

ESCUELA SIRGAS 2023

“Sistema de Referencia”



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

J.A. Tarrío¹, Catalina Cáceres¹, Jesarella Inzunza¹, Valeria Vásquez¹, Fernando Isla¹.

¹ Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico de la Universidad de Santiago de Chile, Chile.

La programación del curso es la siguiente:

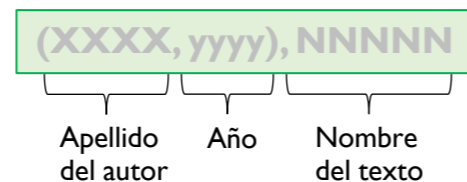
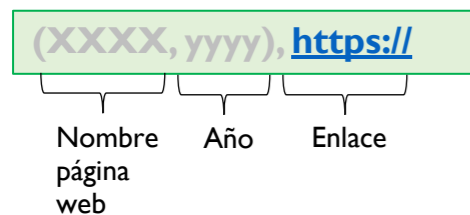
	Dia 3 Julio	Dia 4 Julio	Dia 5 Julio
8:00-9:40	Tema 0	Tema 3	Tema 4
10:00-12:00	Tema 1	Tema 3	Tema 4
13:00-14:40	Tema 2	Tema 3	
15:00-16:00	Tema 2	Tema 4	

Los temas marcados en negrita serán impartidos por José Antonio Tarrío

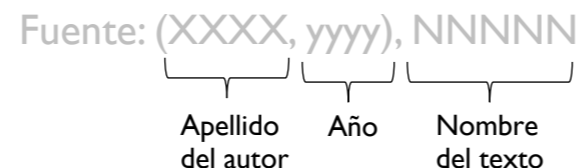
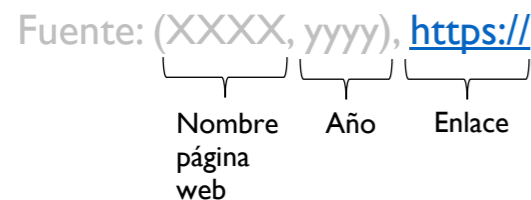
Las presentaciones están realizadas para que sirvan como un apoyo bibliográfico, después de la terminación del curso

Para el presente curso se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Cada vez que salga el siguiente cuadro, este corresponde a la cita de un artículo, texto, libro o página web.



2. Cada imagen y tabla tendrá su fuente (de texto o página web) la cual se reconoce de la siguiente manera:



Del 3 al 7 de julio de 2023 se realizará la 8ª Escuela SIRGAS sobre “Sistema de Referencia”. La Escuela tendrá lugar en la Universidad de Costa Rica y Universidad Nacional, en San José y Heredia, Costa Rica. La Escuela se llevará a cabo de manera presencial y se impartirá únicamente en español.

Un curso de cinco días para profesionales avanzados, jóvenes científicos y empleados de agencias nacionales con los temas fundamentales de la geodesia física y geométrica. La escuela se dividirá en dos bloques: teórico (dos días y medio) y práctico (dos días y medio). Durante el bloque de prácticas se desarrollarán los temas necesarios para el procesamiento y ajuste de redes GPS/GNSS con paquetes BERNESE y GAMIT/GLOBK. Al finalizar el curso, se espera que los participantes sean capaces de:

- Saber cuáles son los metadatos necesarios para procesar GNSS
- Comprender los detalles del procesamiento GNSS
- Montar un procesamiento GAMIT/BERNESE con datos propios
- Utilizar GLOBK/BERNESE para realizar combinaciones diarias y semanales
- Densificar IGS20 utilizando los datos de ejemplo

0. Tema: Geodesia. Conceptos previos e introducción

- 0.1. Definición.
- 0.2. Técnicas de observación.
- 0.3. Superficies de referencia.
- 0.4. Contexto latinoamericano. Singularidades geodésicas de la región.
- 0.5. SIRGAS.
- 0.6. Espacio de consulta y discusión.

1. Tema: Sistema de referencia de coordenadas

- 1.1. Sistemas de coordenadas.
 - 1.1.1. Coordenadas cartesianas $[X, Y, Z, t]$.
 - 1.1.2. Coordenadas elipsoidales $[\text{lat}, \text{long}, h]$.
 - 1.1.3. Coordenadas locales (topocéntricas) $[e, n, u]$.
 - 1.1.4. Coordenadas proyectadas $[E, N, H]$.
- 1.2. Operaciones con coordenadas.
 - 1.2.1. Conversiones.
 - 1.2.2. Transformaciones.
- 1.3. Espacio de consultas y discusión.

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

- 2.1. Generalidades, Sistemas y Marcos de Referencia.
 - 2.1.1. Definición Sistema y Marco de Referencia (Celeste y Terrestre).
 - 2.1.2. Principios matemáticos
- 2.2. Sistema y Marco de Referencia Celeste, orientación y movimientos de la tierra.
 - 2.2.1. ICRS (Sistema de Referencia Celeste Internacional).
 - 2.2.2. ICRF (Marco de Referencia Celeste Internacional).
 - 2.2.3. Precesión, nutación, movimiento del polo y mareas terrestres.
 - 2.2.4. Transformación entre sistema de referencia terrestre y celeste.
- 2.3. Sistema de Referencia Terrestre.
 - 2.3.1. Global (ITRS) definiciones y realizaciones.
 - 2.3.2. Continental (SIRGAS) definiciones y realizaciones.
- 2.4. Marco de Referencia Terrestre.
 - 2.4.1. Tipos de marco según movimiento.
 - 2.4.2. Global (ITRF).
 - 2.4.3. Continental (SIRGAS-CON).
- 2.5. Modelos de deformación
- 2.6. Bases de datos geodésicas: ISO GR y EPSG.
- 2.7. Espacio de consultas y discusión.

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.1. Introducción.

3.1.1. Terminología Básica.

3.2. Estructura GNSS.

3.3. Sistemas de Referencia, Tiempo y Marcos de Referencia.

3.4. Teoría orbital.

3.5. Observables.

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento.

3.7. Observación y procesamiento.

3.7.1. Observaciones GNSS (línea base y sesiones).

3.7.2. Datos y Metadatos.

3.7.3. Análisis de precisión (metodología).

3.8. Ajuste GNSS.

3.8.1. Ajuste común (MMCC).

3.8.2. Transformación Helmert.

3.8.3. Análisis de precisión (metodología).

3.9. Espacio de consultas y discusión.

4. Tema: Sistemas verticales de referencia

4.1. Sistema de Referencia Vertical.

4.1.1. Coordenada vertical.

4.1.2. Sistema geométrico de alturas.

4.1.3. Componentes del Sistema geométrico de referencia vertical.

4.1.4. Sistema de Alturas Físicas.

4.1.5. Números Geopotenciales y gravimetría.

4.1.6. Superficies de Referencia (elipsoide, geoide y cuasigeoide).

4.2. Sistema de alturas existentes.

4.3. Sistema de referencia vertical moderno.

4.3.1. International Height Reference System (IHR).

4.3.2. Realización del IHR: IHRF Marco de Referencia Internacional de Alturas.

4.3.3. Determinación de coordenadas en el IHRF.

4.3.4. Contribución/integración de SIRGAS en el IHR/IHRF.

4.3.5. Ventajas del uso del IHR/IHRF en la región SIRGAS.

4.3.6. Requerimientos inmediatos para el establecimiento del IHR/IHRF en la región SIRGAS.

0. Tema: Geodesia. Conceptos previos e introducción.

0.1. Definición.



<https://youtu.be/biqkQ8ly5rl>

0.1. Definición.

¿Qué es la Geodesia?

La geodesía es la ciencia que estudia la forma, el tamaño y el campo gravitatorio de la Tierra, así como sus variaciones en el tiempo (IAG, 2023)

(IAG, 2023) <https://www.iag-aig.org/geodesy>

¿QUÉ ES LA GEODESIA?

En pocas palabras, es la ciencia que se encarga de **medir la Tierra**. Los geodestas y otros científicos pueden aprender mucho del estudio del **tamaño**, la **forma**, la **orientación** y la **gravedad** de nuestro planeta.

¿NO CONOCEMOS YA LA FORMA Y EL TAMAÑO DE LA TIERRA?

En realidad, nuestro planeta está **cambiando constantemente**, aunque no lo podamos sentir. La Tierra está compuesta de **muchas partes móviles**, y estudiar cómo se mueve cada una en relación a las demás es importante para comprender los **procesos que nos afectan a todos**.

SI NO PODEMOS SENTIRLO, ¿CÓMO SABEMOS QUE LA TIERRA ESTÁ CAMBIANDO?

Los científicos utilizan herramientas geodésicas, tales como **satélites**, **GPS**, **escáneres láser**, e incluso **drones** para observar pequeños cambios que tienen grandes impactos en el tiempo.

¿LA GEODESIA ES ALGO NUEVO?

La Geodesia existe, por lo menos, desde la **antigua Grecia**, cuando Eratóstenes utilizó mediciones de **sombras** para calcular la circunferencia de la Tierra.

¿CÓMO FUNCIONA LA GEODESIA?

La clave de la Geodesia es la **precisión**. Si los científicos conocen la ubicación exacta de sus equipos con precisión milimétrica, los procesos geológicos invisibles al ojo pueden ser observados estudiando cómo esa posición cambia en el tiempo.

¿QUÉ PODEMOS HACER CON LA GEODESIA?

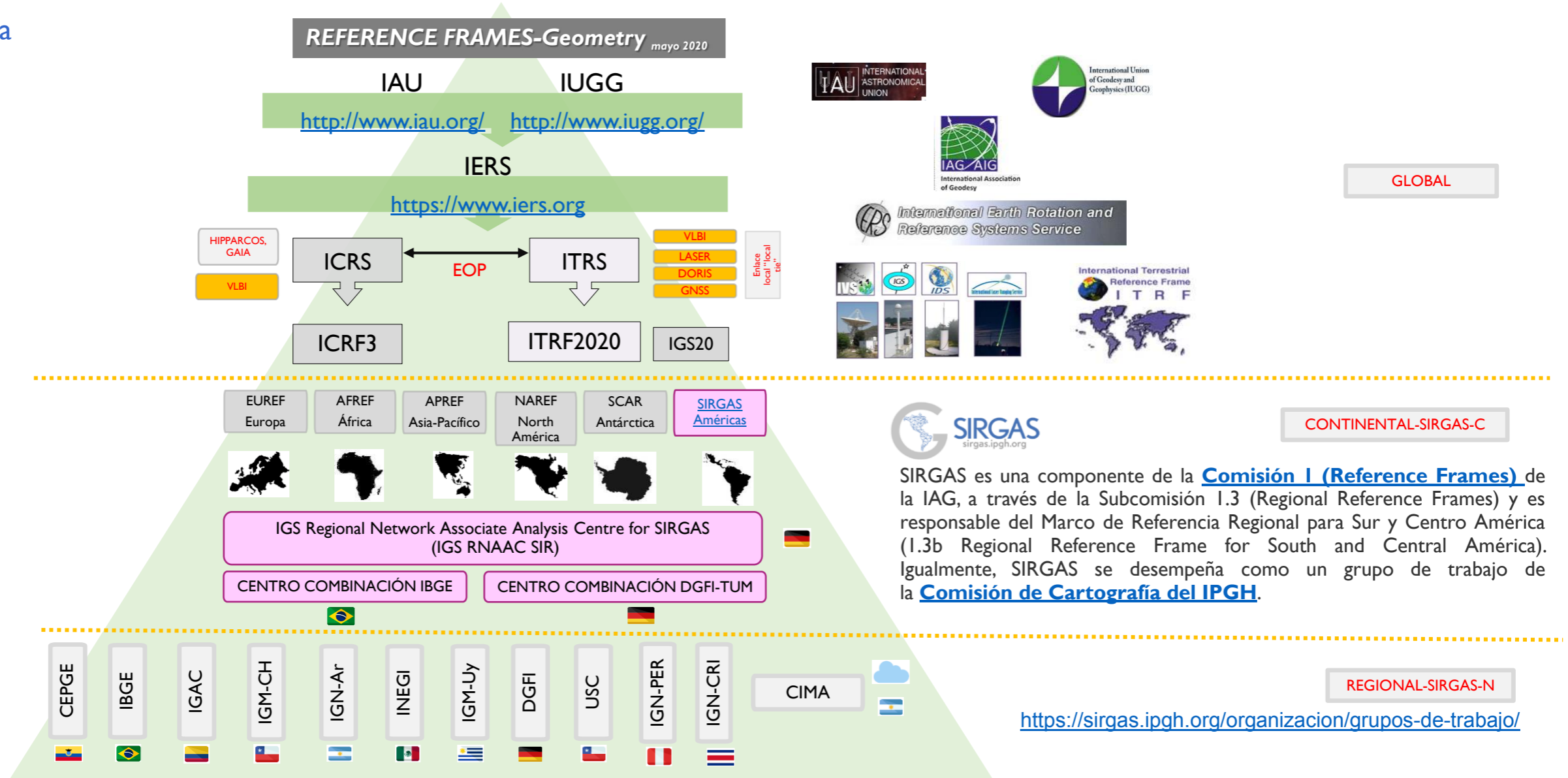
Los científicos usan mediciones geodésicas para observar las condiciones del hielo polar, que afectan el clima global y el nivel del mar.

Al medir los cambios en el nivel del mar, las estaciones GPS flotantes pueden ser usadas para alertar sobre tsunamis antes de que lleguen a la costa y causen daños.

Los vulcanólogos pueden pronosticar erupciones utilizando herramientas geodésicas para detectar cuando el suelo comienza a inflarse debido a la presión que se acumula bajo tierra.

Usando herramientas de escaneo láser, los científicos pueden crear modelos 3D de las superficies propensas a deslizamientos, y detectar movimientos del suelo.

0.1. Definición. Jerarquía geodésica



0.1. Definición.

Subcomisión 1.3b de la IAG: La IAG corresponde a la Asociación Internacional de Geodesia, esta es una de las asociaciones que componen a la IUGG. La IAG está dividida en comisiones las cuales se dividen en subcomisiones, la comisión I en particular, es la encargada de los Marcos de Referencia.

La Subcomisión 1.3 corresponde a los Marcos de referencia regionales y específicamente la subcomisión 1.3b abarca América del Sur y Central, teniendo por objetivo lo siguiente:

- Determinar, mantener y poner a disposición un marco de referencia geocéntrico (un conjunto de estaciones con posiciones geocéntricas de alta precisión y su variación con el tiempo) como una densificación regional del ITRF global;
- Apoyar a los países SIRGAS en el establecimiento y mantenimiento de redes nacionales de referencia geodésica como densificaciones locales de SIRGAS a fin de garantizar la accesibilidad al ITRF global a nivel nacional y local;
- Establecer un sistema de referencia vertical unificado que apoye la determinación y la combinación precisa de alturas físicas y geométricas, así como sus variaciones con el tiempo;
- Apoyar a la Subcomisión 2.4b del IAG (Gravedad y Geoide en América del Sur) en las actividades relacionadas con las densificaciones de gravedad a fin de mejorar la distribución de la información sobre la gravedad y establecer una nueva Red de Gravedad Absoluta en América del Sur;
- Contribuir al programa GGOS mediante el desarrollo e implementación de productos de vanguardia basados en la infraestructura de observación SIRGAS;
- Promover, apoyar y coordinar los esfuerzos de los países de América y el Caribe para lograr estos objetivos. (IAG, 2023)

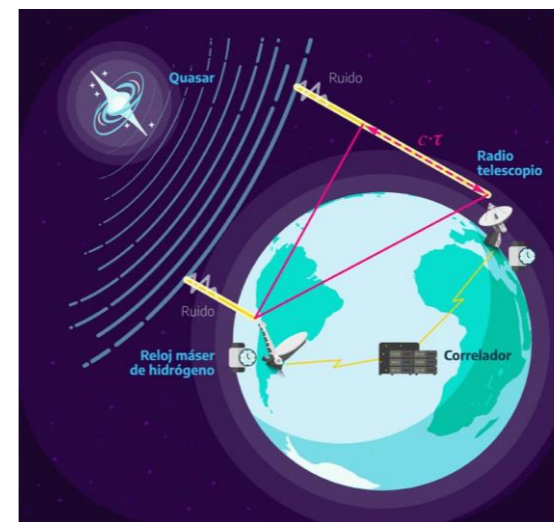


Fuente: GGOS, <https://ggos.org/products/>

0.2. Técnicas de observación

Cuatro son las técnicas utilizadas para el cálculo del ITRF, estas son VLBI, GNSS, SLR y DORIS

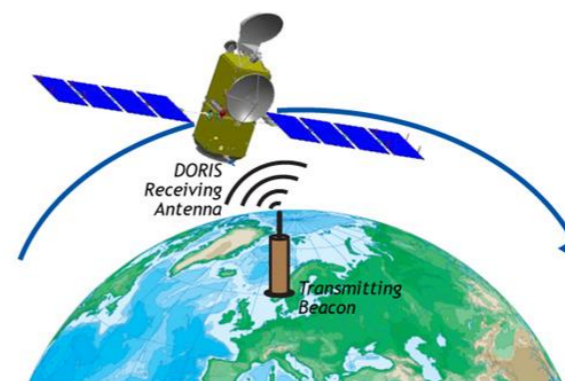
- VLBI (Very Long Baseline Interferometry): Utiliza radiotelescopios que observan cuerpos celestes (Quasar) muy lejanos, se basa netamente en la medición que realizan al menos dos radiotelescopios en el mismo instante al mismo Quasar, cumpliendo este la función de un punto fijo. Esta técnica de medición contribuye significativamente en lo referente al Marco de Referencia Internacional y en el cálculo de los parámetros de orientación terrestre, pues permite cuantificarlos de manera precisa. (CDDIS, 2023)¹
- GNSS (Global Navigation Satellite System): Esta tecnología consta de receptores GNSS que reciben, decodifican y procesan señales de los satélites GNSS, es de diversas constelaciones (GLONASS, GPS Galileo, Beidou, QZSS, entre otros). Los satélites envían los códigos de distancia en dos portadoras de radiofrecuencia las cuales permiten calcular la ubicación de los receptores. (CDDIS, 2023)²
- SLR (Satellite Laser Ranging): Esta tecnología utiliza láseres de pulso ultra corto, receptores ópticos y electrónica de sincronización de última generación para medir el tiempo de vuelo bidireccional y por lo tanto, la distancia desde las estaciones terrestres hasta el conjunto de retrorreflectores ubicados en los satélites que orbitan la Tierra. (CCDIS, 2023)³
- DORIS (Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite): Es un sistema de posicionamiento Doppler de doble frecuencia, esta tecnología realiza una medición precisa del desplazamiento Doppler en las señales de radiofrecuencia emitidas por las balizas terrestres y recibidas en la nave espacial. (CDDIS, 2023)⁴



Fuente: (IGN Argentina, 2023), https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/CI_GA/VLBI



Fuente: (NASA, 2023), <https://space-geodesy.nasa.gov/techniques/SLR.html>



Fuente: NASA, <https://space-geodesy.nasa.gov/techniques/DORIS.html>



Fuente: GGOS, <https://ggos.org/products/>

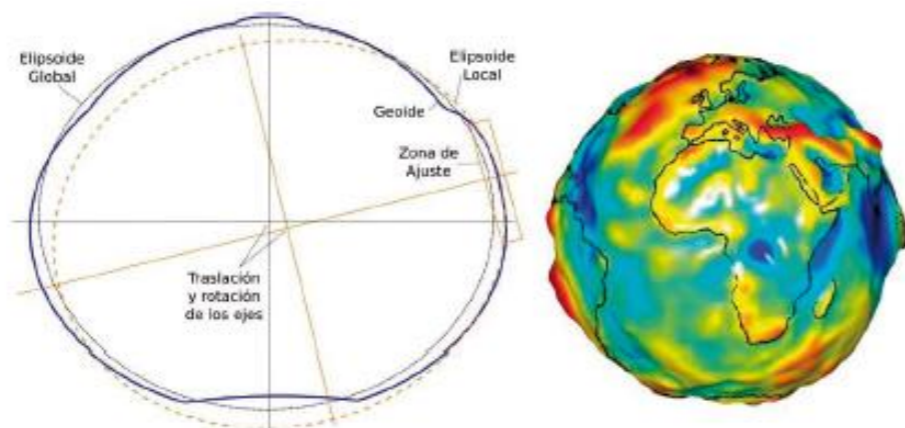
1 (CDDIS, 2023), https://cddis.nasa.gov/Techniques/VLBI/IVS_Summary.html
2 (CDDIS, 2023), https://cddis.nasa.gov/Techniques/GNSS/GNSS_Overview.html
3 (CDDIS, 2023), https://cddis.nasa.gov/Techniques/SLR/SLR_Overview.html
4 (CDDIS, 2023), https://cddis.nasa.gov/Techniques/DORIS/DORIS_Overview.html

0.3. Superficies de referencia.

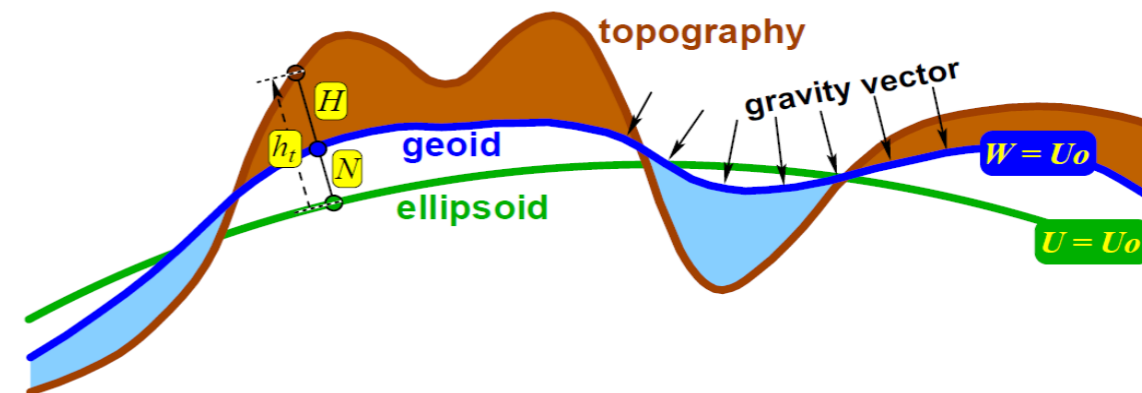
La figura de la Tierra se asemeja a la definición de geode, definiéndolo como una superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre al nivel medio del mar. (Barthelmes, 2013)

Como la definición del geode presenta se emplea a nivel físico, la superficie de la Tierra puede representarse a nivel geomético mediante una aproximación a un elipsoide de revolución (Berné, 2014), definiéndose este sistema mediante:

- Semieje ecuatorial (a) o semieje mayor: longitud del semieje correspondiente al Ecuador, desde el centro de masas de la Tierra hasta la superficie terrestre.
- Semieje polar (b) o semieje menor: Longitud de semieje desde el centro de masas de la Tierra hasta uno de los polos. El elipsoide se genera por la revolución de una elipse alrededor de este.



