



**Universidad de Concepción  
Campus Los Ángeles  
Escuela de Ciencias y Tecnologías  
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática**

**EVALUACIÓN DE ESTIMACIONES CON FRECUENCIA SIMPLE DEL  
RETARDO TROPOSFÉRICO GPS POR MEDIO DE  
PROCESAMIENTO RIGUROSO**

Proyecto de Título presentado al Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática de  
la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Geomático

Por: Sergio Fernando Mardones Rivera  
Profesor Guía: Dr.-Ing.- Víctor J. Cioce P.

abril de 2024

Los Ángeles, Chile

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

## **DEDICATORIA**

A mi adorada hija y a mi amada pareja:

En este viaje de descubrimiento, tropiezo y crecimiento, ustedes dos han sido mis pilares más sólidos, mi constante fuente de inspiración y apoyo. Su presencia en mi vida ha colmado cada día de significado y ha enriquecido cada experiencia.

A ti, mi pequeña, has iluminado mi mundo con tu inocencia, tu ingenio y tu amor incondicional. Eres la razón por la que busco alcanzar mis sueños, y tu sonrisa es el faro que guía cada paso de mi camino.

Y a ti, mi amor, mi compañera de alma, has sido mi roca en los momentos de adversidad y mi compañera en las alegrías. Tu amor me da fuerzas para enfrentar cualquier desafío, y tu presencia en mi vida es el regalo que valoro más que cualquier tesoro.

A ambas les dedico este trabajo, como un testimonio de mi gratitud por todo lo que han sido y significan para mí. Sigamos compartiendo juntos cada momento, cada desafío y cada alegría que nos depare la vida.

Las amo hoy, mañana y siempre.

Sergio Mardones R.

*No solo falla el que no lo intenta, también falla el que no persevera*

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor, mi mentor, el Dr.-Ing. Víctor Cioce. Sin su orientación, el camino que decidí recorrer habría resultado prácticamente intransitable. Agradezco profundamente sus sabios consejos, su generosa dedicación y tiempo, gracias por compartir conmigo su sabiduría y brindarme el honor de conocer personas tan excepcionales como usted.

Reconozco que mi entorno y mis decisiones, algunas quizás un tanto audaces, han desempeñado un papel fundamental para lograr llegar a este momento, sin embargo, quisiera comenzar expresando mi gratitud a todas y cada una de las personas que han sido parte de mi vida. Agradezco tanto las lecciones aprendidas de mis propios errores como de las experiencias compartidas con los demás.

Sea cual sea nuestra relación actual, ya sea que continúes siendo parte de mi vida o hayas tomado un camino diferente, quiero agradecerte. Cada interacción, positiva o negativa, ha contribuido a mi crecimiento personal y me ha llevado hasta este punto. Gracias a todos por formar parte de mi viaje.

A Dios, por permitirme soñar despierto, muchísimas gracias.

A todas las instituciones que me permitieron obtener datos y productos de manera libre y gratuita, demostrando su compromiso con la ciencia, el desarrollo y el bien común, gracias.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN	11
2. EFECTOS ATMOSFÉRICOS SOBRE LA SEÑAL GNSS	15
3. DESARROLLO METODOLÓGICO	26
3.1. Obtención y preparación de datos	32
3.2. Cálculo del Retardo Zenital Troposférico: solución ZWD-PPP	35
3.3. Cálculo del Retardo Zenital Troposférico: solución ZWD-L1	40
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
4.1. Series temporales del ZWD	45
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS	57
ANEXOS	61
A1. Series temporales e histogramas del ZWD estimado para las estaciones de cada Región	61
A2. Divulgación en eventos	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.
1. Composición promedio de la atmósfera neutra por debajo de los 25 km	17
2. Centros de Análisis SIRGAS que estiman parámetros troposféricos	23
3. Distancia entre las estaciones base (IACR, CHEN, PTAR) y las estaciones de cada arreglo	31
4. Archivos de observación disponibles en la Región de Arica y Parinacota	32
5. Archivos de observación disponibles en la Región Metropolitana	33
6. Archivos de observación disponibles en la Región de Magallanes y Antártica Chilena	33
7. Características generales de las estimaciones ZWD-PPP y ZWD-L1	37
8. Desviación estándar promedio del ZTD en cada región	44
9. Percentil 5 y 95 del ZTD en la Región de Arica y Parinacota	50
10. Percentil 5 y 95 del ZWD en la Región de Arica y Parinacota	50
11. Percentil 5 y 95 del ZTD PPP y Relativo en la Región de Magallanes y Antártica Chilena	54
12. Percentil 5 y 95 del ZWD PPP y Relativo en la Región de Magallanes y Antártica Chilena	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Refracción de la señal GNSS en la atmósfera neutra	18
2. Posicionamiento de Punto Preciso (PPP)	22
3. Ubicación relativa de las zonas de estudio	27
4. Arreglo de estaciones GPS en la Región de Arica y Parinacota	28
5. Arreglo de estaciones GPS de monitoreo continuo en la Región Metropolitana	29
6. Red de estaciones de monitoreo continuo en la ciudad de Punta Arenas	30
7. Esquema general del procesamiento ZWD-PPP	38
8. Esquema general del procesamiento relativo con simple frecuencia	41
9. Resultados del ZWD obtenidos con diferentes marcos de referencia para VZCH	47
10. Estimación ZTD y ZWD de la estación CHYT, periodo 2019-2021	48
11. Histograma del ZTD con identificación de percentiles (5 y 95%) de CHYT	49
12. Histograma del ZWD con identificación de percentiles (5 y 95%) de CHYT	49
13. Estimación ZTD y ZWD de la estación SANT	51
14. Histograma del ZTD con identificación de percentiles (5 y 95%) de SANT	52
15. Histograma del ZWD con identificación de percentiles (5 y 95%) de SANT	52
16. Histograma del ZTD con identificación de percentiles (5 y 95%) de PARC	53
17. Histograma del ZWD estimado en la estación PARC con sus respectivos percentiles	53
18. Estimación ZTD y ZWD de la estación PARC	54

## **LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS**

BSW52: Bernese GNSS Software v5.2

CODE: Center for Orbit Determination in Europe

GNSS: Global Navigation Satellite Systems

GPS: Global Positioning System

PPP: Posicionamiento de Punto Preciso

ZHD: Zenith Hydrostatic Delay

ZTD: Zenith Total Delay

ZWD: Zenith Wet Delay

## **RESUMEN**

El retardo zenital troposférico (en inglés, Zenith Tropospheric Delay, ZTD) es una de las variables que se pueden estimar a partir de observaciones GPS (Global Positioning System), esta tiene gran interés global debido a la estrecha relación con parámetros atmosféricos utilizados en estudios meteorológicos y climáticos. Su estimación confiable se sustenta en observaciones de doble-frecuencia. En este trabajo se evalúa la calidad de resultados obtenidos analizando solamente datos de simple-frecuencia aplicando una estrategia de procesamiento acorde a la potencialidad del Bernese GNSS Software v5.2. Se comparó la confiabilidad del ZTD-L1 con un patrón de referencia dado por estimaciones PPP (Posicionamiento de Punto Preciso), considerando un conjunto de estaciones de operación continua en territorio nacional. Si bien los resultados son cercanos a los de referencia, existe una estrecha limitación con la disponibilidad previa de observaciones L1+L2, siendo recomendable profundizar el estudio con el fin de ofrecer alternativas que faciliten el uso de receptores de simple-frecuencia en aplicaciones atmosféricas.

**Palabras clave:** GPS, retardo troposférico, observaciones de simple-frecuencia

**Correo electrónico del autor:** sergiomardonesrivera@gmail.com

## **ABSTRACT**

The tropospheric zenith delay (ZTD) is one of the variables that can be estimated from GPS (Global Positioning System) observations, and it has significant global interest due to its close relationship with atmospheric parameters used in meteorological and climatic studies. Its reliable estimation relies on dual-frequency observations. This work assesses the quality of results obtained by analyzing only single-frequency data, applying a processing strategy constrained by the capabilities of the Bernese GNSS Software v5.2. The reliability of ZTD-L1 was compared with a reference standard provided by PPP (Precise Point Positioning) estimates, considering a set of continuous operation stations within the national territory. While the results are close to the reference, there is a significant limitation with the prior availability of L1+L2 observations, suggesting that further study is advisable to offer alternatives that facilitate the use of single-frequency receivers in atmospheric applications.

**Keywords:** GPS, tropospheric delay, single-frequency measurements

**Author's E-mail:** sergiomardonesrivera@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ha permitido la determinación precisa de la posición y navegación en cualquier parte del mundo. Sin embargo, cuando las señales GNSS se propagan a través de las capas de la atmósfera, experimentan desviaciones y retardos que afectan la obtención de productos precisos (Yang et al., 2021; Boisits et al., 2020).

El retardo de la señal en la atmósfera neutra representa una de las fuentes de error más importantes en la observación GNSS, este es analizado mediante el denominado Retardo Zenital Troposférico (en inglés, Zenith Total Delay, ZTD) y por sus proyecciones hacia cualquier otra dirección distinta al zenit, utilizando funciones de mapeo (Yang et al., 2021). Con estos se describe el grado o nivel de influencia de la troposfera sobre la propagación de señales, dependiendo principalmente del ángulo de elevación del satélite (Yao et al., 2018).

El ZTD es un parámetro importante en aplicaciones geodésicas del GNSS, ya que afecta significativamente el posicionamiento preciso (Freymueller y Sánchez, 2022). Además, estudiar y modelar la distribución espacio-temporal del ZTD es de gran relevancia en aplicaciones meteorológicas y climáticas, ya que, se trata de la principal variable para la recuperación del Vapor de Agua Precipitable (PWV, por sus siglas en inglés) (Oikonomou et al., 2018; Yao et al., 2018). En este sentido, los modelos para el cálculo del ZTD generalmente utilizan observaciones de doble-frecuencia, estos proporcionan

estimaciones iniciales que luego pueden ser refinadas mediante técnicas de corrección y modelado más precisas (Perdiguer et al., 2008).

Esta situación es considerada por la Meteorología GNSS, aplicación que comenzó a desarrollarse a principios de la década de 1990, en base al GPS (Global Positioning System), y que, a lo largo de los años, las contribuciones científicas han ido definiendo nuevos alcances para esta técnica, dando como resultado metodologías cada vez más precisas y comparables con mediciones convencionales dentro del área de las Ciencias Atmosféricas (Yao et al., 2018; Bevis et al., 1992).

Determinar el ZTD utilizando una sola frecuencia GPS pudiera aportar beneficios para el desarrollo de sistemas de monitorización meteorológica, que cuenten con una mayor densificación gracias al bajo costo del instrumental en comparación con receptores geodésicos (i.e. de doble-frecuencia), sin embargo, es necesario que los usuarios sigan metodologías de cálculo especializadas.

En este sentido, la idea de llevar a cabo este Proyecto de Título nace con el objetivo de explorar y estudiar el vasto potencial de las observaciones GNSS en el ámbito de las Ciencias Atmosféricas. Aquí se evalúan las estimaciones del ZTD sobre tres regiones del territorio chileno, empleando observaciones GPS de simple-frecuencia, a fin de determinar su confiabilidad respecto a patrones de mayor calidad ampliamente conocidos y aceptados.

El diseño de una posible metodología para obtener productos troposféricos con bajos costos operativos, se presenta como una motivación inherente a este proyecto. Esta iniciativa no solo conlleva beneficios sustanciales en aplicaciones meteorológicas y climáticas, sino que también desempeña un papel crucial en la consecución del posicionamiento preciso en diversas disciplinas.

De esta manera, se ha planteado como objetivo general evaluar componentes del retardo zenital troposférico estimado a partir de observaciones GPS de simple-frecuencia, cuyo cumplimiento quedó supeditado al logro de los siguientes objetivos específicos:

- a. Revisar los aspectos fundamentales de la estimación GPS aplicada a estudios meteorológicos y climáticos.
- b. Implementar estrategias de estimación GPS para la determinación del ZTD a partir de observaciones de simple-frecuencia (ZTD-L1).
- c. Caracterizar el nivel de representatividad del ZTD-L1 según su variabilidad espacio-temporal.
- d. Promover las ventajas de las técnicas geodésicas en aplicaciones meteorológicas y climáticas a nivel nacional.

Para una comprensión integral, se exponen los fundamentos básicos acerca de la naturaleza del GPS, las características de la señal y los efectos causados por la atmósfera durante su recorrido con énfasis en el retardo troposférico (Capítulo 2). Los detalles del enfoque metodológico adoptado se describen en el Capítulo 3, aquí se explican los pasos realizados para la recolección y preparación de los datos GPS, las técnicas utilizadas para

el cálculo del ZTD con doble- y simple-frecuencia; finalmente, el Capítulo 4 expone los resultados obtenidos y los criterios empleados para su evaluación y análisis, para dar paso a las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo, sintetizando los principales resultados del estudio y las contribuciones del proyecto a futuras investigaciones.

## **2. EFECTOS ATMOSFÉRICOS SOBRE LA SEÑAL GNSS**

GNSS es un término genérico con el que se engloba a los sistemas de navegación por satélite que proporcionan posicionamiento geoespacial, a saber: GPS, GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Galileo, y BeiDou. Estos operan emitiendo al menos dos señales de radio de la banda L, a fin de facilitar al usuario su posición, navegación y tiempo ya sea en mar, tierra o aire (Aragón, 2020; Berné et al., 2014).

En el caso específico del GPS, sistema en funciones desde la década de los 1980 y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, sus satélites se encuentran en órbita terrestre media (Medium Earth Orbit; MEO), distribuidos en seis planos orbitales, igualmente espaciados y con una inclinación satelital de  $55^\circ$  respecto al plano ecuatorial (Moorefield, 2020). Cuentan con periodo orbital de medio día sidéreo (aproximadamente 11h58m), permitiendo que las trayectorias se repitan diariamente (Teunissen y Montenbruck, 2017; Hofmann-Wellenhof et al., 2008), de manera que todo usuario puede recibir la señal en cualquier momento, lugar y condición meteorológica, como sucede con los demás sistemas satelitales.

La señal GPS es de tipo electromagnética, y al estar fijada dentro de la banda L, tiene frecuencias que oscilan entre 1.2 y 1.6 GHz. El sistema GPS inicialmente proporciona dos radiofrecuencias, L1 y L2, y desde el 2009 se emite una tercera denominada como L5, permitiendo al usuario corregir el retardo ionosférico, resolver ambigüedades, y tratar

otros sesgos sistemáticos (bias) asociados con los efectos de la propagación, para así obtener resultados con precisión adecuada según la aplicación y el tipo de receptor utilizado (Teunissen y Montenbruck, 2017).

No obstante, la variedad de radiofrecuencias no influye en la capacidad de minimizar los efectos sobre la propagación que ejerce la atmósfera baja (troposfera y estratosfera), siendo considerados como la principal fuente de error luego de la refracción en la ionosfera. Esto es debido a la compleja composición y dinámica de esta capa gaseosa.

A diferencia del efecto ionosférico, que logra ser minimizado gracias a que la ionosfera es un medio dispersivo para las ondas de radio, permitiendo cuantificar y corregir el retardo o el adelanto de la señal (según sean los códigos o las portadoras) al formar combinaciones lineales, como por ejemplo la L3 o Libre-de-Ionosfera (Xu y Xu, 2016; Dach et al., 2015; Wallace y Hobbs, 2006; Seeber, 2003), para la atmósfera neutra, el abordaje es distinto.

Siendo la atmósfera neutra la parte más baja de la atmósfera terrestre (desde la superficie hasta los 45 ó 50 km de altura, según la latitud y época del año, además de verse afectada por variación de la presión atmosférica), donde se producen los fenómenos meteorológicos y climáticos, y concentra aproximadamente el 80% de la masa total de esta, se compone por diversos gases secos (ver Tabla 1) y por vapor de agua, junto con aerosoles (Teunissen y Montenbruck, 2017). Esta región carece de partículas eléctricamente cargadas (de ahí la denominación de atmósfera neutra) debido a que su masa se encuentra en constante agitación, en donde la mezcla de átomos y moléculas

forman un medio no-dispersivo para las señales electromagnéticas, haciendo que el retardo se produzca independientemente de la frecuencia de la señal, siendo imposible eliminar por medio de una combinación de diferentes frecuencias (Böhm y Schuh, 2013).

Tabla 1. Composición promedio de la atmósfera neutra por debajo de los 25 km (Barry y Chorley, 2009).

<b>Componente</b>	<b>Volumen %</b>
Nitrógeno	78.08
Oxígeno	20.95
Argón	0.93
Dióxido de Carbono	0.037
Neón	0.0018
Helio	0.0005
Ozono	0.00006
Hidrogeno	0.00005
Kriptón	0.0011
Xenón	0.00009
Metano	0.00017

Es el aire seco y el vapor de agua quienes alteran la propagación de las señales GNSS, afectando por igual a códigos y fases portadoras, las señales siempre sufren retardo en su tiempo de arribo, tal que el efecto se conoce como retardo en la atmósfera neutra. Se trata de una fuente de error potencial, en especial sobre la componente vertical del posicionamiento (altura elipsoidal), cuya magnitud depende del ángulo de elevación del satélite. Para estimaciones de alta calidad, su tratamiento efectivo resulta esencial (Boisits et al., 2020; Dach et al., 2015). La refracción también desvía la trayectoria de la señal como se ilustra en la Figura 1, de hecho, esta alteración es la responsable del retardo que esta sufre durante su paso por las capas bajas de la atmósfera.

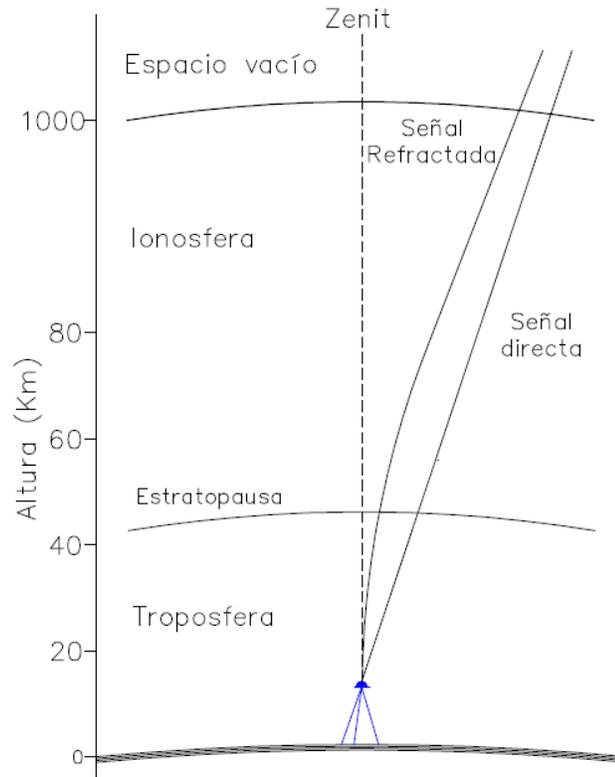


Figura 1. Refracción de la señal GNSS en la atmósfera neutra (elaboración propia).

En un sentido físico, el retardo en la atmósfera neutra es atribuido en un 90% a la presencia de gases neutros, definiendo su componente hidrostática que puede ser modelada fácilmente gracias a la condición de equilibrio con la gravedad (hidrostática). La contribución restante, es decir, el otro 10%, es debida a la distribución espacio-temporal del vapor de agua hablándose entonces de una componente no-hidrostática, y que no puede ser modelada de manera eficiente dada su elevada variabilidad (Jones et al., 2020; Deng et al., 2011).

