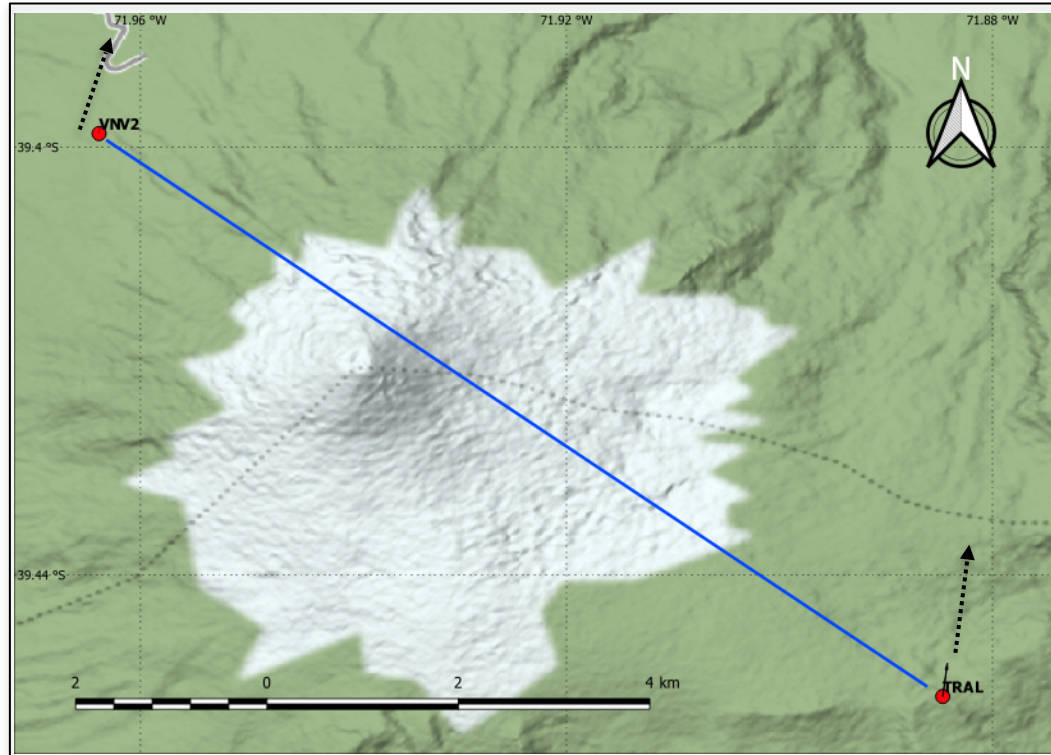
VNV2-TRAL: disminución entre 2019.50-2020.00 de

## Desplazamiento 2020.00-2022.00



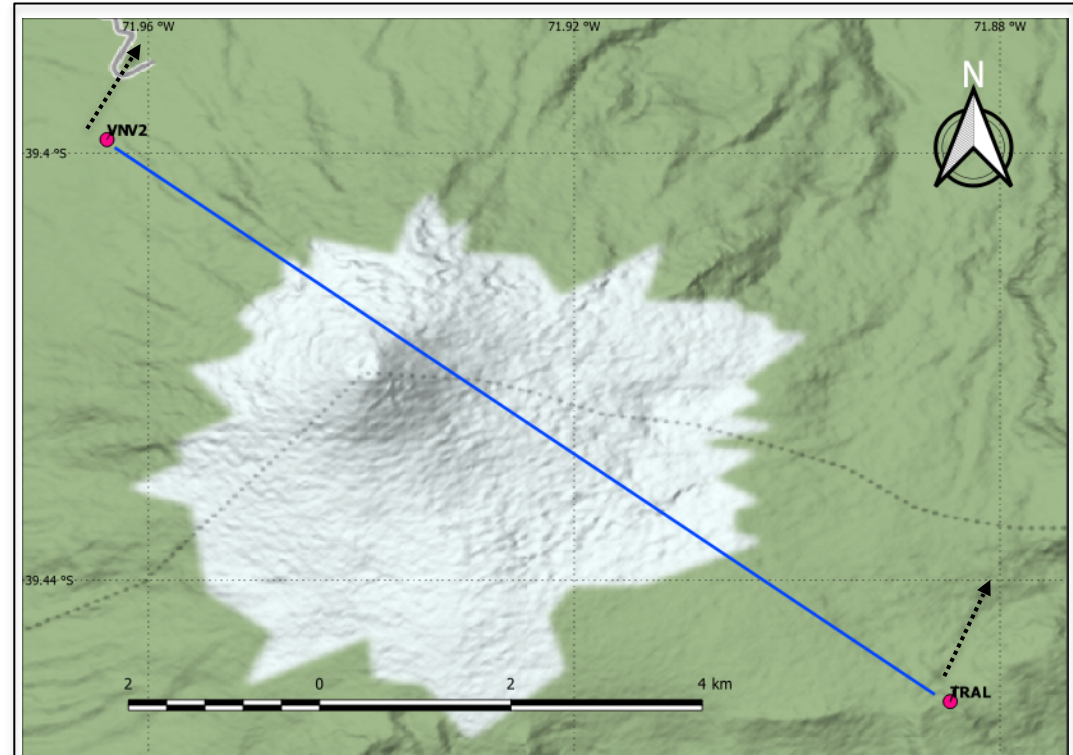
VNV2-TRAL: disminución entre 2020.00-2020.50 de 12.6 mm.