Fuente: (Berné, 2014), GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática



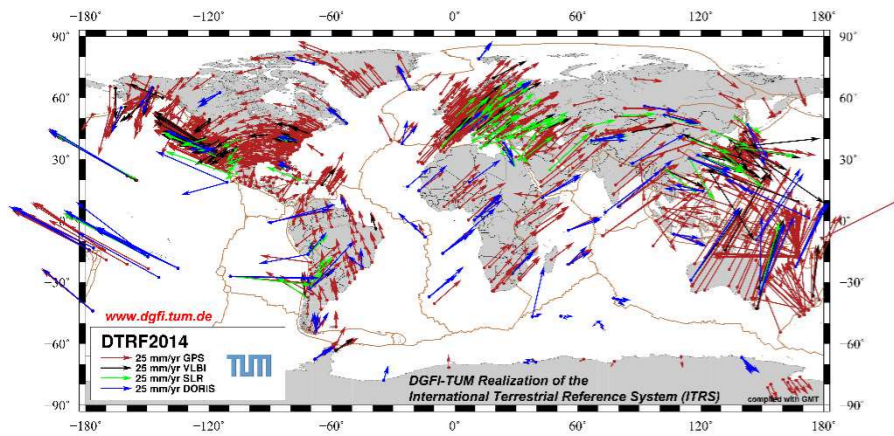
Fuente: (Barthelmes, 2013), Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models - Theory and formulas used by the calculation service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM)

El GRS80 Geodetic Reference System es el elipsoide de revolución actualmente utilizado a escala internacional para estudiar de manera global el geode para una superficie matemática. Ej: EPSG 7019: GRS 1980

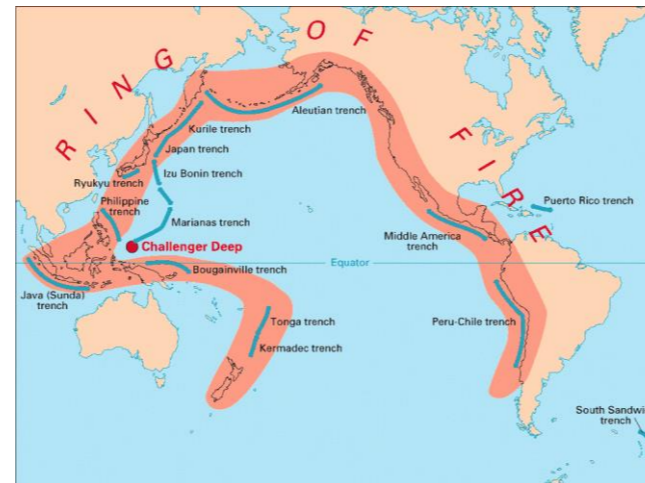
(Barthelmes, 2013), Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models - Theory and formulas used by the calculation service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM).
(Berné, 2014), GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática

0.4. Contexto latinoamericano. Singularidades geodésicas de la región.

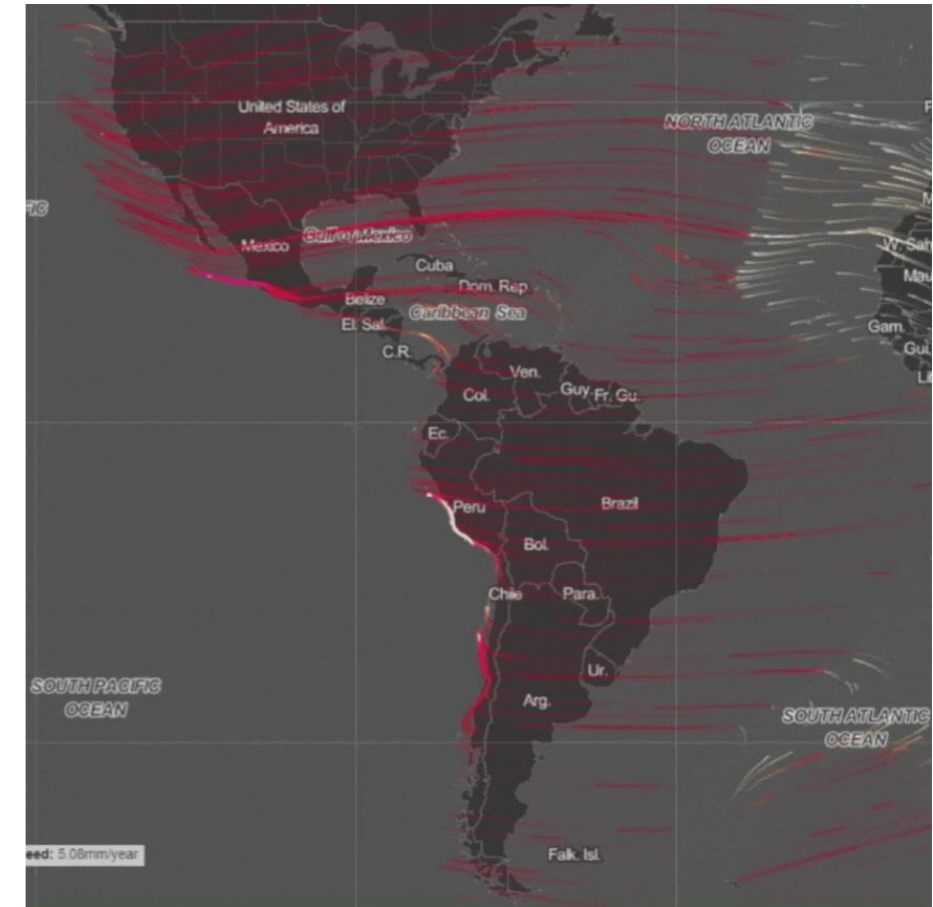
El cinturón de fuego del pacifico abarca aproximadamente 40.000 km y en él se encuentra el mayor movimiento de placa existente en la tierra. Las placas que componen el cinturón de fuego son: placa del Pacífico, placa de América del Sur, placa de Nazca, placa de América del Norte, placa de Cocos y placa de Filipinas. En su mayoría, las placas antes mencionadas subducen con otras o entre si, causando grandes movimientos de la corteza terrestre los cuales se traducen como movimientos sísmicos o erupciones volcánicas.



Fuente: DGFI-TUM, <https://dtrf.dgfi.tum.de/en/dtrf2014/>



Fuente: USGS, <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/fire.html>



Fuente: Geolab Pasaia, <http://geolabpasaia.org/gnss/agi/maps/WORLD-DenseVelocities.html#3/-17.34/-391.43>

Debido a los movimientos producidos por la corteza terrestre y en especial los ocasionados en el cinturón de fuego del Pacífico, hacen que sea vital actualizar de manera constante los puntos pasivos existentes en el país (actualizar coordenadas en base a un marco cinemático o dinámico), pues estos puntos cambian con el tiempo.



Fuente: Centro USC/

0.5. SIRGAS.

El acrónimo SIRGAS corresponde al Sistema de Referencia Geodésico para las Américas. SIRGAS cuenta con 3 realizaciones, SIRGAS95, SIRGAS2000 y SIRGAS-CON (SIRGAS Continuously Operating Network), las dos primeras corresponden a campañas GPS, donde SIRGAS95 estuvo compuesta por 58 estaciones y SIRGAS2000 por 184. La última realización, es la red geodésica que densifica al ITRF (International Terrestrial Reference Frame) en Latinoamérica y El Caribe, integrada por más de 490 estaciones GNSS de monitoreo continuo. El Análisis de la red se efectúa gracias a un procesamiento semanal, donde se consideran observaciones GPS+GLO.

El Grupo de Trabajo I (Sistema de Referencia), garantiza la adecuada operatividad de la red desde la adquisición de las observaciones hasta la generación de productos.



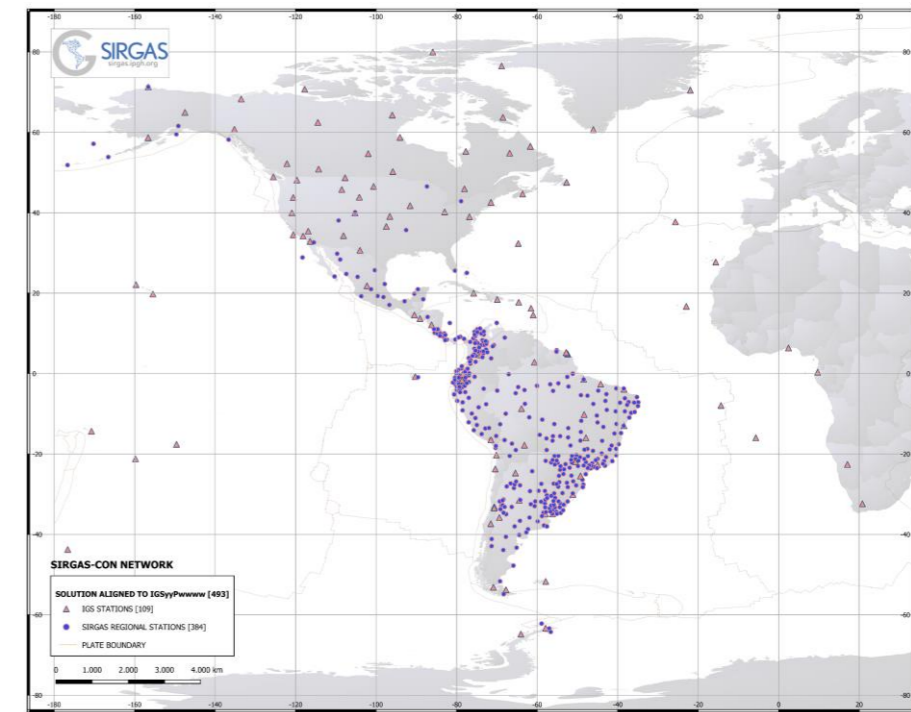
SIRGAS95

Fuente: Centro USC



SIRGAS2000

Fuente: Centro USC



SIRGAS-CON

Fuente: Centro USC

ESCUELA SIRGAS 2023

0.6. Espacio de consulta y discusión. 10 MINUTOS

I.1. Sistemas de coordenadas

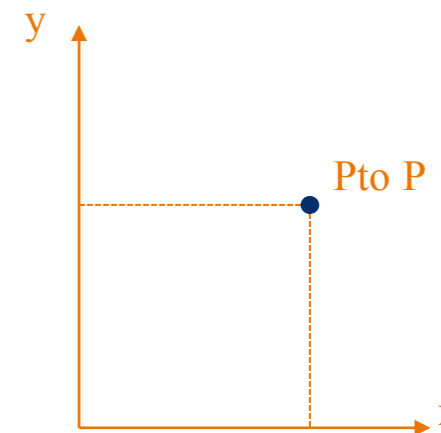
Según ISO 19111:2019 (ISO, Organización Internacional de Normalización, 2019), se define **COORDENADA** como uno de los n números de una secuencia que designa la posición de un punto en un sistema n -dimensional.

Se define como **SISTEMA DE COORDENADAS** al conjunto de reglas matemáticas que especifican cómo las coordenadas deben ser asignadas a los puntos.

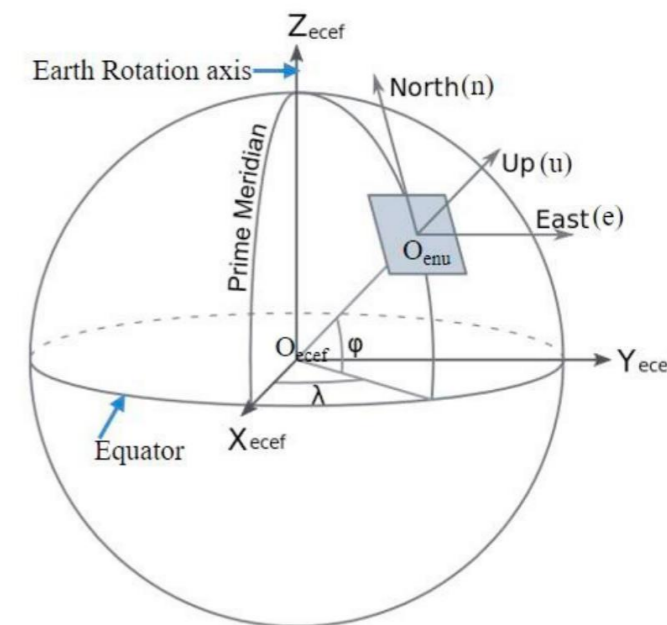
I.1.1. Coordenadas cartesianas $[X, Y, Z, t]$: También conocidas como ECEF (Earth Centered, Earth Fixed), con origen en el centro de masas terrestre (geocentro). La dirección del eje Z se encuentra en dirección al polo convencional, el eje X se encuentra cercano al Meridiano de Greenwich y el eje Y es perpendicular a los dos antes mencionados. La unidad de medida es métrica. En estas coordenadas estamos incluyendo la componente temporal en el posicionamiento, es decir, las coordenadas incluyen el tiempo. (ICSM and Brown, 2022)

I.1.2. Coordenadas elipsoidales $[\lambda, \phi, h]$: Coordenadas sobre la superficie del elipsoide representadas por $[\lambda, \phi, h]$ siendo estas Longitud, Latitud y Altura Elipsoidal. La longitud mide el ángulo de rotación (-180° a 180°) entre el primer meridiano y el punto medio, la latitud mide el ángulo (-90° a 90°) entre el ecuador y la normal del elipsoide. Su unidad de medida son los grados. La altura elipsoidal (h) es la altura calculada desde el punto en la superficie terrestre al elipsoide que pasa por la normal al elipsoide en dicho punto. (IOGP, 2019)

I.1.3. Coordenadas locales (*topocéntricas*) $[e, n, u]$: Corresponde a un sistema de coordenadas local ligado al campo de gravedad orientado en función de la vertical local (cenit, línea de la plomada), su origen es el punto P conocido como topocentro en el cual se ubica el observador y en dicho punto se crea un plano tangente a la tierra generado por las componentes e y n . El vector u , es ortogonal al plano tangente y coincide con la normal elipsoidal. (Hofmann, 2008).



Fuente: Centro USC



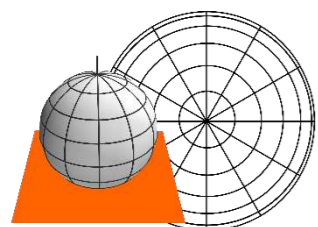
Fuente: (Devadas, 2020), Preliminary Analysis of Standalone Galileo and NavIC in the context of Positioning Performance for Low Latitude Region

(ISO, 2019), ISO/CD 19111 Geographic information — Referencing by coordinates
(ICSM and Brown, 2022), Australian Geospatial Reference System Compendium.
(IOGP, 2019), Geomatics, Guidance Note Number 7, part 2. Coordinate Conversions and Transformations including Formulas.
(Hofmann, 2008), GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more

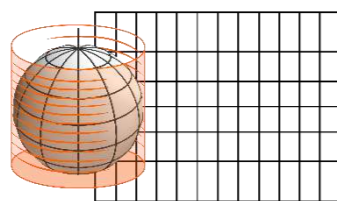
I.1. Sistemas de coordenadas

I.1.4. Coordenadas proyectadas [E, N, h, H]: Representa las coordenadas elipsoidales en un plano a través de una determinada proyección, comúnmente se utiliza la proyección UTM (Universal Transversal Mercator) la cual se divide por husos, sus coordenadas se representan con [E, N, h], las cuales corresponden a Este, Norte y Altura elipsoidal donde al agregar un modelo geoidal, se tiene [E, N, h, H], la última componente corresponde a la altura ortométrica. La representación de una superficie curva sobre un plano no es posible sin distorsión, por ello existen diferentes tipos de proyecciones que distorsionan en menor medida los ángulos, distancias o áreas. (IOGP, 2019).

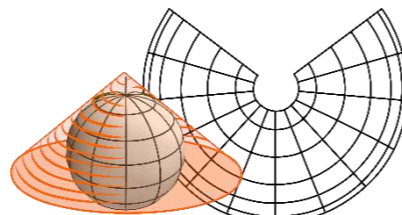
Existe la proyección cónica, cilíndrica y en un plano, las cuales según su orientación se dividen en, normal, transversal y oblicua.



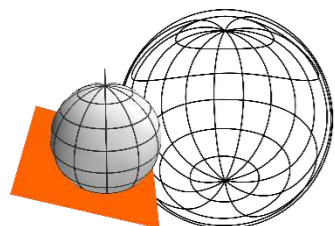
Plana Normal



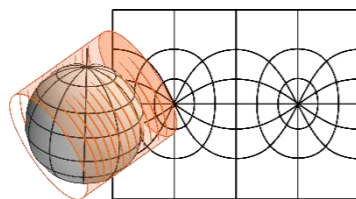
Cilíndrica Normal



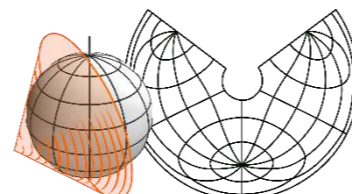
Cónica Normal



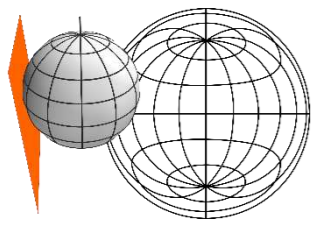
Plana Transversal



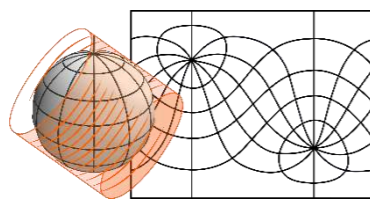
Cilíndrica Transversal



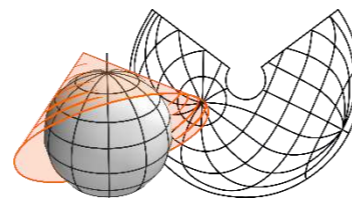
Cónica Transversal



Plana Oblicua



Cilíndrica Oblicua



Cónica Oblicua

Fuente: Centro USC

Todas las proyecciones son afectadas por distorsiones, estas se pueden clasificar en (USGS and John P. Snyder, 1987):

- Conforme: Mantiene los ángulos, es decir, estos no sufren distorsión.
- Equivalente: La proyección tiene la misma superficie que la “esfera” terrestre. No es posible la equivalencia sin deformar considerablemente los ángulos, es decir, si hay equivalencia no hay conformidad.
- Equidistante: La proyección mantiene las distancias reales, es decir, los meridianos y paralelos se representan en su verdadera longitud.

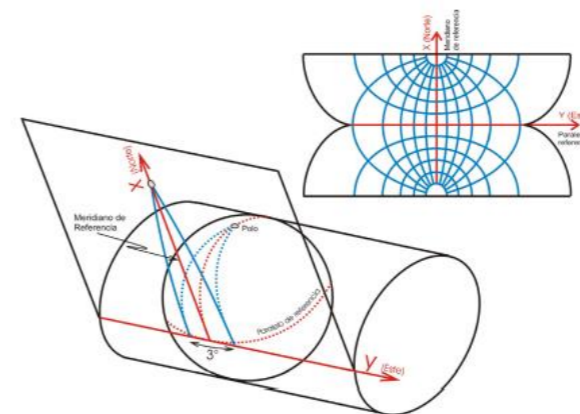
(IOGP, 2019), Geomatics, Guidance Note Number 7, part 2. Coordinate Conversions and Transformations including Formulas (USGS and John P. Snyder, 1987), Map Projections-A Working Manual

I.1. Sistemas de coordenadas

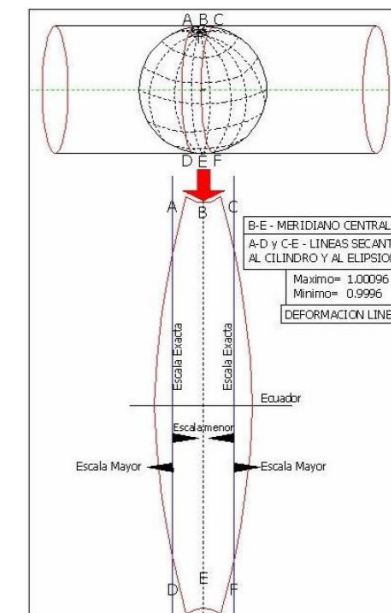
I.1.4. Coordenadas proyectadas [E, N, h, H]:

Proyecciones más utilizadas

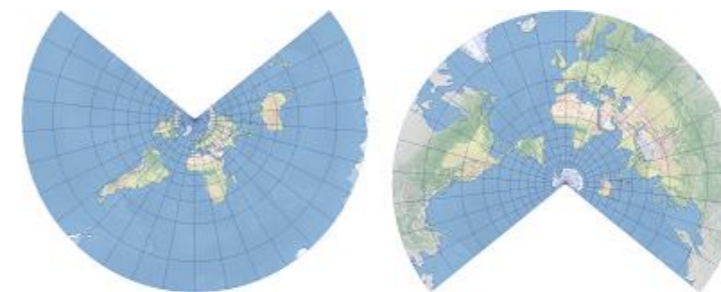
1. Gauss Krüger: Corresponde a un caso particular de la proyección Transversa Mercator. Es una proyección conforme, cilíndrica, transversal y tangente. Se utilizan fajas de 3° , los meridianos y paralelos se interceptan de manera perpendicular pero no son líneas rectas, sino curvas complejas, a excepción del meridiano central (punto de tangencia) y el paralelo de referencia (Sánchez, 2004).
2. UTM (Universal Transversal Mercator): Es una proyección transversa cilíndrica que divide la tierra en 60 husos con una dimensión de 6° (ancho de huso), empezando por el meridiano de Greenwich. Para reducir la distorsión en las zonas limitantes, se emplea un factor de escala 0,9996 (IOGP, 2019).
3. Cónica conforme de Lambert: Como lo dice su nombre, corresponde a una proyección cónica conforme donde todos los meridianos son líneas rectas equidistantes que convergen en un punto en común, esta proyección mantiene sus ángulos, es decir, estos son verdaderos. Uno de los polos se proyecta de manera circular y el otro hacia el infinito y se no muestra (USGS and John P. Snyder, 1987).
4. Estereográfica Polar: Utilizada comúnmente en conjunto con proyecciones que no dan cobertura a los polos, es una proyección conforme y los meridianos son líneas rectas que convergen el polo, mientras más se aleja de la proyección, mayor es la distorsión (USGS and John P. Snyder, 1987).