Para poder describir la propagación de la señal en la atmósfera neutra, es necesario conocer el índice de refracción ( $n$ ), el cual está dado por:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

En donde (c) es la velocidad de la luz en el vacío y (v) representa la velocidad de propagación por el medio. En la atmósfera neutra, (n) es muy cercano a 1, por lo que es más adecuado y conveniente utilizar la refractividad (N) que se relaciona con el índice de refracción (Böhm y Schuh, 2013) por:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (2)$$

La refractividad se descompone entonces, en una parte hidrostática ( $N_h$ ) y otra no-hidrostática ( $N_{nh}$ ), las cuales dependen de la presencia del aire seco y vapor de agua respectivamente (Xu y Xu, 2016):

$$N = N_h + N_{nh} \quad (3)$$

Al ser la atmósfera neutra un medio no-dispersivo para las señales de radio, el efecto refractivo es independiente de la frecuencia, por lo que, se asume que la atmósfera adyacente al receptor GNSS es horizontalmente homogénea, reduciendo el número de incógnitas durante la estimación. Además, en la actualidad, los receptores permiten configurar el ángulo de elevación, eliminando en gran medida el retardo y minimizando el efecto multitrayectoria de las señales, permitiendo calcular la refractividad integrada a

lo largo de la trayectoria de propagación de la señal (Jones et al., 2020; Deng et al., 2011). De esta manera, la refracción troposférica ( $\delta^T$ ) o retardo, viene dada por las contribuciones hidrostáticas y no-hidrostáticas de la refractividad a lo largo de la trayectoria de la señal (ds) como:

$$\delta^T = \delta_h + \delta_{nh} = 10^{-6} \int N_h d_s + \int N_{nh} d_s \quad (4)$$

En la práctica común, la primera es evaluada al conocer la presión atmosférica del sitio de observación, utilizando la conocida ecuación de Saastamoinen, mientras que la segunda tiene que ser calculada, siendo asumida como incógnita en el proceso de estimación de parámetros. Por simplicidad, se toma la dirección del zenit como referencia para la determinación de ambas componentes del retardo, luego proyectadas hacia cualquier dirección al introducir funciones de mapeo (Boisits et al., 2020; Xu y Xu, 2016). Se tiene entonces:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (5)$$

siendo: ZTD el retardo zenital total, ZHD el retardo zenital hidrostático (en inglés, Zenith Hydrostatic Delay), y ZWD el retardo zenital no-hidrostático (en inglés, Zenith Wet Delay). Si bien el retardo es una fuente error considerable en las observaciones GPS, también se trata de una variable clave para poder recuperar el vapor de agua precipitable, y, en consecuencia, su estimación confiable para aplicaciones geodésicas y

meteorológicas resulta imprescindible (Cui et al., 2022; Yang et al., 2021; Chen et al., 2020; Jones et al., 2020).

La investigación científica ha demostrado que los productos atmosféricos derivados del GPS tienen un alto potencial en aplicaciones geodésicas y meteorológicas (Deng et al., 2011). Acerca de estas últimas, cierta cantidad de servicios meteorológicos a nivel mundial mejoran sus pronósticos al asimilar datos, ya sean en tiempo real o casi tiempo real del ZTD provenientes de un análisis GNSS (Aragón, 2020; Mackem et al., 2020).

Al respecto, diversos estudios destacan la confiabilidad del PPP en base a observaciones de doble-frecuencia GPS (Cui et al., 2022; Boisits et al., 2020; Cioce, 2019). El PPP es una potente estrategia de cálculo GNSS, capaz de proporcionar niveles de precisión de centímetros a milímetros, al incorporar orbitas y relojes satelitales precisos, parámetros de rotación terrestre y otros productos relacionados (Atiz y Kalayci, 2021; Portela, 2019), aunque los receptores de doble-frecuencia son ampliamente utilizados, estimar el retardo troposférico con receptores de simple-frecuencia presenta desafíos importantes (Deng et al., 2011).

La principal ventaja del PPP es el hecho de no requerir observaciones simultáneas (ver Figura 2), debido a que es una extensión lógica de la navegación por pseudodistancia GNSS, excepto que se reemplazan las orbitas y los relojes preprocesados de los satélites observados, para corregir los errores del reloj del receptor y así obtener estimaciones precisas sin la necesidad de contar con estaciones de referencia (Teunissen y Montenbruck, 2017). Debido al carácter absoluto que presenta el PPP, las variables que

se consideran conocidas deben presentar la máxima calidad posible (órbitas  $\sim 2,5$  cm, relojes  $\sim 20$  ps), ya que, los errores tienden a propagarse directamente en los resultados.

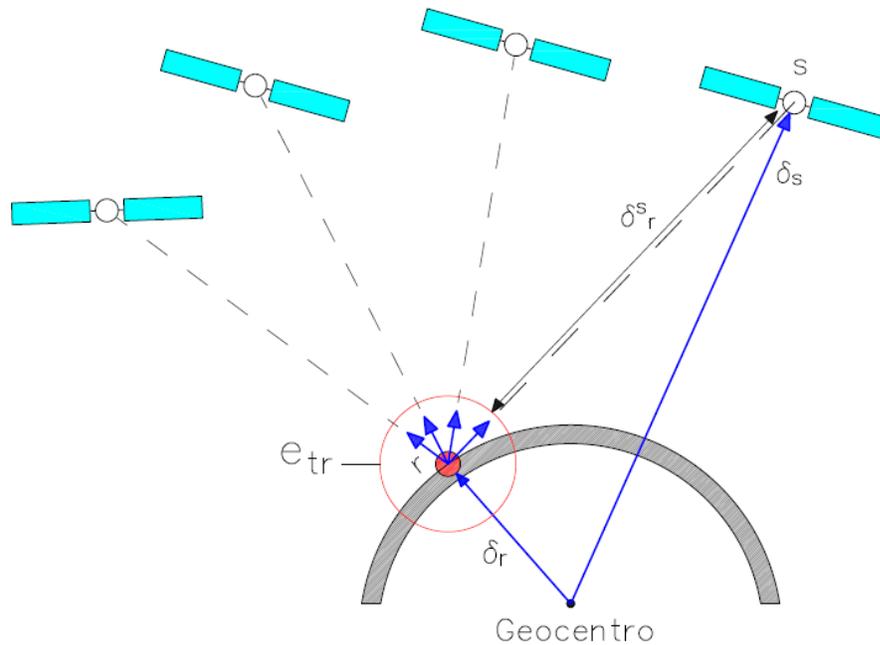


Figura 2. Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) (elaboración propia).

Un cálculo PPP confiable debe efectuarse con software especializado. Uno de ellos es el Bernese GNSS Software v5.2 (BSW52; Dach et al., 2015), el cual es utilizado por numerosos centros de investigación, agencias y organizaciones dedicadas al desarrollo de la Geodesia, e.g. los Centros de Análisis SIRGAS (ver Tabla 2). El BSW52 es un paquete que integra herramientas robustas que cumplen con los más altos estándares de calidad para aplicaciones geodésicas basadas en GNSS. Una de ellas es el BPE (Bernese Processing Engine), útil al momento de simplificar y automatizar procesos complejos

dentro del entorno BSW52 destinados a la estimación de parámetros, siendo ideal para el análisis de redes GNSS de operación continua.

Tabla 2. Centros de Análisis SIRGAS que estiman parámetros troposféricos (Mackern et al. 2020).

<b>Centro</b>	<b>País</b>	<b>Institución</b>	<b>Software</b>
DGF	Alemania	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München	BSW52
ECU	Ecuador	Instituto Geográfico Militar	BSW52
IBG	Brasil	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	BSW52
IGA	Colombia	Instituto Geográfico Agustín Codazzi	BSW52
CHL	Chile	Instituto Geográfico Militar	BSW52
URY	Uruguay	Instituto Geográfico Militar	BSW52
LUZ	Venezuela	Universidad de Zulia	BSW52
UNA	Costa Rica	Universidad Nacional de Costa Rica	BSW52
USC	Chile	Universidad de Santiago	BSW52
GNA	Argentina	Instituto Geográfico Nacional	GAMIT

A continuación, se explican a rasgos generales, los principales programas y funciones utilizados dentro del entorno BSW52:

- POLUPD: este programa ejecuta el tratamiento y adaptación de los Parámetros de Rotación Terrestre (ERP, por sus siglas en inglés), facilitando el manejo de los mismos, a saber: coordenadas  $x$  e  $y$  del polo terrestre, diferencia UTC–UT1 (Universal Coordinate Time), y la duración del día (LoD, por sus siglas en inglés).
- PRETAB: realiza la conversión del formato estándar de las órbitas GNSS al formato propio del BSW52, además de calcular las posiciones de los satélites en un marco inercial, facilitando su uso en etapas posteriores.

- ORBGEN: este programa es esencial para la gestión de información orbital dentro del BSW52, pues se encarga de efectuar la integración numérica del arco orbital de cada satélite, su resultado (órbita estándar) proviene de la implementación de los algoritmos propios de la Mecánica Celeste, siendo los definitivos para el resto del proceso de cálculo GNSS.
- RXOBV3: lleva a cabo el control y verificación de las observables contenidas en los archivos de observación en formato estándar (RINEX, Receiver Independent Exchange Format), asegurando su coherencia tanto en el encabezado como en la sección de los datos.
- CODSP: es el encargado de sincronizar los relojes de los receptores con el tiempo GPS y determinar coordenadas aproximadas de las estaciones mediante mediciones de código. Además, este programa puede utilizarse para detectar valores atípicos dentro de los archivos de observación. Para estimar el desfase del reloj de la estación, el programa introduce como valor a priori los resultados de sincronización del reloj del receptor, utilizando el ajuste estándar por mínimos cuadrados para determinar los parámetros desconocidos (Dach et al., 2015).
- SNGDIF: se utiliza para crear archivos de observación por simple-diferencia a partir de archivos de observación de fase o código de cero-diferencias. Para determinar las posiciones precisas de las estaciones en tierra es necesario que existan observaciones simultáneas, solo así el programa puede generar el archivo de línea-base, ofrece varias posibilidades para su conformación. Es importante resaltar, que para efectos del cálculo PPP, este programa no es utilizado.

- MAUPRP: analiza las observaciones de cero- o dobles-diferencias con el propósito de localizar saltos de ciclo. Al ser detectados, intenta corregirlos bajo específicas condiciones definidas por el usuario; de no lograr la reparación entonces introduce un parámetro de ambigüedad (Dach et al., 2015). El uso del MAUPRP es fundamental en el procesamiento y análisis GNSS en cualquier modalidad y/o estrategia dado su alcance.
- GPSEST: cualquier parámetro sujeto a estimación luego del análisis de observaciones GNSS, como por ejemplo las coordenadas de las estaciones o el ZTD, puede ser determinado con este programa. Su ejecución depende directamente de los parámetros que sean de interés, y se sustenta en procedimientos avanzados de ajuste por mínimos cuadrados, ver Dach et al., (2015) para mayores detalles.

El BSW52 fue la plataforma de cálculo disponible para efectos del presente trabajo, siendo un software científico, es sabido que la versión 5.2 ofrece toda la potencialidad necesaria para una estimación relativa, permitiendo resolver desde una línea-base hasta arreglos de estaciones (redes geodésicas). Su uso en estimación absoluta a través del modelo del PPP es limitado, sin embargo, trabajos previos demuestran la posibilidad real de obtener resultados altamente confiables siguiendo una estrategia particular, ver (Cioce et al., 2016).

### 3. DESARROLLO METODOLÓGICO

Debido al alcance de este trabajo, fue necesario establecer criterios a priori para asegurar la confiabilidad de la estimación del ZWD (como componente del ZTD sujeta a cálculo), utilizando observaciones sólo-GPS de simple-frecuencia (fase portadora L1), en lo sucesivo ZWD-L1:

- En primera instancia, fue necesario definir una solución patrón que sirviera para efectos de comparación o contrastación de resultados del ZWD-L1. En este sentido, las soluciones PPP (en lo sucesivo ZWD-PPP) se tomaron para tal fin, siendo la estimación absoluta aquella adoptada por diversas organizaciones y/o centros de investigación dedicadas al estudio de la atmósfera mediante observaciones GNSS, como por ejemplo el IGS (International GNSS Service; Johnston et al., 2017).
- Las estimaciones correspondientes provinieron del procesamiento con el BSW52 según la estrategia PPP-LUZ (Espinoza, 2017; Cioce et al., 2016).
- Para las estimaciones de tipo ZWD-L1, se optó por la implementación del modelo relativo, priorizando la formación de líneas-base apropiadas según su longitud para este tipo de estimación.
- El ZTD es más pronunciado en zonas con grandes variaciones de presión y temperatura atmosférica, como en zonas montañosas o costeras, así como también durante los cambios estacionales.

Así, se procedió a establecer la zona de estudio. Fueron seleccionadas tres Regiones del territorio nacional (ver Figura 3), siendo: Arica y Parinacota, Región Metropolitana, y

Magallanes y de la Antártica Chilena. Esta selección vino dada al evaluar la geometría del arreglo de estaciones GPS a ser procesado mediante estimación relativa según el criterio previamente indicado, la distancia entre estaciones para conformar líneas-base fue condicionada para ser  $< 30$  km, con excepciones ante la ubicación y distribución de estaciones. Sin embargo, contar con líneas-base cortas fue el criterio esencial al momento de implementar dobles-diferencias con L1.

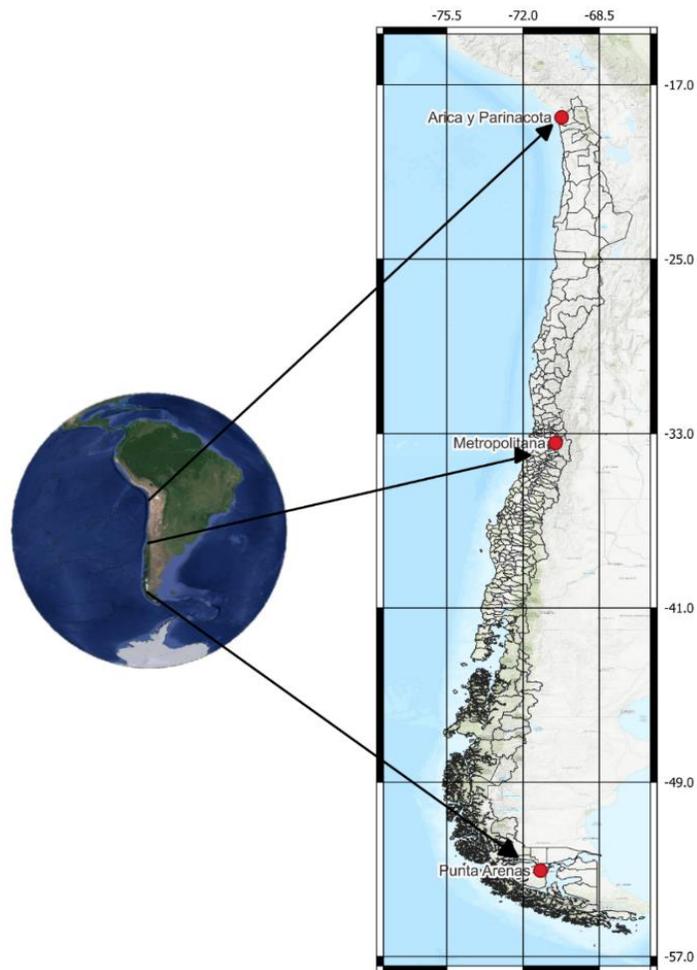


Figura 3. Ubicación relativa de las zonas de estudio (elaboración propia).

Las estaciones seleccionadas en la de Región de Arica y Parinacota se muestran en la Figura 4), zona situada al extremo norte de Chile, es una zona con destacada geografía debido a la tectónica de placas, que modela su topografía, presentando fuertes acantilados en la Cordillera de la Costa (Hernández et al., 2014). En cuanto al clima, se encuentra influenciado por el Anticiclón del Pacífico Sur Oriental, el cual provoca un descenso de aire cálido y seco, generando buena estabilidad atmosférica y aridez, en especial en zonas litorales (Garreaud, 2011).

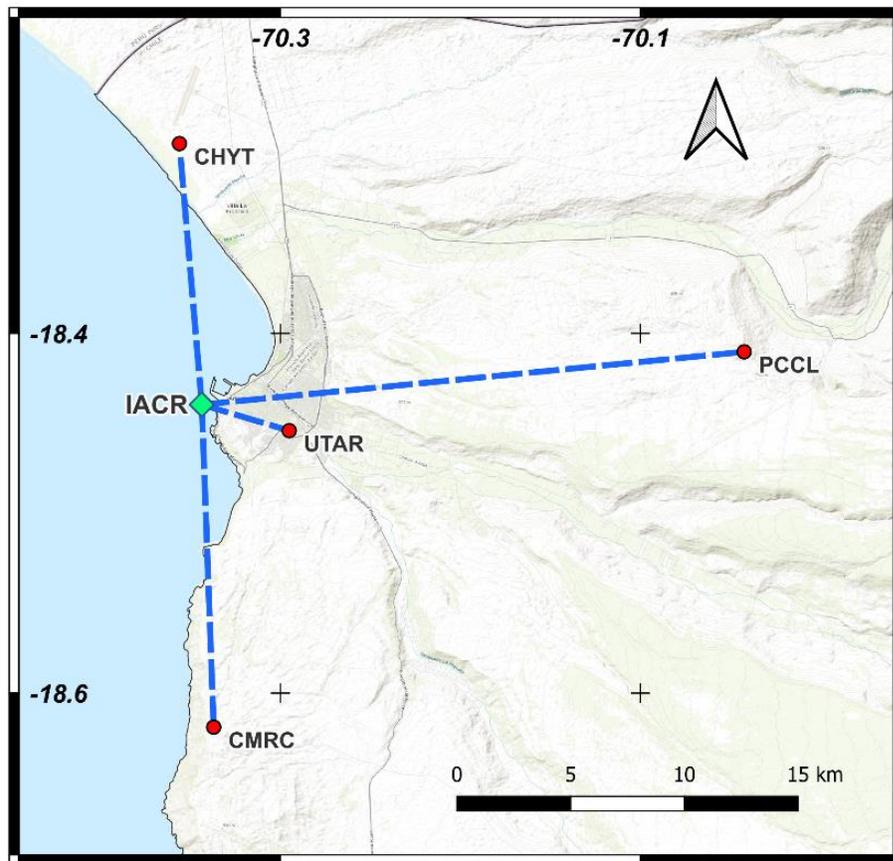


Figura 4. Arreglo de estaciones GPS en la Región de Arica y Parinacota (elaboración propia).

En la Región Metropolitana, núcleo político, industrial, comercial y cultural del país, se optó por formar el arreglo mostrado en la Figura 5, su clima es de tipo mediterráneo semiárido, con periodos de sequía marcados (Contreras et al., 2005).

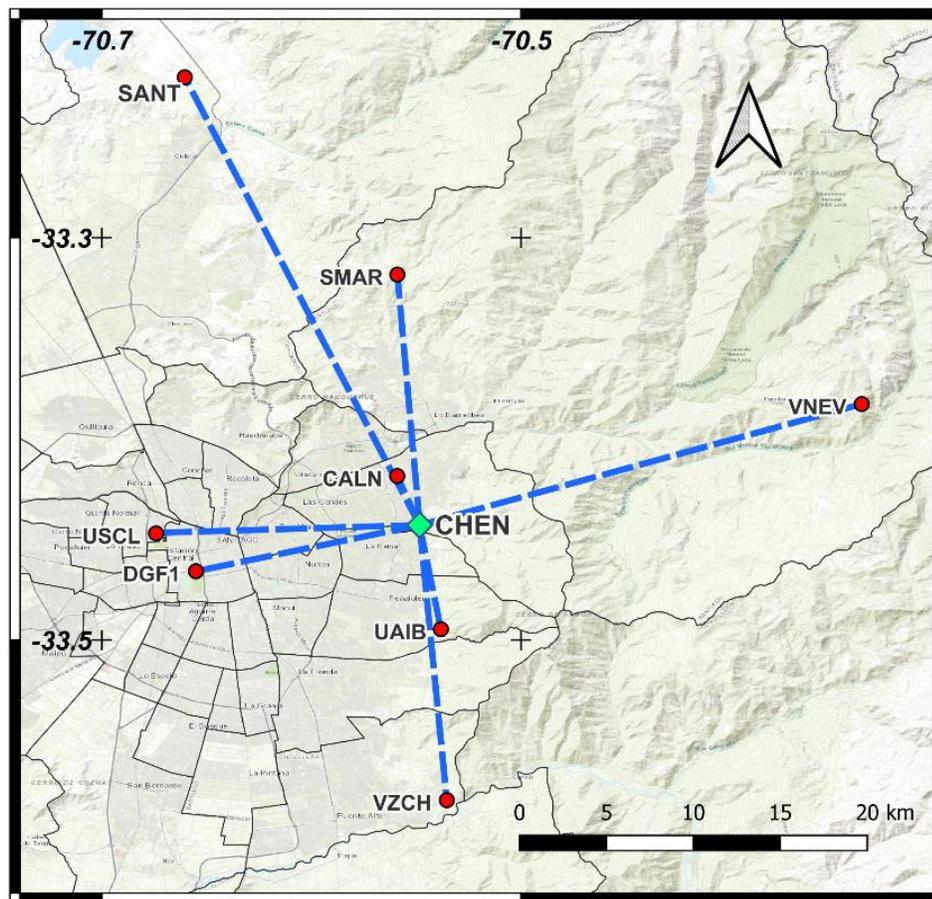


Figura 5. Arreglo de estaciones GPS de monitoreo continuo en la Región Metropolitana (elaboración propia).

