



**XXXVIII Simposio Nacional
de Prevención de Desastres
Ciencia e Ingeniería para proteger
vidas ante terremotos y tsunamis**

Monitoreo sísmológico con datos GNSS de alta velocidad en la Estación de Rastreo Permanente del CISMID-FIC-UNI

Por el Bach. Oscar Solis Garcia

Jorge Mendoza, Miguel Estrada, Carlos Gonzales, Fernando García, Lab. Geomática

IIFIC 24-2025-003942

Lima, 27 de mayo

1. Introducción

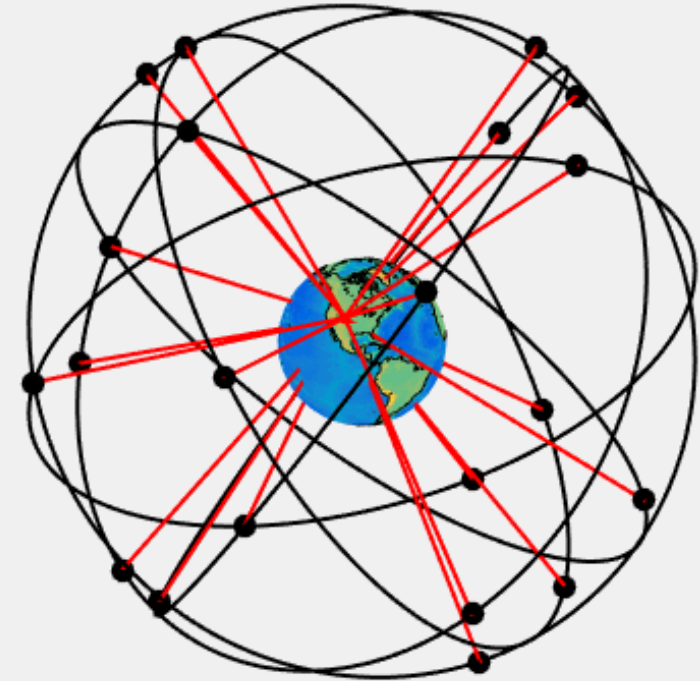
a los Sistemas de Navegación por Satélite



GNSS

Sistema Global de Navegación por Satélite

Los satélites de navegación transmiten señales de radio que contienen información sobre sus orbitas, de tiempo y de otro tipo. Esta información se puede captar mediante una antena especial y procesar con un receptor GNSS que permite determinar la posición sobre la superficie terrestre o en plataformas móviles.



<https://medium.com/@mikeg888/what-is-gps-gnss-fd0092a794ea>

Componentes

Segmento espacial

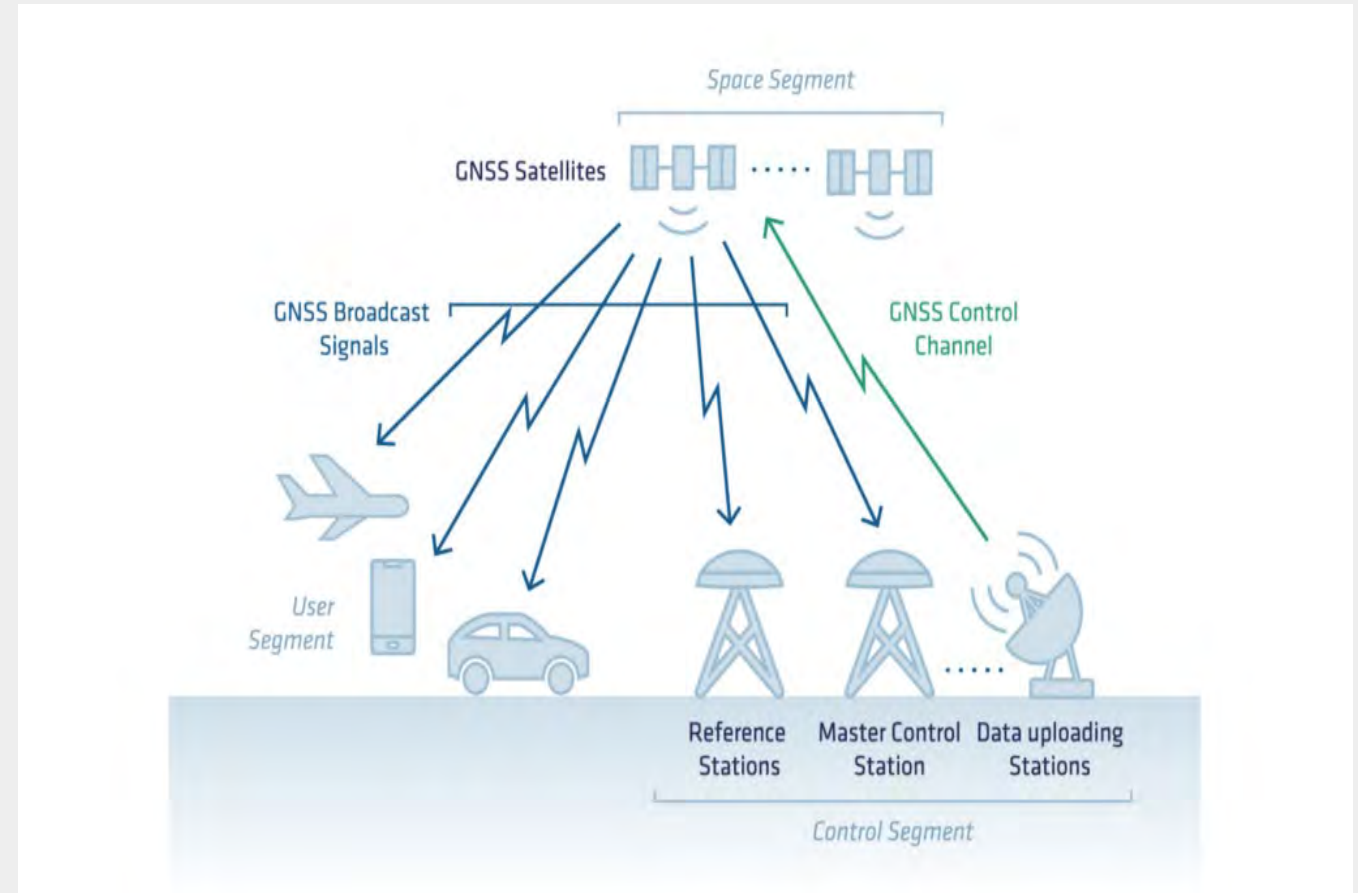
Hace referencia a los satélites que orbitan la tierra tanto de navegación como de comunicación, así como las diferentes señales que envían y reciben

Segmento de control

Compuesto por estaciones de control en tierra y equipos, que monitorizan el segmento espacial y determinan con precisión sus órbitas, relojes, entre otros productos.