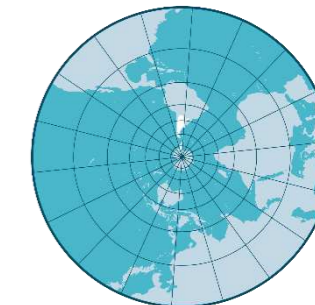
Fuente: (Sánchez, 2004), Aspectos prácticos de la adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA_SIRGAS como Dátum oficial de Colombia, 2004



Fuente: Universidad de Murcia, 2006.
https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node8_tf.html



Fuente: ArcGIS,
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/map/projections/lambert-conformal-conic.htm>

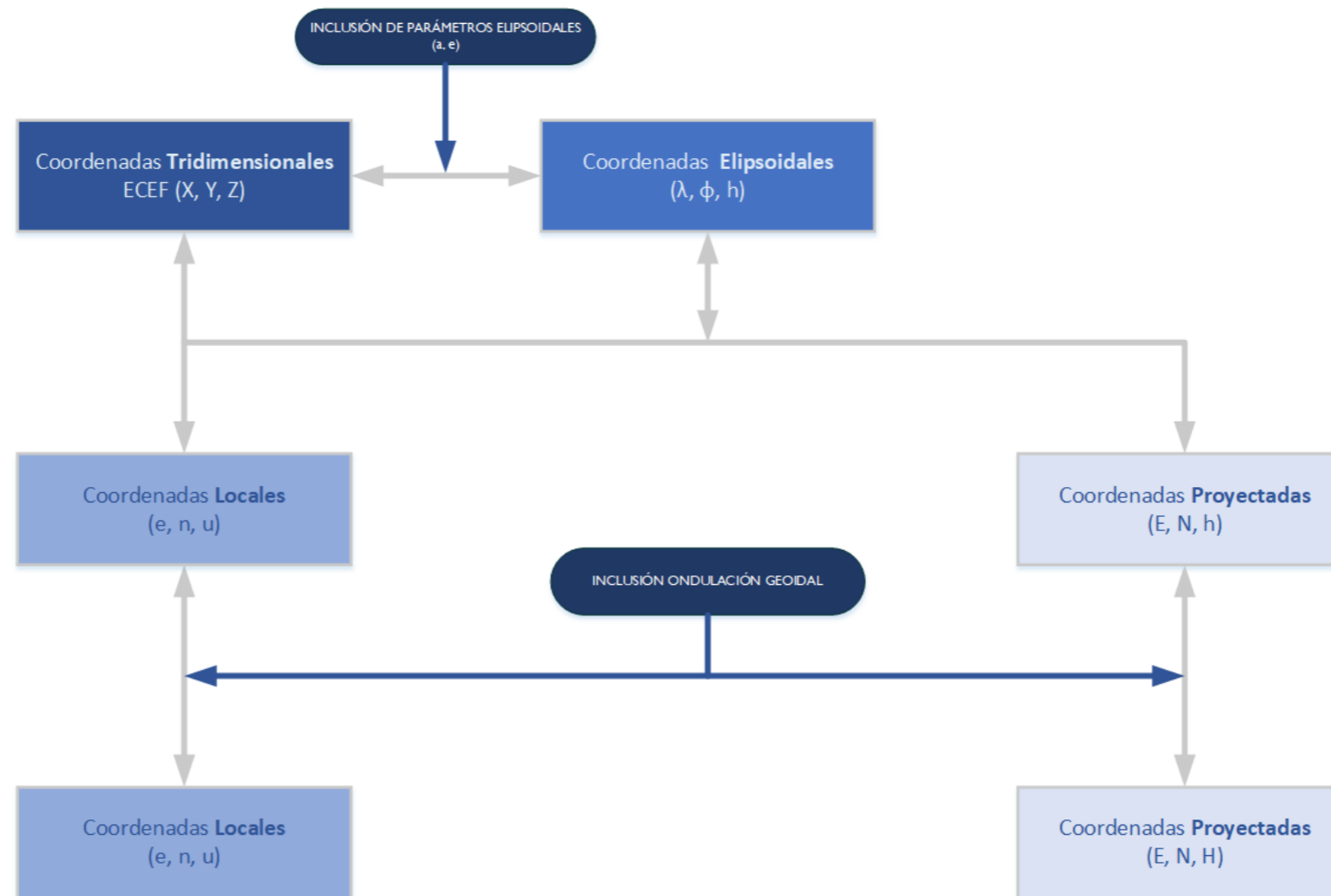


Fuente: IGN Argentina,
<https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/ProduccionCartografica/sistemas-de-proyeccion>

(Sánchez, 2004), Aspectos prácticos de la adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA_SIRGAS como Dátum oficial de Colombia. (IOGP, 2019), Geomatics, Guidance Note Number 7, part 2. Coordinate Conversions and Transformations including Formulas (USGS and John P. Snyder, 1987), Map Projections-A Working Manual

I.2. Operaciones con coordenadas

Flujo conversión de coordenadas



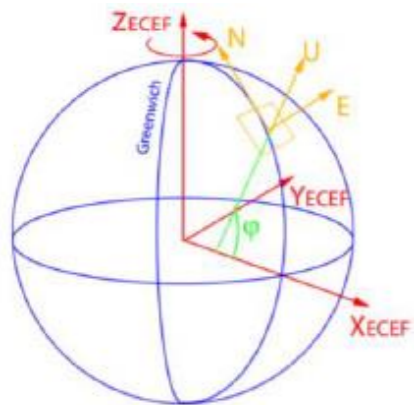
Fuente: Centro USC

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

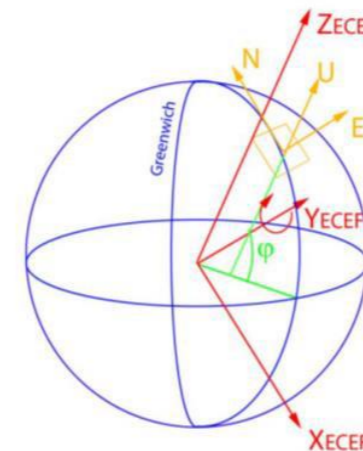
Conversión de coordenadas ECEF a coordenadas ENU

Los ejes n_i, e_i, u_i , del sistema de coordenadas locales en el punto P de tangencia (λ, φ, h) corresponden a los ejes norte, este, altura y pueden relacionarse según tres matrices de rotación mediante dos giros. El primer giro alrededor del eje Z sitúa los ejes X e Y en ambos sistemas paralelos según:



$$R(\lambda)_X = \begin{bmatrix} \cos\lambda_i & \sin\lambda_i & 0 \\ -\sin\lambda_i & \cos\lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ec.(1)}$$

Posteriormente la segunda rotación será $90^\circ - \varphi$ alrededor de Y según:



$$R(\varphi)_Y = \begin{bmatrix} \sin\varphi_i & 0 & -\cos\varphi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\varphi_i & 0 & \sin\varphi_i \end{bmatrix} \quad \text{ec.(2)}$$

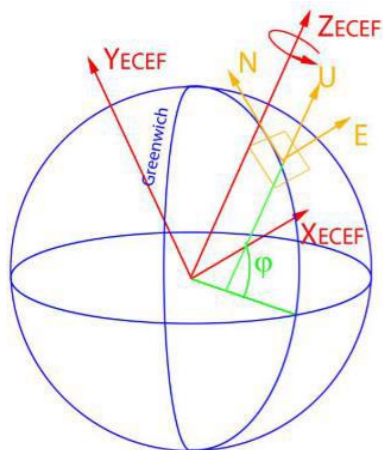
Fuente: (Navarro, 2014), Orientación espacial de múltiples sensores integrados con constreñimientos geométricos, 2014

Fuente: (Navarro, 2014), Orientación espacial de múltiples sensores integrados con constreñimientos geométricos, 2014

Aplicando las dos rotaciones logramos que los ejes se sitúen paralelos, quedando el eje X en sentido contrario al eje n, el eje Y en la misma dirección y sentido que e, y el eje Z paralelo a u. Lo anterior se refleja según:

$$\begin{pmatrix} -n \\ e \\ u \end{pmatrix}_{ENU} = R(\varphi)_Y R(\lambda)_X \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{bmatrix} \sin\varphi_i \cos\lambda_i & \sin\varphi_i \sin\lambda_i & -\cos\varphi_i \\ -\sin\lambda_i & \cos\lambda_i & 0 \\ \cos\varphi_i \cos\lambda_i & \cos\varphi_i \sin\lambda_i & \sin\varphi_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{ECEF} \quad \text{ec.(3)}$$

Con la intención de ordenar la expresión, se introduce una última rotación alrededor del eje Z:



$$R\left(\frac{-\pi}{2}\right)_Z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ec.(4)}$$

Quedando finalmente:

$$\begin{pmatrix} n \\ e \\ u \end{pmatrix}_{ENU} = R\left(\frac{-\pi}{2}\right)_Z R(\varphi)_Y R(\lambda)_X \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ECEF} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_i \cos\lambda_i & -\sin\varphi_i \sin\lambda_i & \cos\varphi_i \\ -\sin\lambda_i & \cos\lambda_i & 0 \\ \cos\varphi_i \cos\lambda_i & \cos\varphi_i \sin\lambda_i & \sin\varphi_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{ECEF} \quad \text{ec.(5)}$$

O de manera desglosada:

$$n_i = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_i \cos\lambda_i \\ -\sin\varphi_i \sin\lambda_i \\ \cos\varphi_i \end{bmatrix} \quad \text{ec.(6)}$$

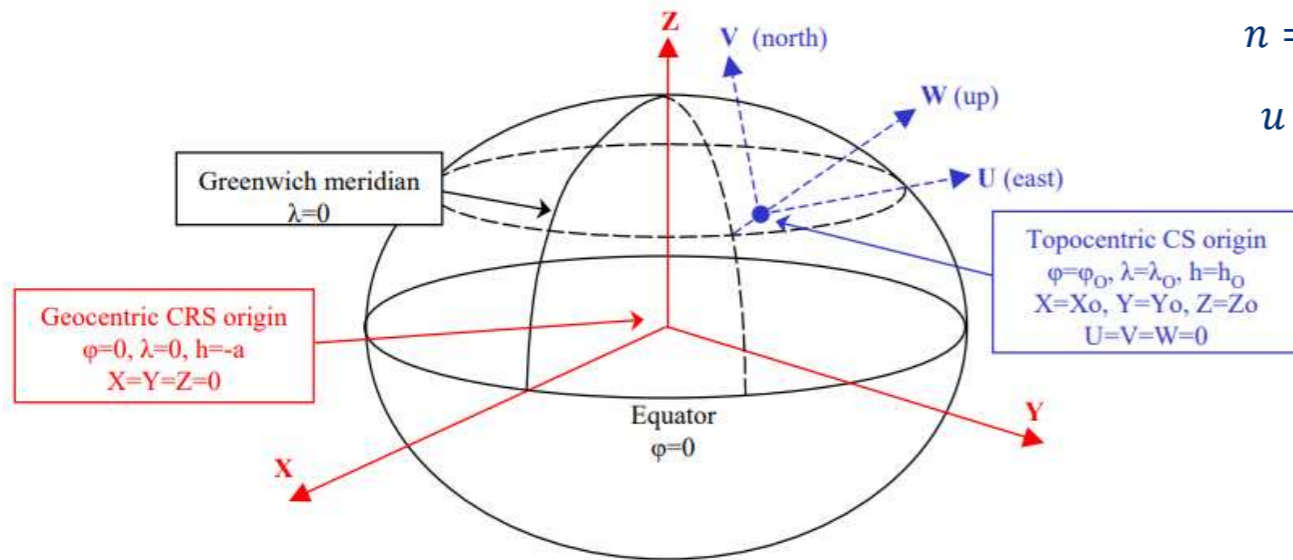
$$e_i = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_i \\ \cos\lambda_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{ec.(7)}$$

$$u_i = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i \cos\lambda_i \\ \cos\varphi_i \sin\lambda_i \\ \sin\varphi_i \end{bmatrix} \quad \text{ec.(8)}$$

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión de coordenadas ENU a coordenadas ECEF



Fuente: (IOGP, 2019), Geomatics, Guidance Note Number 7, part 2. Coordinate Conversions and Transformations including Formulas.

$$\begin{pmatrix} e \\ n \\ u \end{pmatrix} = R * \left(\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right); R = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ -\sin\phi_0\cos\lambda_0 & -\sin\phi_0\sin\lambda_0 & \cos\phi_0 \\ \cos\phi_0\cos\lambda_0 & \cos\phi_0\sin\lambda_0 & \sin\phi_0 \end{bmatrix} \quad \text{ec.(9)}$$

$$e = -(X - X_0) * \sin\lambda_0 + (Y - Y_0) * \cos\lambda_0 \quad \text{ec.(10)}$$

$$n = -(X - X_0) * \sin\phi_0\cos\lambda_0 - (Y - Y_0) * \sin\phi_0\sin\lambda_0 + (Z - Z_0) * \cos\phi_0 \quad \text{ec.(11)}$$

$$u = (X - X_0) * \cos\phi_0\cos\lambda_0 + (Y - Y_0) * \cos\phi_0\sin\lambda_0 + (Z - Z_0) * \sin\phi_0 \quad \text{ec.(12)}$$

Despejando X, Y, Z de la primera ecuación se tiene:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R^{-1} * \left(\begin{pmatrix} e \\ n \\ u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right) \quad \text{ec.(13)}$$

$$R^{-1} = R^T = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & -\sin\phi_0\cos\lambda_0 & \cos\phi_0\cos\lambda_0 \\ \cos\lambda_0 & -\sin\phi_0\sin\lambda_0 & \cos\phi_0\sin\lambda_0 \\ 0 & \cos\phi_0 & \sin\phi_0 \end{bmatrix} \quad \text{ec.(14)}$$

$$X = X_0 - e * \sin\lambda_0 - n * \sin\phi_0\cos\lambda_0 + u * \cos\phi_0\cos\lambda_0 \quad \text{ec.(15)}$$

$$Y = Y_0 + e * \cos\lambda_0 - n * \sin\phi_0\sin\lambda_0 + u * \cos\phi_0\sin\lambda_0 \quad \text{ec.(16)}$$

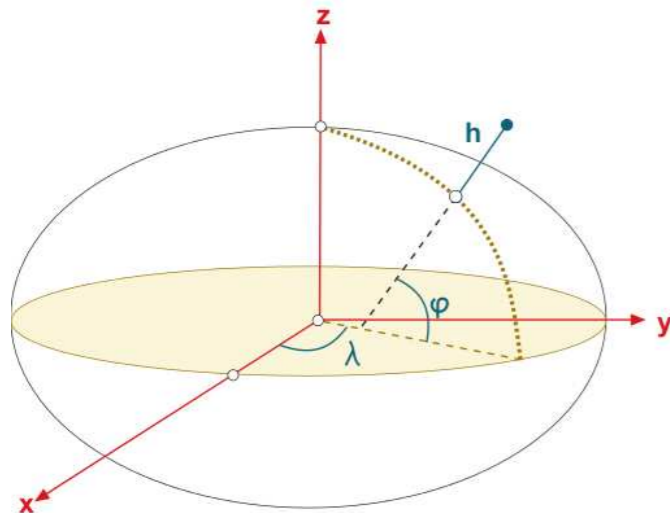
$$Z = Z_0 + n * \cos\phi_0 + u * \sin\phi_0 \quad \text{ec.(17)}$$

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión de coordenadas ECEF a coordenadas elipsoidales

Dado un punto P con coordenadas geodésicas X, Y, Z , el punto P ubicado en sistema geodésico con coordenadas elipsoidales, queda dado de la siguiente manera:



$$P = \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix}$$

Donde λ está dada por:

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad \text{ec.(21)}$$

φ está dada por:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{Z + e'^2 * b * \sin^3 \theta}{\sqrt{X^2 + Y^2 - (e^2 * a * \cos^3 \theta)}} \right] \quad \text{ec.(22)}$$

Donde:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Z * a}{\sqrt{X^2 + Y^2} * b} \quad \text{ec.(23)}$$

h está dada por:

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi} - N_n ; \quad N_n = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * \sin^2 \varphi}} ; \text{Gran Normal} \quad \text{ec.(24)}$$

Fuente: (ESA, 2023) https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ellipsoidal_and_Cartesian_Coordinates_Conversion

$a =$ Semi eje mayor $f =$ Achatamiento

$$b = a * (1 - f); \text{ Semi eje menor del elipsoide} \quad \text{ec.(18)}$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}; \text{ Primera excentricidad} \quad \text{ec.(19)}$$

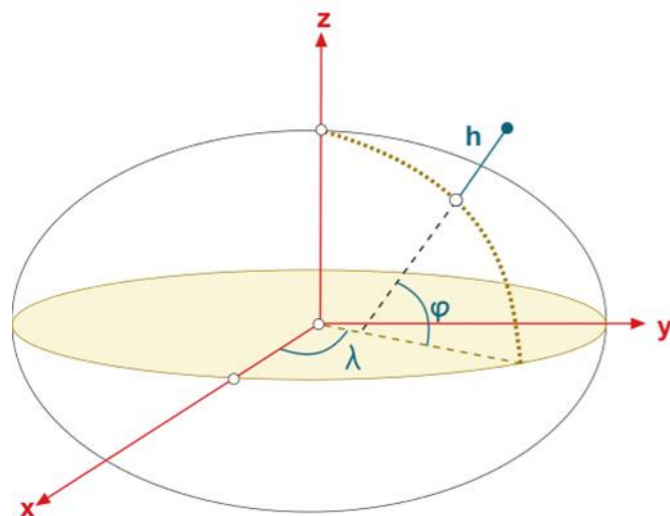
$$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}; \text{ Segunda excentricidad} \quad \text{ec.(20)}$$

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión de coordenadas elipsoidales a ECEF

Dado un punto P con coordenadas geodésicas λ (longitud), φ (latitud), h (altura elipsoidal) el punto P ubicado en sistema geocéntrico queda dado de la siguiente manera:



$$P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Donde X está dada por:

$$X = (N_n + h) * \cos \varphi \cos \lambda \quad ; \quad N_n = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * \sin^2 \varphi}} \quad ; \quad \text{Gran Normal} \quad \text{ec.(27)}$$

Y está dada por:

$$Y = (N_n + h) * \cos \varphi \sin \lambda \quad \text{ec.(28)}$$

Z está dada por :

$$Z = (N_n * (1 - e^2) + h) * \sin \varphi \quad \text{ec.(29)}$$

$a = \text{Semi eje mayor}$ $f = \text{Achatamiento}$

$$b = a * (1 - f); \text{Semi eje menor del elipsoide} \quad \text{ec.(25)}$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}; \text{Primera excentricidad} \quad \text{ec.(26)}$$

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión de coordenadas elipsoidales a UTM

Dado un punto P con coordenadas geodésicas λ (longitud), φ (latitud), h (altura elipsoidal) se realiza la conversión para obtener las coordenadas proyectadas del punto.

$$P = \begin{pmatrix} E \\ N \\ Z_0 \end{pmatrix}$$

Antes de realizar la conversión se deben realizar algunos cálculos previos y se deben tener en cuenta los parámetros elipsoidales.

$$a = \text{Semi eje mayor} \quad f = \text{Achatamiento}$$

$$b = a * (1 - f); \text{ Semi eje menor del elipsoide} \quad \text{ec.(30)}$$

$$c = \frac{a^2}{b}; \text{ Radio Polar de Curvatura} \quad \text{ec.(31)}$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}; \text{ Primera excentricidad} \quad \text{ec.(32)} \quad e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}; \text{ Segunda excentricidad} \quad \text{ec.(33)}$$

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 * \sin^2 \varphi)^{3/2}}; \text{ Radio medio de curvatura} \quad \text{ec.(34)}$$

$$N_n = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * \sin^2 \varphi}}; \text{ Gran Normal} \quad \text{ec.(35)}$$