Esta presenta tres rasgos geográficos característicos: la Cordillera de la Costa (al occidente), la depresión intermedia, la cual corresponde a una planicie formada

principalmente por depósitos del sector andino y la Cordillera de los Andes (al oriente), con alturas que sobrepasan los 5000 m (Contreras et al., 2005).

Por su parte, hacia el sur, en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, las estaciones seleccionadas formaron un arreglo más sencillo, que se presenta en la Figura 6. Las condiciones de sequía y bajas temperaturas (promedio de 6 °C) de la zona generan vegetación de estepa fría subandina, compuesta de hierbas y pastos duros (Biblioteca de Congreso Nacional de Chile).

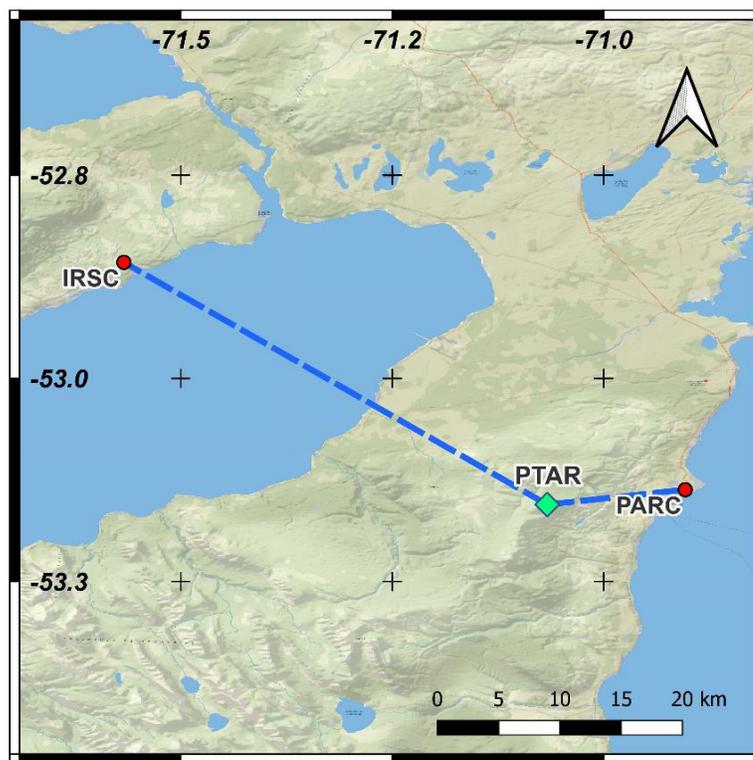


Figura 6. Red de estaciones de monitoreo continuo en la ciudad de Punta Arenas (elaboración propia).

En total, se trabajó con 17 estaciones GNSS de operación continua, estas son administradas por el Centro Sismológico Nacional (CSN), estando sus datos disponibles

a todo usuario a través de su portal web: <http://gps.csn.uchile.cl>. En la Tabla 3 es presentado un resumen comparativo de las longitudes de líneas-base formadas en cada arreglo.

Tabla 3. Distancia entre las estaciones base (IACR, CHEN, PTAR) y las estaciones de cada arreglo.

Distancia a la base [km]	Arica y Parinacota	Metropolitana	Magallanes
	IACR (Isla Alacrán)	CHEN (Cechen)	PTAR (Punta Arenas)
UTAR (Universidad de Tarapacá)	4.23	---	---
CHYT (Chacalluta)	12.14	---	---
CMRC (Cerro Camaraca)	14.96	---	---
PCCL (Poconchile)	25.24	---	---
CALN (Cerro Calan)	---	3.72	---
UAIB (Universidad Adolfo Ibáñez)	---	7.34	---
DGF1 (Dpto. Geofísica, Universidad de Chile)	---	13.43	---
USCL (Universidad de Santiago de Chile)	---	15.24	---
SMAR (Santa Martina)	---	17.36	---
VZCH (Las Vizcachas)	---	19.08	---
VNEV (Valle Nevado)	---	31.58	---
SANT (Peldehue)	---	34.89	---
PARC (Punta Arenas)	---	---	18.97
IRSC (Isla Riesco)	---	---	66.6

### 3.1. Obtención y preparación de datos

Luego de seleccionar la zona de estudio y definir las estaciones de interés, se comenzó con la recopilación exhaustiva de los datos GPS. Estos abarcaron un periodo de cuatro años, desde 2018 hasta 2021, a excepción de las estaciones ubicadas en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, las cuales cuentan con un periodo de dos años (2018 y 2019) debido a no contar con observaciones simultaneas suficientes para el procesamiento relativo.

La disponibilidad de archivos de observación no fue constante, debido a que se presentaron días sin información, por lo que varía según la región y estación. La cantidad de días disponibles durante los periodos seleccionados fue crucial para determinar la estación utilizada como base durante el procesamiento relativo con simple-frecuencia, por ejemplo, en el caso del arreglo en la Región de Arica y Parinacota, aunque la estación UTAR se encuentra en el centro del arreglo formado por las estaciones, lo que favorece la estimación por condición de simetría, fue IACR la seleccionada como fiducial al contar con mayor cantidad de datos. Las Tablas 4 a 6 resumen lo indicado para toda la zona de estudio.

Tabla 4. Archivos de observación disponibles en la Región de Arica y Parinacota

<b>Año</b> <b>Est.</b>	<b>2018</b> <b>(días)</b>	<b>2019</b> <b>(días)</b>	<b>2020</b> <b>(días)</b>	<b>2021</b> <b>(días)</b>
CHYT	365	365	366	219
IACR	296	361	360	365
UTAR	207	311	357	365
PCCL	365	360	366	365
CMRC	187	360	365	365

Tabla 5. Archivos de observación disponibles en la Región Metropolitana.

<b>Año</b> <b>Est.</b>	<b>2018</b> <b>(días)</b>	<b>2019</b> <b>(días)</b>	<b>2020</b> <b>(días)</b>	<b>2021</b> <b>(días)</b>
CALN	195	361	361	365
CHEN	203	352	357	365
DGF1	312	347	366	365
SANT	358	365	335	365
SMAR	185	364	366	144
UAIB	307	310	365	272
USCL	364	360	360	sin datos
VNEV	365	365	365	135
VZCH	154	364	338	365

Tabla 6. Archivos de observación disponibles en la Región de Magallanes y Antártica Chilena.

<b>Año</b> <b>Est.</b>	<b>2018</b> <b>(días)</b>	<b>2019</b> <b>(días)</b>	<b>2020</b> <b>(días)</b>	<b>2021</b> <b>(días)</b>
IRSC	365	363	250	360
PARC	365	361	sin datos	364
PTAR	358	248	sin datos	sin datos

Para la Región de Magallanes y Antártica Chilena, ante la escasa cantidad de sitios GNSS, no hubo más alternativa que seleccionar las tres estaciones indicadas. Además, debido a que la cantidad de datos disponibles no fue la esperada (periodo de cuatro años), se priorizó la geometría y no la cantidad de observaciones, decidiéndose dejar a PTAR como base para formar las líneas hacia las otras dos estaciones, una de ellas de hasta 66 km.

De manera paralela a la obtención y organización de las observaciones GPS, se llevó a cabo la descarga de otros insumos necesarios para el procesamiento PPP y relativo, a saber:

- Orbitas y relojes satelitales, así como ERP calculados y ofrecidos por el CODE (Center for Orbit Determination in Europe; <http://www.aiub.unibe.ch>)
- Mallas globales de la VMF3 (Vienna Mapping Function 3; Landskron y Böhm, 2018). Esta moderna función de mapeo para las componentes hidrostática y no-hidrostática, no solo permite evaluar el retardo de la señal en la atmósfera neutra a cualquier ángulo de elevación, sino que ofrece valores del ZHD en base al sofisticado modelo climático ERA5, lo que minimiza la incertidumbre en el cálculo del ZWD. Los coeficientes de la VMF3 se obtuvieron del sitio: <https://vmf.geo.tuwien.ac.at>
- Mallas globales del contenido total de electrones o TEC (por sus siglas en inglés, ofrecidas por el CODE, y necesarias para la reducción del efecto ionosférico durante el proceso de resolución de ambigüedades en la estimación relativa, y/o cuando se procesan datos de simple-frecuencia.
- Coeficientes de carga oceánica mareal según el modelo FES2014b (Lyard et al., 2021), dados por Bos y Scherneck (2024), disponible en <http://holt.oso.chalmers.se/loading>, necesarios para reducir el efecto de las variaciones en la distribución de masas de agua que deforman la corteza terrestre, principalmente en zonas costeras, con mayor magnitud sobre la componente vertical.
- Coeficientes de carga atmosférica mareal, extraídos del modelo de mareas ofrecido por van Dam y Ray, (2010), y disponible en <https://geophy.uni.lu>. Estos son necesarios, ya

que al igual que en el caso de la carga oceánica, las estimaciones rigurosas toman en cuenta la deformación, ahora por causa de los cambios en la presión atmosférica, que pueden alcanzar hasta los 20 mm en la vertical y 3 mm en la horizontal.

Una vez completada la recopilación de los productos necesarios, se inició la etapa de preparación y adaptación del conjunto de archivos según los requerimientos propios del BSW52, lo que se conoce como creación de la campaña. Esta incluye la verificación y creación del registro de estaciones, para asegurar consistencia en la nomenclatura del sitio, tipo de receptor y de antena, y altura de antena, asumiéndose como fidedignos aquellos suministrados por el proveedor de los datos GNSS en su sitio web.

### 3.2. Cálculo del Retardo Zenital Troposférico: solución ZWD-PPP

Contar con observaciones GPS de alta calidad es fundamental para estimar el retardo, esta condición se cumple en buena medida, con datos de fase y diferencia de fase de las portadoras L1 y L2. La ecuación de observación genérica es presentada por Xu y Xu (2016).

$$\lambda\Phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r, t_s) - (\delta t_r - \delta t_s)c + \lambda N_r^s - \delta_{ion} + \delta_{tro} + \delta_{tide} + \delta_{mt} + \delta_{rel} + \varepsilon \quad (6)$$

Donde:

$\rho_r^s(t_r, t_s)$ : Distancia geométrica entre el satélite (s) y el receptor (r) durante el momento de transmisión (t)

$(\delta t_r - \delta t_s)c$ : Es la corrección del tiempo entre el reloj satelital ( $\delta t_s$ ) y el del receptor ( $\delta t_r$ ), por la velocidad de la luz ( $c$ )

$N_r^s$ : Es el número de ambigüedades en fases portadoras

$\lambda$ : Longitud de onda de la fase portadora

$\delta_{ion}$ : Refracción ionosférica

$\delta_{tro}$ : Refracción troposférica

$\delta_{tide}$ : Efectos de las mareas terrestres

$\delta_{mt}$ : Efecto multitrayectoria

$\delta_{rel}$ : Efectos relativísticos

$\varepsilon$ : Errores remanentes

Todos estos son tratados durante el procesamiento de las observaciones GPS, considerándose como conocidas o incógnitas al momento de correr el GPSEST/BSW52. Como en todo procesamiento GNSS, las cantidades que se estiman de manera conjunta son las coordenadas geocéntricas de las estaciones, los parámetros de reloj del receptor, y el retardo en la atmósfera neutra. En la Tabla 7, se ofrece una visión general y comparativa de las características, modelos y productos utilizados durante el procesamiento efectuado, tanto en la modalidad PPP como en la relativa.

Tabla 7. Características generales de las estimaciones ZWD-PPP y ZWD-L1.

	<b>ZWD-PPP</b>	<b>ZWD-L1</b>
Software	Bernese GNSS Software 5.2	Bernese GNSS Software 5.2
Técnica	Estimación PPP	Estimación Relativa
Sistema GNSS	GPS (L1 y L2)	GPS (L1)
Intervalo de muestreo	30s	30s
Mascara de elevación	7 grados	7 grados
Parámetros Ionosféricos	Libre de ionosfera (L3)	Mapas ionosféricos del CODE
Orbitas, Relojes y ERP	Finales del CODE	Finales del CODE
Variación del centro de fase de las antenas	igs14.atx	igs14.atx
Modelo de Nutación	IAU 2000	IAU 2000
Modelo de Polo Subdiario	IERS2010	IERS2010
Modelado de la troposfera	Vienna Mapping Functions 3 (VMF3), 6 horas	Vienna Mapping Functions 3 (VMF3), 6 horas
Correcciones de carga oceánica	FES2014b	FES2014b
Correcciones de carga Atmosférica	van Dam y Ray (2010)	van Dam y Ray (2010)
Ambigüedades	Flotantes, cercanas al entero	Enteras
Marco de Referencia	ITRF2014	ITRF2014

Para el procesamiento ZWD-PPP, tal y como se mencionó anteriormente, cuatro años consecutivos de datos fueron analizados, ventana temporal que se asumió suficiente para evaluar la calidad de la subsiguiente estimación relativa con observaciones L1. Esta solución PPP sirvió como patrón de referencia o de control. De esta manera, en la Figura 7 se esquematiza la metodología del cálculo.

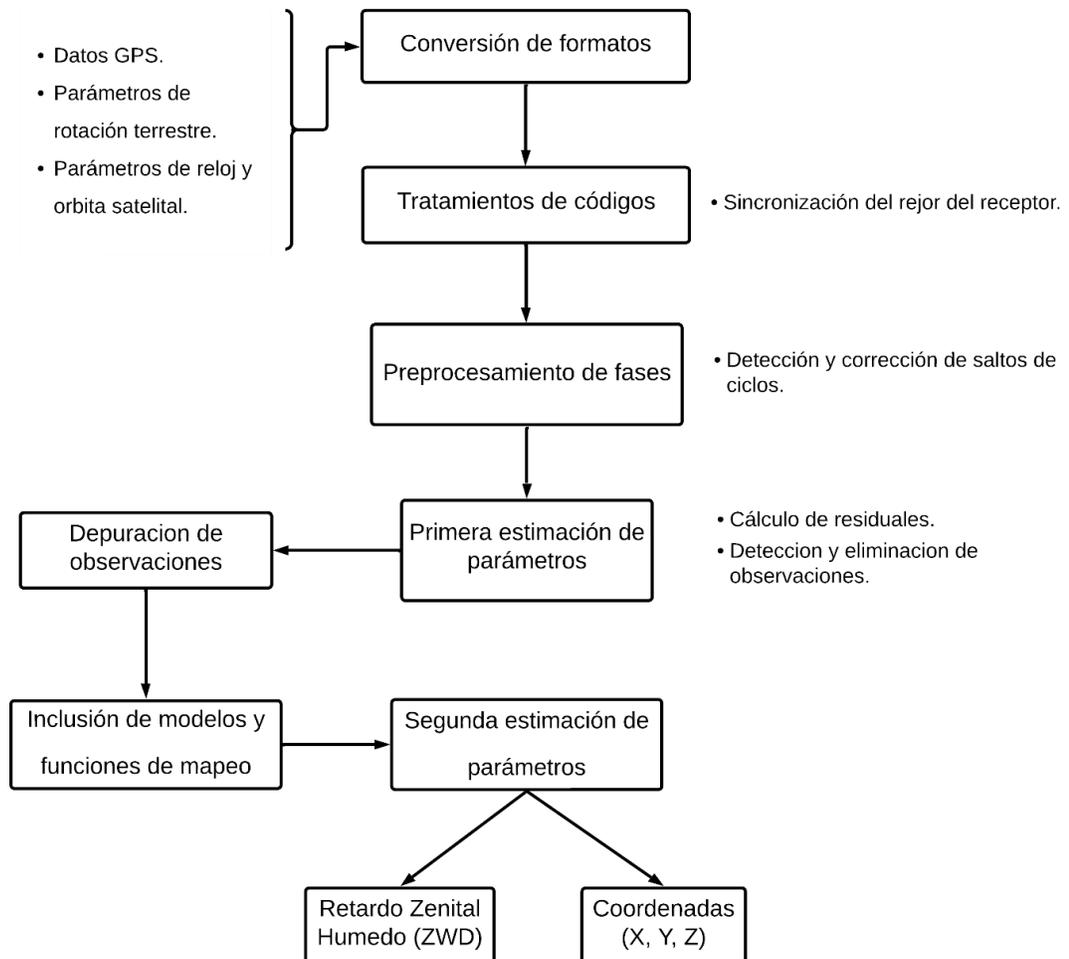


Figura 7. Esquema general del procesamiento ZWD-PPP.

Dada la rigurosidad del procesamiento, las características de los productos y modelos utilizados deben contar con la calidad previamente indicada, lo que justifica el uso de relojes y órbitas finales del CODE y demás insumos ya mencionados. La estrategia aplicada considera cinco etapas principales:

- Preprocesamiento, orientado a la preparación de los datos GPS en conjunto con la obtención, validación y conversión de los insumos adicionales, como las orbitas, relojes y parámetros de rotación terrestre, otros.
- Tratamiento de los códigos, a fin de establecer la sincronización del reloj del receptor con el tiempo GPS de los satélites, además se identifican observaciones con errores groseros según criterios indicados por el calculista.
- Detección y corrección de los saltos de ciclos presentes en las observaciones de fases aplicando diferenciaciones y modelos estocásticos propios del BSW52.
- Estimación de parámetros (1<sup>era</sup> corrida), en donde se calculan los residuales de las observaciones para detectar y reducir aquellas que excedan niveles de tolerancia establecida. Además de depurar las observaciones, un tratamiento inicial del retardo troposférico es adelantado en base a funciones de mapeo empíricas. La observable derivada utilizada fue la L3.
- Estimación de parámetros (2<sup>da</sup> corrida), con la que se obtienen o resuelven las incógnitas de interés (coordenadas de las estaciones y ZWD); esta solución no cuenta con resolución fija de ambigüedades, pero si con valores muy cercanos a un número entero.

Utilizando el modelo de Saastamoinen y los valores del ZHD contenidos en las mallas globales de la VMF3, el software realiza la interpolación de esta variable hacia la ubicación de la estación GPS, alcanzando precisión de  $\pm 0.55$  mm. Así, la estimación de parámetros se orienta sólo al ZWD, calculado con resolución temporal de 2 horas.

En general, para todo el conjunto de estaciones analizadas, las soluciones PPP arrojaron un RMS de 0.8 mm en coordenadas geocéntricas y 1.9 mm para el ZWD, con un factor de varianza a posteriori de 2 mm.

### **3.3. Cálculo del Retardo Zenital Troposférico: solución ZWD-L1**

Durante la estimación relativa, bajo condiciones específicas de ocupación, los errores que afectan a las observaciones pueden ser reducidos de manera eficiente, según los tipos de productos utilizados y las correcciones realizadas, sin embargo, no resultan precisos cuando se trata de aplicaciones geodésicas debido a que la precisión depende principalmente de las observaciones de fase (Li et al., 2018). Estos errores provienen de diferentes fuentes, como la refracción atmosférica en la ionosfera y atmósfera baja, deriva de los relojes de satélites y receptores, efectos orbitales, etc. A pesar de que los modelos actuales reducen estos sesgos, siempre existe un residual que puede afectar significativamente la precisión final del posicionamiento relativo (Wang et al., 2022).