## Desplazamiento 2020.50-2022.00



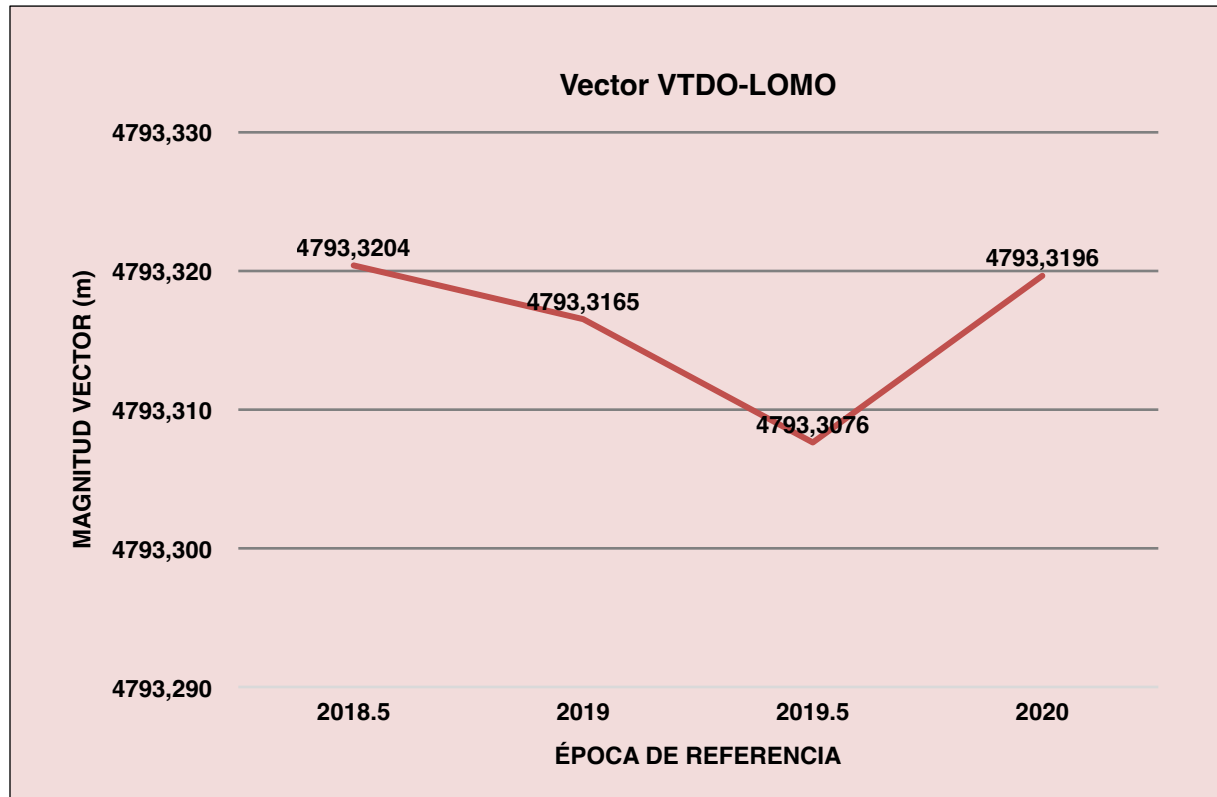
VNV2-TRAL: aumento entre 2020.50-2021.00 de 18.4 mm.

## Desplazamiento 2021.00-2022.00

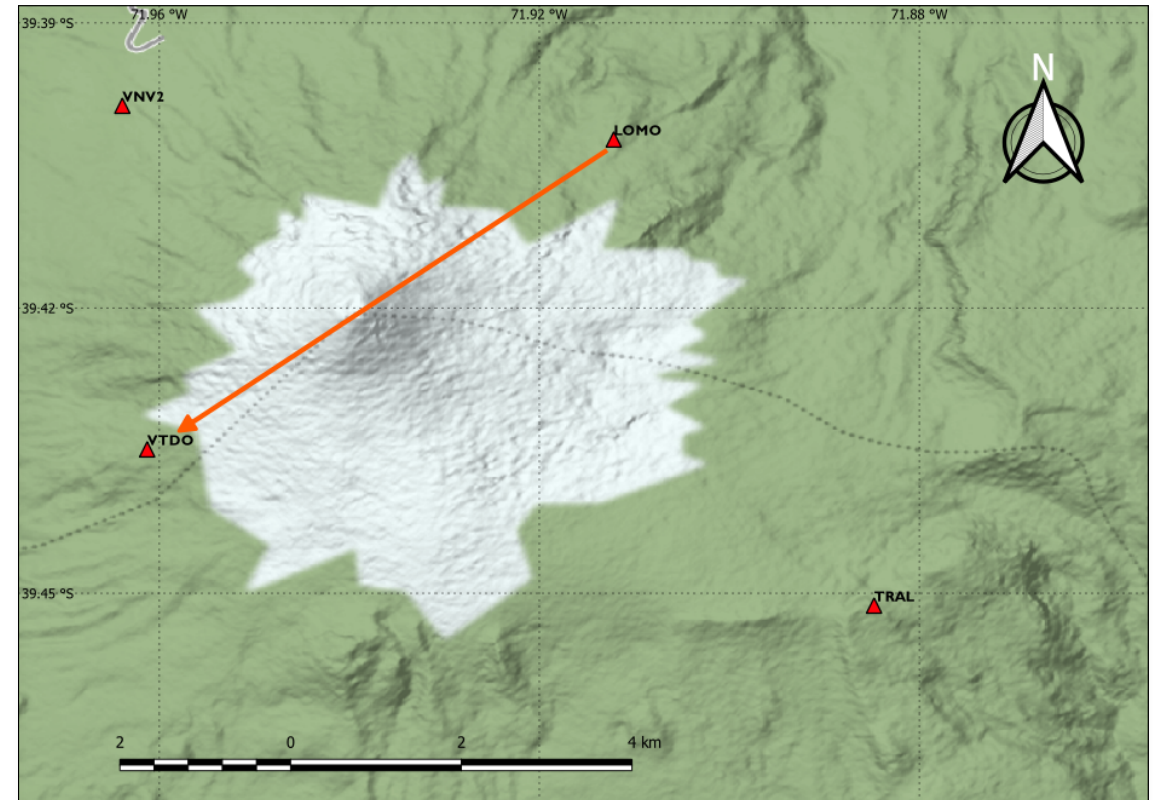


Aparente aumento del tensor VNV2-TRAL, debido al paralelismo que nuevamente presenta el desplazamiento en ambas estaciones.

VTDO-LOMO (norte-sur) presentó una disminución constante entre 2018.50 y 2019.50 de 12.7mm; luego entre 2019.50 y 2020.00 aumenta 11.9mm, con desplazamiento hacia el norte en ambos puntos.