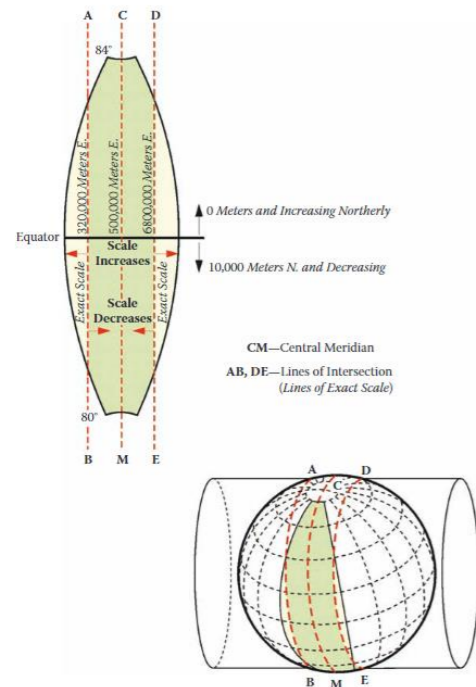
I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión de coordenadas elipsoidales a UTM

Sobre la latitud y longitud, estas deben estar expresadas en grados decimales y con su respectivo signo según hemisferio correspondiente (Norte +, Sur -) (caso para latitud) y referidas al Este (+) u Oeste (-) del meridiano de Greenwich (caso para longitud). Posteriormente estas (Lat y Long) deben ser pasadas a radianes para realizar la conversión.

$$\text{Grados decimales} = \text{grados} + \left(\frac{\text{minutos}}{60}\right) + \left(\frac{\text{segundos}}{3600}\right) ; \text{Radianes} = \left(\frac{\text{Grados decimales} * \pi}{180}\right) \quad \text{ec.}(36)$$



Fuente: (Sickle, 2015), GPS for Land Surveyors, 2015

Donde *Huso* está dado por:

$$\text{Huso} = \text{Parte entera de} \left[\left(\frac{\text{Grados decimales (longitud)}}{6} + 31 \right) \right] \quad \text{ec.}(37)$$

Se calcula el meridiano central:

$$\lambda_0 = \text{Huso} * 6 - 183 \quad \text{ec.}(38)$$

Desplazamiento del punto con respecto al meridiano central:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad \text{ec.}(39)$$

Factor de escala de la proyección:

$$k_0 = 0.9996$$

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión de coordenadas elipsoidales a UTM

La coordenada E está dado por:

$$E = 500000 + (k_0 * x) \quad \text{ec.(40)}$$

$$x = N_n \Delta\lambda \cos \varphi + N_n \frac{\Delta\lambda^3}{6} \cos^3 \varphi * (1 - t^2 + \eta^2) + N_n \frac{\Delta\lambda^5}{120} \cos^5 \varphi * (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2) + N_n \frac{\Delta\lambda^7}{5040} \cos^7 \varphi * (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) \quad \text{ec.(41)}$$

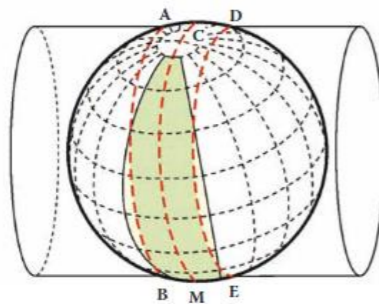
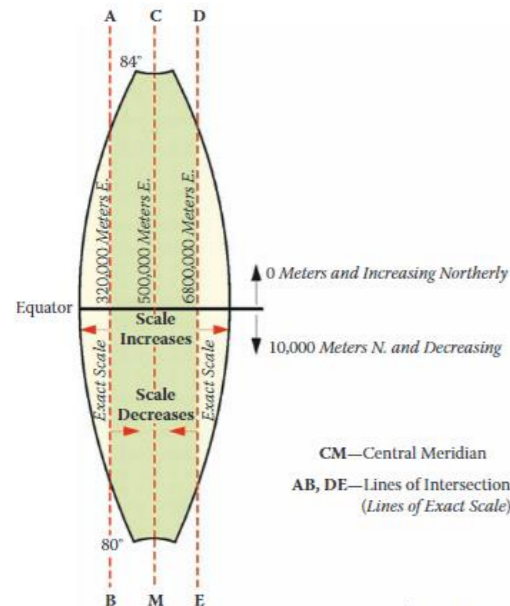
$$\eta = \sqrt{e'^2 * \cos \varphi} \quad \text{ec.(42)}$$

$$t = \tan \varphi \quad \text{ec.(43)}$$

La coordenada N está dado por :

$$N = 10000000 + (k_0 * y) \quad \text{ec.(44)}$$

$$y = Y(\varphi) + N_n \sin \varphi \frac{\Delta\lambda^2}{2} \cos \varphi + N_n \sin \varphi \frac{\Delta\lambda^4}{24} \cos^3 \varphi * (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) + N_n \sin \varphi \frac{\Delta\lambda^6}{720} \cos^5 \varphi * (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2) + N_n \sin \varphi \frac{\Delta\lambda^8}{40320} \cos^7 \varphi * (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) \quad \text{ec.(45)}$$

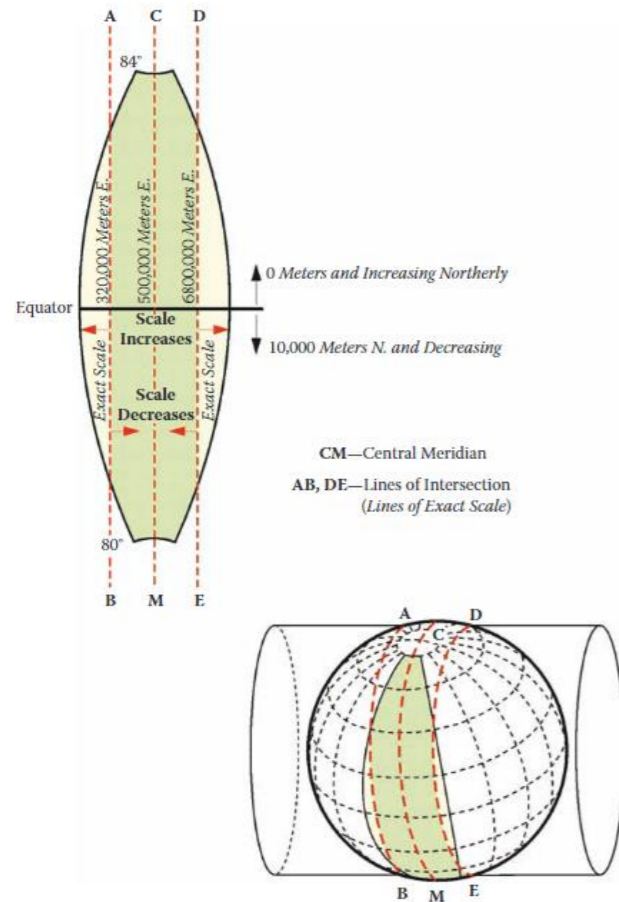


Fuente: (Sickle, 2015), GPS for Land Surveyors, 2015

I.2. Operaciones con coordenadas:

I.2.1 Conversiones

Conversión coordenadas elipsoidales a UTM



Fuente: (Sickle, 2015), GPS for Land Surveyors, 2015

Para el cálculo de la coordenada N se debe calcular previamente:

$$Y(\varphi) = \alpha(\varphi + \beta \sin 2\varphi + \gamma \sin 4\varphi + \delta \sin 6\varphi + \varepsilon \sin 6\varphi) \quad \text{ec.(46)}$$

$$\alpha = \frac{a + b}{2} \left(1 + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64} \right) ; n = \frac{a - b}{a + b} \quad \text{ec.(47)}$$

$$\beta = -\frac{3n}{2} + \frac{9n^3}{16} - \frac{3n^5}{32} \quad \text{ec.(48)}$$

$$\gamma = \frac{15n^2}{16} - \frac{15n^4}{32} \quad \text{ec.(49)}$$

$$\delta = -\frac{35n^3}{48} + \frac{105n^5}{256} \quad \text{ec.(50)}$$

$$\varepsilon = \frac{315n^4}{512} \quad \text{ec.(51)}$$

La coordenada Z_0 está dado por :

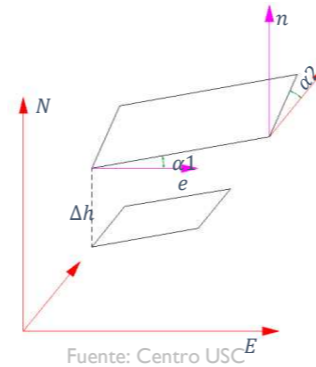
$$Z_0 = \frac{\Delta\lambda}{Huso} \quad \text{ec.(52)}$$

I.2. Operaciones con coordenadas

I.2.2 Transformaciones de semejanza

a. Transformaciones 1D: son las empleadas generalmente para asumir los cambios de geoide vs elipsoide.

$$H_i - h_i = \Delta h - x_i d\alpha_1 + y_i d\alpha_2 \quad \text{ec.(53)}$$



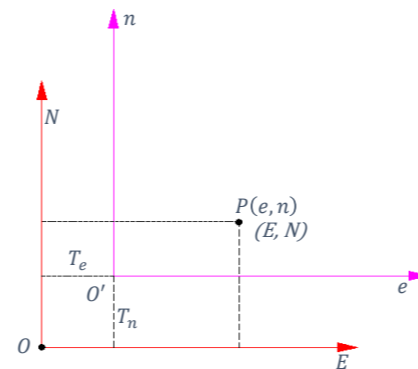
Fuente: Centro USC

b. Transformaciones 2D: son las empleadas para transformar SGR (Sistema Geodésico de Referencia) planimétricamente, ampliamente empleadas también en fotogrametría, no se calculan parámetros de altura, solo rotaciones, traslaciones y factores de escala.

b.1. Traslaciones 2D: Calcula desplazamientos planimétricos mediante la media de las diferencias entre origen y destino)

$$e' = E + T_e \quad \text{ec.(54)}$$

$$n' = N + T_n \quad \text{ec.(55)}$$



Fuente: Centro USC

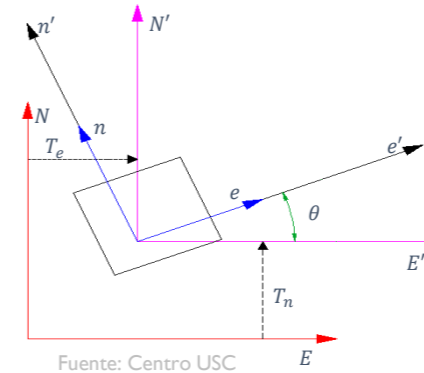
I.2. Operaciones con coordenadas

I.2.2 Transformaciones de semejanza

b.2. Helmert 2D: Conocida como transformación de semejanza de 4 parámetros. Esta transformación incluye escalado, rotación y dos traslaciones.

$$e' = T_e + \mu_e x \cos\theta + \mu_e y \operatorname{sen}\theta \quad \text{ec.(56)}$$

$$n' = T_n - \mu_n x \operatorname{sen}\theta + \mu_n y \cos\theta \quad \text{ec.(57)}$$

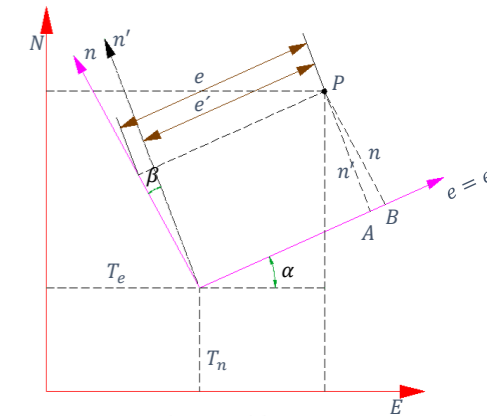


Fuente: Centro USC

b.3. Afín 2D: Conocida como transformación de 6 parámetros. Se trata del caso general de la transformación de Helmert de 4 parámetros, donde se utilizan escalas diferentes para los ejes X e Y, y además, estos ejes no son ortogonales.

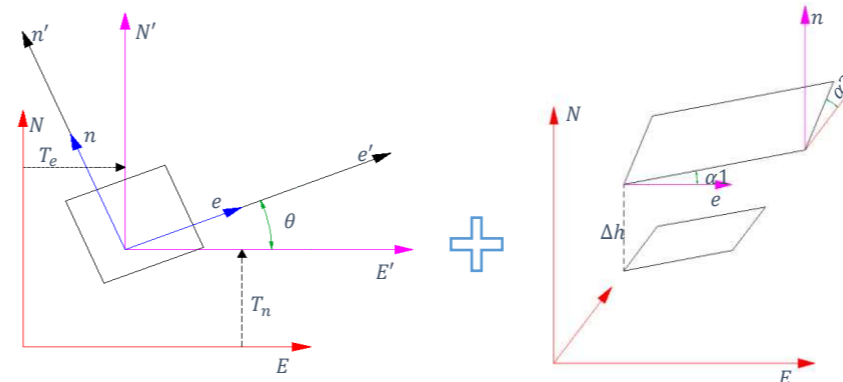
$$e' = T_e + \mu x \cos\theta + \mu y \operatorname{sen}(\theta+\beta) \quad \text{ec.(58)}$$

$$n' = T_n - \mu x \operatorname{sen}\theta + \mu y \cos(\theta+\beta) \quad \text{ec.(59)}$$



Fuente: Centro USC

b.4. Helmert 2D+Desplazamiento vertical: Este tipo de transformación es una combinación de la transformación de 4 parámetros de Helmert y un desplazamiento en Z. Esta traslación en Z se calcula como la media de las diferencias entre los puntos origen y destino con esta componente.



Fuente: Centro USC

$$e' = T_e + \mu_e x \cos\theta - \mu_e y \operatorname{sen}\theta \quad \text{ec.(60)}$$

$$n' = T_n + \mu_n x \operatorname{sen}\theta + \mu_n y \cos\theta \quad \text{ec.(61)}$$

$$h' = T_h + h \quad \text{ec.(62)}$$

I.2. Operaciones con coordenadas

I.2.2 Transformaciones de semejanza

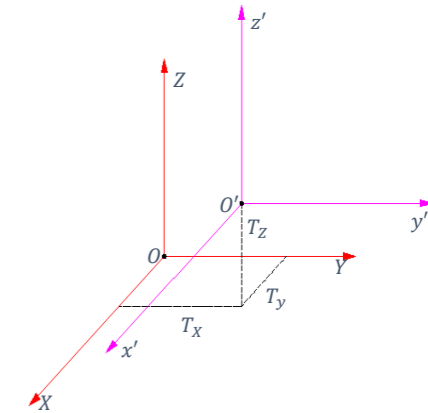
c. Transformaciones 3D: Consiste en transformaciones en las tres dimensiones. Estas transformaciones consideran X, Y, Z en conjunto.

c.1. Traslaciones 3D: Este tipo de transformación calcula los desplazamientos X, Y, Z mediante la media de las diferencias entre origen y destino. Sólo es necesario un par de puntos.

$$x' = x + T_x \quad \text{ec. (63)}$$

$$y' = y + T_y \quad \text{ec. (64)}$$

$$z' = z + T_z \quad \text{ec. (65)}$$



Fuente: Centro USC

c.2. Helmert 3D: Esta transformación también es conocida como transformación de 7 parámetros. Transfiere puntos de un sistema tridimensional de coordenadas a otro. Los 7 parámetros implicados son: tres rotaciones, tres traslaciones y un factor de escala. La matriz de rotación se construye mediante tres giros consecutivos alrededor de los ejes X, Y, Z. Es necesario disponer al menos de 3 pares de puntos. La matriz rotación estará compuesta de por los ángulos de rotación, suponiendo que los ángulos de rotación sean lo suficientemente pequeños la expresión $\cos R_i = 1$ y la expresión $\sin R_i = \Delta R_i$.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (1 + \lambda) * \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad \text{ec. (67)}$$

$$X = (1 + \lambda) (a_{11} * x + a_{12} * y + a_{13} * z) + T_x \quad \text{ec. (68)}$$

$$Y = (1 + \lambda) (a_{21} * x + a_{22} * y + a_{23} * z) + T_y \quad \text{ec. (69)}$$

$$Z = (1 + \lambda) (a_{31} * x + a_{32} * y + a_{33} * z) + T_z \quad \text{ec. (70)}$$

$$a_{11} = \cos R_Y \cos R_Z = 1$$

$$a_{12} = \cos R_X \sin R_Z + \sin R_X \sin R_Y \cos R_Z = -\Delta R_Z$$

$$a_{13} = \sin R_Z \sin R_X - \cos R_X \sin R_Y \sin R_Z = -\Delta R_Y$$

$$a_{21} = -\cos R_Y \sin R_Z = -\Delta R_Z$$

$$a_{22} = \cos R_X \cos R_Z - \sin R_X \sin R_Y \sin R_Z = 1$$

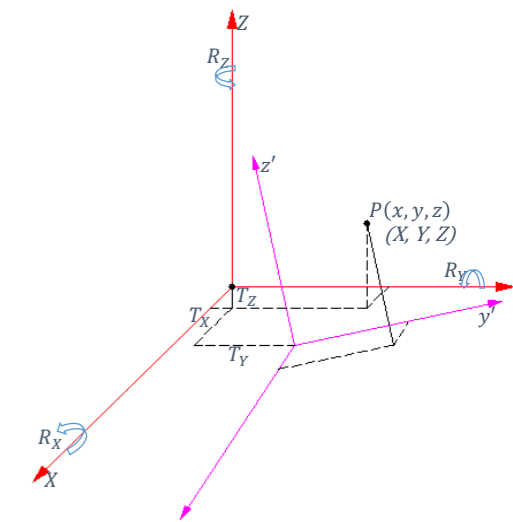
$$a_{23} = \sin R_X \cos R_Z + \cos R_X \sin R_Y \sin R_Z = \Delta R_X$$

$$a_{31} = \sin R_Y = \Delta R_Y$$

$$a_{32} = -\sin R_X \cos R_Y = -\Delta R_X$$

$$a_{33} = \cos R_X \cos R_Y = 1$$

ec. (66)



Fuente: Centro USC

I.2. Operaciones con coordenadas

I.2.2 Transformaciones de semejanza

Quedando la matriz de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (1 + \lambda) * \begin{bmatrix} 1 & -\Delta R_Z & -\Delta R_Y \\ -\Delta R_Z & 1 & \Delta R_X \\ \Delta R_Y & -\Delta R_X & 1 \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad \text{ec.(71)}$$

Resultando las siguientes ecuaciones:

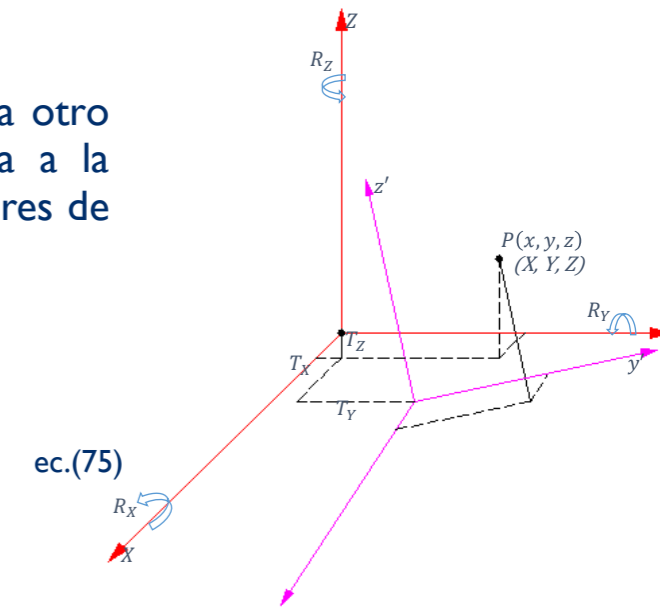
$$X = (1 + \lambda) (1 * x + -\Delta R_Z * y + -\Delta R_Y * z) + T_x \quad \text{ec.(72)}$$

$$Y = (1 + \lambda) (-\Delta R_Z * x + 1 * y + \Delta R_X * z) + T_y \quad \text{ec.(73)}$$

$$Z = (1 + \lambda) (\Delta R_Y * x + -\Delta R_X * y + 1 * z) + T_z \quad \text{ec.(74)}$$

c.3. Helmert 3D de 14 parámetros: Esta transformación es utilizada para el paso desde un marco de referencia a otro tomando en cuenta que estos marcos de referencia se encuentran en distintas épocas. Esta relación es idéntica a la transformación de 7 parámetros, con la diferencia, que a cada una de las componentes de la ecuación se le añaden valores de variación para cada una de sus componentes, quedando el cálculo de coordenadas de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (1 + \lambda + \dot{\lambda}(t_2 - t_1)) * \begin{bmatrix} 1 & -\Delta R_Z + \dot{\Delta R}_Z(t_2 - t_1) & -\Delta R_Y + \dot{\Delta R}_Y(t_2 - t_1) \\ -\Delta R_Z + \dot{\Delta R}_Z(t_2 - t_1) & 1 & \Delta R_X + \dot{\Delta R}_X(t_2 - t_1) \\ \Delta R_Y + \dot{\Delta R}_Y(t_2 - t_1) & -\Delta R_X + \dot{\Delta R}_X(t_2 - t_1) & 1 \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x + \dot{T}_x(t_2 - t_1) \\ T_y + \dot{T}_y(t_2 - t_1) \\ T_z + \dot{T}_z(t_2 - t_1) \end{pmatrix} \quad \text{ec.(75)}$$



Fuente: Centro USC

I.2. Operaciones con coordenadas

Polo de Euler

Permite considerar los desplazamientos de posiciones sobre la superficie terrestre como una rotación con una velocidad angular definida alrededor de un polo.