Segmento usuario

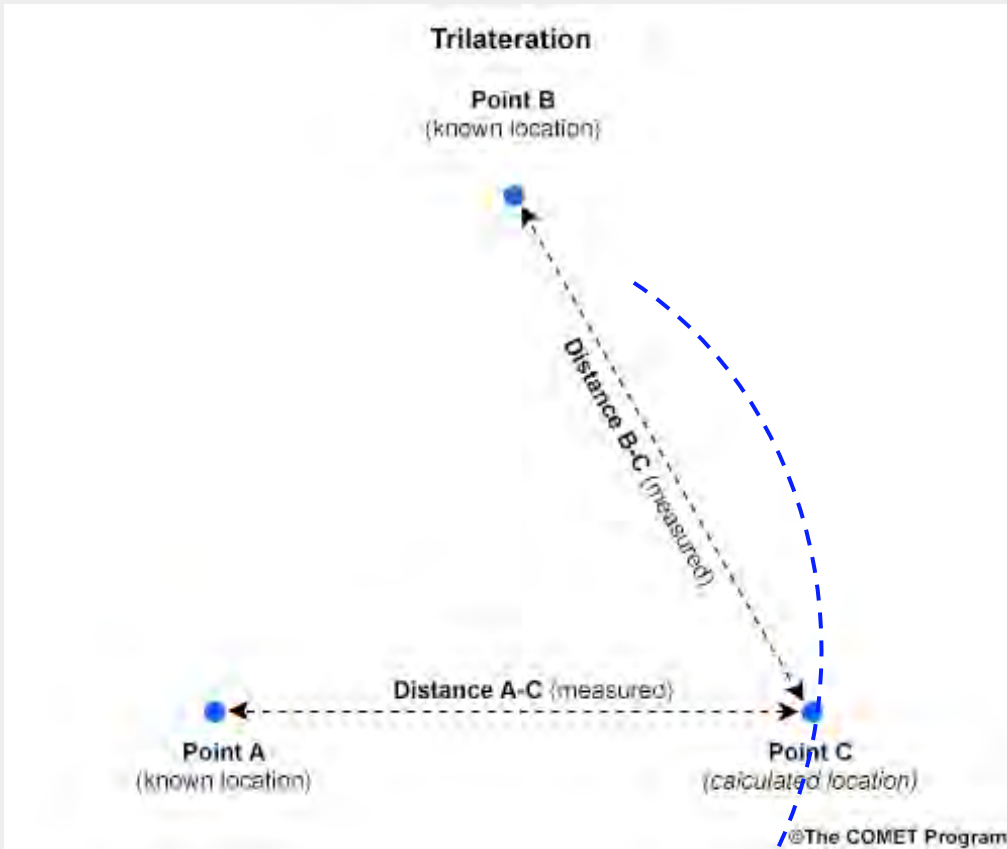
Todo equipo que decodifica la información satelital y es utilizado para calcular una posición basada en las señales recibidas de los satélites.



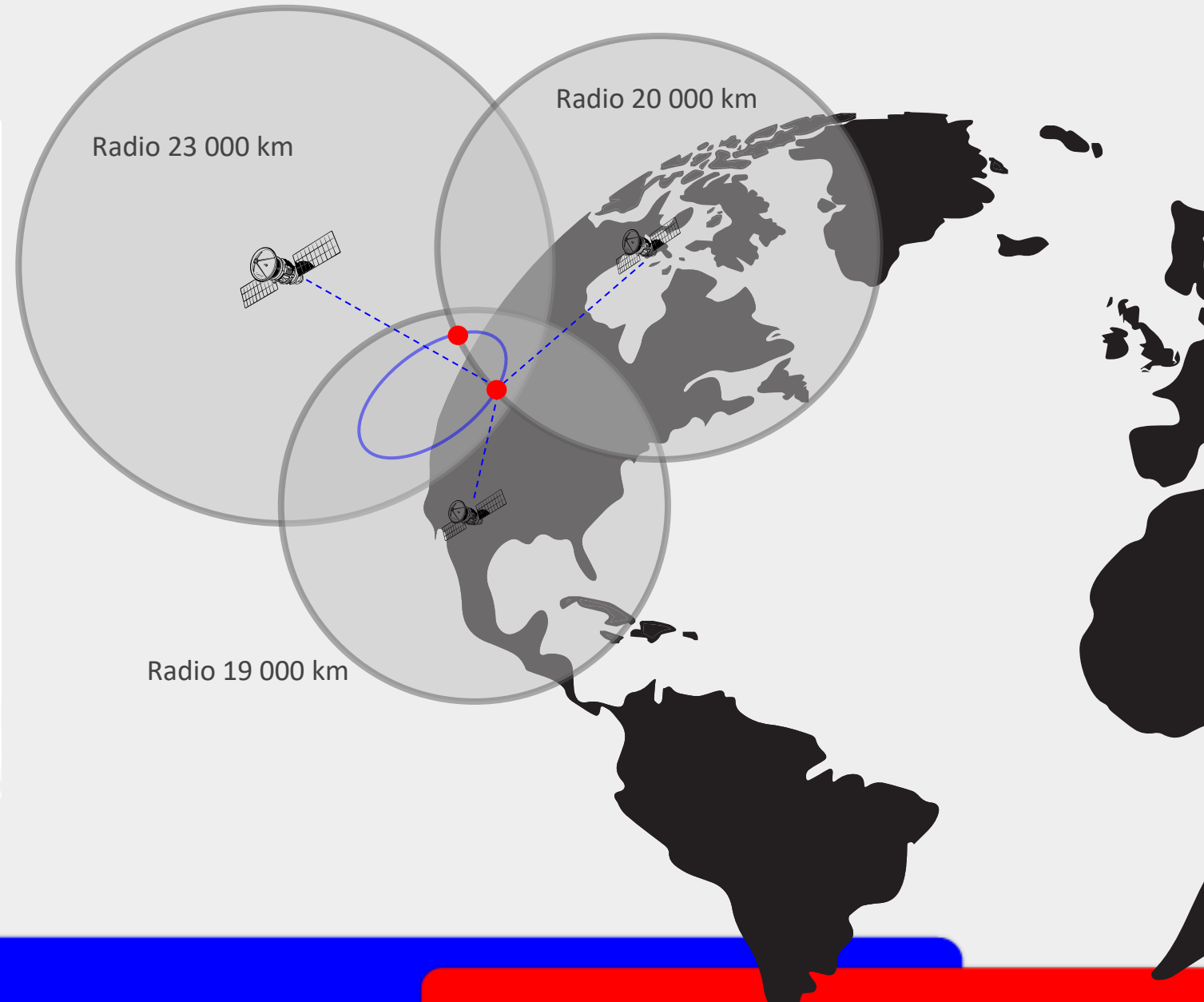
<https://www.sbg-systems.com/es/technology/gnss-and-their-error-sources/>

Principio de posicionamiento

Principio de posicionamiento por trilateración



The COMET Program: Foundations of Global Navigation Satellite Systems (GNSS)



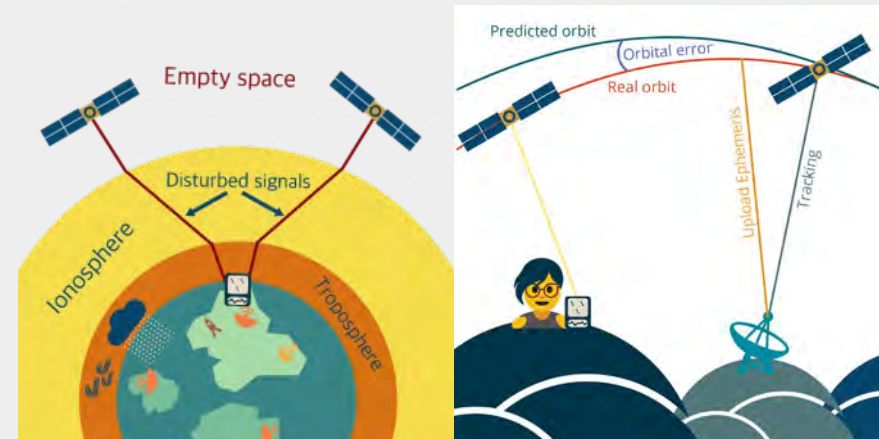
Posicionamiento GNSS

- La posición del receptor se estima a partir de las distancias satélite–receptor obtenidas mediante las señales GNSS.
- En teoría, se requieren al menos 4 satélites para determinar las tres coordenadas espaciales y corregir el desfase del reloj del receptor.
- En aplicaciones geodésicas se utilizan múltiples satélites, observables de código y fase, y un ajuste por mínimos cuadrados para obtener soluciones de mayor precisión.

Fuentes de error

- Errores orbitales y de reloj satelital.
- Retrasos ionosféricos y troposféricos.
- Multitrayectoria y ruido del receptor.
- Errores asociados a la antena, mareas y efectos geodinámicos.