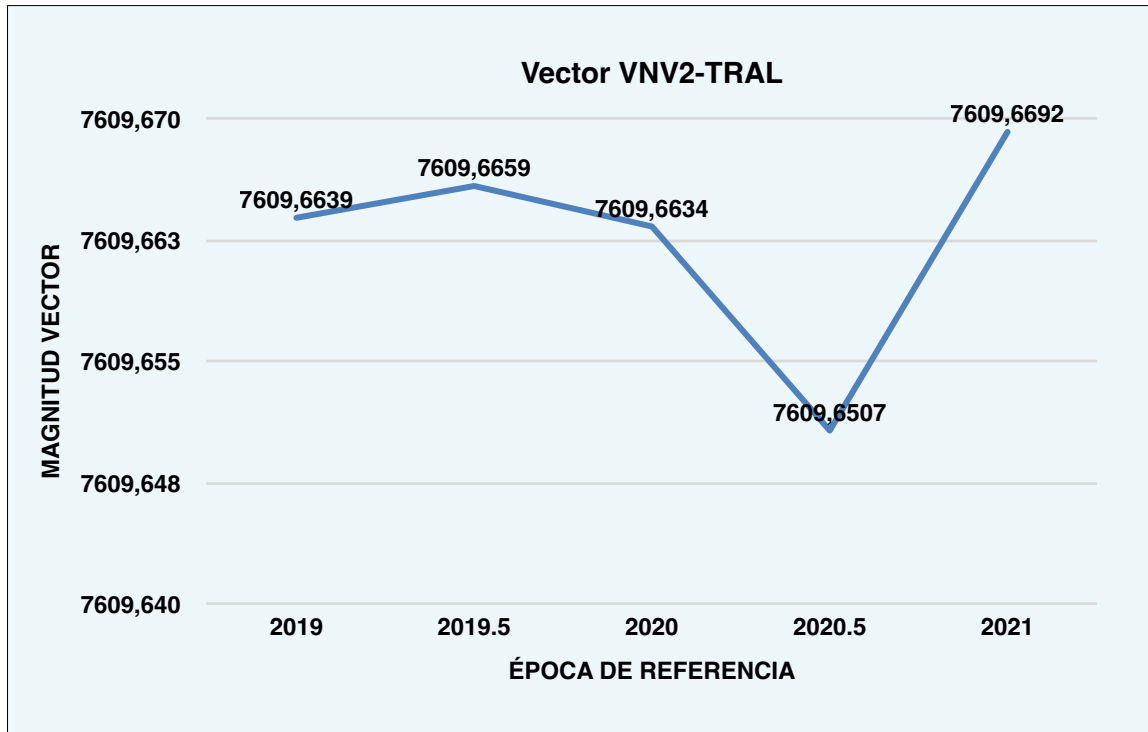


Desde 2020.00 en adelante los puntos vuelven al sentido y trayectoria del período 2018.50-2019.50, lo que podría indicar una eventual disminución en la magnitud del tensor.

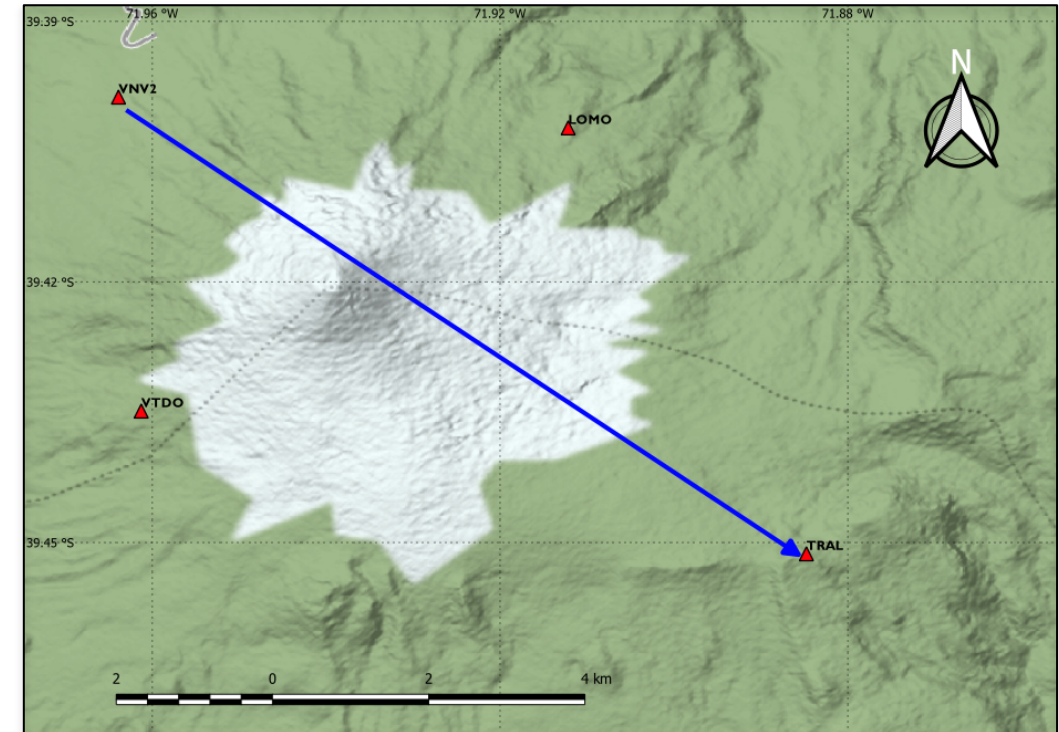




VNV2-TRAL, (este-oeste) se detecta mayor variabilidad, aumentando en 19.7mm durante el período 2019.00-2019.50. Desde 2019.50 y hasta 2020.50, el desplazamiento en TRAL hacia el oeste junto VNV2 hacia el este, influyen en la disminución de 15.1mm del tensor.

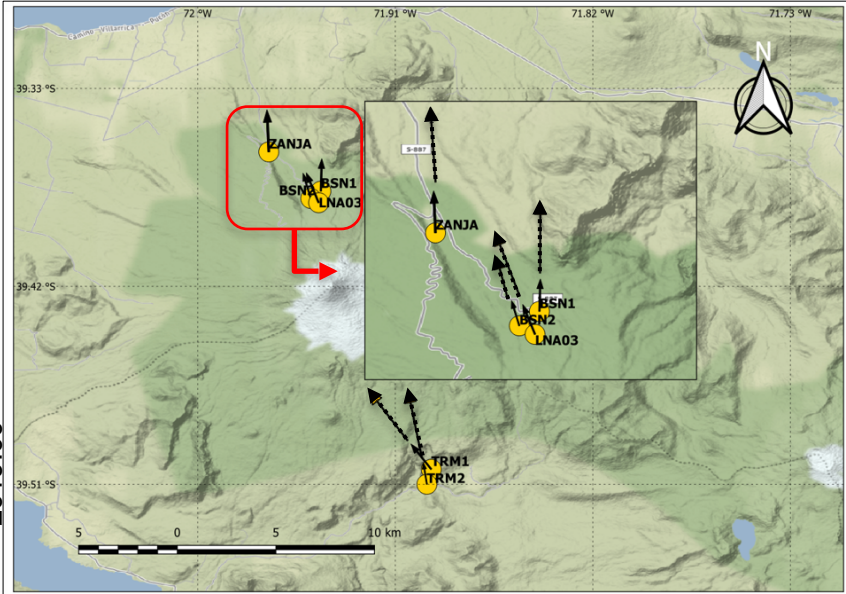


Finalmente, aumenta en 18.5mm entre 2020.50 y hasta 2021.00.