Para lograr óptimos resultados durante la estimación de parámetros troposféricos con observaciones de simple-frecuencia, diversas pruebas de cálculo fueron realizadas, considerando las posibilidades dadas por el BSW52., incluyéndose estimación PPP-L1, cuyos resultados fueron descartados de inmediato debido a su alta debilidad ante el patrón de comparación. El desarrollo de la estrategia ZWD-L1 se sustentó únicamente en el modelo de estimación relativa, buscando optimizar el proceso de diferenciaciones dada la existencia de líneas-base de hasta 60 km, este se esquematiza en la Figura 8.

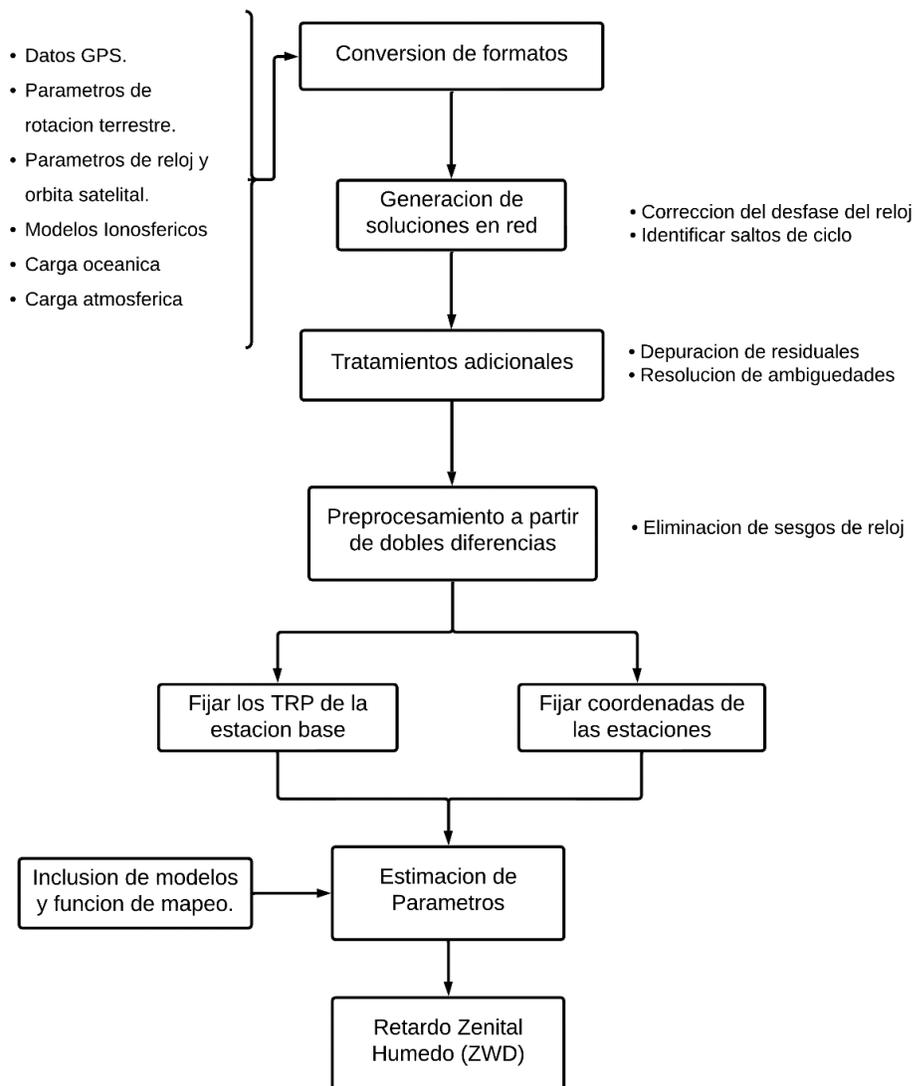


Figura 8. Esquema general del procesamiento relativo con simple frecuencia.

El procesamiento relativo con simple-frecuencia considera etapas específicas para la técnica utilizada, ejecutadas al aplicar variantes al cálculo estándar con el BSW52, siendo estas:

- Fijación de ambigüedades en fases portadoras, previa depuración de saltos de ciclo, tomando las observaciones de doble-frecuencia para derivar la L3 como observable. Al

suprimir los sesgos dependientes de la longitud de la línea-base hasta la resolución de ambigüedades, se obtuvo una solución semi-libre del arreglo de estaciones.

- Estimación de parámetros en base a observaciones GPS-L1, para lo cual fue indispensable introducir los mapas ionosféricos globales una vez descompuesta la L3 para formar observables con la portadora L1. En esta etapa se procuró minimizar la cantidad de incógnitas, de manera que se introdujeron como fijas las coordenadas de todas las estaciones, y el ZWD solo para la estación base de cada arreglo, a fin de evitar efectos de correlación respecto a los demás sitios. Ambos grupos de parámetros provienen del cálculo ZWD-PPP, aunque pueden obtenerse de cualquier centro de análisis que los ofrezca.

En general, para todo el conjunto de estaciones analizada, las soluciones L1 arrojaron un RMS de 7.5 mm para el ZWD, con un factor de varianza a posteriori de 7.3 mm.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Considerando que los resultados son estadísticamente confiables, es importante tener en cuenta que los datos GPS no siempre se registran de manera uniforme y continua, por lo que pueden surgir valores atípicos a pesar de la rigurosidad del procesamiento. Por lo tanto, el primer paso para utilizar los resultados PPP como base de comparación es depurar o filtrar las estimaciones que contengan desviaciones altas.

Para lograr esto, se aplicó un criterio de rechazo, el cual es efectivo desde el punto de vista estadístico, ya que permite detectar y minimizar las determinaciones ruidosas. El criterio comúnmente utilizado es el de  $3\sigma$  (tres veces el error medio), este permite eliminar cualquier valor que exceda tres veces la desviación estándar asociada a la variable de interés (ver Tabla 7). Sin embargo, al aplicar este criterio se eliminaron datos que no presentaban gran ruido, esto se produjo debido a que existían estimaciones que presentaban una desviación estándar muy alta.

Para corregir esto se aplicó un filtro de paso bajo, el cual permite descartar las estimaciones que sobrepasen una determinada desviación estándar, este fue seleccionado debido a la bondad de la estimación, ya que, al existir datos atípicos muy considerables podría significar una inconsistencia de los datos. En este caso se eliminaron todos aquellos valores que presentaban una desviación superior los 10 cm, esto se estableció luego de ordenar de mayor a menor las desviaciones resultantes, hacer la diferencia entre los datos y seleccionar la diferencia mayor. Esto permitió utilizar el criterio de rechazo ya mencionado, eliminando solo los datos que sobrepasen  $3\sigma$ . Cabe señalar que los resultados

obtenidos por medio del procesamiento ZWD-L1 fueron sujetos al mismo tratamiento estadístico para su filtrado.

Tabla 8. Desviación estándar promedio del ZTD en cada región.

<b>Desviación Estándar [mm]</b>			
<b>Región</b>	<b>Estación</b>	<b>PPP (L1 + L2)</b>	<b>Relativo (L1)</b>
Arica y Parinacota	CHYT	0.481	1.092
	CMRC	0.407	1.071
	UTAR	0.612	1.149
	PCCL	0.543	1.122
Metropolitana	CALN	0.456	1.611
	DGF1	1.176	2.521
	SANT	0.487	1.581
	SMAR	0.568	1.649
	UAIB	0.637	1.586
	USCL	0.454	1.613
	VNEV	0.636	1.635
	VZCH	0.735	1.665
Magallanes y Antártica Chilena	IRSC	0.458	1.646
	PARC	0.534	1.679

Los valores observados en la Tabla 7 representan la desviación estándar promedio (posterior al filtrado), del periodo completo de observaciones procesadas, permitiendo apreciar en primera instancia, que los resultados son consistentes entre las diferentes estaciones y técnicas utilizadas. En consecuencia, se puede apreciar la bondad, tanto de PPP L1+L2 como el procesamiento relativo con simple frecuencia. Revelando que la estimación con L1 presenta una estrecha similitud respecto a su patrón de comparación.

Es la estimación con PPP la que arroja los valores más bajos, confirmando que esta estrategia de cálculo proporciona resultados más precisos. A su vez las estimaciones por estimación relativa fueron igual de confiables, el resultado con mayor desviación se obtuvo en la estación DGF1 y corresponde solo a 2.5 mm, resultado bastante aceptable si se considera que línea-base formada fue superior a 13 km.

Luego de eliminar los valores atípicos presentes en resultados de las estimaciones realizadas en la Región de Magallanes, se puede observar una desviación estándar consistente al igual que en las regiones anteriores.

De los resultados vistos en la Tabla 7 se tiene que:

- En la Región de Arica y Parinacota las desviaciones estándar obtenidas con procesamiento de simple-frecuencia fueron en promedio 2.2 veces mayores que para los resultados procesamiento de ZWD-PPP.
- En la Región Metropolitana la diferencia entre el procesamiento de simple-frecuencia es de 2.8 veces el promedio de la desviación estándar para el cálculo ZWD-PPP.
- Finalmente, en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, la zona más al sur de este trabajo, el promedio superó 3.3 veces el de la estimación PPP.

#### **4.1. Series temporales del ZWD**

Una manera de evaluar los resultados de la estimación del ZWD con simple-frecuencia, es mediante la confección de series temporales, es decir, la secuencia de múltiples datos de la misma variable asociada a una marca de tiempo, facilitando así observar y estudiar

su evolución. Gracias a las observaciones de estaciones de rastreo continuo GNSS, es posible generar series temporales, ya sean diarias, mensuales o hasta multianuales (Freymueller y Sánchez, 2022).

Al contar con soluciones diarias durante cuatro años consecutivos de mediciones GPS, se generaron series temporales del retardo troposférico, esto implicó el manejo de un gran volumen de datos, ya que el ZWD se estimó con una resolución de dos horas, y para un total de 17 estaciones con doble frecuencia y 14 utilizando simple frecuencia.

Para una mejor visualización de las series temporales, se llevó a cabo un proceso de suavizado en ambas estimaciones (PPP suave, L1 suave). Esto permitió una mejor comparación y análisis del comportamiento del ZTD y del ZWD, facilitando su comprensión.

Inicialmente, se aplicó un filtro a partir de una media móvil. Aunque este método suavizaba eficazmente las series, se observó que sesgaba algunos datos, debido a que es sensible a valores extremos o atípicos. Se optó por utilizar la mediana móvil, gracias a que permite una interpretación más realista del comportamiento al proporcionar una tendencia central de los datos.

En cuanto a la representatividad de los resultados respecta, no solo debe considerarse la consistencia estadística, pues tratándose de un procesamiento multitemporal, la interpretación puede verse sesgada al no vincularse a un mismo marco de referencia. A manera de ejemplo, en la Figura 9, se presenta la serie temporal de ambas soluciones (ZWD-PPP y ZWD-L1) luego de ser filtradas y suavizadas, aquí se puede apreciar una diferencia de más de 15 cm en la estación VZCH durante el año 2019, para el cual se

refirió la solución diaria al ITRF2020 y no al ITRF2014 como se vino haciendo para el resto de los años.

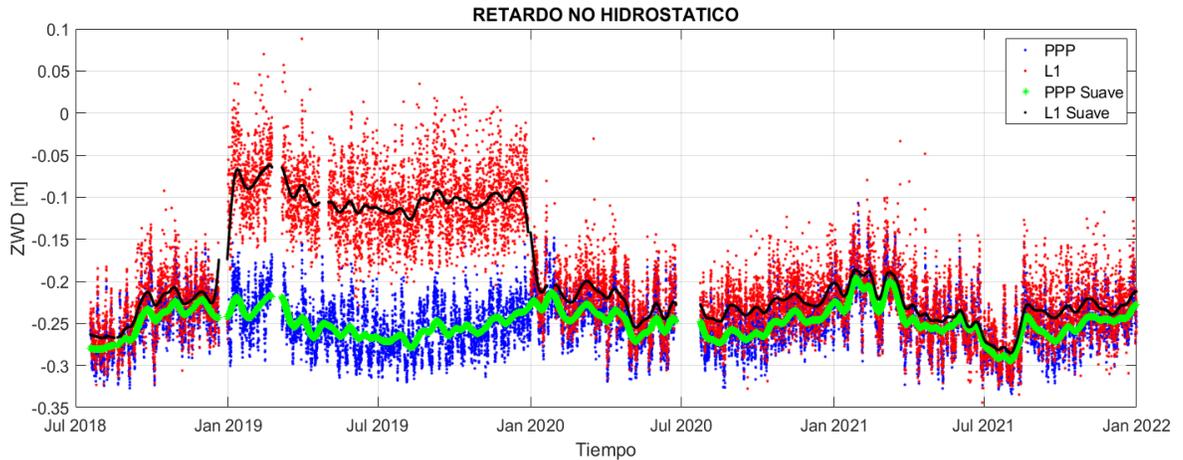


Figura 9. Resultados del ZWD obtenidos con diferentes marcos de referencia para VZCH.

Como se puede observar en la Figura 9, el no procesar de manera consistente puede generar estimaciones equivocadas, en donde, si bien los patrones generados con diferentes marcos presentan un comportamiento bastante similar, la diferencia entre los valores produce una interpretación errónea.

La descripción de las series tomando algunas estaciones como ejemplo, por Región, es expuesta a continuación. La Figura 10 corresponde a la serie temporal del retardo en la estación CHYT (Región de Arica y Parinacota), provenientes de la solución ZWD-PPP (azul) y ZWD-L1 (rojo), las líneas punteadas representan el inicio de verano e invierno durante cada año, con el propósito de visualizar si la variabilidad del retardo se relaciona con el cambio estacional en las regiones seleccionadas.

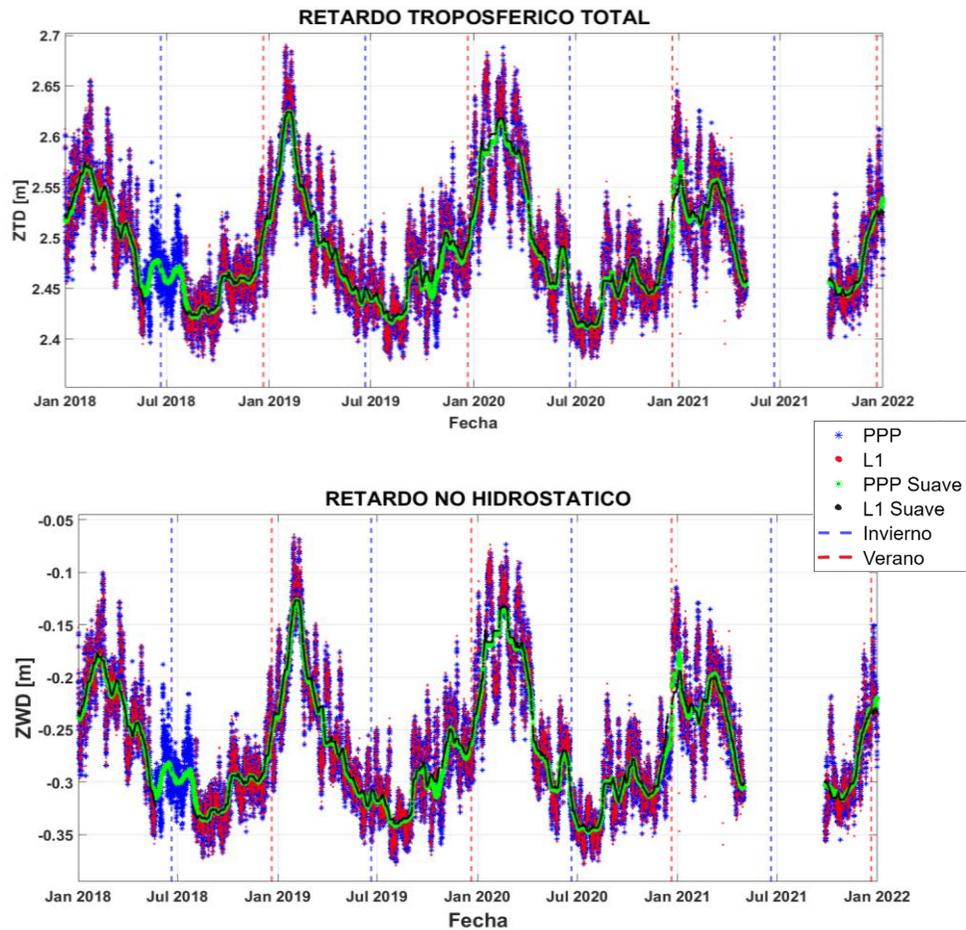


Figura 10. Estimación ZTD y ZWD de la estación CHYT, periodo 2019-2021.

Es notable que el retardo calculado mediante estimación relativa se ajusta bastante bien a los resultados por PPP. También puede notarse que, en los periodos de invierno, tanto el ZTD como ZWD disminuyen, no así en verano en donde se observa un continuo aumento en ambas componentes. En las Figuras 11 y 12 se presenta una caracterización estadística más detallada de los parámetros troposféricos calculados.

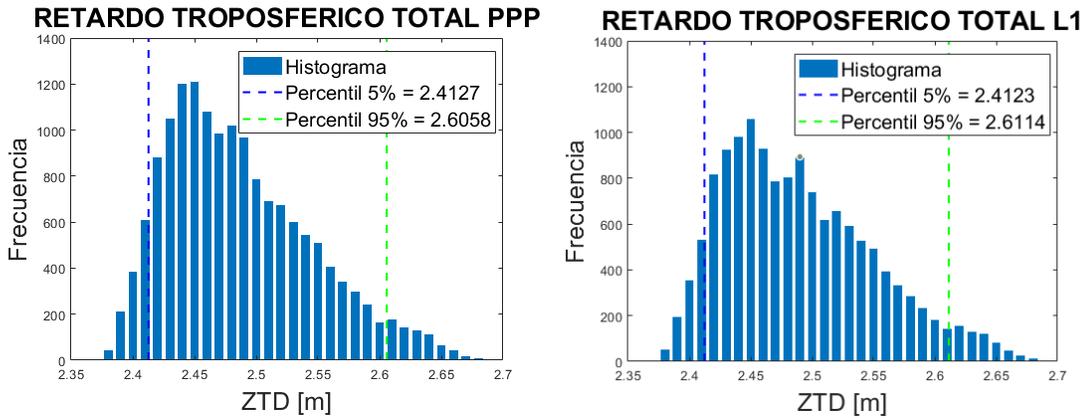


Figura 11. Histograma del ZTD con identificación de percentiles (5 y 95%) de CHYT.

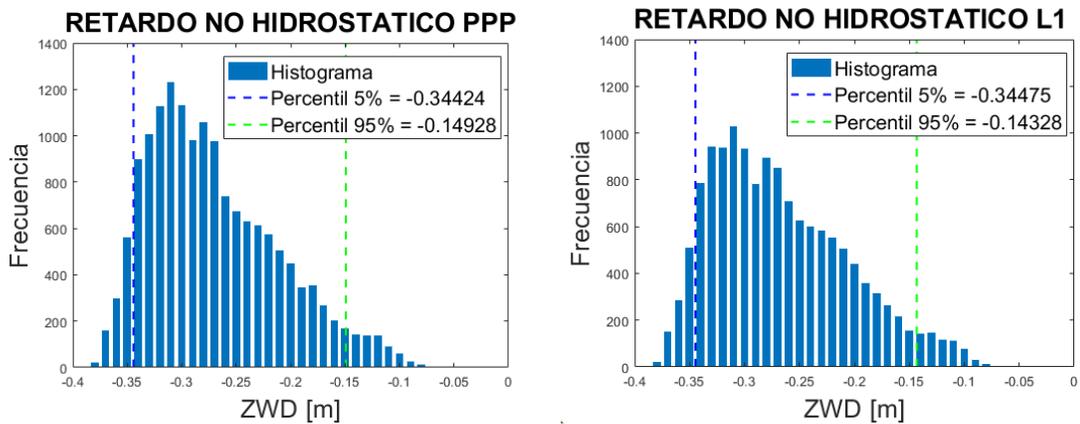


Figura 12. Histograma del ZWD con identificación de percentiles (5 y 95%) de CHYT.