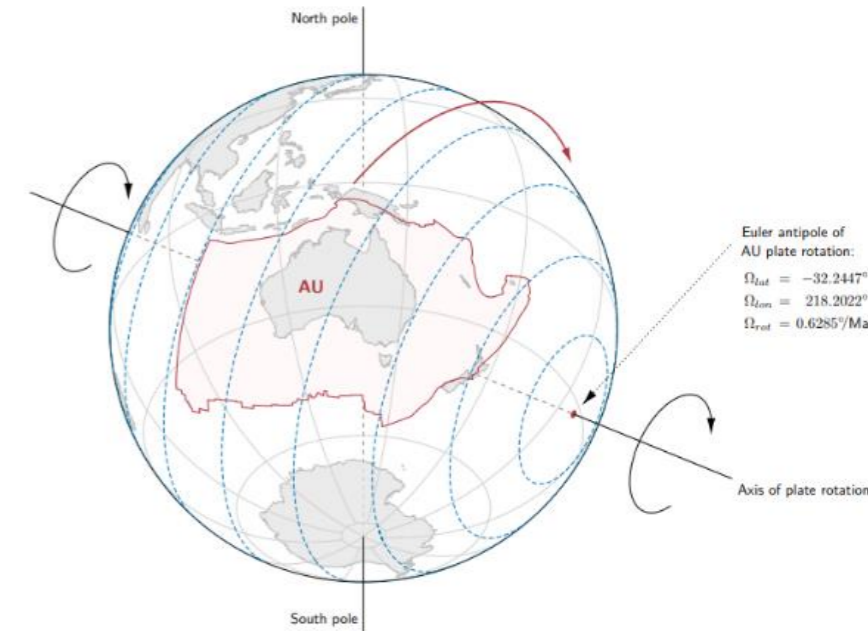
En cualquier caso, los movimientos de las placas se pueden expresar en relación con una sola placa que se mantiene fija, o con respecto a un marco de referencia "sin rotación neta" (NNR) que representa el movimiento de la superficie de la tierra en relación con el origen de la tierra en un sentido absoluto. El primero permite cuantificar el movimiento de las estaciones con respecto a una placa fija arbitrariamente; el último para el movimiento de todas las estaciones en relación con un marco de referencia absoluto (centrado en la tierra, fijo en la tierra).

Todas las placas tectónicas de la Tierra se pueden cuantificar en términos de velocidad angular alrededor de un polo de Euler. Matemáticamente, movimientos de placas globales normalmente se expresan en términos de:

- Velocidad angular esférica, dada como la latitud del polo de Euler Ω_{lat} , longitud Ω_{lon} (en grados decimales) y una tasa de rotación hacia la derecha (en sentido contrario a las agujas del reloj) Ω_{rot} en grados por millón de años
- Tasas de rotación cartesianas centradas en la Tierra, dadas como $\Delta\dot{R}_x$, $\Delta\dot{R}_y$ y $\Delta\dot{R}_z$ en milisegundos de arco por año (Fraser, R., Leahy, F. and Collier, P., (2023)).

La siguiente expresión convierte el polo de Euler en elementos cartesianos.

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{R}_x \\ \Delta\dot{R}_y \\ \Delta\dot{R}_z \end{pmatrix} = \frac{\Omega_{rot}}{10^6} \begin{pmatrix} \cos(\Omega_{lat}) \cos(\Omega_{lon}) \\ \cos(\Omega_{lat}) \sin(\Omega_{lon}) \\ \sin(\Omega_{lat}) \end{pmatrix} \quad \text{ec. (76)}$$



Fuente: (Fraser, R., Leahy, F. and Collier, P., (2023)), DynAdjust User's Guide Version 1.2

I.2. Operaciones con coordenadas

Ejercicio Transformaciones

Para el cálculo de parámetros de transformación se necesitan coordenadas tanto en el sistema de origen como en el sistema de destino, los puntos se encuentran ubicados en Chile:

Estación	PSAD56 (L)			SIRGAS (G)		
	X[M]	Y[m]	Z[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]
LACUESTA	2083833.562	-5690493.701	-1990322.975	2083578.755	-5690357.585	-1990729.568
POCONCHILE	2059912.653	-5692263.046	-2006055.44	2059656.909	-5692123.958	-2006461.393
ELMORRO	2037783.959	-5697955.544	-2009547.435	2037527.857	-5697816.376	-2009953.34
BASECHACAEXTRO	2044928.300	-5686584.424	-2035660.519	2044672.242	-5686445.328	-2036067.264

En base a uno de los puntos se calcula la matriz t_0 la cual está compuesta de la diferencia simple entre las coordenadas PSAD56 de uno de los puntos y la coordenada SIRGAS, esto para generar un vector desplazamiento y poder calcular los 7 parámetros de la transformación entre un sistema local (L) y global (G) (Hofmann, 2008). Para este caso se utilizó el punto LACUESTA, lo ideal es hacerlo con el promedio de los desplazamientos para una mejor convergencia.

Quedando como resultado:

$$t_0 = \begin{bmatrix} 254.807 \\ -136.116 \\ 406.593 \end{bmatrix}$$

$$t_0 = \begin{bmatrix} X_L - X_G \\ Y_L - Y_G \\ Z_L - Z_G \end{bmatrix} \text{ ec.(77)}$$

Para calcular los parámetros de transformación se necesita realizar un planteamiento de las siguientes matrices:

$$L = \begin{bmatrix} (X_{L1} - X_{G1}) - t_{0_{1:1}} \\ (Y_{L1} - Y_{G1}) - t_{0_{2:1}} \\ (Z_{L1} - Z_{G1}) - t_{0_{3:1}} \\ \vdots \\ (X_{Ln} - X_{Gn}) - t_{0_{n:1}} \\ (Y_{Ln} - Y_{Gn}) - t_{0_{n+1:1}} \\ (Z_{Ln} - Z_{Gn}) - t_{0_{n+2:1}} \end{bmatrix} \text{ ec.(78)}$$

$$J = \begin{bmatrix} X_{Gi} & 0 & -Z_{Gi} & Y_{Gi} & 1 & 0 & 0 \\ Y_{Gi} & Z_{Gi} & 0 & -X_{Gi} & 0 & 1 & 0 \\ Z_{Gi} & -Y_{Gi} & X_{Gi} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ ec.(79)}$$



I. Tema: Sistema de referencia de coordenadas

I.2. Operaciones con coordenadas

Ejercicio Transformaciones

$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.937 \\ -2.972 \\ -0.640 \\ 1.295 \\ -3.052 \\ -0.688 \\ 1.251 \\ -2.980 \\ 0.152 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 2083578.76 & 0 & 1990729.57 & -5690357.59 & 1 & 0 & 0 \\ -5690357.59 & -1990729.57 & 0 & -2083578.76 & 0 & 1 & 0 \\ -1990729.57 & 5690357.59 & 2083578.76 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2059656.91 & 0 & 2006461.39 & -5692123.96 & 1 & 0 & 0 \\ -5692123.96 & -2006461.39 & 0 & -2059656.91 & 0 & 1 & 0 \\ -2006461.39 & 5692123.96 & 2059656.91 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2037527.86 & 0 & 2009953.34 & -5697816.38 & 1 & 0 & 0 \\ -5697816.38 & -2009953.34 & 0 & -2037527.86 & 0 & 1 & 0 \\ -2009953.34 & 5697816.38 & 2037527.86 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2044672.24 & 0 & 2036067.26 & -5686445.33 & 1 & 0 & 0 \\ -5686445.33 & -2036067.26 & 0 & -2044672.24 & 0 & 1 & 0 \\ -2036067.26 & -5686445.33 & 2044672.24 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con las matrices expuestas se realiza un ajuste por mínimos cuadrados para calcular dX y los residuos (matriz V), es importante destacar que la componente P en la ecuación 80 corresponde a la matriz peso que para el caso será una matriz unitaria:

$$dX = (J^T * P * J)^{-1} * (J^T * P * L) \text{ ec.(80)}$$

$$V = J * dX - L \text{ ec.(81)}$$

Dando como resultado de dX :

$$dX = \begin{bmatrix} -0.0000163 \\ 0.0000013 \\ 0.0000187 \\ -0.0000651 \\ -373.7272051 \\ -226.5527124 \\ -78.8167316 \end{bmatrix}$$

De la matriz dX se obtienen los siguientes parámetros de transformación:

T1	-118.9202051
T2	-362.6687124
T3	327.7762684
s	0.999983666
θ1 (Sexagesimal)	7.37283E-05
θ2 (Sexagesimal)	0.001068677
θ3 (Sexagesimal)	-0.00373148

I.2. Operaciones con coordenadas

Ejercicio Transformaciones

Una transformación de coordenadas de 7 parámetros se aplica a partir de la siguiente fórmula: $X_{LD} = sR'X_{GD} + T$ ec.(82)

Donde s es el factor de escala, X_{GD} son las coordenadas (X,Y,Z) del Sistema Moderno que se transformaran a coordenadas (X,Y,Z) en el sistema Local X_{LD} . T son las traslaciones necesarias para que los orígenes de ambos marcos de referencia coincidan. Y por último la matriz R corresponde a la matriz de rotaciones.

$$R' = \begin{bmatrix} 1 & \theta_3 & -\theta_2 \\ -\theta_3 & 1 & \theta_1 \\ \theta_2 & -\theta_1 & 1 \end{bmatrix} = I + \begin{bmatrix} 0 & \Delta\theta_3 & -\Delta\theta_2 \\ -\Delta\theta_3 & 0 & \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 & -\Delta\theta_1 & 0 \end{bmatrix} = I + \Delta R \quad \text{ec.(83)}$$

En base a lo mencionado anteriormente, y a los siguientes parámetros de transformación calcular las coordenadas para la estación **GEMELOS (punto ubicado en Chile)**

s	0.999983666	T_1	-118,9202	X	2048462,733
θ_1	0.000073728	T_2	-362,6687	Y	-5671872,062
θ_2	0.001068677	T_3	327,7763	Z	-2073317,915
θ_3	-0.003731480				

$$X_{LD} = 0,999983666 * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -0.00006513 & -0.00001865 \\ 0.00006513 & 0 & 0.00000129 \\ 0.00001865 & -0.00000129 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 2048462,733 \\ -5671872,062 \\ -2073317,915 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -118.9202 \\ -362.6687 \\ 327.7763 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2048718.409 \\ -5672011.349 \\ -2072910.768 \end{bmatrix}$$

I.2. Operaciones con coordenadas

Aplicación de transformación de 14 parámetros

Una transformación de coordenadas de 14 parámetros se aplica entre marcos de referencia que se encuentran en diferentes épocas, aplicando la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (1 + \lambda + \dot{\lambda}(t_2 - t_1)) * \begin{bmatrix} 1 & -\Delta R_Z + \dot{\Delta R}_Z(t_2 - t_1) & -\Delta R_Y + \dot{\Delta R}_Y(t_2 - t_1) \\ -\Delta R_Z + \dot{\Delta R}_Z(t_2 - t_1) & 1 & \Delta R_X + \dot{\Delta R}_X(t_2 - t_1) \\ \Delta R_Y + \dot{\Delta R}_Y(t_2 - t_1) & -\Delta R_X + \dot{\Delta R}_X(t_2 - t_1) & 1 \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x + \dot{T}_x(t_2 - t_1) \\ T_y + \dot{T}_y(t_2 - t_1) \\ T_z + \dot{T}_z(t_2 - t_1) \end{pmatrix} \quad \text{ec.(84)}$$

Donde a los parámetros ya conocidos, $(1 + \lambda)$ (factor de escala), T_i (traslaciones en los ejes) y ΔR_i (rotaciones en los ejes), se le agregan variaciones a cada una de las componentes.

En base a lo mencionado anteriormente, y a los siguientes parámetros de transformación correspondientes al ITRF (de 2000 a 2014) calcular las coordenadas para la estación **CHET (punto ubicado en México)**, la cual se encuentra en SIRGAS2000 y se desea pasar a SIR17P01.

λ	$-2.12 * 10^{-12}$	$\dot{\lambda}$	$-1.1 * 10^{-13}$	T_x	-0.0007	\dot{T}_x	-0.0001	x	179584.804
ΔR_x	0.00	$\dot{\Delta R}_x$	0.00	T_y	-0.0012	\dot{T}_y	-0.0001	y	-6048080.746
ΔR_y	0.00	$\dot{\Delta R}_y$	0.00	T_z	0.0261	\dot{T}_z	0.0019	z	2010447.355
ΔR_z	0.00	$\dot{\Delta R}_z$	0.00	t_2	2010.0			t_1	2000.4

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (1 + -2.12 * 10^{-12} + -1.1 * 10^{-13}(2010.0 - 2000.4)) * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 179584.804 \\ -6048080.746 \\ 2010447.355 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0007 + -0.0001(2010.0 - 2000.4) \\ -0.0012 + -0.0001(2010.0 - 2000.4) \\ 0.0261 + 0.0019(2010.0 - 2000.4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 179584.802 \\ -6048080.748 \\ 2010447.399 \end{bmatrix}$$

ESCUELA SIRGAS 2023

1.3. Espacio de consulta y discusión. 10 MINUTOS

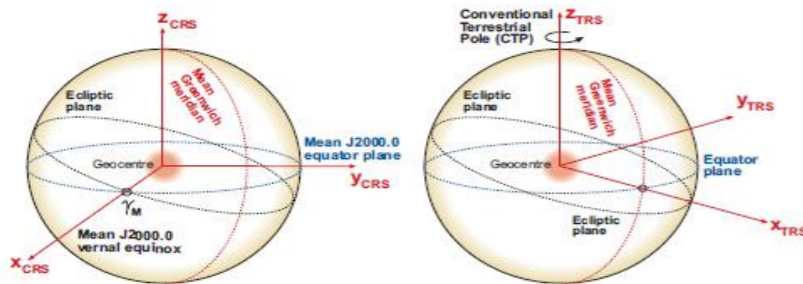
2.1. Generalidades, Sistemas y Marcos de Referencia

(Drewes, 2012), How to Fix the Geodetic Datum for Reference Frames in Geosciences Applications? (IAU, 2006), IAU 2006 NFA GLOSSARY, https://synte.obspm.fr/iauWGnfa/NFA_Glossary.html

2.1.1 Definición Sistema y Marco de Referencia (Celeste y Terrestre)

Sistema de Referencia:

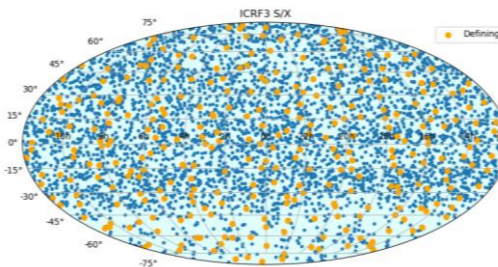
Un sistema de referencia (*Reference System*), es la definición teórica e ideal de una estructura geométrica para referenciar las coordenadas de puntos en el espacio, está constituido por un conjunto de parámetros, modelos convencionales y algoritmos; queda definido por un origen, direcciones de los ejes, escala y algoritmos para sus transformaciones espaciales y temporales. (Drewes, 2012)



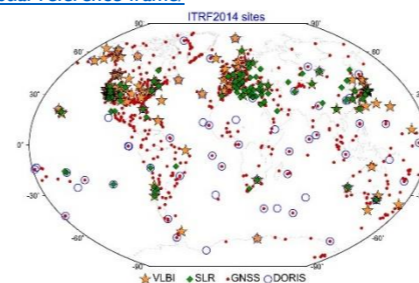
Fuente: ESA, GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

Marco de Referencia:

Un marco de referencia (*Reference Frame*) es la realización práctica de un sistema de referencia (IAU, 2006), es decir, el conjunto de puntos en la superficie terrestre o en la esfera celeste junto con sus coordenadas y las técnicas aplicadas en las medidas y métodos utilizados.



Fuente: GGOS, <https://ggos.org/item/celestial-reference-frame/>

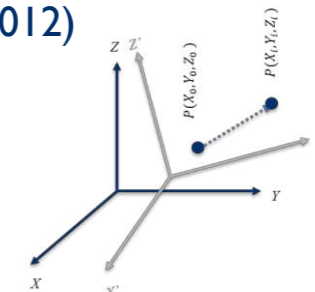


Fuente: ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, 2016

Datum Geodésico:

Datum geodésico es el conjunto de parámetros que definen la situación y orientación de un sistema de coordenadas geodésicas. Se asocia a la posición, orientación, tamaño y forma de una figura geométrica (elipsoide) lo más coincidente con la figura física de la Tierra (geoide). Generalmente el datum se define a nivel local o regional, y el sistema de referencia a nivel global.

Erróneamente se asocia el datum al punto astronómico fundamental, que es aquel punto que coincide elipsoide y geoide, donde la desviación de la vertical es nula. (Drewes, 2012)



Fuente: Centro USC

2.1. Generalidades, Sistemas y Marcos de Referencia

2.1.1 Definición Sistema y Marco de Referencia (Celeste y Terrestre)

- Local Tie: corresponde al enlace microgeodésico(a través de la creación de vectores y su ajuste) entre los centros geométricos, de los equipos de las diferentes técnicas de medición que componen una estación fundamental (GNSS, VLBI, SLR, DORIS). El local tie entra en el cálculo del Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF) pero debe contar con una precisión ente 1 a 3 mm (IERS, 2003).

El local tie se puede realizar de diferentes maneras, es decir, empleando diferentes técnicas de medición, algunas de estas técnicas son (Poyard, 2017):

- Levantamiento convencional : Consiste en medir ángulos horizontales y verticales, así como distancias.
- Nivelación: Proporciona una muy buena precisión en el componente de altura. Se puede usar como un conjunto independiente de observaciones que contienen solo las diferencias de altura.
- Determinación con GNSS: Esta técnica es particularmente apropiada si los puntos de levantamiento están demasiado lejos entre sí o si no hay intervisibilidad entre ellos.



Estación fundamental Ishioka, Fuente: An effective approach for accurate estimation of VLBI–GNSS local-tie vectors

2.1. Generalidades, Sistemas y Marcos de Referencia

2.1.2 Principios matemáticos: El sistema de referencia internacional terrestre (ITRS) se define como un sistema geocéntrico, esto significa que las coordenadas dadas al origen son cero, es decir, $X_0 = Y_0 = Z_0 = 0$. La orientación del eje Z está cerca del eje de rotación de la Tierra (variable), los ejes X e Y están en el plano ecuatorial (Drewes, 2009). La orientación de las coordenadas sigue los parámetros de orientación de la tierra de BIH (Bureau International de l'Heure) 1984.0 y su escala es métrica por convención (Drewes, 2012).

Para fijar el marco de referencia es importante tener que esto se debe realizar tomando un enfoque gravimétrico, teniendo en cuenta que el centro de masa de la Tierra está definido por ($M = \text{masa total de la Tierra}$):

$$X_0 = \iiint X dm/M \quad \text{ec.(85)}$$

$$Y_0 = \iiint Y dm/M \quad \text{ec.(86)}$$

$$Z_0 = \iiint Z dm/M \quad \text{ec.(87)}$$

Los coeficientes armónicos esféricos de primer grado y orden del campo de gravedad de la Tierra expresan la posición del geocentro con el semieje mayor a como factor de escala (Drewes, 2009):

$$C_{11} = \iiint X dm/aM \quad \text{ec.(88)}$$

$$S_{11} = \iiint Y dm/aM \quad \text{ec.(89)}$$

$$C_{10} = \iiint Z dm/aM \quad \text{ec.(90)}$$

Se utiliza un modelo de gravedad con $C_{11} = S_{11} = C_{10} = 0$, para estimar las coordenadas y fijar el sistema de coordenadas al geocentro.

Por otro lado, la orientación también podría realizarse por métodos gravimétricos, pero actualmente los coeficientes armónicos esféricos de segundo grado (C_{21}, S_{21}, S_{22}) no pueden determinarse con la precisión suficiente, por tanto, la orientación debe fijarse de manera convencional, por ejemplo, con los parámetros de orientación de BIH 1984.0. Con respecto a la escala, esta es métrica y no hay evolución temporal de esta; es siempre la misma unidad de longitud. Por ende, el sistema tiene origen, orientación y escala (Drewes, 2012).

(Drewes, 2009), Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum – Basic considerations
(Drewes, 2012), How to Fix the Geodetic Datum for Reference Frames in Geosciences Applications?

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

2.2. Sistema y Marco de Referencia Celeste, orientación y movimientos de la tierra

2.2.1. ICRS (Sistema de Referencia Celeste Internacional): Es un sistema de referencia casi-inercial (casi porque está afectado del movimiento de la Tierra alrededor del Sol) , donde el eje X está definido en la dirección del equinoccio vernal medio en la época J2000.0, el eje Z es ortogonal al plano definido por el ecuador medio en la época J2000.0 (plano fundamental) y el eje Y es ortogonal a los ejes anteriores.

2.2.2. ICRF (Marco de Referencia Celeste Internacional): Se determina a partir de un conjunto de coordenadas precisas de fuentes extra galácticas (se fija con respecto a puntos lejanos del Universo) y corresponde a la realización.

2.2.3. Precesión, nutación, movimiento del polo y mareas terrestres: Conocer estos movimientos es necesario para llevar a cabo la transformación entre marcos de referencia (ICRF y ITRF).

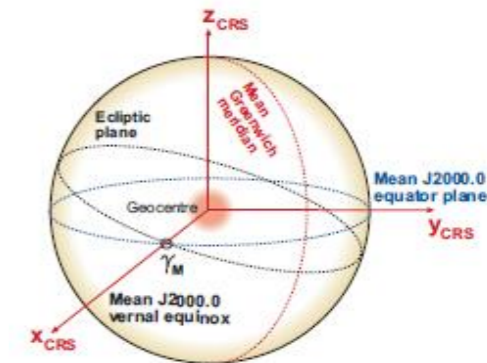
I. Precesión y Nutación: el eje de rotación de la Tierra y su plano ecuatorial no se mantiene fijo en el espacio (en relación a las llamadas estrellas fijas), sino que gira alrededor del polo de la eclíptica.