Estas fuentes de error deben modelarse o corregirse adecuadamente para alcanzar soluciones precisas mediante técnicas



<https://usq.pressbooks.pub/gpsandgnss/chapter/3-5-errors-in-gnss/>

Métodos de posicionamiento

MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO GNSS

RELATIVO

ABSOLUTO

POST PROCESO

TIEMPO REAL

FASE CODIGO

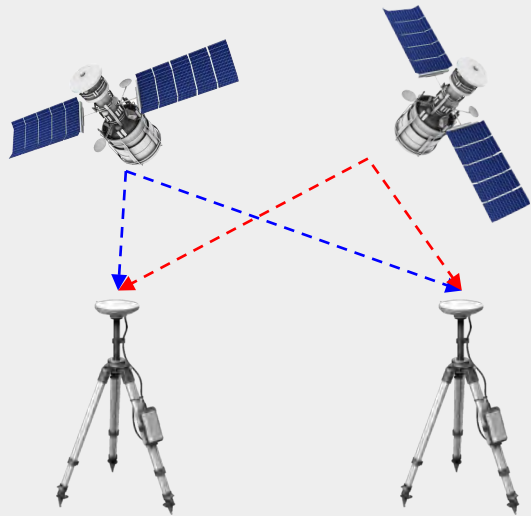
POSICIONAMIENTO DE PUNTO PRECISO (PPP)

ESTÁTICO

CINEMÁTICO

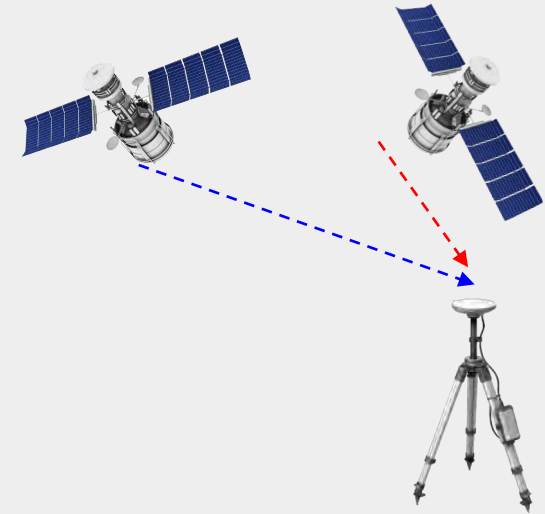
DGPS

REAL TIME KINEMATICS (RTK)



Estación GNSS N°1

Estación GNSS N°2

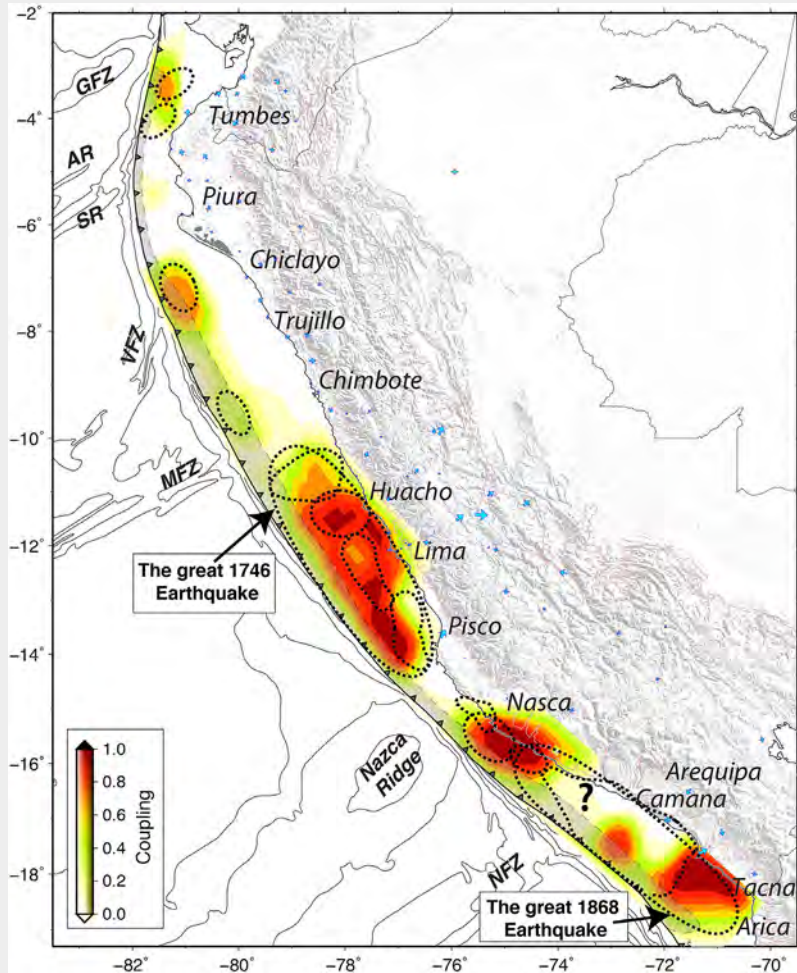


Estación GNSS ÚNICA

2. Problemática

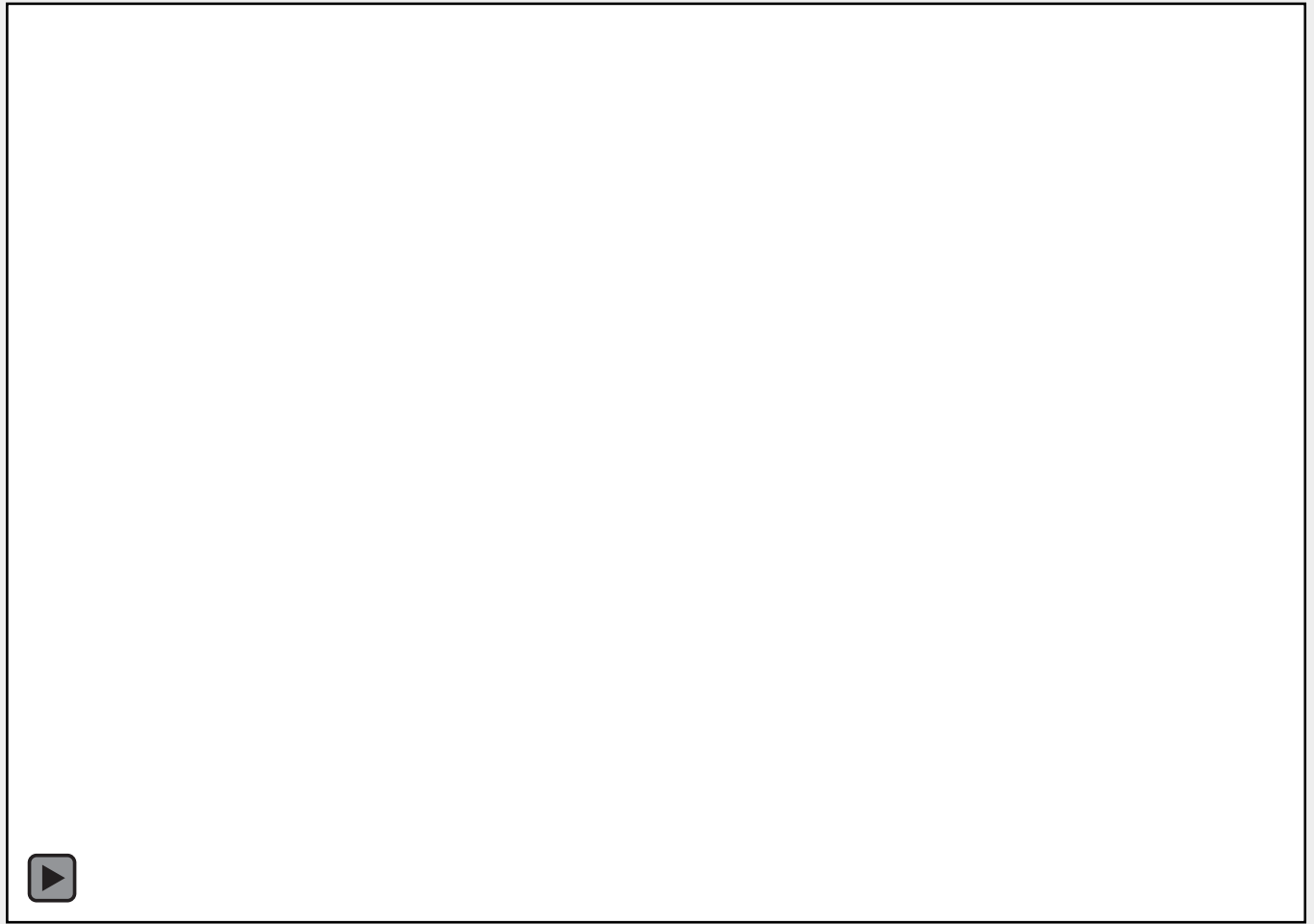


Acoplamiento intersísmico



Villegas-Lanza et al., 2016

Deformación cortical



Red Geodésica Peruana de Monitoreo Continuo (REGPMOC)