Con los histogramas del ZTD y ZWD se analizó la concentración del 90% de los datos para determinar qué tan confiable resultó la estimación utilizando observaciones GPS-L1, evaluando los percentiles 5% y 95%. Los resultados presentan una asimetría positiva o sesgada a la izquierda con diferencias milimétricas tanto para el ZTD como el ZWD.

Las Tablas 8 y 9 presentan una visión general para ambas variables obtenidas en todas las estaciones procesadas para la Región de Arica y Parinacota, dando posibilidad de

comparar y evaluar de manera más rápida la calidad del procesamiento. Los resultados son consistentes.

Tabla 9. Percentil 5 y 95 del ZTD en la Región de Arica y Parinacota.

Estación	PPP (L1 + L2) [m]		Relativo (L1) [m]	
	Perc. 5%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 95%
CHYT	2.412	2.605	2.412	2.611
CMRC	2.145	2.324	2.145	2.326
UTAR	2.401	2.593	2.401	2.597
PCCL	2.075	2.255	2.072	2.257

Tabla 10. Percentil 5 y 95 del ZWD en la Región de Arica y Parinacota.

Estación	PPP (L1 + L2) [m]		Relativo (L1) [m]	
	Perc. 5%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 95%
CHYT	-0.344	-0.149	-0.344	-0.143
CMRC	-0.348	-0.165	-0.354	-0.168
UTAR	-0.345	-0.150	-0.344	-0.145
PCCL	-0.254	-0.072	-0.257	-0.071

Como era de esperarse, los resultados para la Región Metropolitana resultaron ser muy precisos y estables respecto al patrón de comparación (PPP), reafirmando la confiabilidad de la estimación. La serie temporal de la estación SANT (ver Figura 13), demuestra que los parámetros troposféricos obtenidos con el procesamiento de simple-frecuencia también son consistentes en la zona central del país. No hay incidencias causadas por condiciones meteorológicas o climáticas de largo plazo, siendo recomendable profundizar la investigación en este sentido.

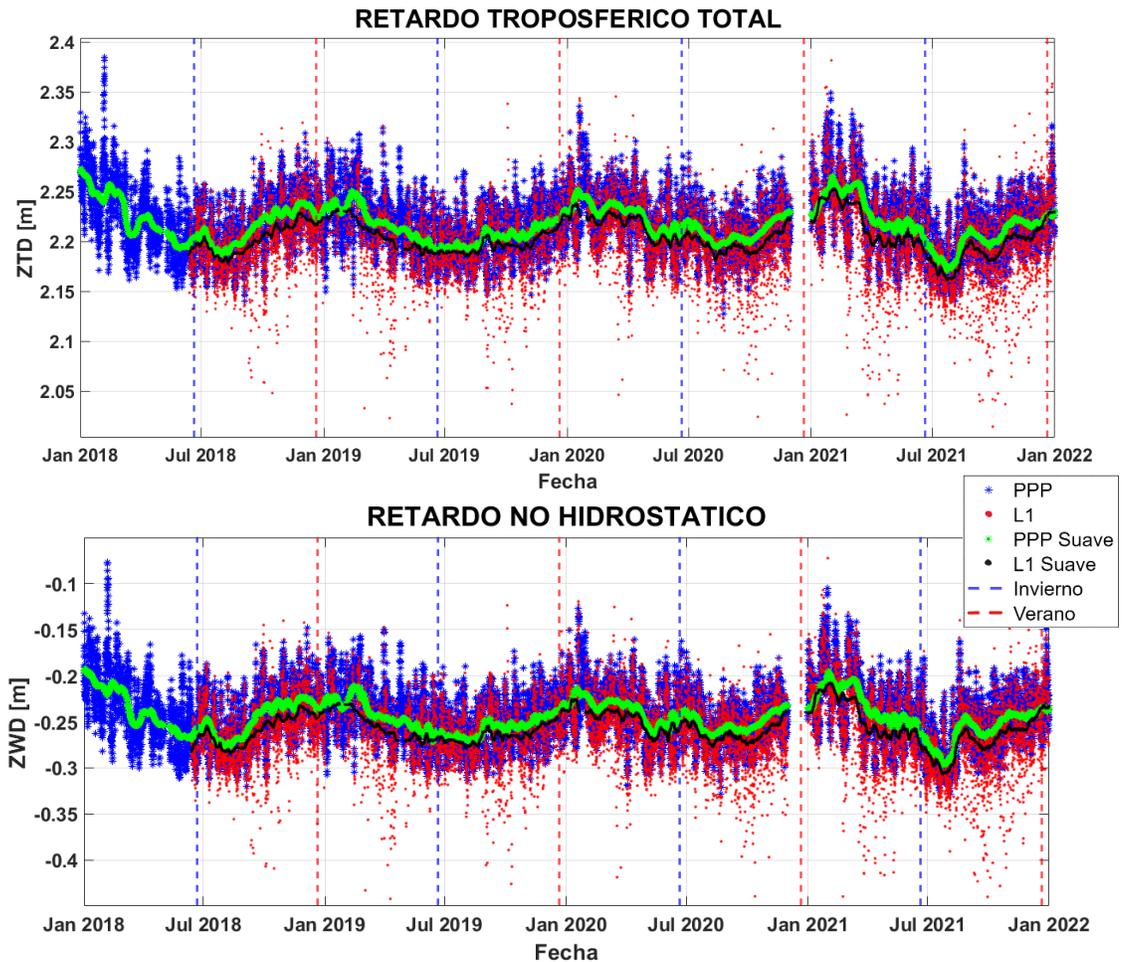


Figura 13. Estimación ZTD y ZWD de la estación SANT.

Los histogramas del ZTD y ZWD de la estación SANT (ver Figuras 14 y 15) muestran una distribución simétrica en ambas estimaciones, sin embargo, los resultados del límite inferior de los datos (5%) se encuentra con una diferencia de más de 2 cm y el límite superior de los datos (95%) presenta una diferencia de 0.95 cm. A pesar de la diferencia, los resultados obtenidos con simple frecuencia muestran el mismo comportamiento que la estimación PPP.

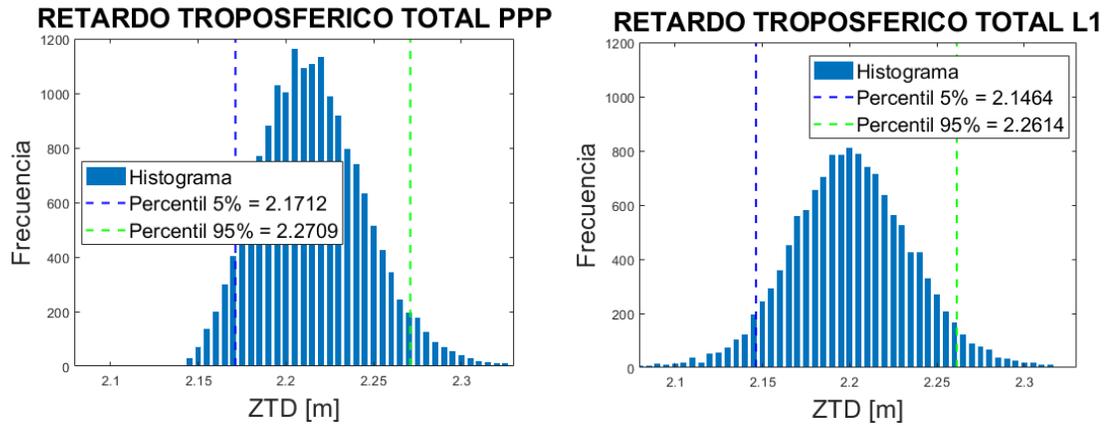


Figura 14. Histograma del ZTD con identificación de percentiles (5 y 95%) de SANT.

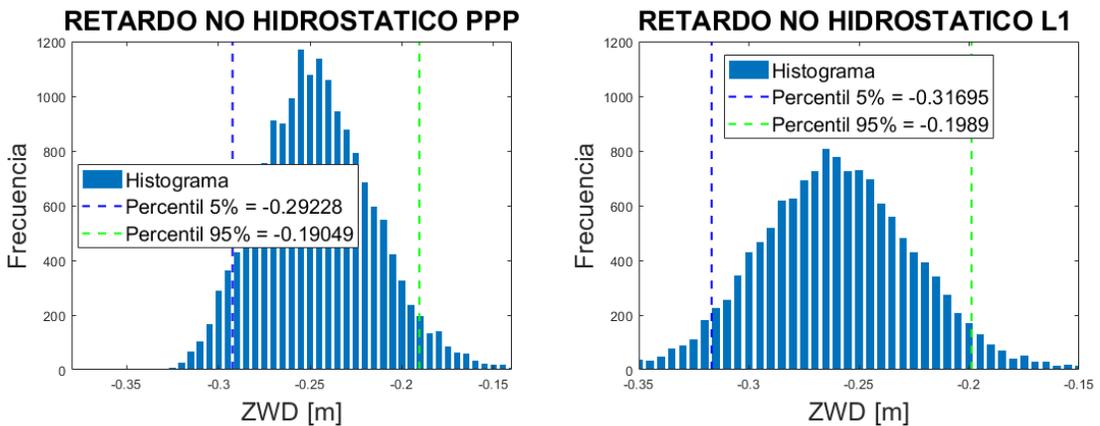


Figura 15. Histograma del ZWD con identificación de percentiles (5 y 95%) de SANT.

Por su parte, en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, tomando la estación PARC, se aprecia una diferencia en el percentil inferior del histograma del ZTD (ver Figura 16) de 3.7 mm entre los resultados, mientras que la discrepancia del percentil superior es de 6.6 mm. Estas variaciones refuerzan la idea sobre la calidad de la estimación de simple frecuencia, mostrando que su distribución es simétrica y no demuestra sesgos, pese al comportamiento errático y poco estable de los parámetros visualizados en la serie

temporal (ver Figura 18). Sin embargo, el histograma del ZWD (ver Figura 17), se nota una leve asimetría positiva, ya que, la mayoría de sus datos están sesgados a la izquierda. En las Tablas 10 y 11 se presentan los valores de los percentiles.

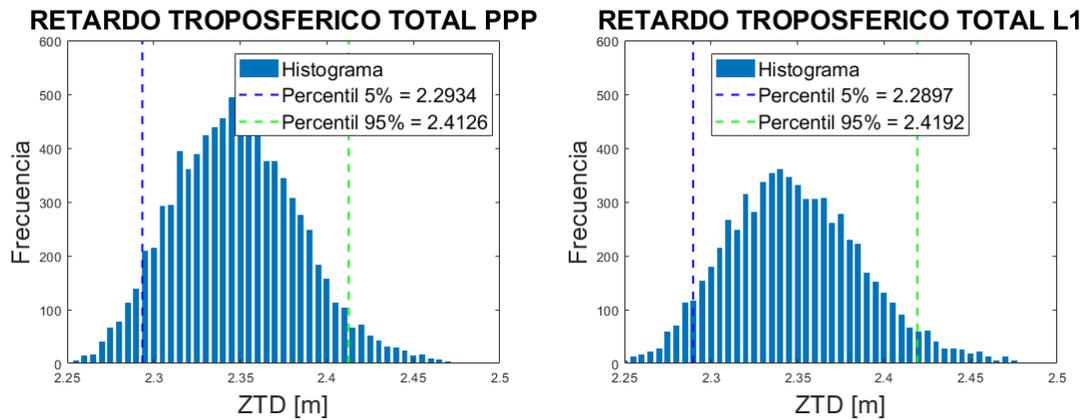


Figura 16. Histograma del ZTD con identificación de percentiles (5 y 95%) de PARC.

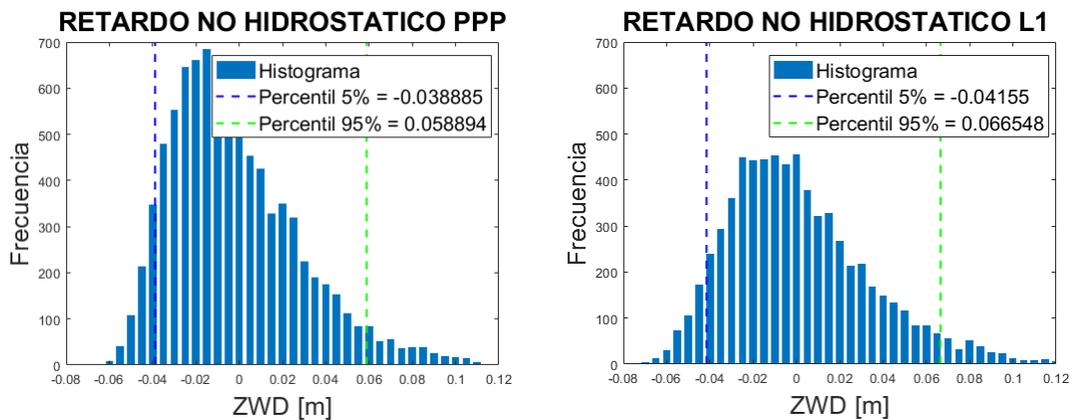


Figura 17. Histograma del ZWD estimado en la estación PARC con sus respectivos percentiles.

Tabla 11. Percentil 5 y 95 del ZTD PPP y Relativo en la Región de Magallanes y Antártica Chilena.

Estación	PPP (L1 + L2) [m]		Relativo (L1) [m]	
	Perc. 5%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 95%
IRSC	2.276	2.395	2.269	2.403
PARC	2.293	2.413	2.290	2.419

Tabla 12. Percentil 5 y 95 del ZWD PPP y Relativo en la Región de Magallanes y Antártica Chilena.

Estación	PPP (L1 + L2) [m]		Relativo (L1) [m]	
	Perc. 5%	Perc. 95%	Perc. 5%	Perc. 95%
IRSC	-0.013	0.083	-0.020	0.094
PARC	-0.039	0.059	-0.042	0.067

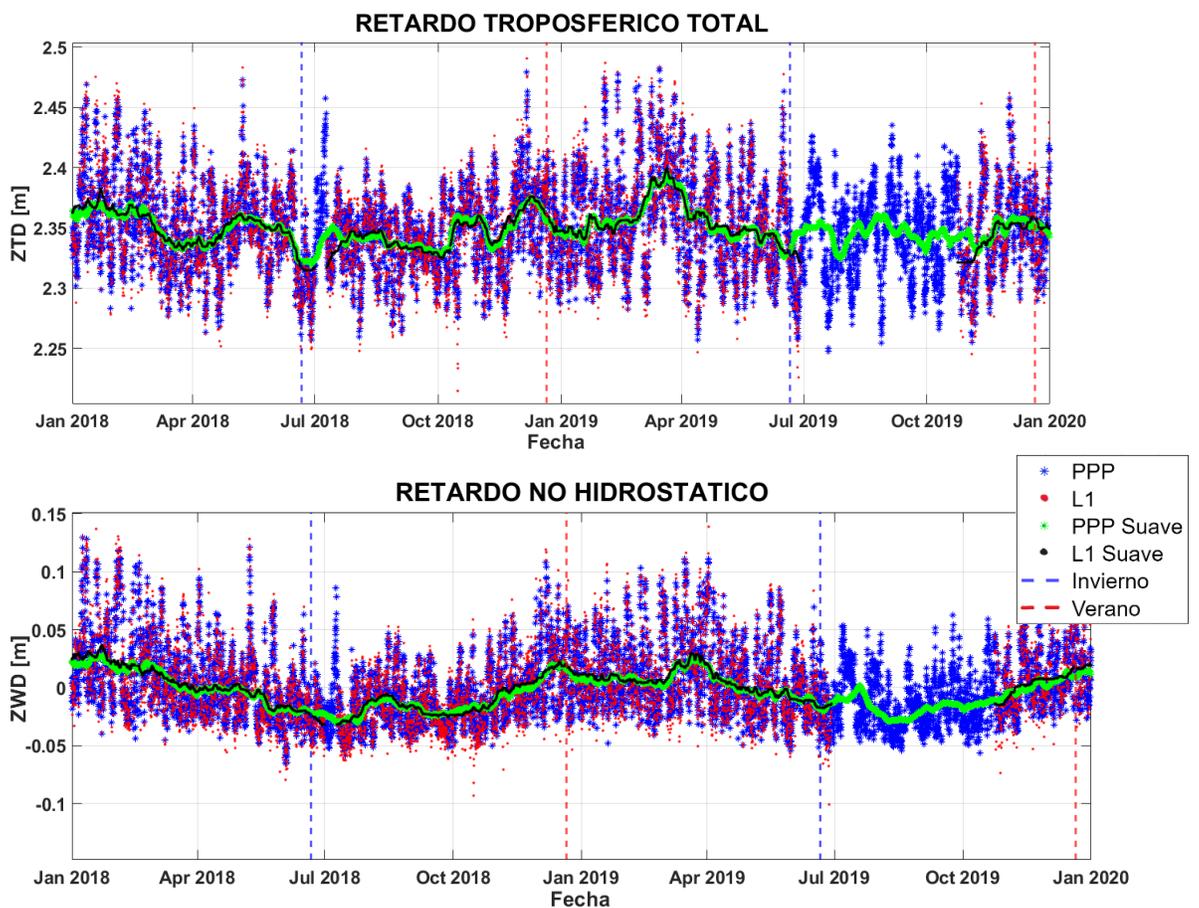


Figura 18. Estimación ZTD y ZWD de la estación PARC.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Estimar y modelar la distribución espacio-temporal del ZTD es de gran relevancia en aplicaciones meteorológicas y climáticas, ya que, se trata de la principal variable para la recuperación del vapor de agua precipitable mediante GPS/GNSS. En este sentido, se logró estimar parámetros troposféricos utilizando observaciones de simple-frecuencia GPS, con el fin de evaluar la representatividad respecto a determinaciones PPP, en sitios seleccionados en tres de regiones del país, diseñando para ello una metodología de cálculo relativo con el Bernese GNSS Software v5.2.

Las determinaciones PPP se hicieron mediante un procesamiento riguroso de observaciones de doble-frecuencia con la misma plataforma de cálculo, siguiendo estándares internacionales e introduciendo insumos de última generación como la VMF3 para modelar la componente hidrostática del retardo.

Los resultados demuestran que la estimación de parámetros troposféricos utilizando observaciones relativas de simple-frecuencia, son consistentes y precisas, describiendo magnitudes y tendencias muy cercanas a las dadas por el patrón de referencia, esto luego de la correspondiente comparación por medio de series temporales, por lo que puede afirmarse que la calidad obtenida para el ZWD L1 es adecuada para la monitorización de la atmósfera. Sin embargo, la metodología implementada necesita de parámetros troposféricos a priori de alta calidad, y es sensible ante la longitud de las líneas-base, siendo imposible obtener el ZWD únicamente con datos L1 utilizando las herramientas computacionales disponibles.

En cuando a posibles efectos sobre el ZWD L1 por las condiciones atmosféricas particulares de cada zona seleccionada, las variaciones temporales demostraron una correlación con el cambio de estación climática tal como sucedió con el ZWD PPP, siendo más notorio en la zona norte y disminuyendo hacia el sur, en donde la variabilidad de las series temporales es mayor.

Ya que la metodología implementada para la estimación del ZWD L1 resultó efectiva y precisa, recomienda:

- Profundizar la evaluación sobre la distribución de las estaciones con el objetivo de proponer una configuración geométrica más eficiente y adecuada. Esta debe considerar la longitud de la línea-base, así como también las condiciones locales que puedan influir en la señal. Una mejor distribución facilitará la mitigación de errores asociados a la longitud de la línea-base durante la estimación relativa, pudiendo mejorar la confiabilidad y los resultados.
- También es recomendable evaluar estimaciones ZTD-L1 haciendo uso del PPP. Esta podría ser una alternativa útil para evitar complicaciones derivado del arreglo de las redes.
- En virtud de lo anterior, es necesario considerar la adquisición de plataformas de cálculo especializadas en PPP o bien, la adquisición de la versión reciente del Bernese GNSS Software, pues esta incluye nuevos algoritmos, con mayor capacidad de procesamiento y funcionalidades, pudiendo generar mejores rutinas en su BPE.