Los elementos de PRECESIÓN en época τ para el modelo de la IAU del 2006 están dados por (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O., 2017):

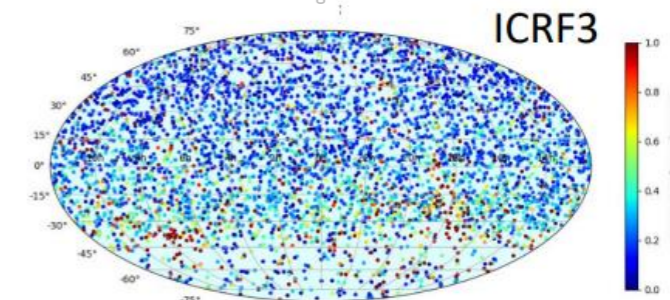
$$\zeta_A = 2.650545'' + 2306.083227''\tau + 0.29884990''\tau^2 + 0.01801828''\tau^3 - 0.5971'' * 10^{-6}\tau^4 - 3.17300'' * 10^{-7}\tau^5 \quad \text{ec.(91)}$$

$$\theta_A = 2004.191903'' \tau - 0.4294934'' \tau^2 - 0.041822'' \tau^3 - 7.089'' * 10^{-6}\tau^4 - 1.274'' * 10^{-7}\tau^5 \quad \text{ec.(92)}$$

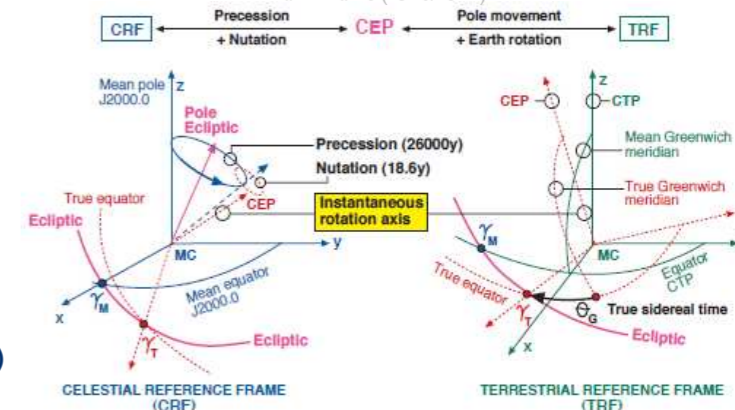
$$\alpha_A = -2.6505453'' + 2306.0771813''\tau + 1.09273483''\tau^2 + 0.018268373''\tau^3 - 28.596'' * 10^{-6}\tau^4 - 2.904'' * 10^{-7}\tau^5 \quad \text{ec.(93)}$$



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms



Fuente: (GFZ and Heinkelmann, 2019), International Celestial Reference System and Frame (ICRS/ICRF)



Fuente: ESA, GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

(Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), 2017), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1

2.2. Sistema y Marco de Referencia Celeste, orientación y movimientos de la tierra

2.2.3. Precesión, nutación, movimiento del polo y mareas terrestres:

I. Precesión y Nutación: el eje de rotación de la Tierra y su plano ecuatorial no se mantiene fijo en el espacio (en relación a las llamadas estrellas fijas), sino que gira alrededor del polo de la eclíptica.

La NUTACIÓN esta expresada en dos ángulos, uno corresponde a la nutación en longitud ($\Delta\psi$) y el otro a la nutación en oblicuidad ($\Delta\varepsilon$) descritos de la siguiente manera:

$$\Delta\psi = \sum_{i=1}^n (a_i \sin A_i + a'_i \cos A_i) \quad \text{ec.(94)}$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{i=1}^n (b_i \cos A_i + b'_i \sin A_i) \quad \text{ec.(95)}$$

Donde a_i, a'_i, b_i, b'_i son funciones lineales de τ y el ángulo A_i está dado por:

$$A_i = n_{\ell,i} \ell + n_{\ell',i} \ell' + n_{F,i} F + n_{D,i} D + n_{\Omega,i} \Omega \quad \text{ec.(96)}$$

El cual representa una combinación lineal de argumentos fundamentales de la órbita solar y lunar (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O., 2017).

Donde:

ℓ = Anomalía media de la luna

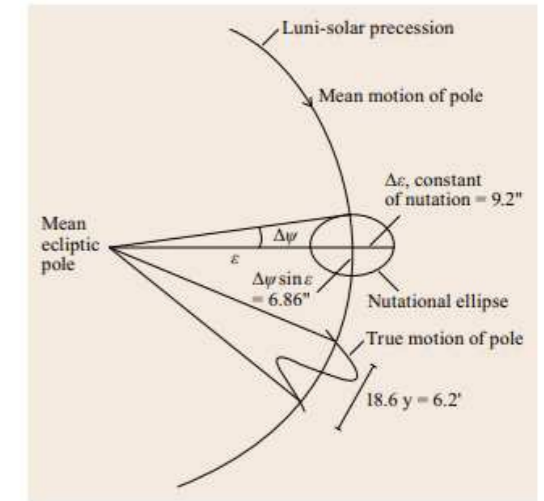
ℓ' = Anomalía media del sol

F = Longitud media de la Luna menos la longitud media del nodo ascendente de la Luna.

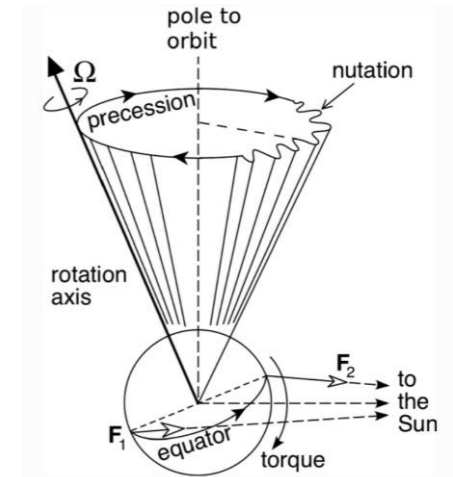
D = Elongación media de la Luna desde el Sol

Ω = Longitud media del nodo ascendente de la Luna

La IAU designa el modelo de precesión y nutación, el cual corresponde al IAU2000 A (IAU, 2006)



Fuente: (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), 2017), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1



Fuente: (Baland, RM., Yseboodt, M., 2020), The precession and nutations of a rigid Mars

(Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), 2017), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1 (IAU, 2006), IAU 2006 Resolution B1

2.2. Sistema y Marco de Referencia Celeste, orientación y movimientos de la tierra

2.2.3. Precesión, nutación, movimiento del polo y mareas terrestres:

2. Movimiento del polo: Debido a la distribución de la estructura de masas de la Tierra y a su variación, el eje de rotación no está fijo en relación con la corteza terrestre, sino que se mueve (CEP, Conventional Ephemeris Pole) sobre la superficie de la Tierra dentro de un cuadrado de aproximadamente 20m de lado en relación a un punto con coordenadas fijas (CTP, Conventional Terrestrial Pole). El cálculo del movimiento del polo esta dado por r_e el cual corresponde al vector unitario que define una dirección geocéntrica de un punto en el sistema de referencia terrestre en términos de coordenadas esféricas.

$$r_e = \begin{pmatrix} \cos \lambda \sin \phi \\ \sin \lambda \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} \quad \text{ec.(97)}$$

Y la transformación del polo de referencia terrestre al polo instantáneo se da por las matrices rotación:

$$r_i = R_1(y_p)R_2(x_p)r_e = Wr_e \quad \text{ec.(98)}$$

Donde:

$$W = R_3(-s') * \begin{pmatrix} 1 - a'x_p^2 & a'x_p y_p & -x_p \\ a'x_p y_p & 1 - a'y_p^2 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 - a'(x_p^2 + y_p^2) \end{pmatrix} \quad \text{ec.(99)}$$

$$a' = \frac{1}{2} + \frac{(x_p^2 + y_p^2)}{8} \quad \text{ec.(100)}$$

Quedando:

$$W = R_3(-s')R_1(y_p)R_2(x_p) \quad \text{ec.(101)}$$

$$s' = -0.0015'' \left(\frac{a_c^2}{1.2} + a_a^2 \right) \tau \quad \text{ec.(102)}$$

a_c y a_a corresponde a la amplitud del arcsec de Chandler “bamboleo” y del “bamboleo” anual.

El IERS tabula las coordenadas del movimiento del polo como parte de su cálculo en los parámetros de orientación terrestres (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O., 2017).

(Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), 2017), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

2.2. Sistema y Marco de Referencia Celeste, orientación y movimientos de la tierra

2.2.3. Precesión, nutación, movimiento del polo y mareas terrestres:

3. Mareas terrestres: Estas influyen en la superficie terrestre debido a la deformación por fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol, debido a la deformación por carga variada de los océanos y la atmósfera. Los efectos en el marco de referencia se pueden mitigar con un modelo terrestre (FES2014b) o un modelo oceánico (Scherneck).

2.2.4. Transformación entre sistema de referencia terrestre y celeste: La relación entre el CRF y el TRF está dada por la siguiente ecuación:

$$[TRF] = R_M(t)R_S(t)N(t)P(t)[CRF] \quad \text{ec.(103)}$$

Donde:

[CRF]: Vector de coordenadas en CRF.

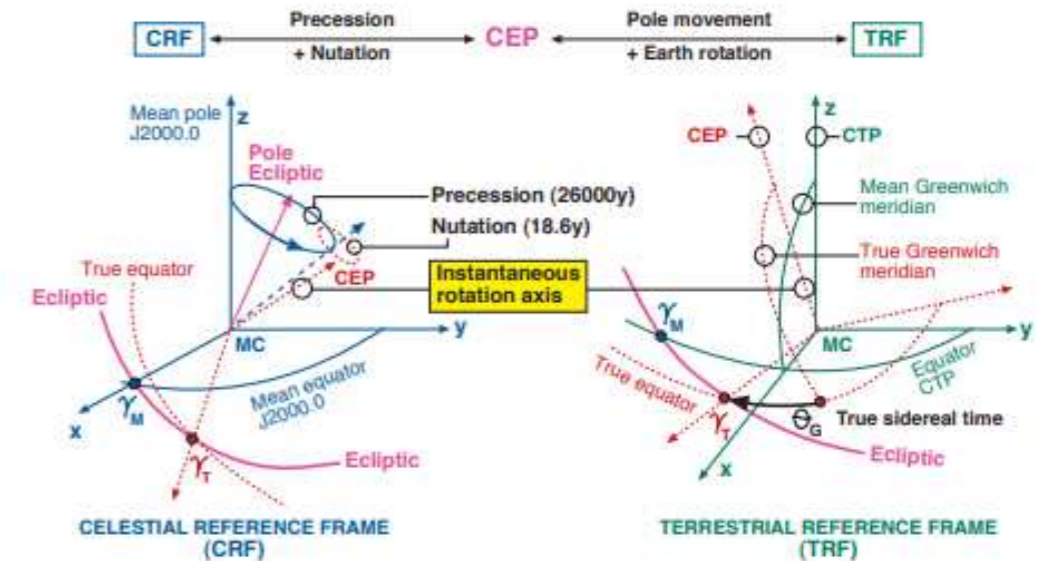
[TRF]: Vector de coordenadas en TRF.

P : Matriz de transformación asociada a la precesión entre la época de referencia y la época t .

N : Matriz de transformación asociada a la nutación en época t .

R_S : Matriz de transformación asociada con la rotación de la Tierra alrededor del eje del CEP (Celestial Ephemeris Pole).

R_M : Matriz de transformación asociada con el movimiento del polo. (ESA,2013)



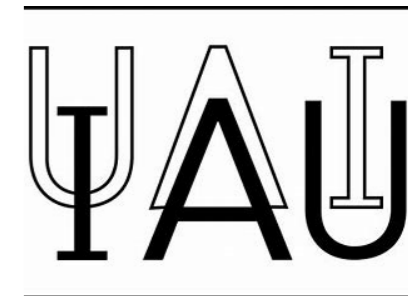
Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

2.3. Sistema de Referencia Terrestre

2.3.1. IAU: Corresponde a la Unión Astronómica Internacional, su misión es promover y salvaguardar la ciencia de la astronomía en todos sus aspectos. La actividad clave de la IAU es la organización de reuniones científicas y entre las otras tareas de la IAU están la definición de constantes astronómicas y físicas fundamentales, además, sirve como autoridad internacional para asignar designaciones a cuerpos celestes y características de la superficie en ellos. (IAU, 2023)

2.3.2. IUGG: Es la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, se dedica a avanzar, promover y comunicar el conocimiento del sistema de la Tierra, su entorno espacial y los procesos dinámicos que causan el cambio. La IUGG realiza la promoción internacional y coordinación de estudios científicos de la Tierra y su entorno en el espacio, los estudios incluyen la forma de la Tierra, sus campos gravitacionales y magnéticos, la dinámica de la Tierra en su conjunto y de sus partes componentes, la estructura interna de la Tierra, la composición y la tectónica, los terremotos, entre otros. (IUGG, 2023)

2.3.3. IERS: Corresponde al Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia, fue establecido por la IAU y la IUGG en el año 1987. Los principales objetivos del IERS son, proporcionar el Sistema de Referencia Internacional Celeste (ICRS) junto con el Marco de Referencia Internacional Celeste (ICRF), además del Sistema de Referencia Internacional Terrestre (ITRS) junto con el Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF), también proporciona datos geofísicos para interpretar las variaciones de tiempo/espacio en los parámetros de orientación de la tierra de la ICRF, ITRF o modelar dichas variaciones y entregar normas, constantes y modelos (es decir, convenciones) que fomentan la adhesión internacional. (GGOS, 2020)



Fuente: (IAU, 2023), <https://www.iau.org/>



Fuente: (IUGG, 2023), <https://iugg.org/>



Fuente: (GGOS, 2023), <https://ggos.org/item/iers/>

(IAU, 2023), <https://www.iau.org/administration/about/>
(IUGG, 2023), <https://iugg.org/about/>
(GGOS, 2020), <https://ggos.org/item/iers/>

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

2.3. Sistema de Referencia Terrestre

2.3.4. Global (ITRS) definiciones y realizaciones: ITRS (International Terrestrial Reference System) corresponde a un sistema de referencia geocéntrico mundial, el cual co-rotata con la tierra en su movimiento diurno en el espacio. En este sistema las posiciones de los puntos en la superficie de la tierra tienen coordenadas que experimentan pequeñas variaciones con el tiempo, esto debido a los movimientos asociados a la tectónica de placas y los efectos de las mareas. Las realizaciones del ITRS son producidas por el IERS (International Earth Rotation and Reference System Service), bajo el nombre de International Terrestrial Reference Frame (ITRF). La primera realización corresponde a ITRF88 donde posteriormente la siguió ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014 y la realización actual ITRF2020. (Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X. et al, 2023), (Petit and Luzum, 2010)



Fuente: SIRGAS, <https://sirgas.ipgh.org/>

Fuente: ITRF, <https://itrf.ign.fr/en/homepage>

ITRF Version	IGS frame	Start Date	End Date	GPS Week
ITRF92	ITRF92	02.01.1994	31.12.1994	730–781
ITRF93	ITRF93	01.01.1995	29.06.1996	782–859
ITRF94	ITRF94	30.06.1996	28.02.1998	860–946
ITRF94_retained	ITRF96	01.03.1998	31.07.1999	947–1020
ITRF94_retained	ITRF97	01.08.1999	26.02.2000	1020–1050
ITRF94_retained	ITRF97 orbit rotational alignment	27.02.2000	03.06.2000	1051–1064
ITRF97	IGS97	04.06.2000	01.12.2001	1065–1142
ITRF2000	IGS00	02.12.2001	10.01.2004	1143–1252
ITRF2000_retained	IGb00	11.01.2004	04.11.2006	1253–1399
ITRF2005	IGS05	05.11.2006	16.04.2011	1400–1631
ITRF2008	IGS08	17.04.2011	06.10.2012	1632–1708
ITRF2008	IGb08	07.10.2012	28.01.2017	1709–1933
ITRF2014	IGS14	29.01.2017	16.05.2020	1934–2105
ITRF2014	IGb14	17.05.2022	26.11.2022	2106–2237
ITRF2020	IGS20	27.11.2022		2238–

Fuente: Reference Frame, <https://igs.org/wg/reference-frame/#documents>

(Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X. et al, 2023), ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>
 (Petit and Luzum, 2010), IERS Conventions (IERS Technical Note; No.36)
 (SIRGAS, 2023) <https://sirgas.ipgh.org/organizacion/sobre-nosotros/>

2.4. Marco de Referencia Terrestre

2.4.1. Tipos de marco según movimiento:

2.4.1.1. Marco de Referencia Dinámico: Fijado con respecto a la tierra en conjunto, co-rotando con ella en movimiento en el espacio. Dentro de este sistema las placas tectónicas se mueven (lentamente, unos cm al año). Para un observador situado en una placa tectónica las coordenadas de su ubicación en el sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas cambian ligeramente con el tiempo, a esto se le llama Marco Dinámico (ISO, 2017). **Estos marcos están calculados en base a componentes Geodésicas como componentes Geofísicas.**

2.4.1.2. Marco de Referencia Cinemático: Posee la misma definición que el marco dinámico, pero **este marco se define de manera netamente geodésica.**

2.4.1.3. Marco de Referencia Estático: Fijado a una de las placas tectónicas de la tierra. Las coordenadas de los puntos se muevan con dicha placa y para el observador situado en la placa las coordenadas parecen no cambiar en el tiempo, a esto se le denomina Marco Estático (ISO, 2017).

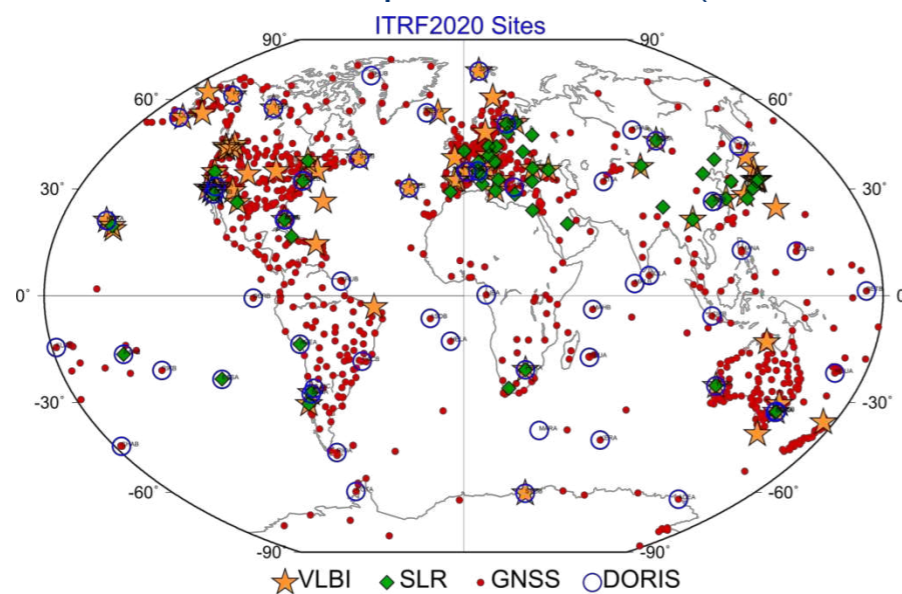


2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

2.4. Marco de Referencia Terrestre

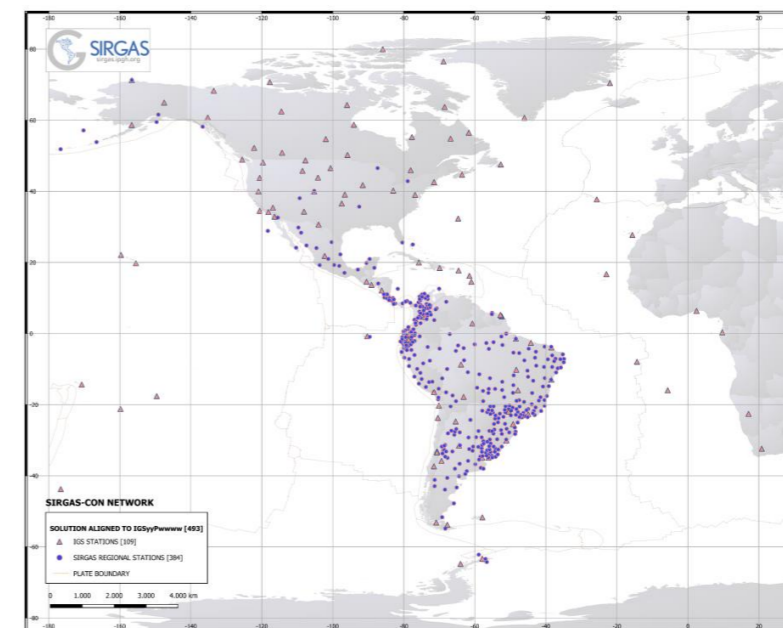
2.4.2. Global (ITRF): Corresponde a la realización del ITRS calculada en promedio cada 4 a 6 años, actualmente corresponde a ITRF2020 el cual es calculado en base a cuatro técnicas geodésicas espaciales, SLR, VLBI, DORIS y GNSS, con puntos distribuidos en todo el mundo. Todas las realizaciones del ITRF incluyen posiciones de estación y velocidades, modelan los cambios seculares de la corteza terrestre, por eso pueden ser utilizadas para comparar observaciones de diferentes épocas. (ITRF, 2023)

2.4.3. Continental (SIRGAS-CON): Corresponde a la última realización de SIRGAS, se compone de aproximadamente 494 estaciones de operación continua, estas estaciones son procesadas semanalmente por los centros locales de procesamiento los cuales entregan una solución semilibre, estas soluciones entregadas por los centros de procesamiento son combinadas (centros de combinación DGF e IBG) con el fin de obtener una realización precisa y actual del marco de referencia. A través de SIRGAS-CON se calculan tanto las soluciones semanales como soluciones multianuales, donde estas últimas están en línea con el ITRF actual y son calculadas cada 2 o 4 años aproximadamente. (SIRGAS, 2023)



(ITRF, 2023), <https://itrf.ign.fr/en/background/>
(SIRGAS, 2023) <https://sirgas.ipgh.org/realizaciones/sirgas-con/>

Fuente: GGOS, <https://ggos.org/item/terrestrial-reference-frame/>



Fuente: Centro USC

2.5. Modelos de deformación

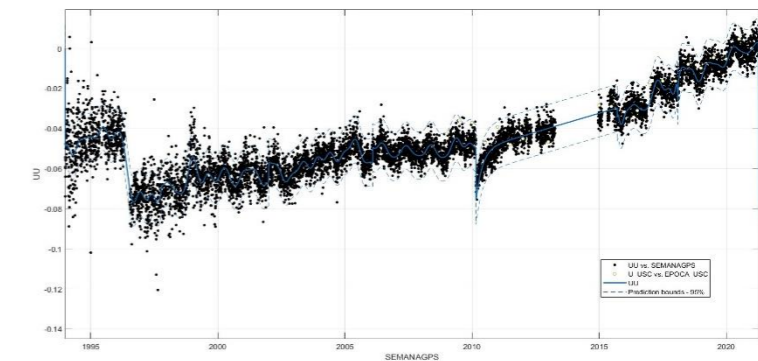
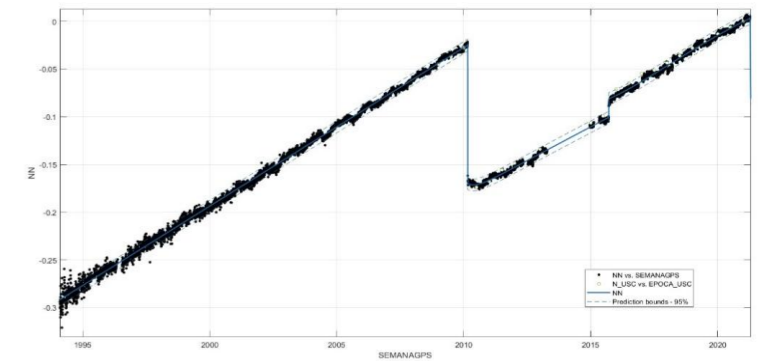
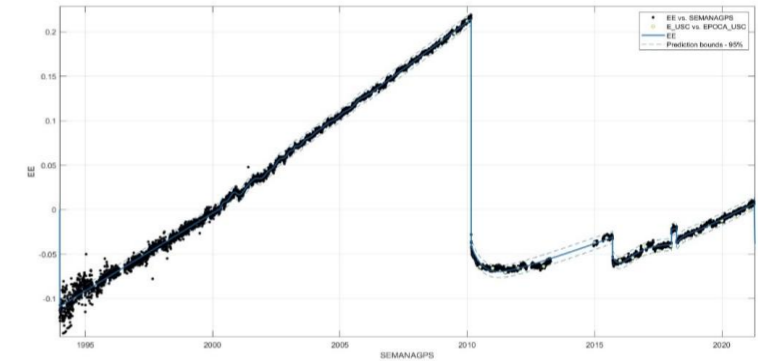
2.5.1. Series de Tiempo: Una serie temporal es el conjunto de coordenadas (este, norte y altura) por estación, cuyas observaciones se realizan en periodos de tiempos regulares. (García, 2016). El objetivo de una serie temporal suele ser doble, el primero es comprender o modelar el mecanismo estocástico y el segundo es predecir o pronosticar valores futuros (Jonathan D. Cryer, 2008).