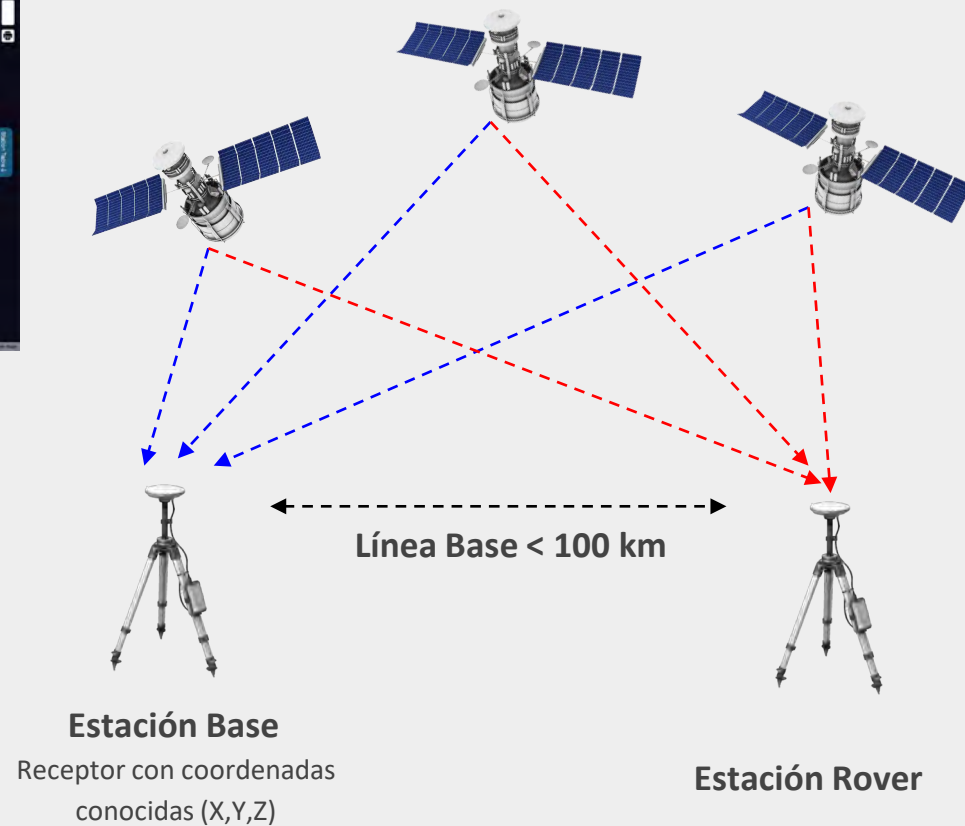


Visor de ERPs del IGN

IGS Network



Posicionamiento Relativo



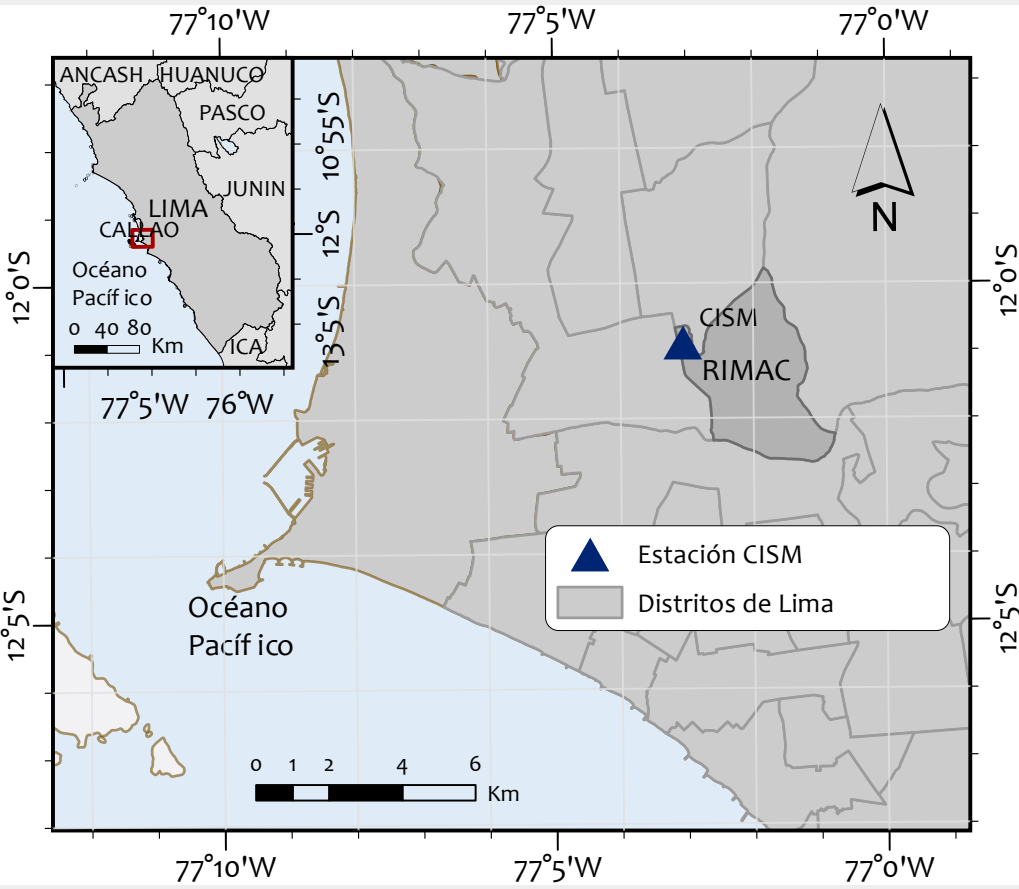
3. Fuente de datos



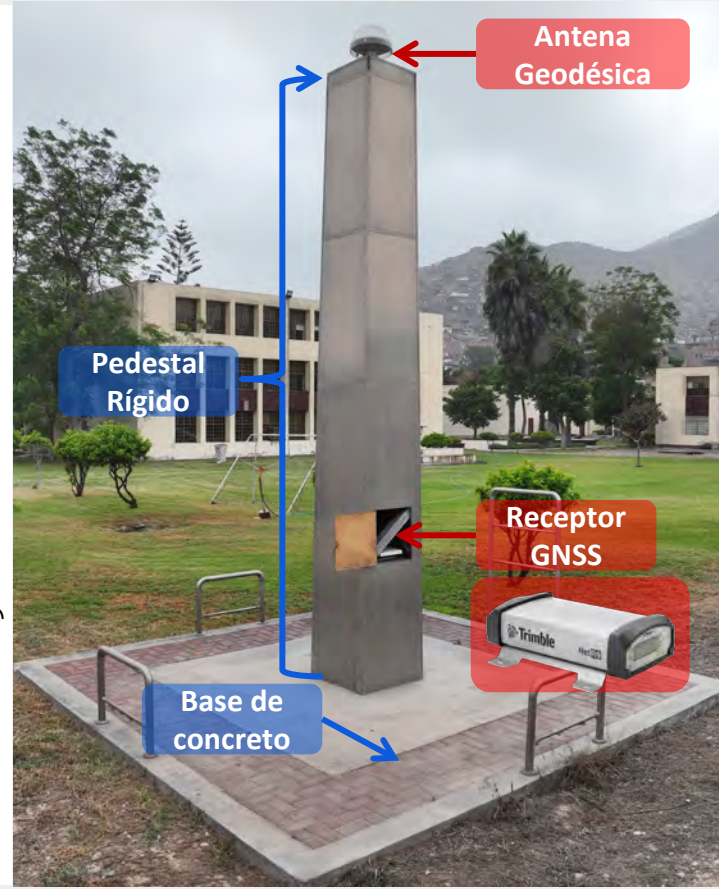
REMCOT (RED DE MONITOREO DE LA CORTEZA TERRESTRE) - CEOIS

ERP

Estación de Rastreo Permanente del CISMID

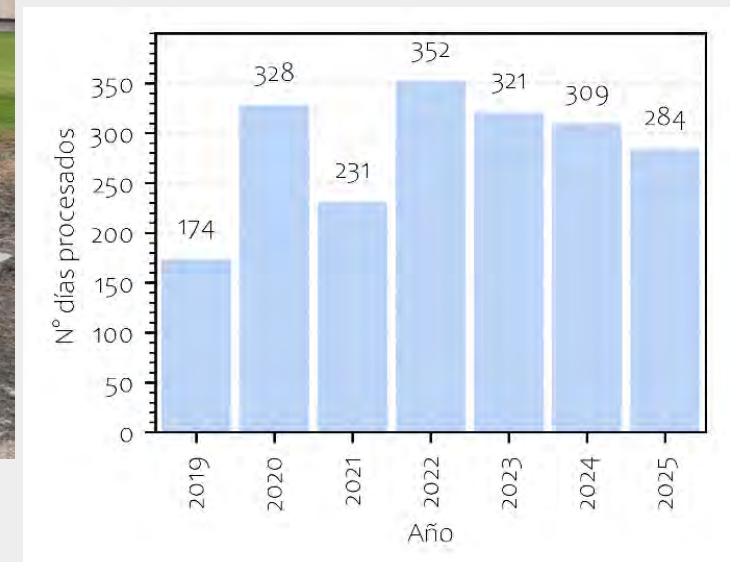


Ubicación de la ERP del CISMID



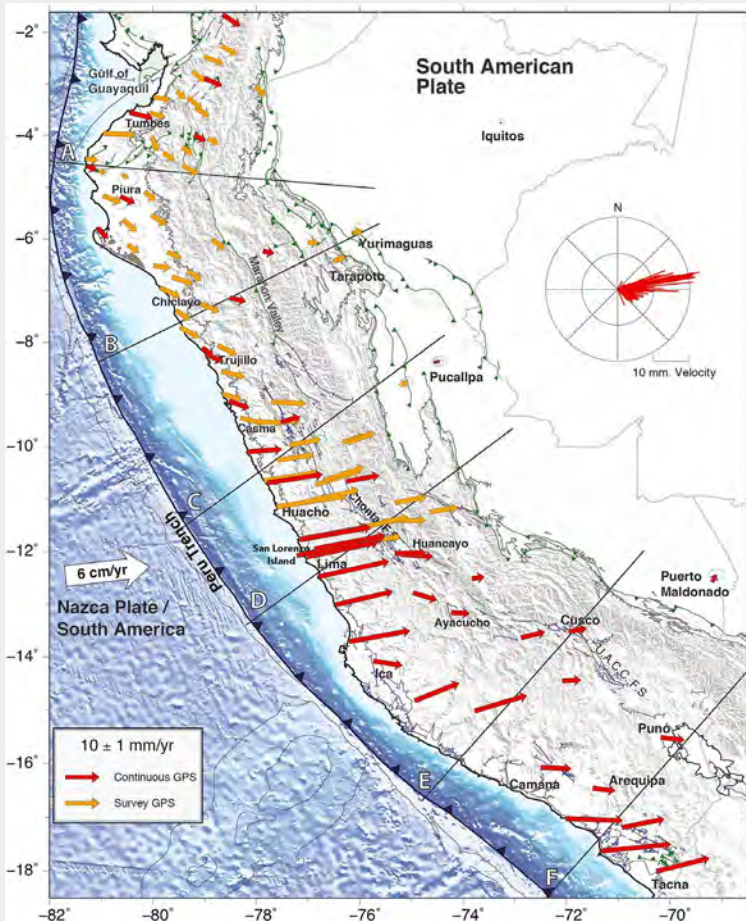
Monumentación de la ERP del CISMID

Parámetro	Especificación
Receptor	Trimble NetR9
Antena	Zephyr Geodetic Model 2
Canales	440
Constelaciones	GPS, GLONASS, Galileo
Precisión estática horizontal	3 mm + 0.1 ppm RMS
Precisión estática vertical	3.5 mm + 0.4 ppm RMS

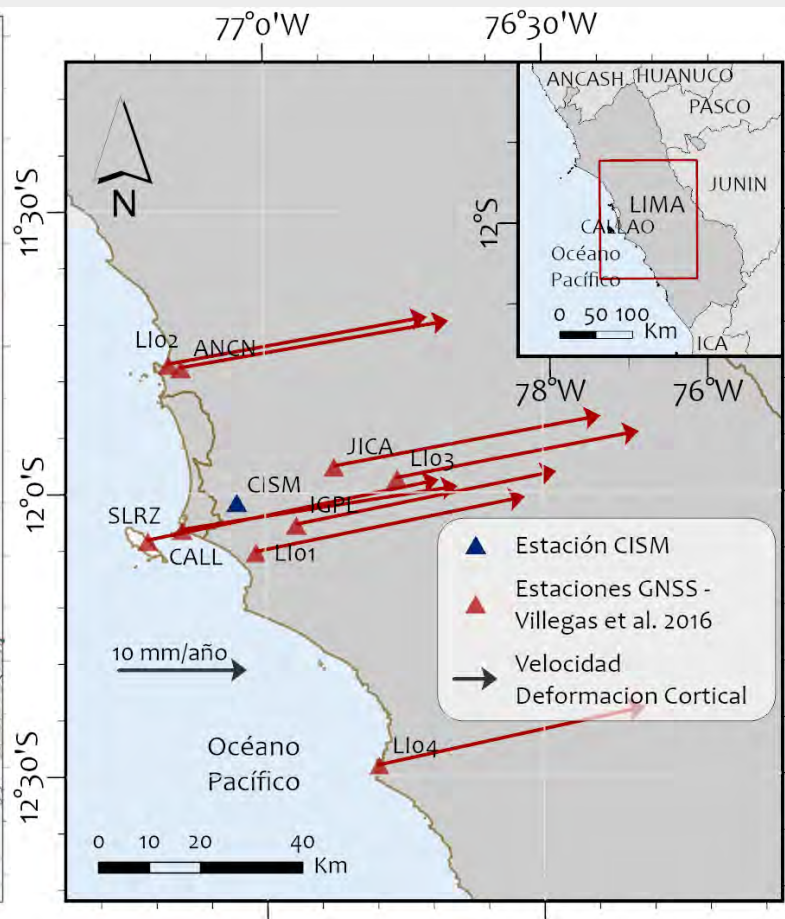


Cantidad de archivos Rinex diarios procesados por año

Velocidades de deformación cortical



Mapa de velocidades GPS en el Perú (Villegas-Lanza et al., 2016)



Mapa de velocidades GPS cercanas a la estación CISM. Adaptado de Villegas-Lanza et al., 2016

Ubicación, velocidad de deformación cortical y rango de observación para las estaciones GNSS cercanas a la estación CISM. Tomado de Villegas-Lanza et al., 2016

Sitio	Long, Lat	Ve (mm/año)	Vn (mm/año)	Rango (años)
ANCN	-77.1500, -11.7766	20.95	3.68	5.2
CALL	-77.1493, -12.0629	21.55	3.41	5.8
IGPL	-76.9442, -12.0551	20.36	4.17	5.2
JICA	-76.8757, -11.9524	20.86	3.95	3.7
LI01	-77.0169, -12.1030	21.05	4.31	5.0
LI02	-77.1724, -11.7700	20.25	3.71	3.4
LI03	-76.7625, -11.9736	18.93	3.65	2.7
LI04	-76.7974, -12.4818	20.80	4.55	3.6
SLRZ	-77.2114, -12.0814	22.77	4.74	3.3