## REFERENCIAS

Aragón, J. M. (2020). Estimación de parámetros troposféricos en tiempo casi real para Sudamérica mediante técnicas GNSS. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísica. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/107223>

Atiz, O. y Kalayci, I. (2021). Performance assessment of PPP-AR positioning and zenith total delay estimation with modernized CSRs-PPP. *Artificial Satellites*, 56(2). DOI: 10.2478/arsa-2021-0003

Barry, R. y Chorley, R. (2009). *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge. Londres. DOI: 10.4324/9780203871027

Berné, J., Anquela, A., Garrido, Natalia. (2014). *GNSS. GPS: Fundamentos y Aplicaciones en Geomática*. Editorial de la Universitat Politècnica de València. Valencia

Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., Ware, R. (1992). GPS Meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14). DOI: 10.1029/92JD01517

Böhm, J., y Schuh, H., Eds. (2013). *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer Berlin. DOI: 10.1007/978-3-642-36932-2

Boisits, J., Glaner, M., Weber, R. (2020). Regiomontan: a regional high precision ionosphere delay model and its application in precise point positioning. *Sensors*, 20(10). DOI: 10.3390/s20102845

Bos, M. y Scherneck, H. (2024). Free ocean tide loading provider. Disponible en: <http://holt.oso.chalmers.se/loading>

Chen, P., Ma, Y., Liu, H., Zheng, N. (2020). A new global tropospheric delay model considering the spatiotemporal variation characteristics of ZTD with altitude coefficient. *Earth and Space Science*, 7(4). DOI: 10.1029/2019EA000888

Cioce, V. (2019). Efectos asociados con la carga por presión atmosférica sobre la estabilidad del posicionamiento geodésico en Venezuela. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela

Cioce V., Espinoza D., Rincón M., Wildermann E., Royero G. y Sánchez L. (2016). Estimación y seguimiento del retardo troposférico GPS empleando posicionamiento de punto preciso. Simposio SIRGAS 2016. Quito, Ecuador. Disponible en: <http://www.sirgas.org>

Contreras, M., Opazo, D., Ubilla-Bravo, G., Pino, C. (2005). Bases para el Ordenamiento Territorial Ambientalmente Sustentable de la Región Metropolitana de Santiago. Informe Final del Proyecto. DOI: 10.13140/2.1.1393.2801

Cui, B., Wang, J., Li, P., Ge, M., Schuh, H. (2022). Modeling wide-area tropospheric delay corrections for fast PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 26(2). DOI: 10.1007/s10291-022-01243-1

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern. Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297

Deng, Z., Bender, M., Zus, F., Ge, M., Dick, G., Ramatschi, M., Wickert, J., Lhnert, U., Schön, S. (2011). Validation of tropospheric slant path delays derived from single and dual frequency GPS receivers. *Radio Science*, 46(6). DOI: 10.1029/2011RS004687

Espinoza, D. (2017). Cálculo del retardo troposférico mediante la implementación rigurosa del Posicionamiento de Punto Preciso. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Freymueller, J. y Sánchez, L., Eds. (2022). Beyond 100: The Next Century in Geodesy. International Association of Geodesy Symposia, 152. Springer. DOI:10.1007/978-3-031-09857-4

Garreaud, R. (2011). The climate of northern Chile: mean state variability and trend. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 41. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/571/57120784004.pdf>

Hernández, J., Estades C., Faúndez L., Herreros J. (2014). Biodiversidad terrestre de la Región de Arica y Parinacota. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26107>

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008). GNSS. Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more. Springer. Viena

Jones, J., Guerova, G., Douša, J., Dick, G., de Haan, S., Pottiaux, E., Bock, O., Pacione, R., van Malderen, R., Eds. (2020). Advanced GNSS Tropospheric Products for Monitoring Severe Weather Events and Climate: COST Action ES1206 Final Action Dissemination Report. Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-13901-8

Johnston, G., Riddell, A., Hausler, G. (2017). The International GNSS Service. En: Teunissen P. y Montenbruck O., Eds. Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1

Landskron, D. y Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. Journal of Geodesy, 92. DOI: 10.1007/s00190-017-1066-2

Li, B., Zhang, Z., Shen, Y., Ling, Y. (2018). A procedure for the significance testing of unmodeled errors in GNSS observations. Journal of Geodesy, 92. DOI: 10.1007/s00190-018-1111-9

Lyard, F., Allain, D., Cancet, M., Carrère, L., Picot, N. (2021). FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. Ocean Science, 17(3). DOI: 10.5194/os-17-615-2021

Mackern, M.V., Mateo M.L, Camisay, M.F., Morichetti, P. (2020). Tropospheric Products from High-Level GNSS Processing in Latin America. En: Freymueller, J. y Sánchez, L., Eds. Beyond 100: The Next Century in Geodesy. International Association of Geodesy Symposia, 152. Springer. DOI: 10.1007/1345\_2020\_121

Moorefield F. (2020). GPS Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard. U.S. Department of Defense. Disponible en: <https://www.gps.gov/technical/ps/>

Oikonomou, C., Tymvios, F., Pikridas, C., Bitharis, S., Balidakis, K., Michaelides, S., Haralambous, H., Charalambous, D. (2018). Tropospheric delay performance for GNSS integrated water vapor estimation by using GPT2w model, ECMWF's IFS operational model and in situ meteorological data. Advances in Geosciences, 45, DOI: 10.5194/adgeo-45-363-2018

Perdiguer, R., Zurutuza, J., Ruiz, M., Sevilla, M. (2008). Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión. 6<sup>ta</sup> Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/23301>

Portela, J. (2019). Análisis comparativo de software y métodos de procesamiento GNSS para la obtención de posiciones y velocidades: aplicación al valle central de Costa Rica. Proyecto de Fin de Carrera. E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España

Seeber G. (2003). Satellite Geodesy, 2<sup>nd</sup> Ed. Walter de Gruyter. Berlin

Teunissen P. y Montenbruck O., Eds. (2017). Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1

van Dam, T. y Ray, R. (2010). S1 and S2 Atmospheric Tide Loading Effects for Geodetic Applications. Disponible en: <https://geophy.uni.lu/atmosphere/tide-loading-calculator>

Wallace, J. y Hobbs, P. (2006). Atmospheric Science, 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier. DOI: 10.1016/C2009-0-00034-8

Wang, J., Yu, X., Guo, S. (2022). Inversion and characteristics of unmodeled errors in GNSS relative positioning. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 195. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111151

Xu, G. y Xu, Y. (2016). GPS: Theory, Algorithms and Applications, 3<sup>rd</sup> Ed. Springer. Berlin. DOI: 10.1007/978-3-662-50367-6

Yang, F., Meng, X., Guo, J., Yuan, D., Chen, M. (2021). Development and evaluation of the refined zenith tropospheric delay (ZTD) models. Satellite Navigation, 2(1). DOI: 10.1186/s43020-021-00052-0

Yao, Y., Sun, Z. y Xu, C. (2018). Establishment and evaluation of a new meteorological observation-based grid model for estimating zenith wet delay in ground-based Global Navigation Satellite System (GNSS). Remote Sensing, 10(11). DOI: 10.3390/rs10111718

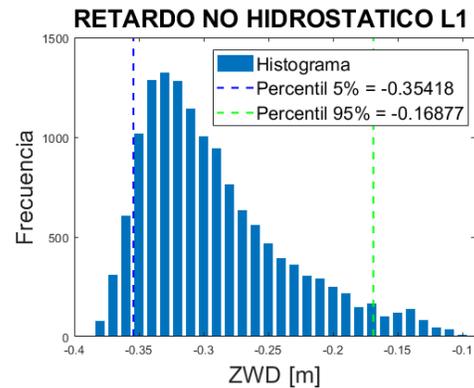
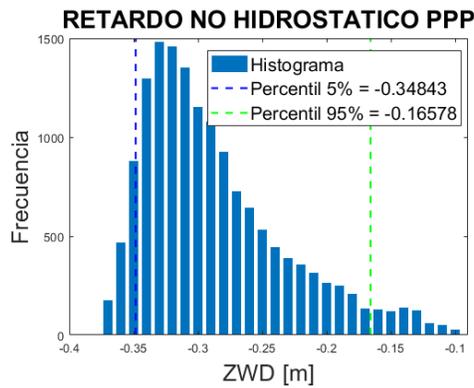
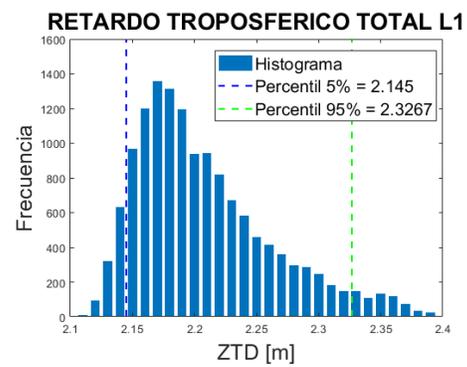
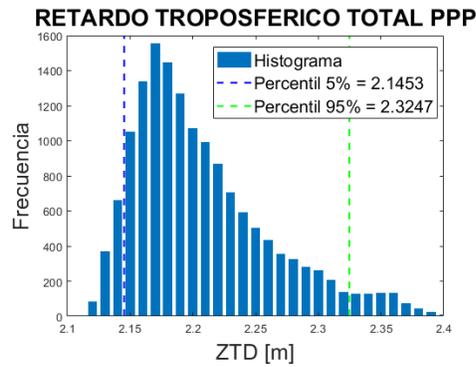
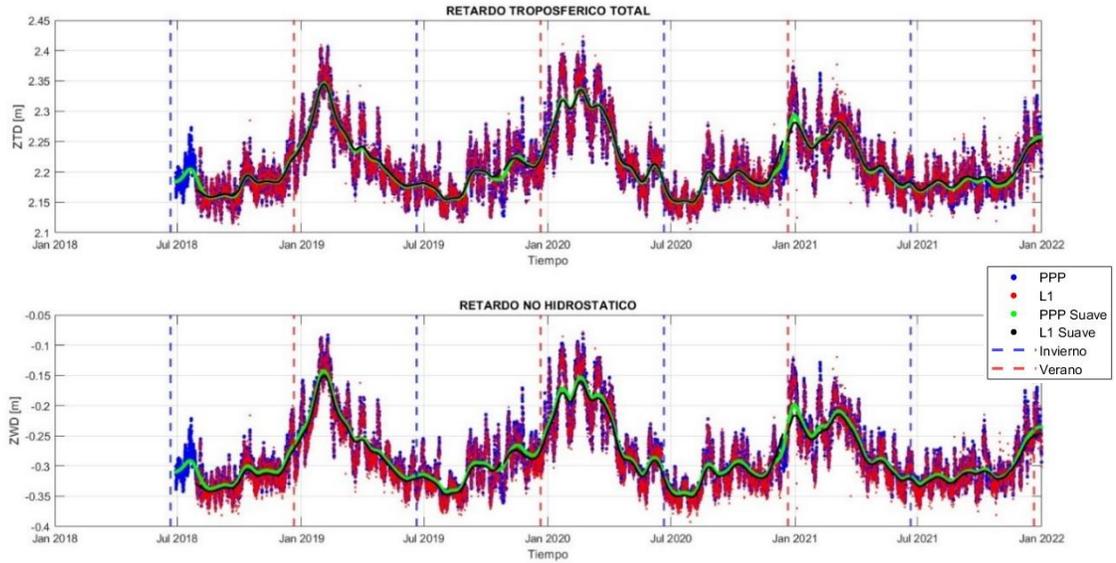
Página web:

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/regiones>

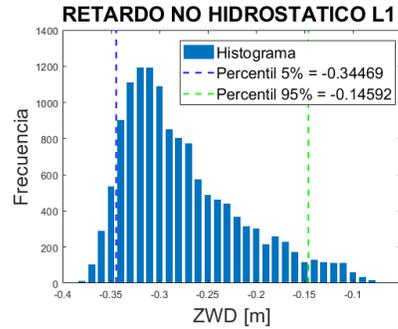
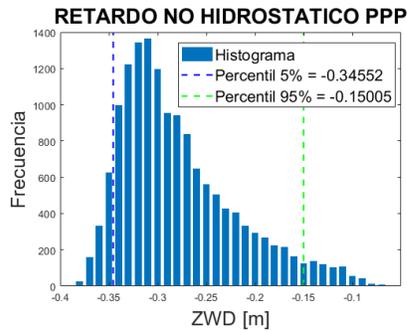
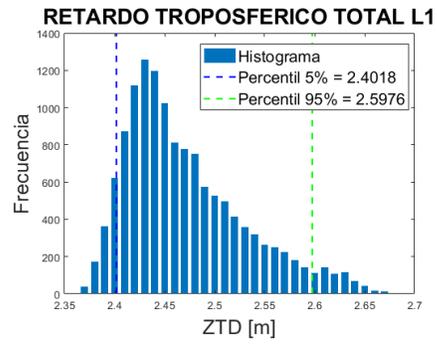
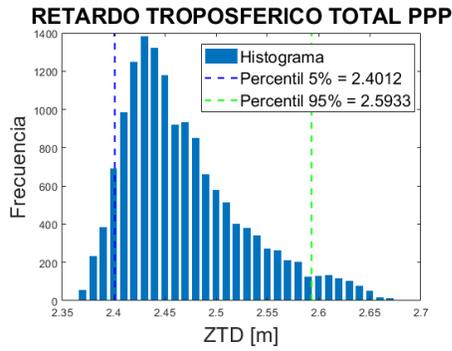
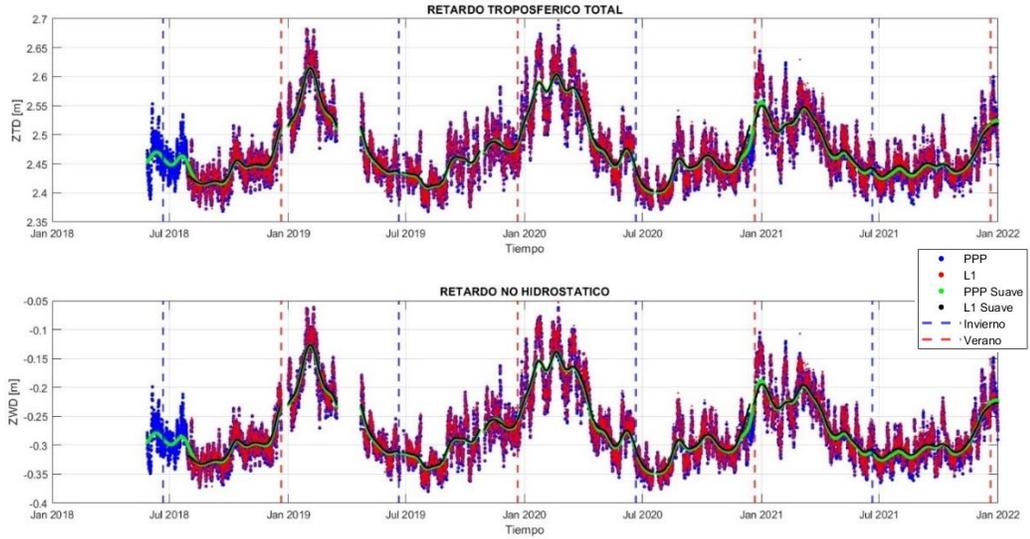
# ANEXOS

## A1. Series temporales e histogramas del ZWD estimado para las estaciones de cada Región

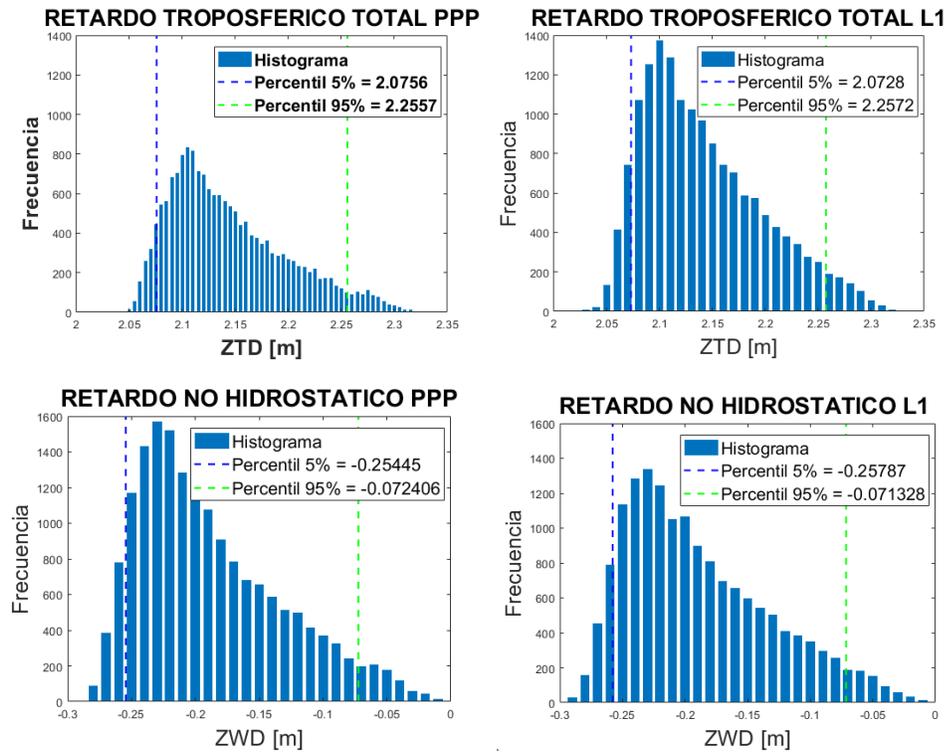
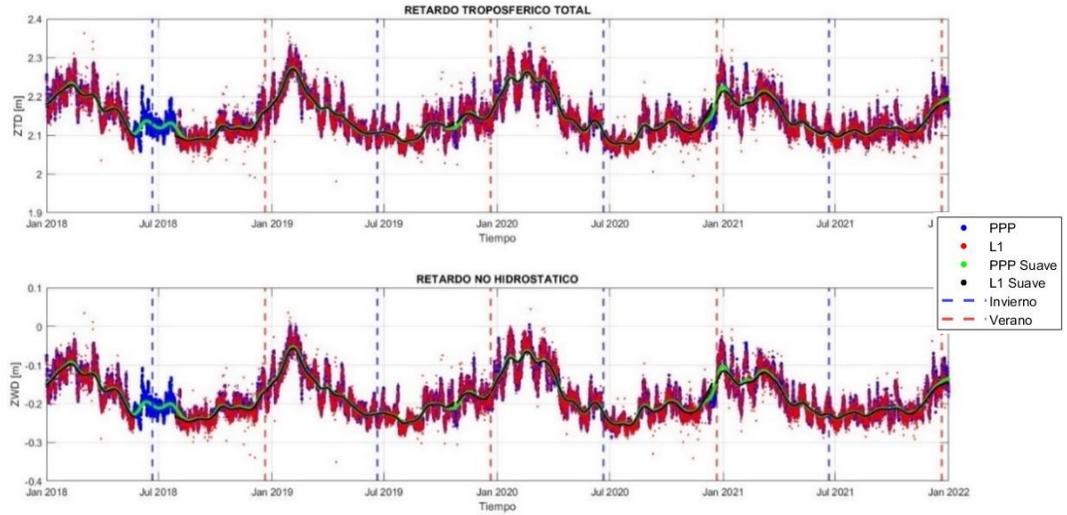
### Región de Arica y Parinacota - CMRC