Se utilizan para la detección de los movimientos de la corteza terrestre, determinación de la velocidad o deformación, ajustando las observaciones a una tendencia lineal u otro modelo.

En casos particulares en los que el movimiento de la estación no puede reconstruirse con series temporales lineales (Sánchez, 2020), es necesario un modelo conjunto, es decir, que considere un periodo intersísmico, coseísmico y postsísmico. Utilizando un modelo lineal tanto para el periodo intersísmico como para el salto coseísmico, funciones de Fourier en el caso de movimientos periódicos, y en caso de haber un terremoto, se modela el periodo postsísmico empleamos un modelo de deformación postsísmica (PSD) utilizando funciones logarítmicas y exponenciales (Sobrero, 2020) (Altamimi, Z., Reischung, P., Collilieux, X. et al, 2023) tal como muestra la siguiente ecuación:

$$f(t) = x(t_0) + \underbrace{\sum_{i=1}^{n_p+1} p_i(t-t_r)^{i-1}}_{\text{Linear velocity}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t-t_j)}_{\text{discontinuities}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_F} [p_{a,k} \cos(\omega_k(t-t_0)) + p_{b,k} \sin(\omega_k(t-t_0))]}_{\text{periodic}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n^{log}} a_i \log\left[1 + \frac{\Delta t}{T_i}\right] + \sum_{i=1}^{n^{exp}} b_i \left[1 - e\left(-\frac{\Delta t}{T_i}\right)\right]}_{\text{PSD}} \quad \text{ec.(104)}$$

ESTACIÓN SANT



Fuente: Centro USC

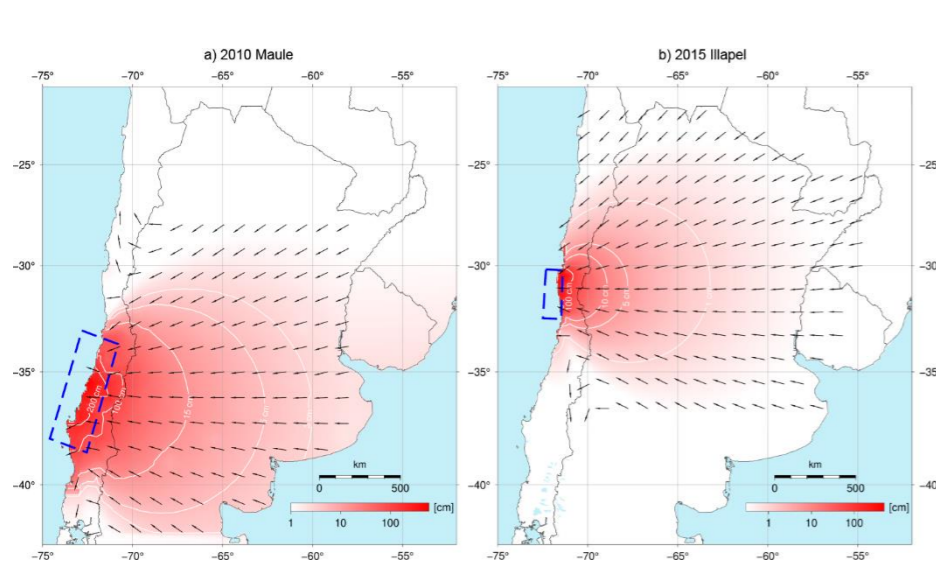
(García, 2016), Análisis de series temporales en estaciones permanentes GPS
 (Sánchez, 2020), Geodetic Monitoring of the Variable Surface Deformation in Latin America
 (Sobrero, 2020), Logarithmic and exponential transients in GNSS trajectory models as indicators of dominant processes in postseismic deformation
 (Altamimi, Z., Reischung, P., Collilieux, X. et al, 2023), ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions.
<https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

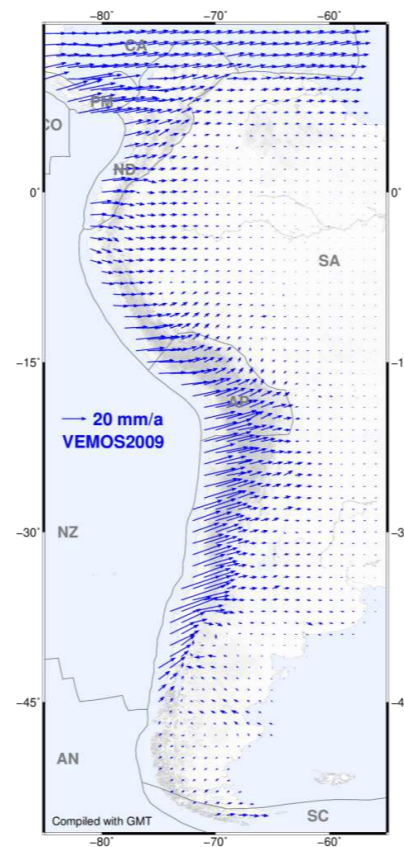
2.5. Modelos de deformación

Con los modelos de deformación, es posible monitorear la cinemática de los marcos de referencia, determinar parámetros de transformación entre coordenadas presísmicas y postsísmicas (deformadas), e interpolar los movimientos superficiales que surgen de la tectónica de placas o las deformaciones de la corteza en áreas donde no se establecen estaciones geodésicas (GGOS,2023). Algunos métodos de interpolación son, interpolación por mínima curvatura e interpolación por lamina delgada (thin plate spline).

Países como Argentina, Indonesia, Nueva Zelanda y Grecia son algunos de los cuales aplican modelos de deformación en sus territorios. Actualmente Chile, también está trabajando en un modelo de deformación para su país.

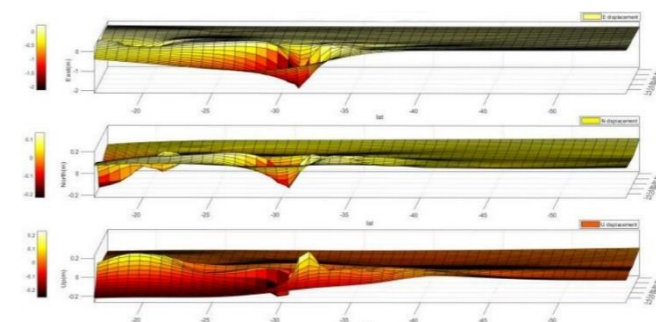
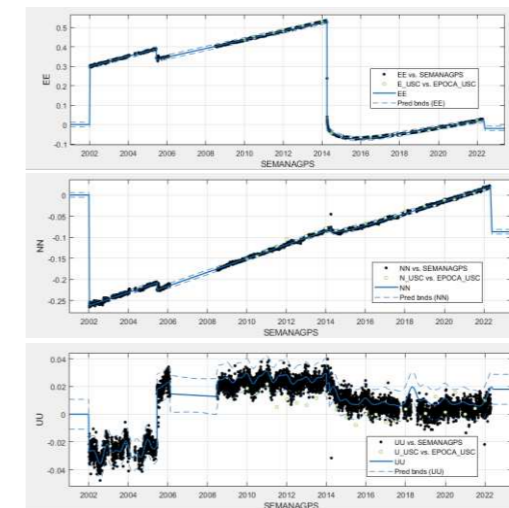


Fuente: VEL-Ar, <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/VEL-Ar>

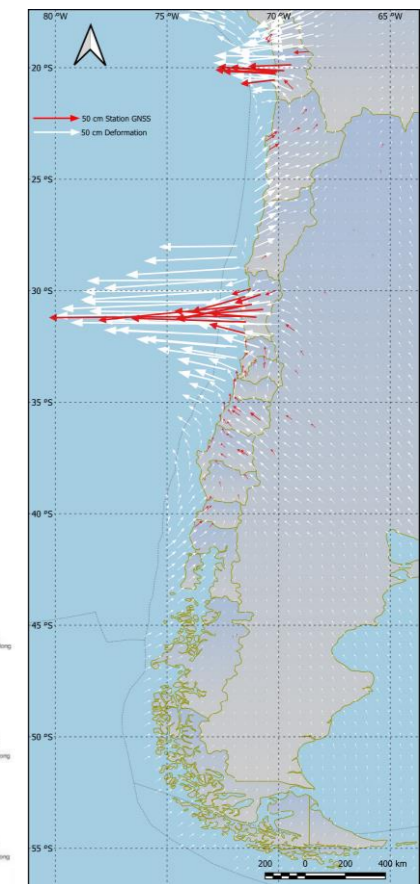


Fuente: Modelos de deformación superficial para SIRGAS (VEMOS) relativos a la placa sudamericana

ESTACIÓN IQQE



Fuente: ADELA :Analysis of DEformation beyond Los Andes



(GGOS, 2023), <https://ggos.org/item/surface-deformation-models/#learn-this>

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia

2.6. Bases de datos geodésicas: ISOGR y EPSG.

2.6.1. ISOGR: Corresponde al registro geodésico ISO (International Organization for Standardization), es una base de datos estructurada de CRS (Coordinate reference systems) y Transformaciones a las cuales se puede acceder en línea. Las transformaciones y CRS de la base de datos ISOGR son solo los utilizados de manera internacional, esta base de datos no contempla todos los CRS ni transformaciones existentes y el registro cumple con las normas ISO 19111, ISO 19127 e ISO 19135 (ISOGR, 2023).

2.6.2. EPSG (European Petroleum Survey Group): Corresponde a un repositorio de parámetros geodésicos que contiene información sobre sistemas y marcos de referencia antiguos y modernos (geocéntricos), proyecciones cartográficas y elipsoides de todo el mundo (EPSG, 2023).

Geodetic Registry

ISO Geodetic Register

- Coordinate Reference Systems
 - Compound CRS
 - Engineering CRS
 - Geodetic CRS**
 - Projected CRS
 - Vertical CRS
- Coordinate Systems
- Datums
- Coordinate Operations
- Other

Geodetic CRS

Overview Contents

Show 10 items per page

Identifier	Name	Item class	Status	
203	SIRGAS-CON SIR14P01 - LatLonEHT	Geodetic CRS	valid	Details
204	NAD 83 (HARN) CORRECTED - LatLonEHT	Geodetic CRS	valid	Details
205	IGS08 - LatLonEHT	Geodetic CRS	valid	Details
206	ETRF94 - XYZ	Geodetic CRS	valid	Details
207	NAD 83 (PA11) Epoch 2010 - LatLon	Geodetic CRS	valid	Details
208	WGS 84 (G873) - LatLon	Geodetic CRS	valid	Details
209	ITRF2005 - LatLonEHT	Geodetic CRS	valid	Details
210	WGS 84 (G1150) - XYZ	Geodetic CRS	valid	Details
211	SIRGAS-CON SIR10P01 - LatLonEHT	Geodetic CRS	valid	Details

Last updated: 2023-04-05T20:39Z -2c0f2a3

POWERED BY Ribose

Fuente: (ISOGR, 2023), <https://geodetic.isotc211.org/register/geodetic/GeodeticCRS>

(EPSG, 2023), <https://epsg.org/home.html>
(ISOGR, 2023), <https://geodetic.isotc211.org/>

GeoRepository

Home EPSG Dataset Support Documentation About Us Contact GIGS IOGP Geomatics Login / Register

Geodetic Parameters

Search Database

Text Search GO

SIRGAS Clear all

Search Results (312 Objects Found) Export

Search results only display valid entries. Please login or register to include deprecated and invalid objects.

Report Selected Results

CRSs (185)	Transformations (98)	Point Motion Operations (0)	Concatenated Operations (0)	Conversions (0)	Datums (29)	More...
NAME	CODE	TYPE	EXTENT	DATA SOURCE	REMARKS	REVISION DATE
SIRGAS-CON DGF06P01	8927	geocentric	Latin America - Central Americ...	EPSG	Replaces SIRGAS-CON DGF05P01 (...)	21 de mayo de 2019
SIRGAS-CON DGF06P01	8928	geographic 3D	Latin America - Central Americ...	EPSG	Replaces SIRGAS-CON DGF05P01 (...)	21 de mayo de 2019
SIRGAS-CON DGF06P01	8978	geographic 2D	Latin America - Central Americ...	EPSG	Replaces SIRGAS-CON DGF05P01 (...)	21 de mayo de 2019
SIRGAS-CON DGF07P01	8929	geocentric	Latin America - Central Americ...	EPSG	Replaces SIRGAS-CON DGF06P01 (...)	21 de mayo de 2019
SIRGAS-CON DGF07P01	8930	geographic 3D	Latin America - Central Americ...	EPSG	Replaces SIRGAS-CON DGF06P01 (...)	21 de mayo de 2019
SIRGAS-CON DGF07P01	8979	geographic 2D	Latin America - Central Americ...	EPSG	Replaces SIRGAS-CON DGF06P01 (...)	21 de mayo de 2019

Fuente: (EPSG, 2023), <https://epsg.org/search/by-name/?query=SIRGAS&sessionkey=zng1hlsxvi>

2.6. Bases de datos geodésicas: ISOGR y EPSG.

2.6.1. ISOGR: Para añadir contenido a la base de datos de ISOGR se debe tener en cuenta lo siguiente (ISOGR, 2019):

1. No todos pueden agregar datos, para eso primero debe registrarse en la página web e indicar si la institución a la que usted pertenece es parte de ISOGR o se debe crear una nueva.
2. La organización a la cual usted pertenece le asigno el rol de remitente frente a ISOGR.
3. Se le otorgo el derecho de actuar por su organización (si usted creó su organización, se le concede de manera automática el derecho de actuar).

Si cumple con los requisitos se le permitirá proponer la inclusión de contenido a ISOGR, este contenido propuesto puede ser revisado por su organización y puede ser modificado, una vez que se está seguro de que, en contenido cumple con lo establecido por la ISOGR, la propuesta se envía, esta propuesta es revisada por el área de control de ISOGR y se da una respuesta frente al contenido propuesto (se acepta, se rechaza o se devuelve al remitente para proporcionar mayor información).

Unit of Measurement

Overview Contents

Propose new

Show 10 Items per page

Identifier	Name	Item class	Status	Details	Action
9001	metre	Unit of Measurement	valid	Details	Action
9002	foot	Unit of Measurement	valid	Details	Clarify
9003	US survey foot	Unit of Measurement	valid	Details	Overwrite
9005	Clarke's foot	Unit of Measurement	valid	Details	Retire
9036	kilometre	Unit of Measurement	valid	Details	Action
9039	Clarke's link	Unit of Measurement	valid	Details	Action
9040	British yard (Sears 1922)	Unit of Measurement	valid	Details	Action
9041	British foot (Sears 1922)	Unit of Measurement	valid	Details	Action
9042	British chain (Sears 1922)	Unit of Measurement	valid	Details	Action
9062	British chain (Benoit 1895 B)	Unit of Measurement	valid	Details	Action

Showing 1 to 10 of 32 items

Navigation: Previous 1 2 3 4 Next

Fuente: (ISOGR, 2019), Geographic information — Geodetic register user guide

Unit of Measure

Name: Furlongs per fortnight

Identifier: 32145

Measure type: VELOCITY

Definition: Travelling the distance of one furlong in 14 days time.

Remarks:

Aliases: x fpl

Standard Target UoM: [9001] metre

Nominator (factor B): 1.663

Denominator (factor C): 10000

Information Source:

Data Source: http://en.wikipedia.org/wiki/FFF_system

Fuente: (ISOGR, 2019), Geographic information — Geodetic register user guide

(ISOGR, 2019), Geographic information — Geodetic register user guide

2. Tema: Sistemas y Marcos de Referencia



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

2.6. Bases de datos geodésicas: ISOGR y EPSG.

2.6.2. EPSG (European Petroleum Survey Group): Para inscribir o modificar datos en EPSG, es necesario contar con un excel que se puede descargar en la página web.

Una vez descargado el Excel, este debe completarse con la información del dato EPSG a modificar o debe completarse con la información del dato que se desea agregar, el Excel contiene instrucciones y sus hojas están divididas según el tipo de dato que se desea agregar o modificar, por ejemplo, Geodetic CRS, Projected CRS, etc. (EPSG, 2023)

GeoRepository Home EPSG Dataset Support Documentation About Us Contact GIGS IOGP Geomatics

EPSG Dataset Change Request Help

Other issue contact

Frequently Asked Questions

Who can request data additions or modification of existing EPSG data?
Change requests are accepted from any interested party.

How to successfully request data additions or modification of existing EPSG data?

- i) Requests should clearly state what is being proposed using the template for data submission.
- ii) If the change is to existing Dataset content then the code for the entity in question must be stated, preferably along with its name.
- iii) If the request is to add new data then as a minimum the information highlighted with an asterisk in the template for data submission shall be submitted, either through completing the template and including in a message to feedback@epsg.org, or given indirectly by providing the URL for a publicly-available web site which contains the information.