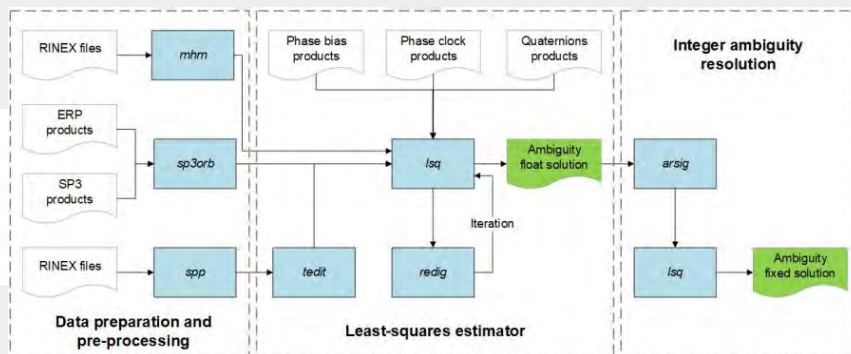
4. Metodología y Resultados

Estrategia PPP-AR

Las posiciones diarias fueron estimadas mediante PPP-AR (Posicionamiento de Punto Preciso con Resolución de Ambigüedades) con el software PRIDE PPP-AR*, en modo estático diario, usando observaciones GPS, GLONASS y Galileo, productos satelitales finales y modelos de corrección geofísica para minimizar errores sistemáticos.

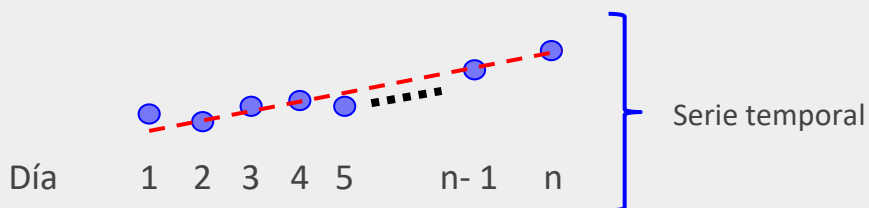


PRIDE PPP-AR



Estructura del programa PRIDE PPP-AR. Tomado de su documentación

Cálculo de posiciones diarias



Estrategia de posicionamiento PPP-AR

Descripción	Estrategia
Modo de resolución	Solución estática de un solo día
Constelaciones	GPS, GLONASS, Galileo
Tasa de muestreo de datos	15s
Productos satelitales	Productos finales de órbitas, reloj, sesgo de fase y ERP de CODE.
Corrección ionosférica	- Primer orden: Sin combinación ionosférica - Segundo orden: Corregido con productos de liberación GIM
Corrección troposférica	- ZTD: una estimación cada 1 hora, precisión a priori de 0,2 m, ruido de proceso de 0,02 m - HTG: una estimación cada 12 horas, precisión a priori de 0,005 m, ruido de proceso de 0,002 m
Corrección de mareas	Modelo FES2004
Otras correcciones	Marea sólida, marea polar, efecto relativista, entrelazamiento de fases
Método de fijación	Método: Redondeo Umbral de carril ancho: 0,2 ciclos Umbral de carril estrecho: 0,15 ciclos Ángulo de corte mínimo: 15° Duración mínima del arco difuso: 600 s

*Geng et al., (2019). PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution

Serie temporal

La serie se modeló mediante un ajuste por mínimos cuadrados

$$Y(t) = T(t) + E(t) + R(t)$$

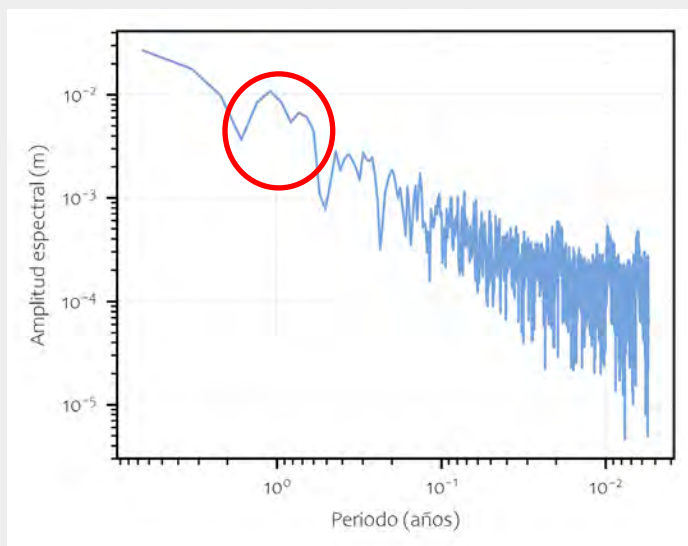
$T(t)$: Tendencia lineal

$$T(t) = a + v \cdot t$$

$E(t)$: Estacionalidad

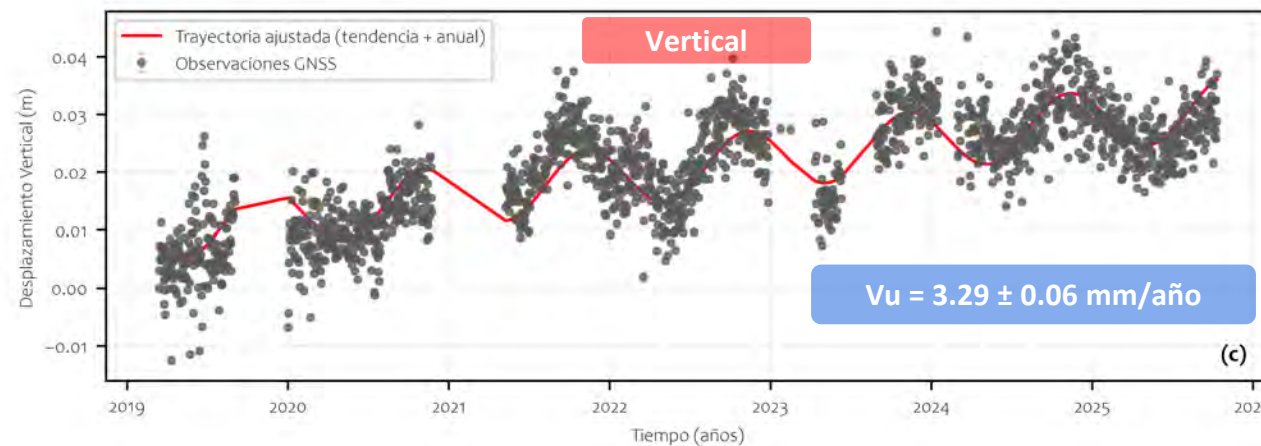
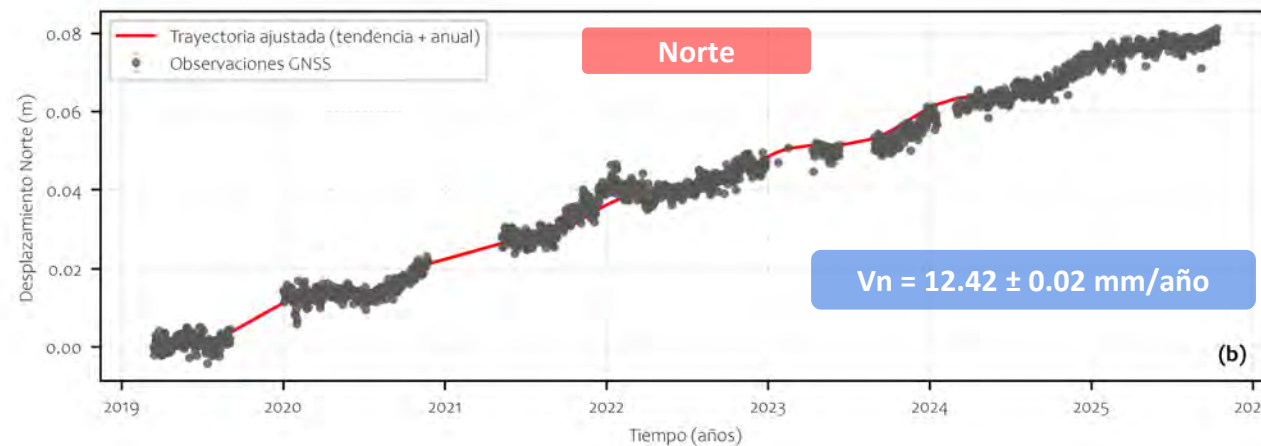
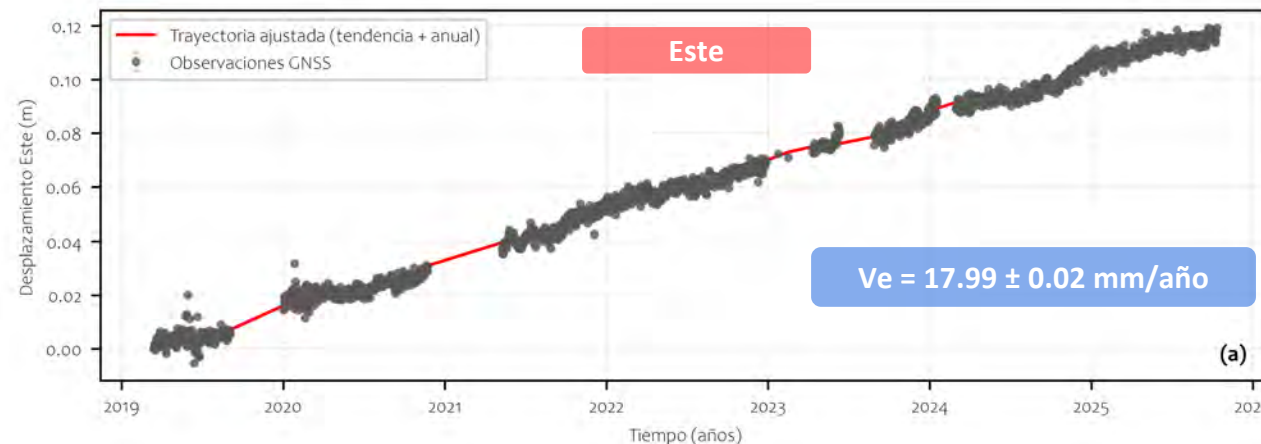
$R(t)$: Ruido