## Región de Arica y Parinacota - UTAR

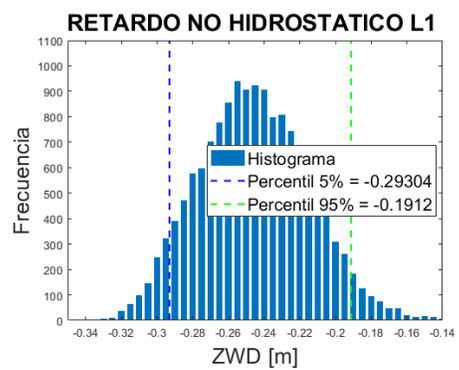
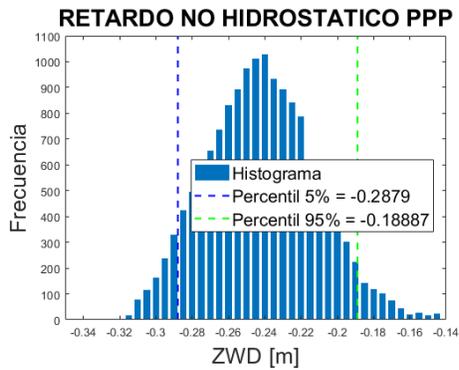
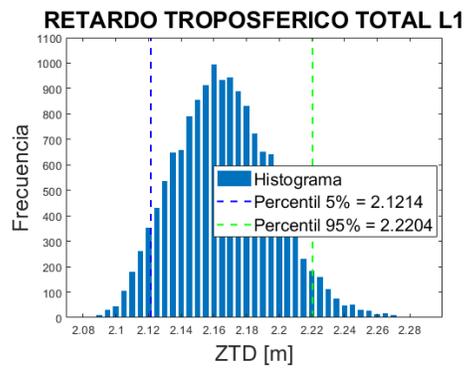
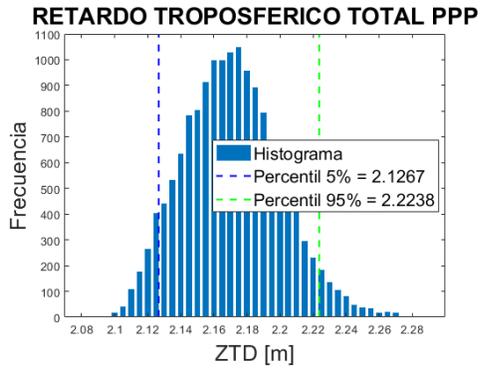
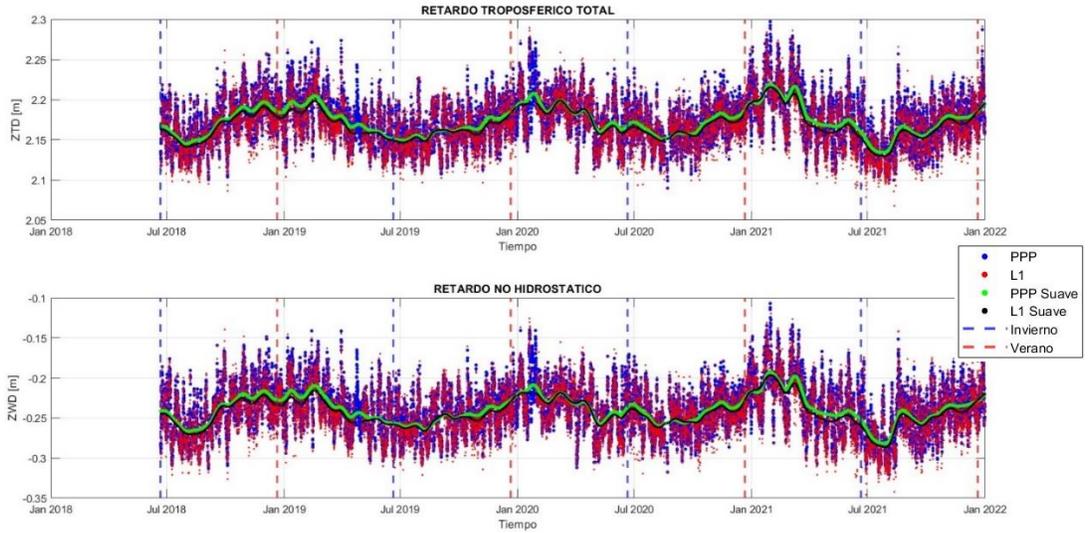


## Región de Arica y Parinacota - PCCL

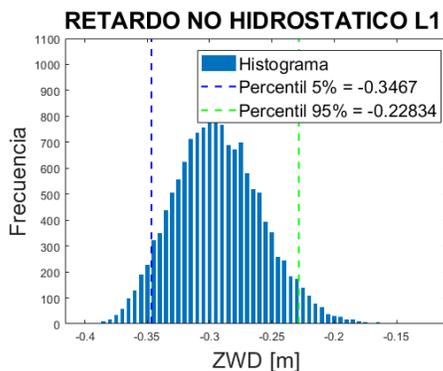
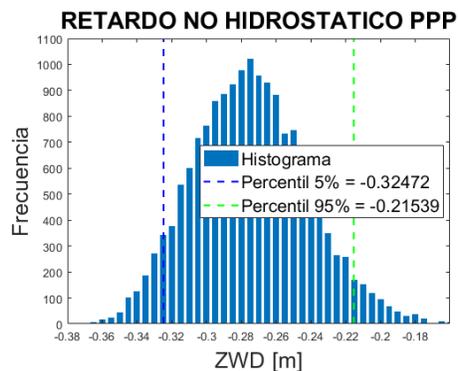
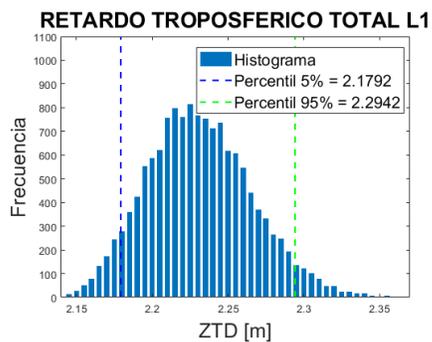
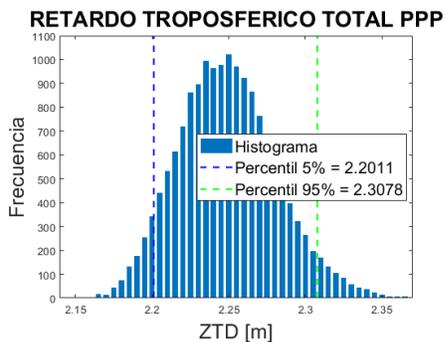
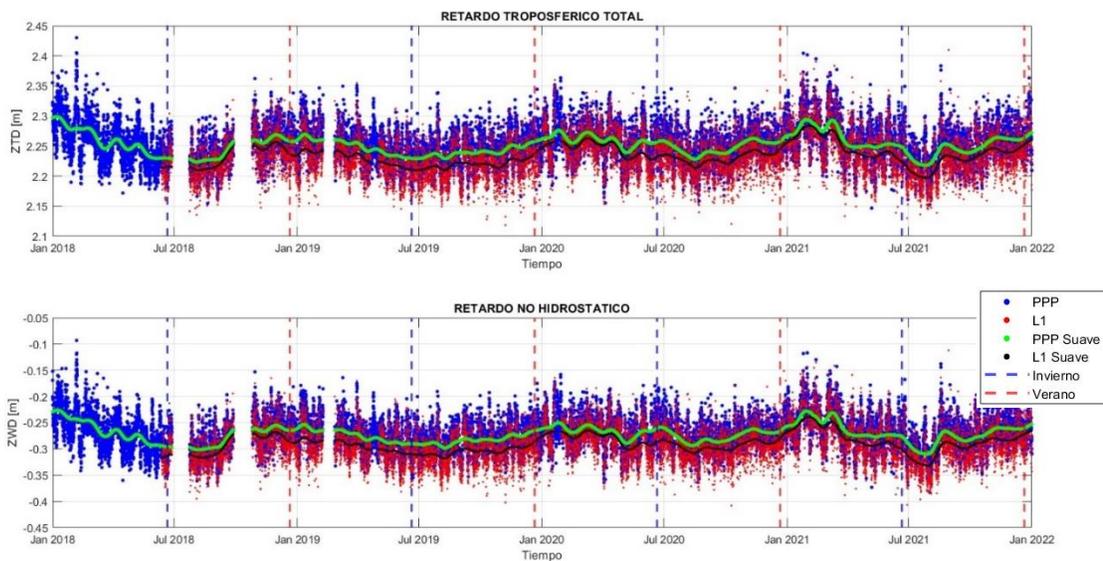


## Región Metropolitana - CALN

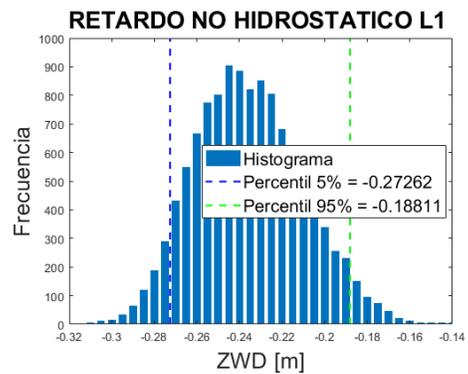
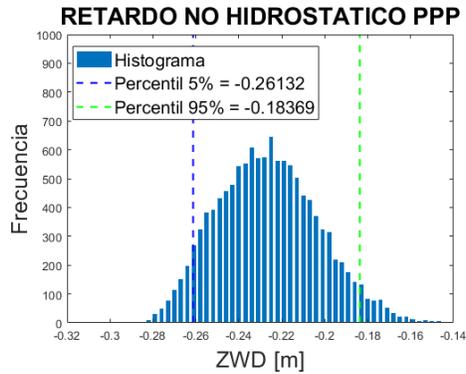
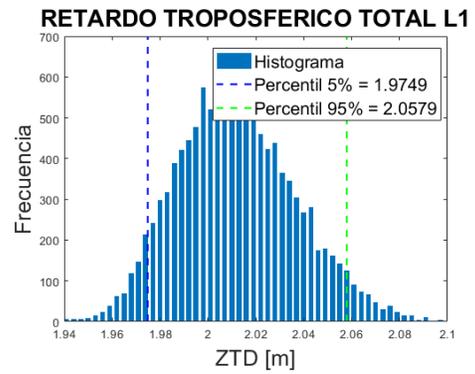
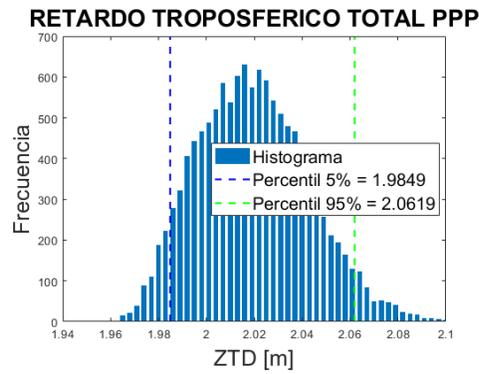
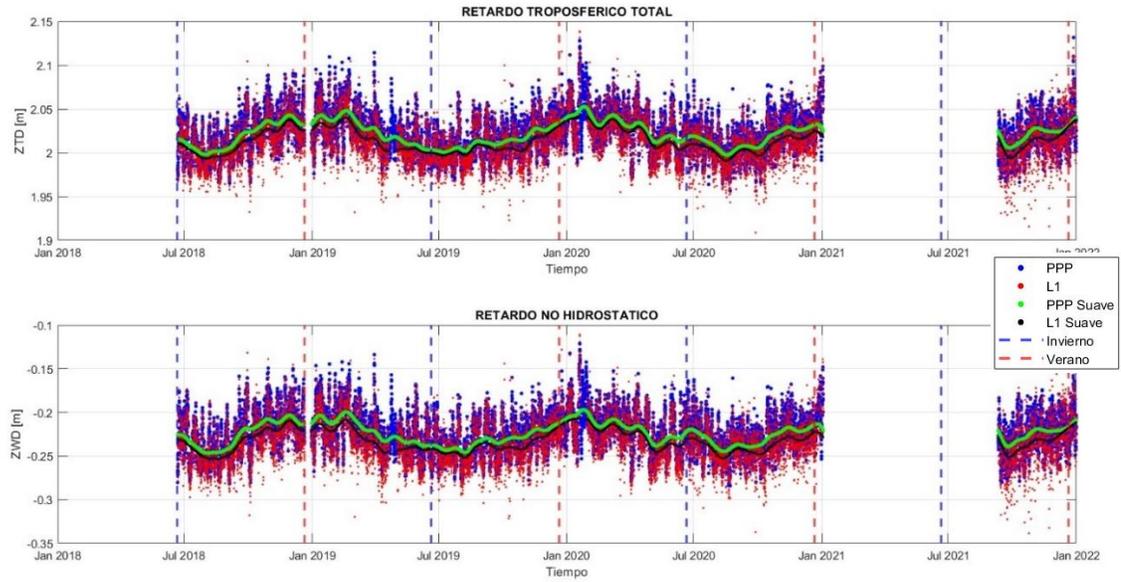
### Región Metropolitana de Santiago:



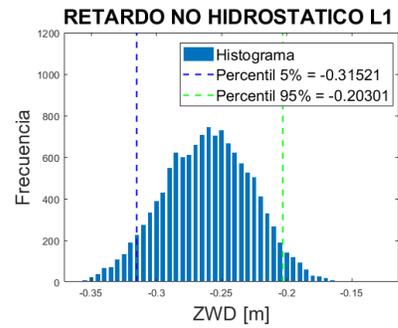
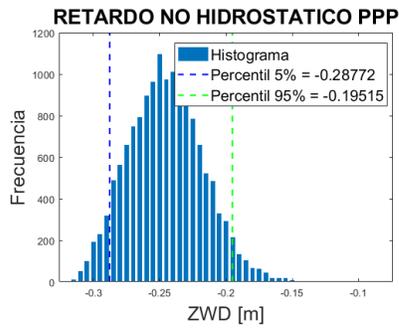
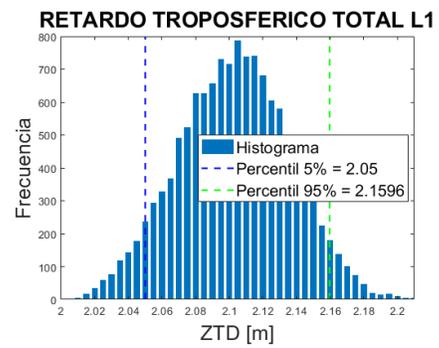
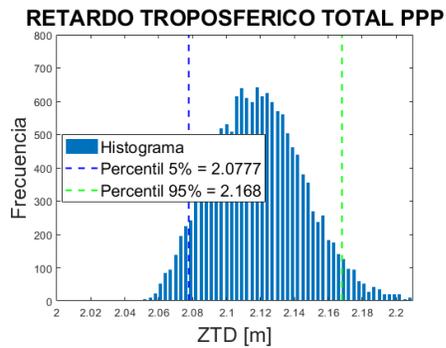
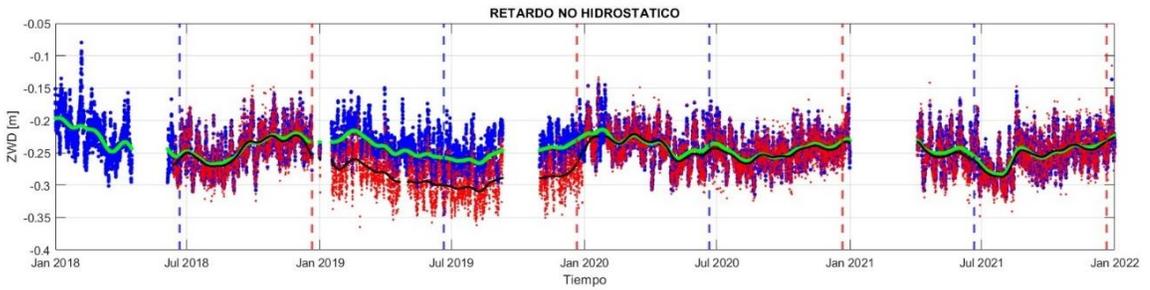
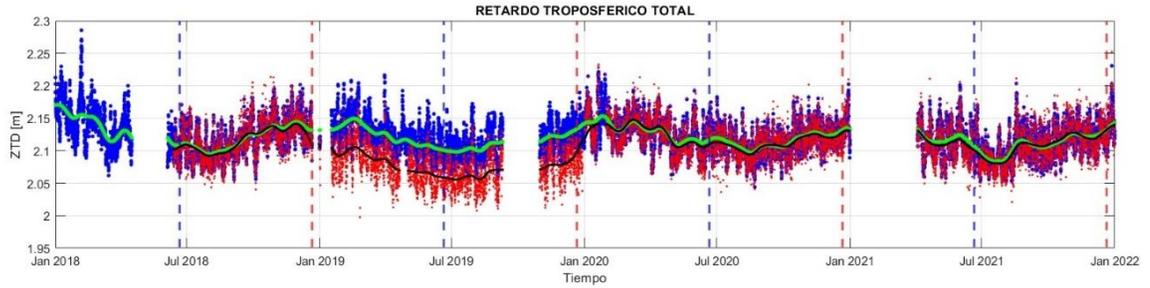
## Región Metropolitana – DGF1



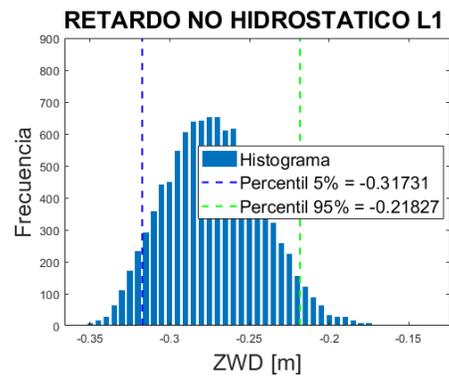
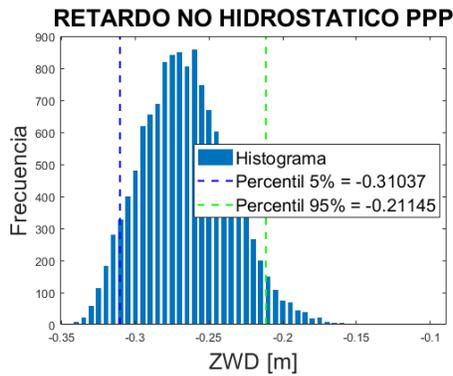
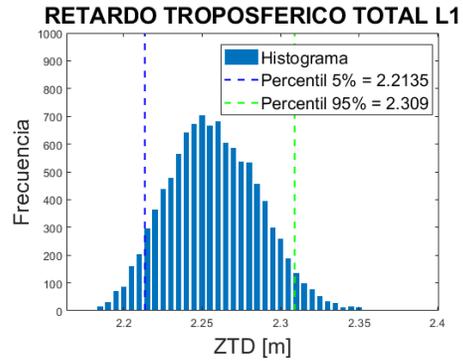
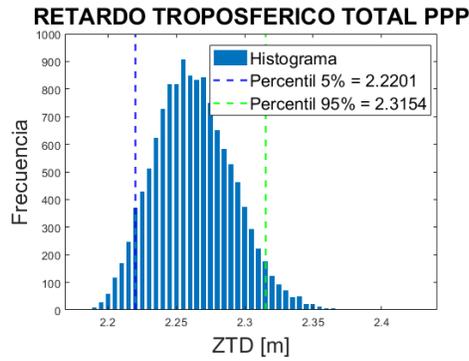
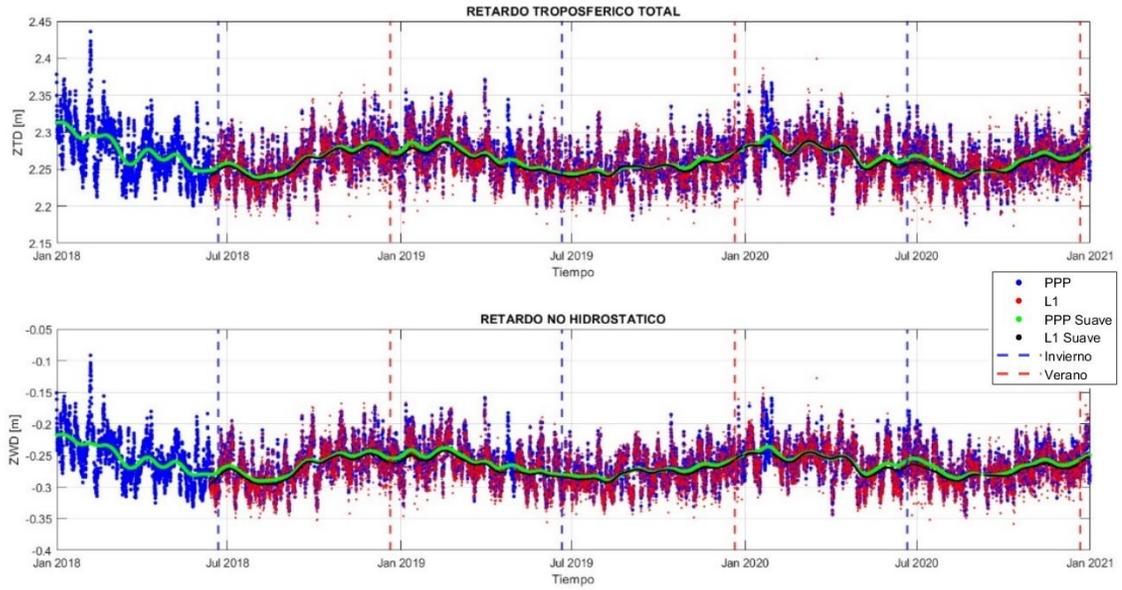
## Región Metropolitana – SMAR