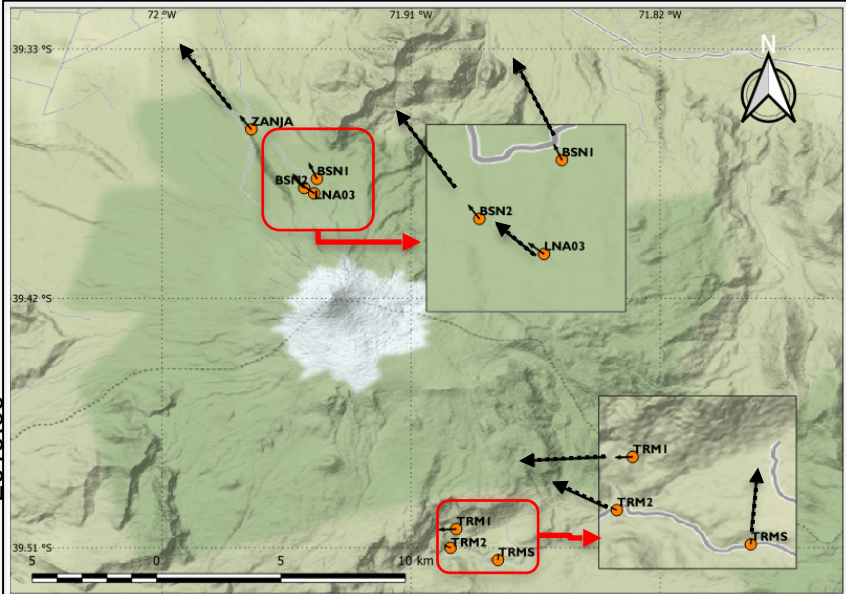


# Desplazamiento de puntos pasivos

Desplazamientos 2017.00 – 2019.00



Desplazamientos 2018.00 – 2019.00



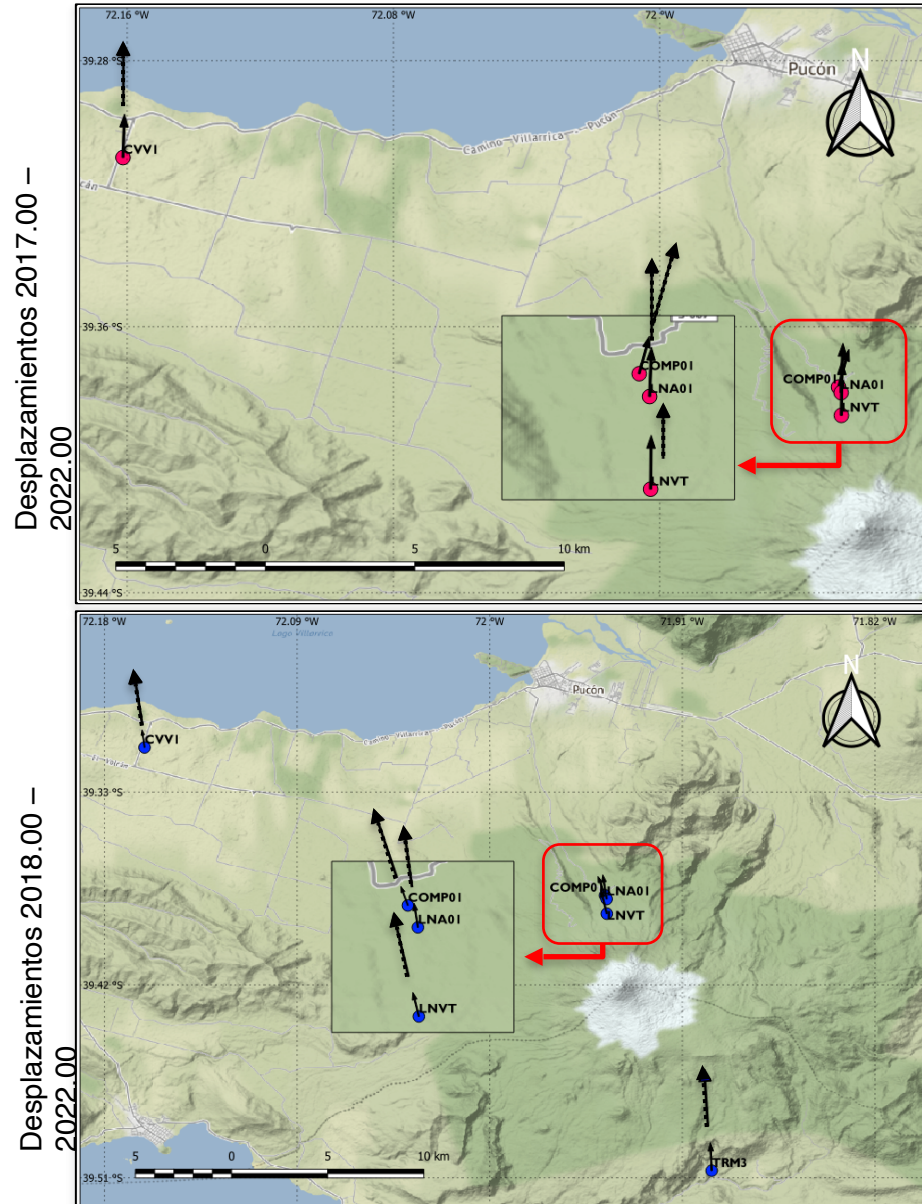
Considerando la mayor parte de los puntos pasivos de la zona Norte y Sur del volcán, entre las épocas 2017.00 - 2019.00 y 2018.00 – 2019.00, debido a la disponibilidad de datos en las campañas realizadas:

Para el 2017.00, la tendencia al Norte por parte de todos los puntos es evidente, destacan TRM1, BSN2, LNA03 que además presentan trayectoria hacia el Oeste.