$$E(t) = S \cdot \sin(2\pi t) + C \cdot \cos(2\pi t)$$



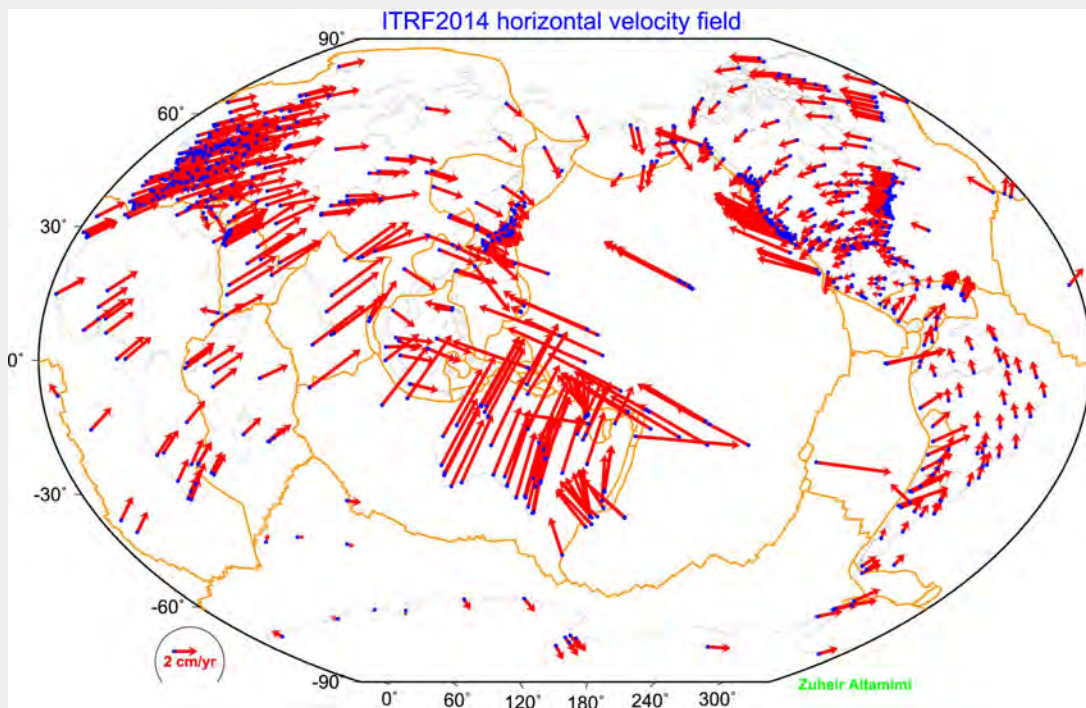
Periodograma de Lomb-Scargle de la componente norte de la serie temporal de la estación CISM

Tasas de velocidad de desplazamiento



Vel. de deformación cortical

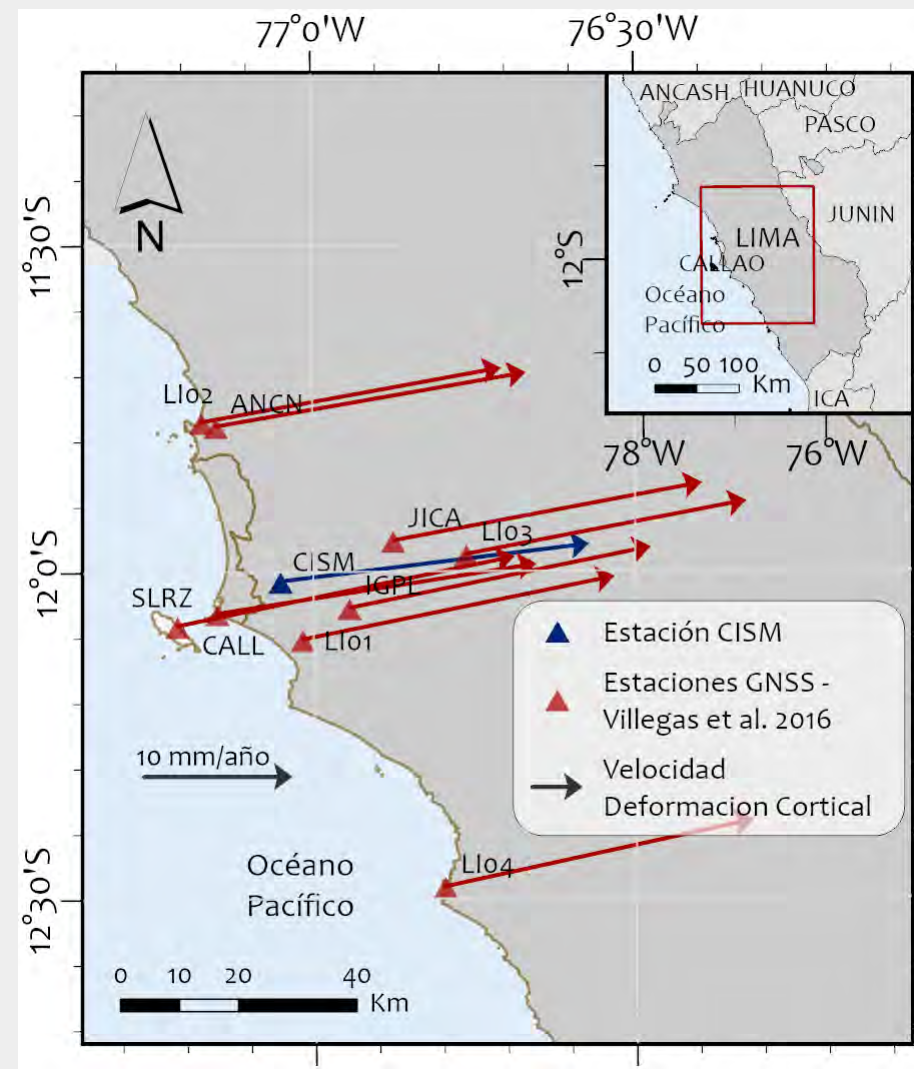
Para estimar la velocidad de deformación cortical asociada al acoplamiento intersísmico se corrigió la velocidad GNSS observada restando la contribución del movimiento relativo entre las placas de Nazca y Sudamericana.