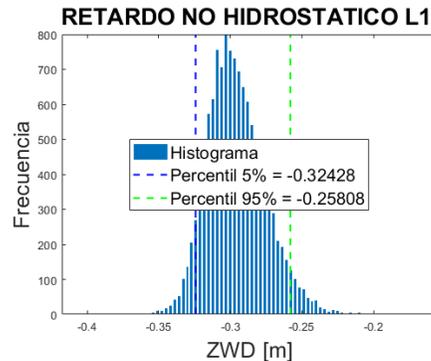
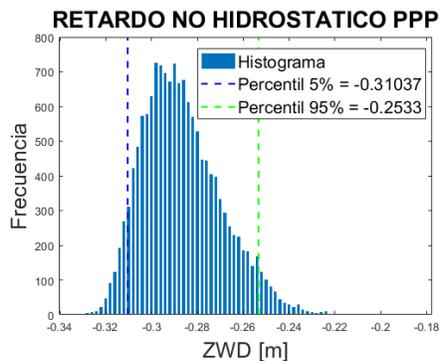
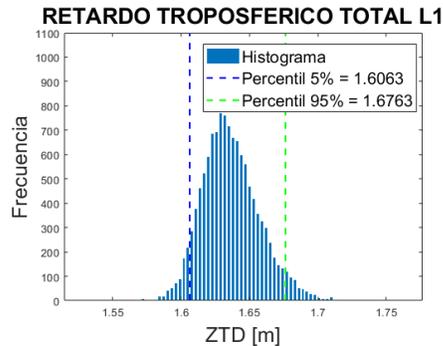
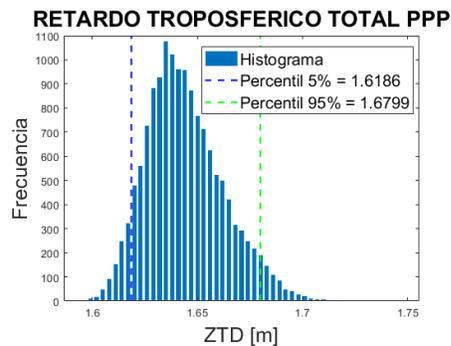
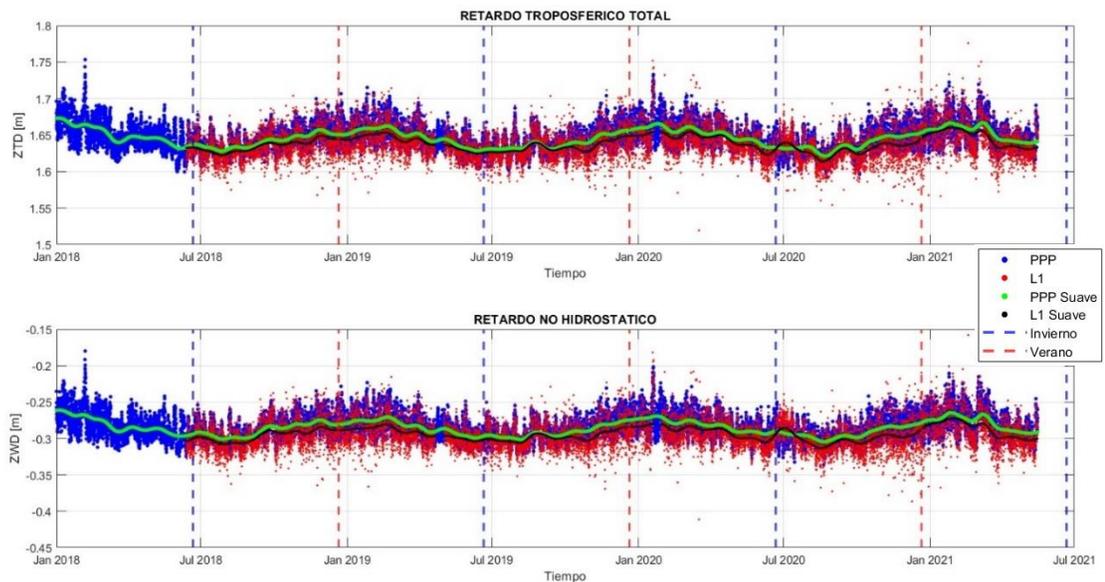
## Región Metropolitana – UAIB



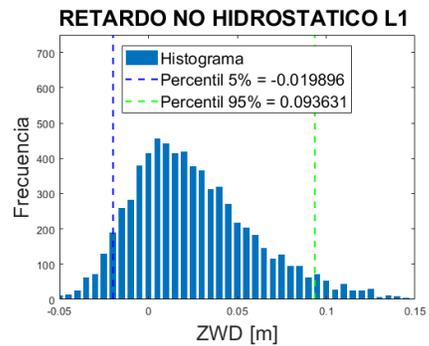
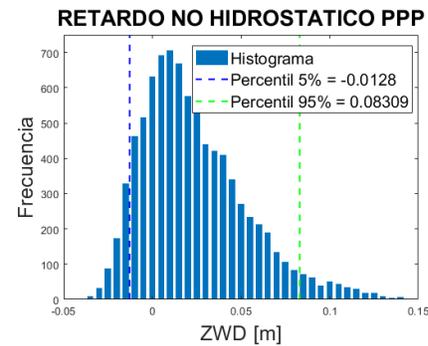
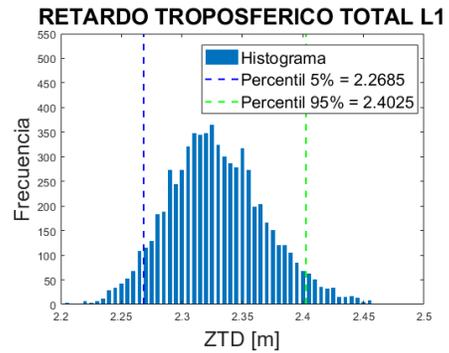
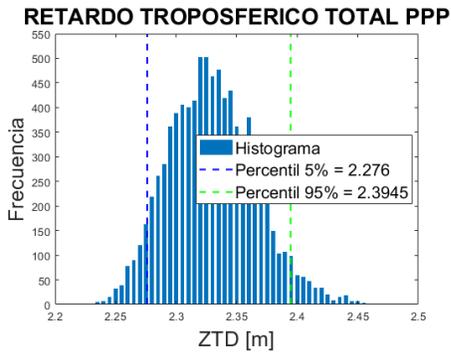
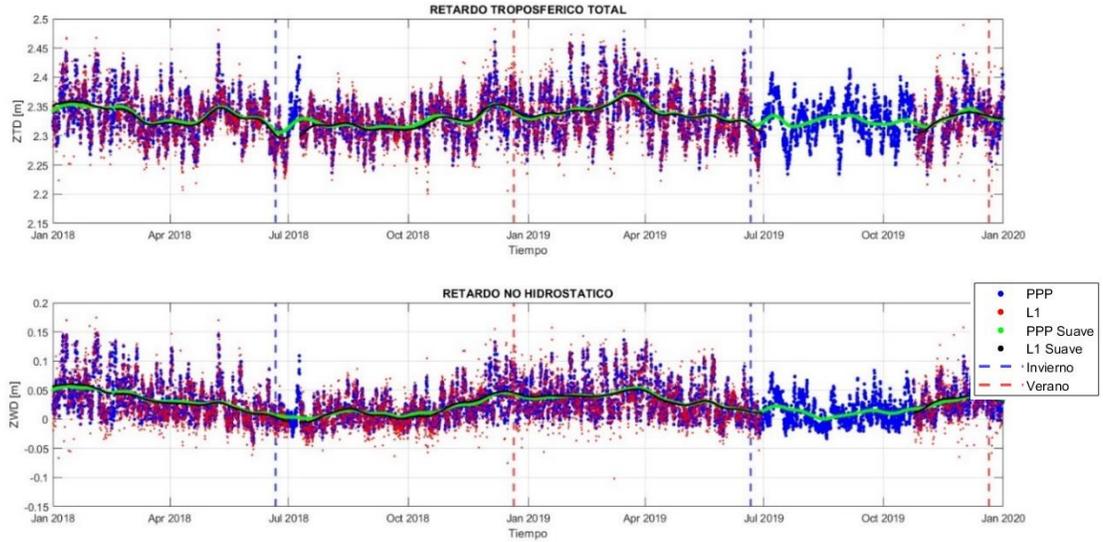
## Región Metropolitana – USCL



## Región Metropolitana – VNEV



## Región de Magallanes y Antártica Chilena – IRSC



## Congreso de Aplicaciones de la Geomática y Ciencias de la Tierra, UdeC 2024 (formato poster)

Congreso de Aplicaciones de la Geomática y Observación de la Tierra

### Estimación del retardo troposférico GPS mediante observaciones de simple frecuencia: resultados preliminares

Sergio Mardones, Bárbara Castillo, Víctor Cioce  
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática - Universidad de Concepción - Campus Los Ángeles  
smardones@udec.cl

#### 1. INTRODUCCIÓN

El posicionamiento geodésico basado en GPS (Global Positioning System) representa una de las mejores alternativas para la adquisición de datos e información geoespacial. Sin embargo, las señales de radio GNSS (Global Navigation Satellite System) experimentan desviaciones y retardos durante su paso por la atmósfera neutra (ver Figura 1), afectando la calidad del posicionamiento preciso (Boisits et al., 2020).

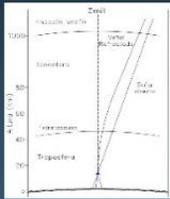


Figura 1: Refracción de la señal GNSS en la atmósfera neutra.

La Meteorología GPS/GNSS, ofrece metodologías cada vez más precisas y confiables, comparables con mediciones convencionales. Esto, debido a la implementación de técnicas geodésicas satelitales, que utilizan datos GNSS de estaciones de operación continua para estimar y analizar información de la atmósfera, aplicable en el campo de las Ciencias Atmosféricas (Cioce et al., 2017).

Estimar el Retardo Zenital Troposférico (ZTD) es fundamental para aplicaciones geodésicas y meteorológicas del GNSS, debido a que es una importante fuente de error al momento de determinar posicionamiento preciso, además, es la variable clave para poder recuperar el Vapor de Agua Precipitable (PWV) (Oikonomou et al., 2018).

El 80% del ZTD se lo atribuye a su componente hidrostática ZHD (Zenith Hydrostatic Delay), que a nivel del mar equivale a 2.3 m. Si 10% restante es aportado por el componente no-hidrostática ZWD (Zenith Wet Delay), la cual se relaciona con la distribución espacio-temporal del vapor de agua en la troposfera.

Diversos estudios destacan la confiabilidad del Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) de doble frecuencia para la estimación de parámetros atmosféricos (Boisits et al., 2020; Cioce et al., 2017), no obstante, estimaciones de simple frecuencia siguen siendo desafiantes.

#### 2. OBJETIVO

En este trabajo se evalúa la estimación de los componentes del Retardo Zenital Troposférico (ZTD) a partir de observaciones GPS de simple frecuencia.

Para lograrlo, estimaciones del ZTD fueron contrastadas con resultados de mayor confiabilidad como los obtenidos por un procesamiento riguroso PPP con base en observaciones de doble frecuencia. El Bernese GNSS Software v5.2 (Dach et al., 2015), fue utilizado ya que cuenta con numerosas herramientas científicas que cumplen los más altos estándares de calidad en cuanto al análisis de este tipo de observaciones geodésicas se refiere.

**Referencias:**

Boisits, J., Gómez W., Winkler R. (2020). Reparametrization of Regional High Precision Atmospheric Delay Model and Its Application to Multi-Point Positioning. *Remote Sens.* 12, 2098. <https://doi.org/10.3390/rs12102098>

Cioce V., Mardones S., Acosta J., Winkler R., Reyes V. (2017). Estimación de retardos troposféricos sobre estaciones GNSS de operación continua mediante un procesamiento geodésico de punto preciso. *Revista de Ingeniería*, 33(2), 34-40.

Dach R., Larić S., Walser P., Fritsch D. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Automated Institute, University of Bern, DOI: 10.19103/Bern.12257

#### 3. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo abordó tres regiones de Chile (ver Figura 2), la Región de Arica y Parinacota (ver Figura 3), la Región Metropolitana (ver Figura 4) y la Región de Punta Arenas.



Figura 2: Área de estudio.

Figura 3: Red formada por estaciones de monitoreo continuo en Arica y Parinacota.

Figura 4: Red formada por estaciones de monitoreo continuo en la Región Metropolitana.

Para obtener resultados óptimos con simple frecuencia se utilizó el método de estimación relativa, formando líneas-base cortas (<30 km), criterio esencial cuando se trata de implementar dobles-diferencias L1. Además, se fijaron parámetros del retardo troposférico en aquellas estaciones fiduciales para cada arreglo. La metodología empleada se orientó hacia la máxima reducción posible de las distintas fuentes de error a fin de calcular únicamente el ZWD como variable, pues el ZHD es dado por la VMF3 y ambos a su vez definen el ZTD.

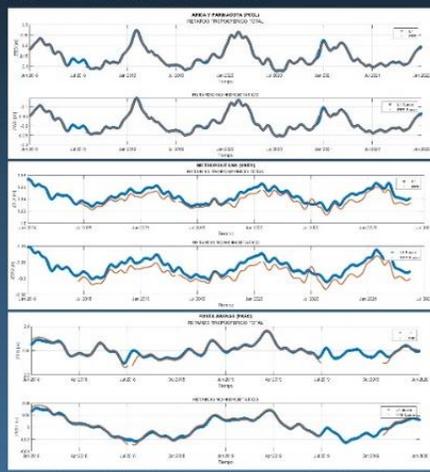


Figura 5: Series temporales PCCCL, VNEV, PABIC de las Regiones Arica y Parinacota, Metropolitana y Punta Arenas respectivamente, totales y sustraidas.

#### 4. DATOS Y MÉTODOS

Las estaciones GPS consideradas (ver Tabla 1), son operadas por el Centro Sismológico Nacional (CSN), disponiendo de datos que abarcan un periodo de cuatro años (2018 - 2021), a excepción de aquellas ubicadas en Punta Arenas. Los datos fueron procesados bajo estándares de estimación geodésica según las Convenciones del IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), IGS (International GNSS Service) y SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésica para las Américas).

Arica y Parinacota	Metropolitana	Punta Arenas	SD [mm]		RMSE [mm]	
			PPP	Relativo	PPP	Relativo
CHYT	CALN - CHEN	IRSC	(1.1 ± 1.2)	1.1	(1.1 ± 1.7)	1.1
CANC	DGTA - SANF	PABIC	0.543	1.12	1.9	7.9
IACB	SMAR - LIAB	PTAR				
PCCCL	USCL - VNEV					
UTAR	VZDH					

Tabla 1: Estaciones de monitoreo continuo seleccionadas.

#### 5. ANÁLISIS:

A partir del análisis cuantitativo y comparativo de las series temporales mostradas en la Figura 5, se pudo apreciar la bondad tanto de PPP (1.2) como del procesamiento relativo con simple frecuencia. El retardo con L1 revela estrecha similitud respecto al patrón de comparación, sin distinción debida a diferencias climáticas y geográficas, permitiendo convalidar la metodología de cálculo. Algunos estadísticos referenciales son mostrados en la Tabla 2.

Región	SD [mm]		RMSE [mm]	
	PPP	Relativo	PPP	Relativo
Arica y Parinacota (PCCCL)	0.543	1.12	1.9	7.9
Metropolitana (VNEV)	0.636	1.03	1.9	7.8
Punta Arenas (PABIC)	0.534	1.87	1.9	7.5

Tabla 2: Desviación estándar y error medio cuadrático.

Los valores máximos del retardo total PPP y Relativo en la Región de Arica y Parinacota son de 2.27m y 2.28 m respectivamente. Aquellos resultados propios de la Región Metropolitana presentan una mayor diferencia en comparación a las otras Regiones, si bien, siguen la tendencia del patrón, tales discrepancias llaman la atención pues se aplicó la misma estrategia de procesamiento, lo que sugiere la presencia de efectos asociados a la geometría del arreglo y a las condiciones propias de las observaciones GNSS en el entorno urbano de la Región Metropolitana. Al respecto, se toma como ejemplo la estación Valle Nevado (VNEV), situada a los pies de la cordillera, el retardo máximo fue de 1.66 m con PPP y 1.67m con simple frecuencia.

Al tratarse de resultados en fase preliminar, lo hasta ahora evaluado, considerando la debilidad propia de las observaciones con simple frecuencia para la estimación troposférica, ampliamente reportada en la bibliografía especializada, puede hacer posible el desarrollo de alternativas que faciliten el seguimiento de variables meteorológicas.

#### 6. CONCLUSIONES:

- Se logró diseñar y aplicar una metodología óptima para la obtención del retardo troposférico zental a partir de datos GPS de simple frecuencia.
- La obtención del ZTD con receptores de bajo costo puede beneficiar el desarrollo de la Meteorología GNSS en el país.
- La calidad de la estimación relativa L1 es totalmente aceptable si se compara con resultados sustraidos por estrategias de cálculo como el PPP, adaptadas por entidades internacionales como el IGS.
- Gracias a la confección de series temporales es posible analizar el comportamiento y/o variabilidad del retardo, lo que implica un análisis apropiado y consecuente con el fenómeno físico en cuestión.



## Encuentro de Investigación UdeC 2024 (presentación oral)



Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática  
Universidad de Concepción - Campus Los Ángeles

Encuentro de Investigación UdeC 2024

### Estimación del vapor de agua atmosférico en la Región del Biobío a través de observaciones satelitales GNSS: resultados preliminares

Víctor Cioce, Andreaw Rifo, Bárbara Castillo, Sergio Mardones

Concepción, Chile  
enero - 2024

#### Resumen

Desde el punto de vista de las Ciencias Atmosféricas, la cuantificación espacio-temporal del vapor de agua atmosférico resulta de interés fundamental, ya que este gas ejerce influencia directa en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos y climáticos diversos, además de considerarse como uno de los principales gases de efecto invernadero. Por otra parte, es sabido que el posicionamiento preciso mediante técnicas geodésicas satelitales implica un tratamiento particular de la señal que permite la elaboración de la observable, pues al refractarse durante su paso por las capas atmosféricas, introduce errores considerables que degradan la calidad de las determinaciones. Durante años, ambos escenarios han permitido el desarrollo continuo de sinergias entre la Geodesia como disciplina de servicios, y las Ciencias Atmosféricas, utilizándose el término genérico Meteorología GNSS. En América Latina, existen avances significativos en la materia, gran parte de ellos sustentados por SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésico para las Américas). Siendo Chile un país con características geográficas particulares, que lo hacen vulnerable a efectos propios de la dinámica terrestre y su proceso de cambio, la existencia de una infraestructura geodésica que contribuya con el seguimiento y modelado de la variabilidad en la distribución del vapor de agua no puede considerarse una alternativa sino una necesidad. Por esta razón, estudios preliminares orientados a promover el análisis rutinario de observaciones GNSS para la recuperación del vapor de agua, están siendo adelantados por el DCGG-UdeC, tomando la Región del Biobío como área de ensayo. Se presentan los primeros resultados y perspectivas futuras.