En 2018.00, los puntos de la zona Norte, mantienen el desplazamiento en este sentido, estando más direccionado hacia el Oeste.

En Sur, se añade el punto TRMS con dirección Noreste y para el caso de TRM1 y TRM2 presentaron un cambio más drástico en dirección Oeste.

# Desplazamiento de puntos pasivos



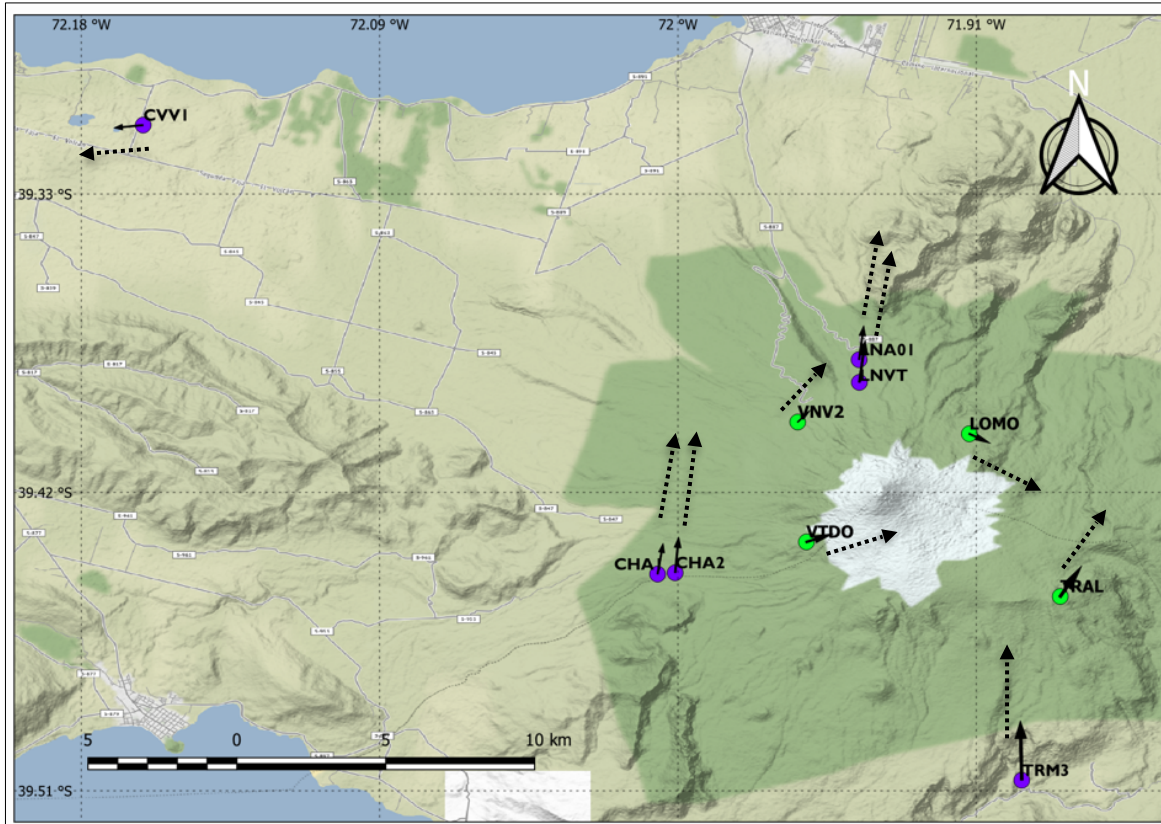
Se extiende el período de análisis para el desplazamiento de los puntos CVV1, LNV, LNA01, TRM3 y se añade COMP01. Para el período 2017.00 – 2022.00, los puntos mantienen la dirección hacia el Norte, destacando a COMP01 con inclinación hacia el Este.

Entre 2018.00 y 2022.00, se incorpora TRM3 que sigue nuevamente la tendencia hacia el Norte por parte de los puntos restantes.

Esta vez, para COMP0, LNV, LNA01 y CVV1 la inclinación se encuentra notoriamente hacia el Oeste.

Esto muestra una clara tendencia de los puntos pasivos en sentido Sur-Norte, con mayor tendencia hacia el Oeste por parte de la mayoría de estos.

## Desplazamientos 2019.00 – 2022.00



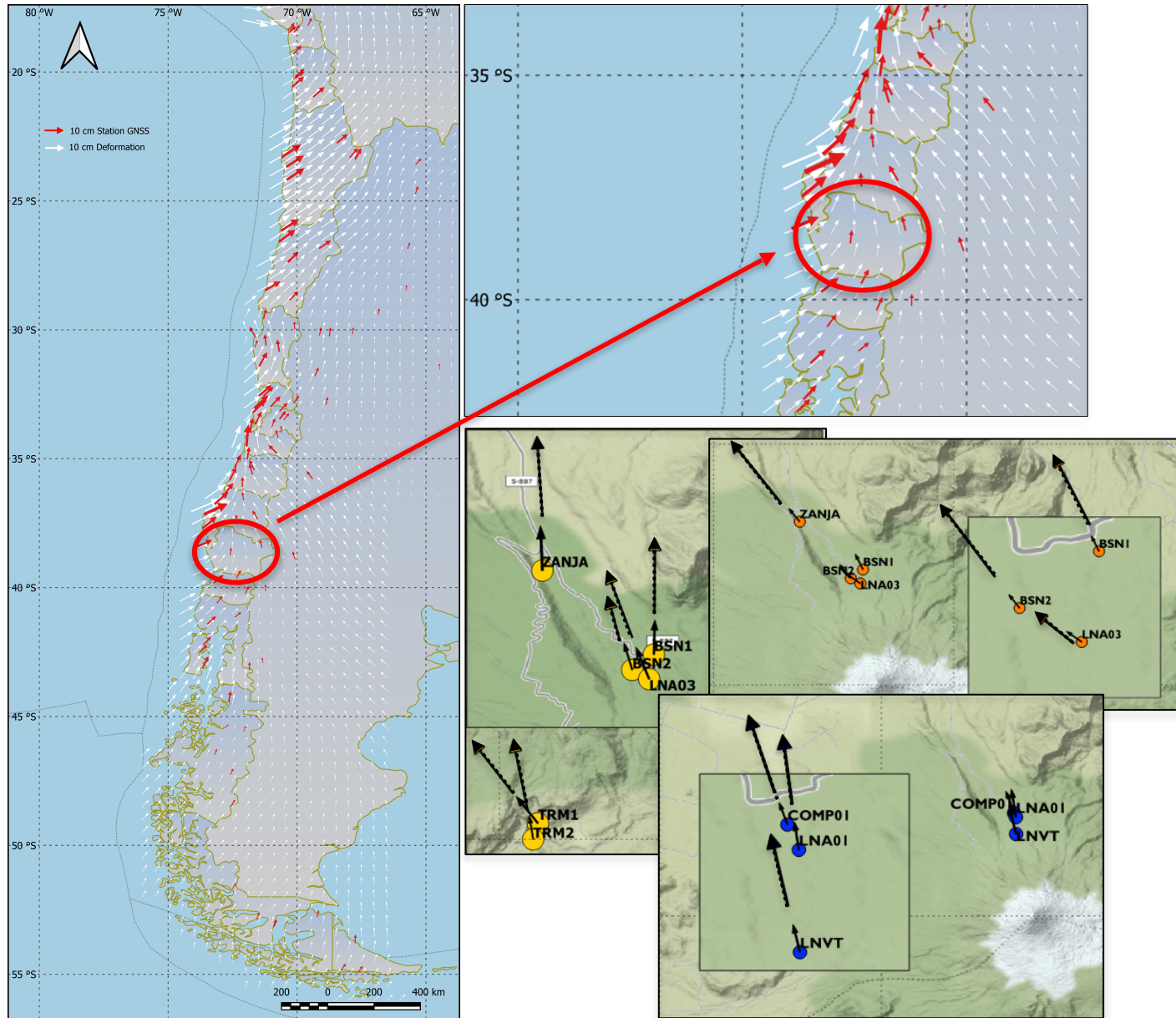
Para los desplazamientos entre 2019.00 y 2022.00, se incluyen lo de las estaciones que conforman los tensores volcánicos, a fin de poder evidenciar la clara diferencia entre los desplazamientos y movimientos propios del macizo, frente a aquellos provocados por el movimiento de placas y el país en general.