Campos de velocidad horizontal y vertical del ITRF2014 para sitios con un error formal inferior a 0,2 mm/año. Tomado de Altamimi et al., 2016

Velocidad cortical corregida — estación CISM

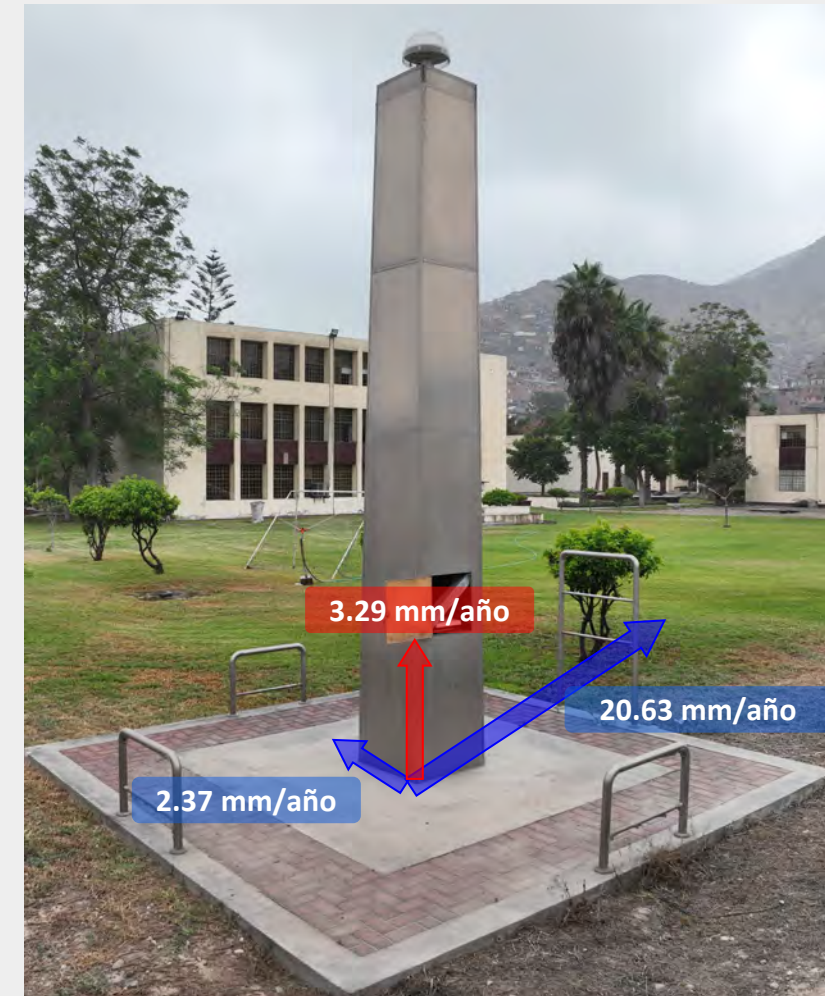
- Este: 20.63 ± 0.2 mm/año
- Norte: 2.37 ± 0.2 mm/año
- Vertical: 3.29 ± 0.2 mm/año



4. Conclusiones



- PPP-AR permitió estimar velocidades corticales confiables en la estación CISM usando más de 6 años de datos GNSS diarios.
- La velocidad residual en el marco estable de Sudamérica fue de 20.63 ± 0.2 mm/año al este y 2.37 ± 0.2 mm/año al norte.
- La tendencia estimada es coherente con la deformación intersísmica del antearco peruano central.
- La modelación de la serie temporal permitió separar la señal tectónica de las variaciones estacionales.
- PPP-AR representa una metodología precisa y accesible para actualizar campos de velocidad cortical en regiones con redes GNSS limitadas.



PPP-AR PARA EL MONITOREO DE DEFORMACIÓN CORTICAL CON UNA ESTACIÓN GNSS PERMANENTE EN LIMA, PERÚ

PPP-AR FOR CRUSTAL DEFORMATION MONITORING USING A PERMANENT GNSS STATION IN LIMA, PERU

Oscar Solís^{1,2}, Jorge Mendoza³, Miguel Estrada^{1,2*}, Fernando García^{1,2}, Carlos Gonzales^{2,3}

¹ Geomatics Laboratory, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres Lima, Peru.

² GeOIRD Research Group, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Av. Tupac Amaru 1150, Rimac, Lima 15333, Peru

³ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 23 / 01 / 2020 Aceptado (Accepted): 07 / 02 / 2021

RESUMEN

El monitoreo de la deformación cortical en zonas de subducción activa requiere métodos geodésicos de alta precisión. En Perú, el acceso limitado a datos de estaciones de referencia de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) restringe la aplicación del posicionamiento relativo. Este estudio evalúa la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso con Resolución de Ambigüedades (PPP-AR) como alternativa para estimar velocidades de desplazamiento cortical a partir de una estación GNSS independiente. Se procesaron más de seis años de observaciones diarias (2019–2025) de una estación ubicada en Lima, empleando productos satelitales finales y un esquema de procesamiento no diferenciado con fijación de ambigüedades enteras. La serie temporal resultante fue analizada mediante un modelo de regresión lineal que incorporó componentes estacionales anuales, identificadas a través de análisis espectral. Las velocidades absolutas obtenidas en el marco ITRF2014 fueron transformadas al marco de referencia estable de Sudamérica (SSA), aislando así la deformación cortical neta. La velocidad residual horizontal resultante es de 20.63 ± 0.2 mm/año en dirección este y 2.37 ± 0.2 mm/año en dirección norte, coherente con el patrón de deformación inter-sísmica documentado para el antearc peruano central. La incertidumbre milimétrica alcanzada y la concordancia con velocidades derivadas de métodos relativos validan al PPP-AR como una metodología robusta, accesible y comparable para el monitoreo geodinámico en entornos con redes GNSS escasas.

Palabras Clave: PPP-AR; GNSS; deformación cortical; serie temporal; zona de subducción.

ABSTRACT

Monitoring crustal deformation in active subduction zones requires high-precision geodetic methods. In Peru, limited access to data from Global Navigation Satellite System (GNSS) reference stations limits the use of relative positioning. This study evaluates the Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (PPP-AR) technique as an alternative for estimating rates of crustal displacement velocities from a standalone GNSS station. Over six years of daily observations (2019–2025) from a station located in Lima were processed using final satellite products and an undifferenced processing scheme with integer ambiguity resolution. The resulting time series was analyzed through a linear regression model that incorporated annual seasonal components, identified via spectral analysis. Absolute velocities obtained in the ITRF2014 frame were transformed to the Stable South America (SSA) reference frame, thus isolating the net crustal deformation. The resulting residual horizontal velocity is 20.6 ± 0.2 mm/yr eastward and 2.4 ± 0.2 mm/yr northward, consistent with the interseismic deformation pattern documented for the central Peruvian forearc. The millimeter-level uncertainty achieved and the agreement with velocities derived from relative methods validate PPP-AR as a robust, accessible, and comparable methodology for geodynamic monitoring in environments with sparse GNSS networks.

Keywords: PPP-AR; GNSS; crustal deformation; time series; subduction zone.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales aportes del Sistema de Navegación Global por Satélites (GNSS) ha sido su capacidad para monitorear con alta precisión y

continuamente la deformación cortical en zonas de subducción, aportando información clave para evaluar el potencial sísmico a largo plazo. En la margen peruana, la Placa de Nazca subduce bajo la Sudamericana a $\sim 6\text{--}7$ cm/año [1], generando un

* Autor de correspondencia.
E-mail: estrada@unleedu.pe

Gracias