Se aprecia nuevamente la mayoría de puntos con desplazamientos hacia el Norte, presentando inclinación hacia el Este.

El punto TRM3 mantiene una leve dirección Noroeste, mientras que CVV1 presente un abrupto cambio de dirección hacia el Oeste.

Por su parte las estaciones de monitoreo de los tensores, presentan desplazamientos hacia el Noreste en su mayoría,

# Desplazamiento de puntos pasivos

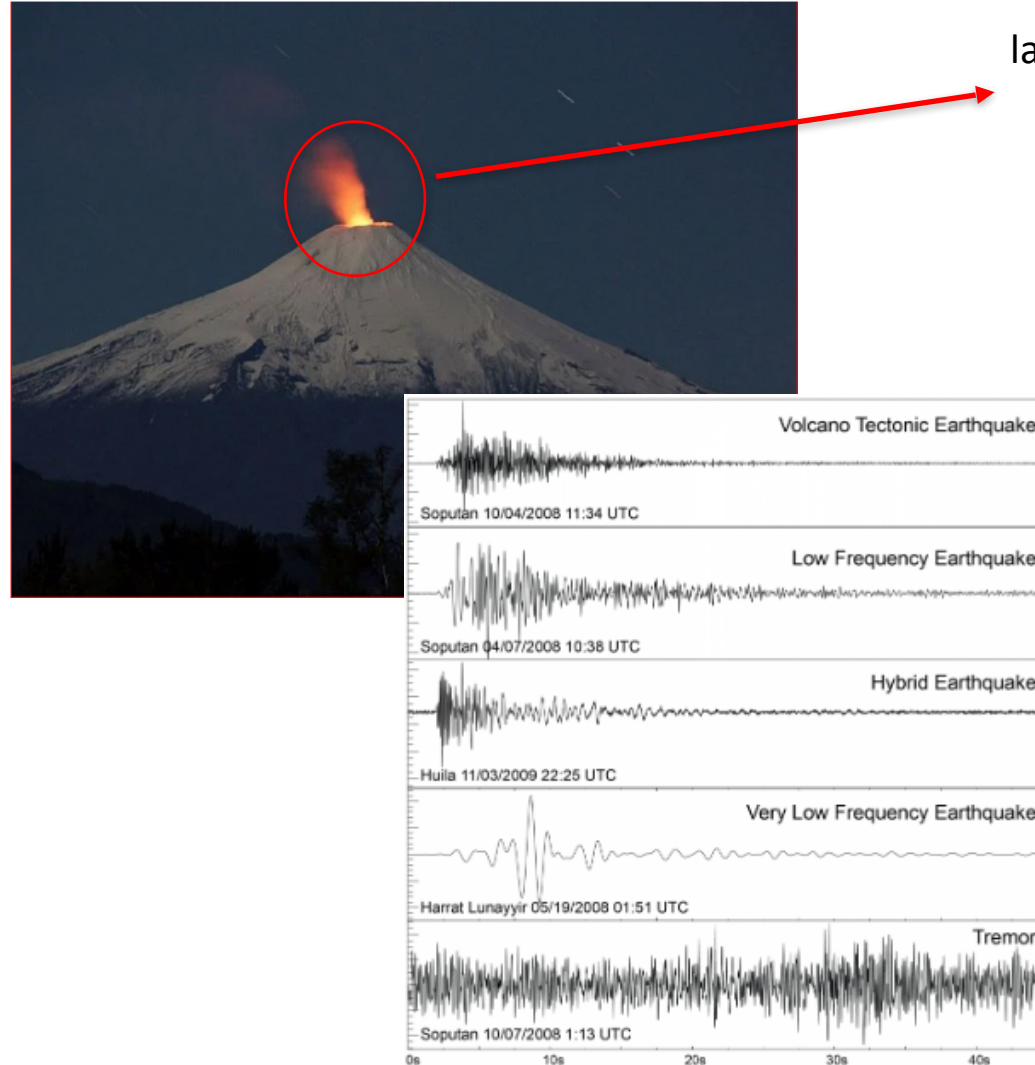


En el siguiente mapa se presentan los desplazamientos para todo Chile entre los años 2018 y 2021, considerando estaciones GNSS de operación continua.

Se evidencia la heterogeneidad y sentido Sur-Norte del movimiento en toda la extensión del país, iniciando en el Sur con una clara tendencia hacia el Noreste para luego, en la Región de la Araucanía y hasta la zona Norte de Chile, comenzar un ciclo de torsión en los desplazamientos, que oscilan entre las direcciones Este y Oeste.

Esto, se condice con el comportamiento observado en el monitoreo de los puntos pasivos, que muestran dirección Noreste.

El desarrollo de la crisis eruptiva de 2015 en el Villarrica, comenzó con una leve pero sostenida alza de la sismicidad (tremor) en los meses anteriores a la erupción, la cual fue informada por el OVDAS. Durante el mes de Enero 2015, ocurrió un cambio en las emisiones de gas, con un aumento en las razones de dióxido de carbono/dióxido de azufre, mientras que la razón de agua/dióxido de carbono disminuyó en esas fechas



Incandescencia debido a la subida del laguna de lava presente en el macizo.

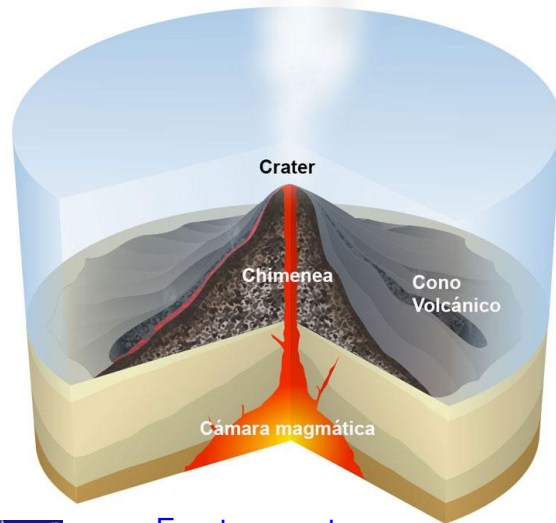
Se observa lo constante de la señal emitida por el tremor en comparación a los sismos "comunes".

Ejemplos de señales sísmicas en sismogramas. Fuente: [Volcanología Chile](http://Volcanología Chile).

La deformación se presentó como un alzamiento en la superficie o corteza, que había llegado hasta 1.7 centímetro al mes ([SERNAGEOMIN, 2015](#)).

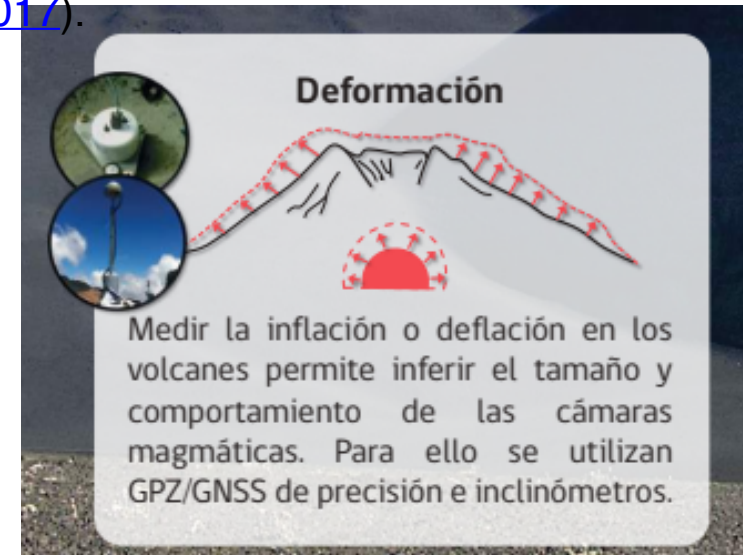
La señal fue detectada por OVDAS en cuatro estaciones GPS y relacionada con un aumento en sismicidad tectónica volcánica.

La profundidad del lago de lava y las explosiones dentro de él se correlacionan con la magnitud del tremor, la cantidad de desgasificación y en definitiva con el maras magmáticas ([Delgado et al., 2017](#)).



Estructura volcánica.

En los días posteriores, la actividad superficial a nivel del cráter fue escalando, mostrando mayor incandescencia nocturna y continuas explosiones estrombolianas (columnas eruptivas de baja altura y bajo volumen emitido). No se presentó gran deformación en la corteza ([Delgado et al., 2017](#)).



Extracto de Monitoreo Volcánico de OVDAS. Fuente: [SERNAGEOMIN](#).

Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur - OVDAS				
		REGION	La Araucanía - Los Ríos	
RAV No.	65	Fecha - Hora	08 de mayo de 2015	16:00 HL
Periodo Evaluado:	07 mayo (15:00 HL) - 08 mayo (15:00 HL)			
Volcán	Villarrica	GVP ID	357120	
RAV anterior	NARANJA	Alerta actual	NARANJA	
<b>1. OBSERVACIONES</b>				
<b>1.1 Vigilancia volcánica:</b>				
<b>1.1.1 Actividad sísmica:</b> Se registraron seiscientos dieciséis (616) eventos tipo Largo Periodo [LP, señal sísmica asociada a la dinámica de fluidos al interior del volcán], con magnitudes locales [M <sub>L</sub> , medida del tamaño de los sismos con base en las características de la amplitud de la onda sísmica] iguales e inferiores a 2,1 y desplazamiento reducido [DR, parámetro que indica el tamaño de la señal sísmica en el origen] máximo igual a 18,9 cm <sup>2</sup> , valores considerados moderados para este volcán. El registro de la señal tipo tremor, asociada principalmente a la dinámica de fluidos al interior del volcán, se mantuvo en niveles similares a los registrados en los días recientes; los valores de Desplazamiento Reducido (DR) alcanzaron valores máximos iguales a 10,5 cm <sup>2</sup> , con un promedio de 8,5 cm <sup>2</sup> , valores considerados moderados. El contenido espectral de los eventos LP y el tremor continuó estable, con frecuencias dominantes entre 0,9 y 7 Hz, siendo el "peak" más persistente en 1,2 - 2,1 Hz. Se registraron dos (2) eventos tipo VT [asociado con ruptura de roca], con una magnitud local [M <sub>L</sub> ] igual a 1,6, localizado 3 km al E del cráter a una profundidad de 4 km.				
No. Eventos	M <sub>L</sub> Max LP / DR Máx	Tremor DR máximo	Observaciones: La amplitud de la señal sísmica y los procesos superficiales presentaron un comportamiento estable.	
616 LP 2 VT	2,1 / 18,9 cm <sup>2</sup>	10,8 cm <sup>2</sup>		
<b>3. Conclusión:</b>				
Continúa la actividad persistente de un lago de lava superficial, que genera actividad LP recurrente y señales acústicas de baja energía, asociada con una actividad estromboliana débil a nivel del cráter, que promueve incandescencia nocturna y desgasificación pulsátil y difusa. Como dato complementario se resalta la observación a través de las estaciones GNSS (Global Navigation Satellite System, estaciones que miden las tasas de deformación del edificio volcánico) de una fuente de deformación localizada en el sector sureste del edificio, que induce alzamientos corticales a una tasa promedio de 3.0 cm/mes, correlacionado espacialmente con el área epicentral de la sismicidad volcano-tectónica, que sugiere la movilización a niveles profundos de material magmático en dicho sector. Lo anterior sugiere que el sistema volcánico continúa en una fase inestable y con la probabilidad de evolución hacia nuevos pulsos eruptivos. Por lo anterior, se mantiene el nivel de alerta en NARANJA, lo que de acuerdo al protocolo significa "erupción probable en días o semanas". Se recomienda la restricción de una zona de 5 km alrededor del cráter activo que incluye el área susceptible de ser afectada por proyecciones balísticas de material piroclástico, flujos de lava y lahares (aluviones volcánicos), aunque estos últimos pueden continuar su recorrido más allá de ese radio, a lo largo de los cauces que nacen en el volcán. Se considera una franja de 200 m a cada costado de los cauces desde su eje, como zona inundable en los cuadrantes suroeste (SW) a noreste (NE), que podrían alojar lahares con capacidad de movilizarse a velocidades del orden de 100 km/h.				

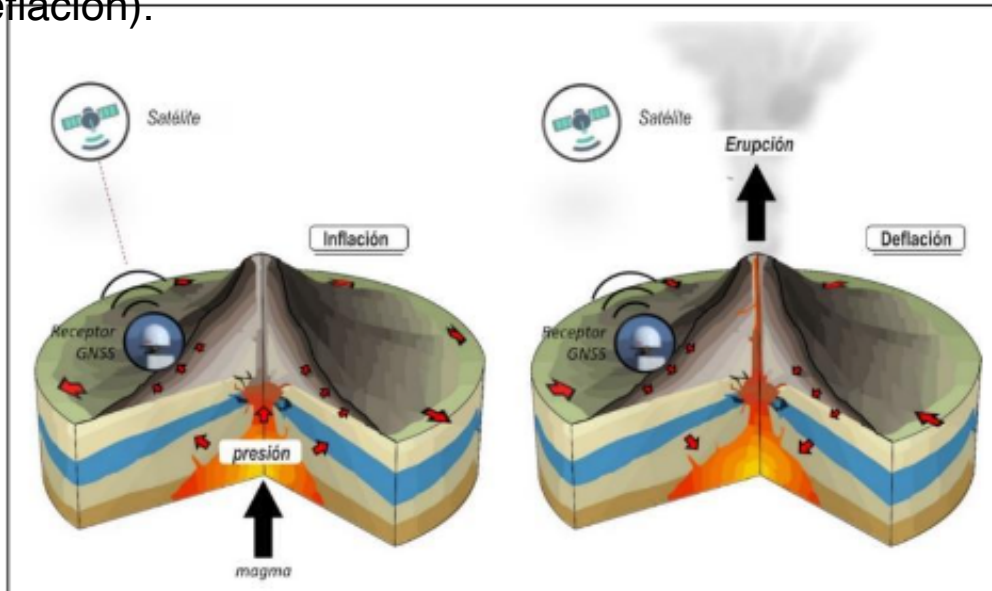
Extracto informe OVDAS 08 de Mayo de 2015. Fuente: [SERNAGEOMIN](http://SERNAGEOMIN).

El 08 de Mayo de 2015, el OVDAS genera el siguiente informe, donde se destaca: **“se resalta la observación a través de las estaciones GNSS (Global Navigation Satellite System, estaciones que miden las tasas de deformación del edificio volcánico) de una fuente de deformación localizada en el sector sureste del edificio, que induce alzamientos corticales a una tasa promedio de 3.0 cm/mes, correlacionado espacialmente con el área epicentral de la sismicidad volcano-tectónica, que sugiere la movilización a niveles profundos de material magmático en dicho sector”**



## Conclusiones

Las deformaciones entonces, son consecuencia de la presión ejercida en la superficie del volcán producto de todo el movimiento y energía presente en las cámaras magmáticas. Por medio del GNSS, se obtienen datos respecto a la deformación de la corteza (inflación y deflación).



Sobre tensores volcánicos: la actividad magmática y su efecto en la corteza terrestre, muestra directa relación en el aumento y/o disminución de la magnitud del vector que, a su vez, muestra indicios de un eventual episodio de inflación/deflación.

Sin embargo, considerando otras herramientas tales como imágenes satelitales, implementación de Interferometría sísmica, sismógrafos, inclinómetros y medidores de emisiones gaseosas, se puede lograr mayor certeza respecto a un inminente evento eruptivo.

Lo anterior puesto que, al considerar solamente los datos provistos por la tecnología GNSS, no muestra la robustez suficiente para indicar que efectivamente está comenzando o no una erupción ([Delgado et al., 2017](#)).

Monitoreo inflación y deflación volcánica. Fuente: [González et al.](#)



## Finalmente:

- Las magnitudes observadas en los tensores (producto del desplazamiento de las estaciones de monitoreo) muestran un comportamiento normal para el Volcán que, según el OVDAS, deben estar por debajo de los 3 cm/mes.
- Al aislar el movimiento local del global, se evidencia la autonomía por parte del desplazamiento y deformación del Volcán Villarrica, en contraste con el desplazamiento que muestra Chile en general.
- Sobre el desplazamiento de puntos pasivos a nivel de macro, estos se condicen con la dirección que presenta la Región de la Araucanía: sentido Sur-Norte y dirección Oeste.
- Por medio de las soluciones SIRGAS, los resultados obtenidos garantizan la veracidad de lo obtenido a lo largo de todo el estudio.
- El empleo de GNSS en el monitoreo volcánico, en conjunto con las herramientas previamente mencionadas, pueden contribuir en pro de una comprensión mayor sobre la naturaleza y procesos volcanológicos, generando modelos que busquen potenciar la capacidad de predicción y alerta temprana en eventos eruptivos.



# Muchas Gracias.

<sup>1</sup>Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico USC  
Universidad de Santiago de Chile