How will I know that my data submission was successful?
Requests received will be acknowledged by the IOGP Geodesy Subcommittee, normally within one working week of receipt. If they are within scope, they will be allocated a change request number and then

We use cookies to ensure that we give you the best experience on our website. By continue browsing our site, you consent to our use of cookies. Accept

Fuente: (EPSG, 2023), <https://epsg.org/dataset-change-requests.html>

A32 Origin definition (max 254 characters)

Attribute	Value
Geodetic Coordinate Reference System	
Name*	
Alias	
Type* (enter all that apply)	

Axis Order (sequence)*	Coordinate axis name*	Orientation*	Abbreviation*	Unit of measure name*
1				
2				
3				

Axis Order (sequence)*	Coordinate axis name*	Orientation*
1		
2		
3		

Geodetic Datum (reference frame)

Attribute	Value
EPSG datum code	
Name*	
Alias	
Type*	
Publication date	
Frame Reference Epoch	
Origin definition (max 254 characters)	
Remarks (max 254 characters)	

Ellipsoid

Attribute	Value
EPSG ellipsoid code	
Name*	
Shape*	
Semi-major axis [a] (including unit)*	
Inverse flattening 1/f (or semi-minor axis b)*	

Example

Attribute	Value
Geodetic Coordinate Reference System	
Name*	Geodetic CRS name (this is usually the a
Alias	Alias(es) or abbreviation (if multiple, con
Type* (enter all that apply)	e.g. geocentric, geographic 3D, geograp

Coordinate System(s) (enter all that apply)

Attribute	Value
Geocentric Cartesian CS	EPSG code for Cartesian 3D CS, e.g. 650
Ellipsoidal 3D CS	EPSG code for ellipsoidal 3D CS, e.g. 642
Ellipsoidal 2D CS	EPSG code for ellipsoidal 2D CS, e.g. 642

Name

Alias

Type

Axis description*

Axis Order (sequence)*	Coordinate axis name*	Orientation*
1		
2		
3		

Geodetic Datum (reference frame)

Attribute	Value
EPSG datum code	If already exists in the EPSG Registry, OI
Name*	Datum (reference frame) name, e.g. Euro
Alias	Alias(es) or abbreviation (if multiple, con
Type*	geodetic or dynamic geodetic
Publication date	Official publication date of the datum (re
Frame Reference Epoch	For Dynamic Datums only, Frame Referer
Origin definition (max 254 characters)	e.g. # active GNSS stations of the networ
Remarks (max 254 characters)	Miscellaneous remarks about the datum

Ellipsoid

Attribute	Value
EPSG ellipsoid code	If already exists in the EPSG Registry, OI
Name*	Ellipsoid name, e.g. GRS 1980
Shape*	Ellipsoid or sphere
Semi-major axis [a] (including unit)*	e.g. 6378137.0 m
Inverse flattening 1/f (or semi-minor axis b)*	e.g. 298.257222101

READ ME Geodetic CRS Projected CRS Vertical CRS Transformation Point Motion Operation Compound CRS

Fuente: (EPSG, 2023), Excel EPSG

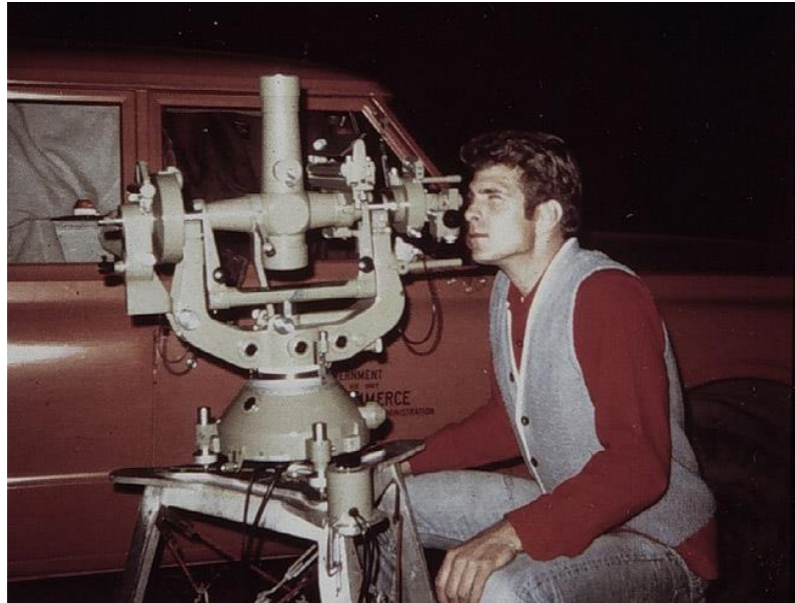
Instrucciones Excel.

(EPSG, 2023), <https://epsg.org/dataset-change-requests.html>

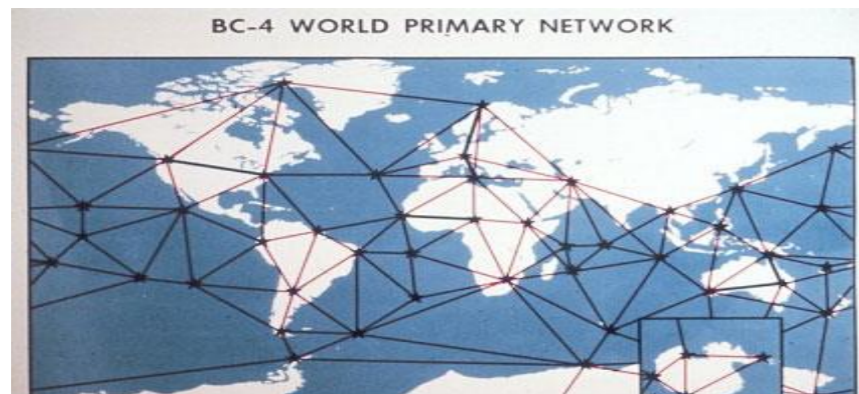
ESCUELA SIRGAS 2023

2.7. Espacio de consulta y discusión. 10 MINUTOS

3.1. Introducción



Fuente: <https://celebrating200years.noaa.gov/theodolites/wild.html>



Fuente: <https://photolib.noaa.gov/Collections/Geodesy/emodule/519/eitem/5835>



Fuente: NOAA, <https://photolib.noaa.gov/Collections/Geodesy/emodule/519/eitem/5842>

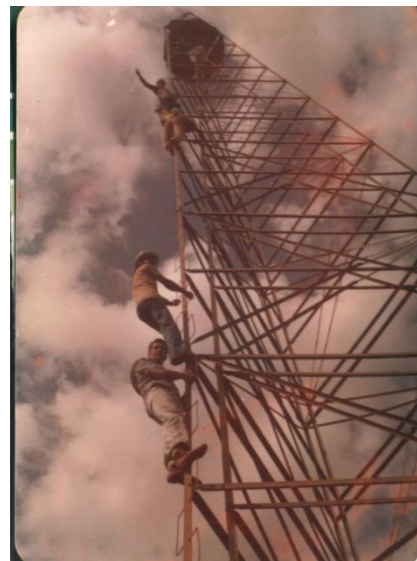
3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.1. Introducción



Fuente: Sonia Costa 2021. Torres Bilby, IBGE.

Fuente: NOAA: <https://photolib.noaa.gov/Collections/Geodesy/emodule/519/eitem/5906>



Fuente: Sonia Costa 2021. Torres Bilby, IBGE.

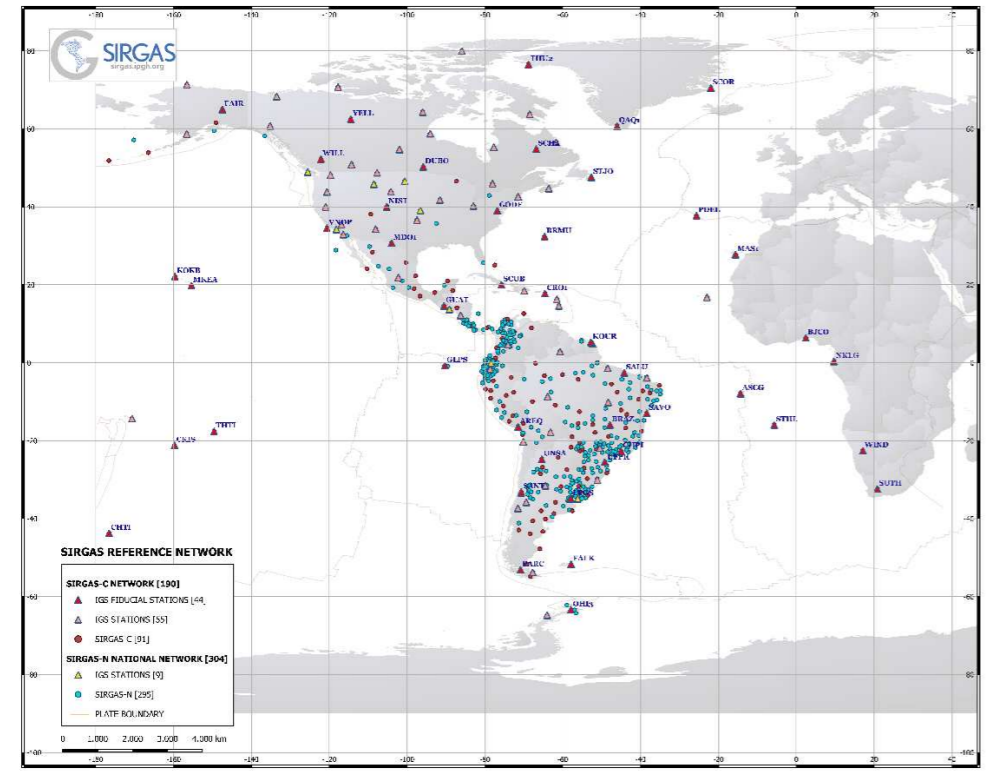
Fuente: David Cisneros 2021. Pto Pasivo, campaña SIRGAS 2000, ciudad La Libertad, IGM Ecuador.

Fuente: Fernando Isla 2021. T4, Centro Procesamiento USC

Fuente: Fisher et. al. 1969: El Geoide Sudamericano referido a varios sistemas de referencia

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.1. Introducción



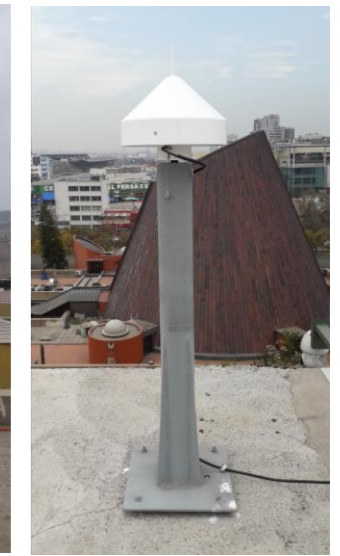
Fuente: Centro USC



LCRZ00CRI
Fuente: IGN Costa Rica



ANTF00CHL
Fuente: Centro USC



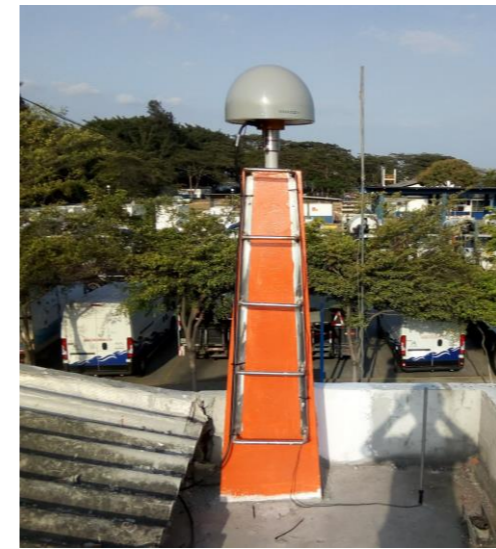
USCL00CHL
Fuente: Centro USC



EBY100ARG
Fuente: IGN Argentina



SUAN00COL
Fuente: IGAC



GQEC00ECU
Fuente: IGM Ecuador



TGTA00ARG
Fuente: IGN Argentina

3.1. Introducción

3.1.1. Terminología básica:

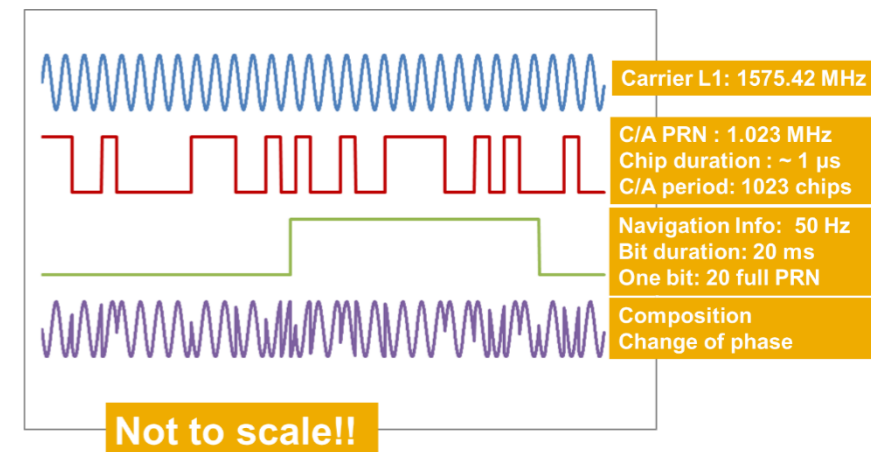
3.1.1.1. Pseudodistancia de código vs pseudodistancia de fase: La exactitud de la pseudodistancia de código está en el nivel de metros, mientras que la exactitud de portadora de fase está en el rango de milímetro. La precisión de las pseudodistancias de código se puede mejorar por la tecnología específica del receptor o mediante técnicas de suavizado.

La desventaja de las pseudodistancias de fase es el hecho de que son ambiguas en un número entero de longitudes de onda, mientras que las pseudodistancias de código están virtualmente sin ambigüedades. La determinación de las ambigüedades de fase es a menudo un problema crítico en el posicionamiento basado en satélites para alta precisión.

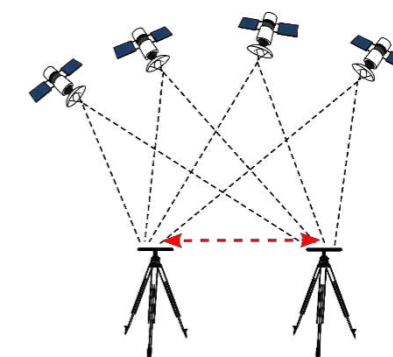
3.1.1.2. Posicionamiento Relativo vs Posicionamiento Absoluto: El posicionamiento absoluto, consta de un único receptor, mide pseudodistancias a cuatro o más satélites en el mismo instante, este posicionamiento también es llamado posicionamiento puntual.

En cambio, el posicionamiento relativo solo puede ser llevado a cabo con la medición de 2 o más receptores en el mismo momento, midiendo pseudodistancias a cuatro o más satélites, la solución no es instantánea y de este tipo de posicionamiento es que se generan las líneas base.

3.1.1.3. Estático vs Posicionamiento Cinemático: Estático denota un lugar de observación fijo, mientras que cinemático implica movimiento. Una pérdida temporal del seguimiento de la señal en modo estático no es tan crítico como en el modo cinemático. (Hofmann, 2008)



Fuente: (ESA, 2022), https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/File:GPS_Signals.png



Fuente: Centro USC

(Hofmann, 2008), GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more

3. Tema: Posicionamiento GNSS

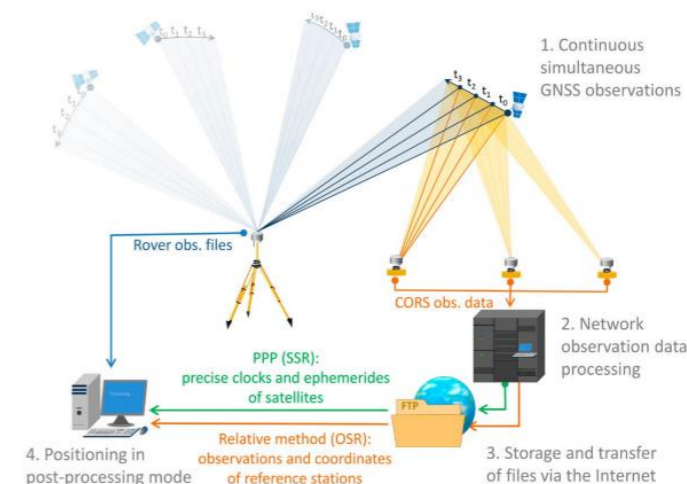
3.1. Introducción

3.1.1. Terminología básica:

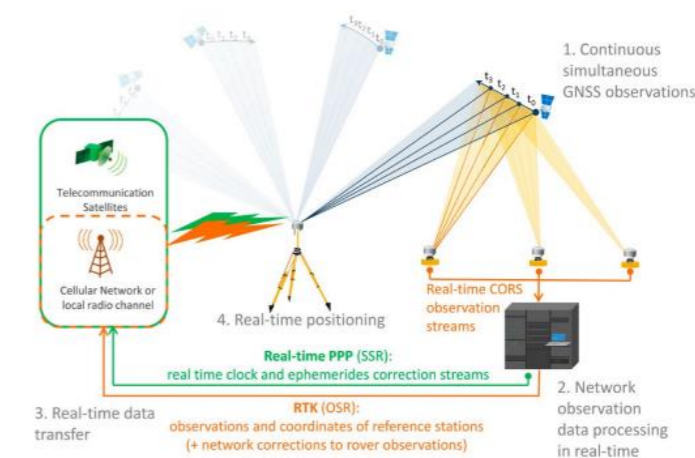
3.1.1.4. Tiempo Real vs Postproceso: En observaciones GNSS en tiempo real, los resultados están disponibles en el campo inmediatamente. Los resultados se indican como "instantáneo" si los observables de una sola época se utilizan para el cálculo de la posición y el tiempo de procesamiento es insignificante.

Postprocesado se refiere a las aplicaciones en las cuales los datos se procesan después de la observación, con esto es posible combinar medidas de varios receptores con más de una época de observación.

3.1.1.5. Topografía vs Navegación: Los campos de la topografía y de navegación están estrechamente relacionados. El objetivo de la topografía, sin embargo, es principalmente el posicionamiento, mientras que la navegación incluye la determinación de la posición, velocidad y orientación de objetos en movimiento. En el pasado, la topografía se caracteriza por alta precisión de posicionamiento, observaciones estáticas y procedimientos de postproceso. Por el contrario, la navegación requiere precisiones inferiores, pero procesamiento en tiempo real de las observaciones cinemáticas. (Hofmann, 2008)



Fuente: (FIG, 2019), Cost Effective Precise Positioning with GNSS



Fuente: (FIG, 2019), Cost Effective Precise Positioning with GNSS

(Hofmann, 2008), GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more

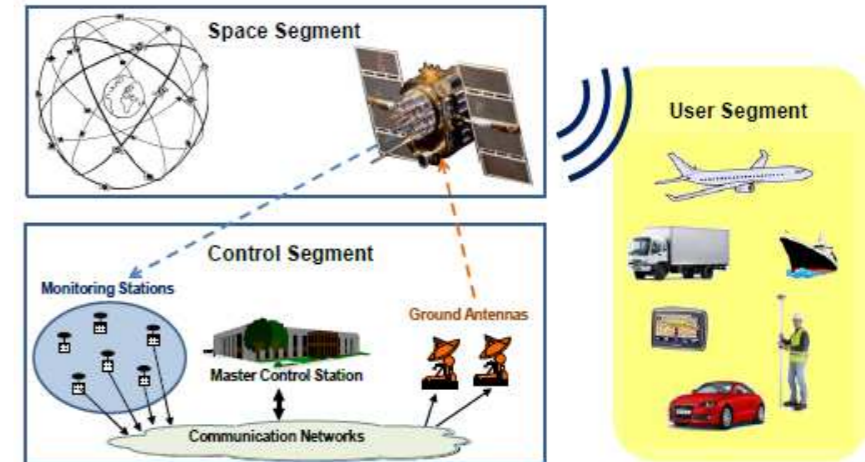
3.2. Estructura GNSS

La estructura GNSS consta básicamente de tres segmentos: el segmento espacial que comprende los satélites, el segmento de control (también llamado segmento de tierra) que es el responsable del adecuado funcionamiento del sistema, y por último el segmento de usuario que son los receptores GNSS que proporcionan al usuario posicionamiento, velocidad y tiempo preciso.

3.2.1. Segmento espacial: Las funciones principales del segmento de espacial son:

- Generar y transmitir las señales de código y portadora de fase.
- Almacenar y enviar el mensaje de navegación actualizado por el segmento de control. (ESA, 2013)

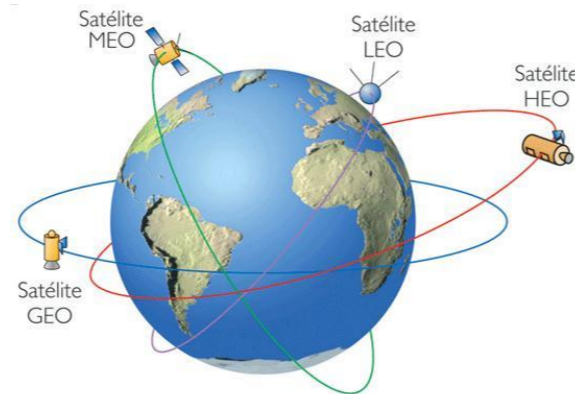
Está formado por las constelaciones de satélites con los satélites suficientes para garantizar que los usuarios dispongan de observaciones simultáneas de al menos cuatro satélites en cualquier momento y lugar de la superficie de la Tierra.



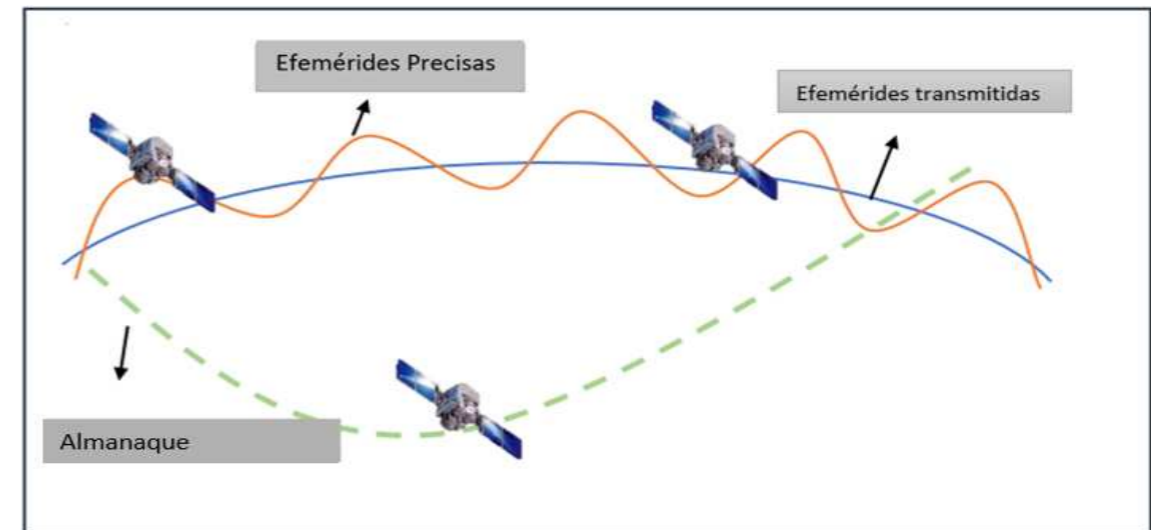
Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

Orbita	Altitud
LEO (Low Earth Orbit)	Hasta los 2000 km
MEO (Medium Earth Orbit)	Entre los 2000 km a los 36000 km
GEO (Geostationary Orbit)	Sobre los 36000km
HEO (Highly Elliptical Orbit)	Sobre los 36000 km

Fuente: Centro USC



Fuente: (López, 2013), Simulador de cobertura en entornos urbanos



Fuente: Centro USC

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.2. Estructura GNSS

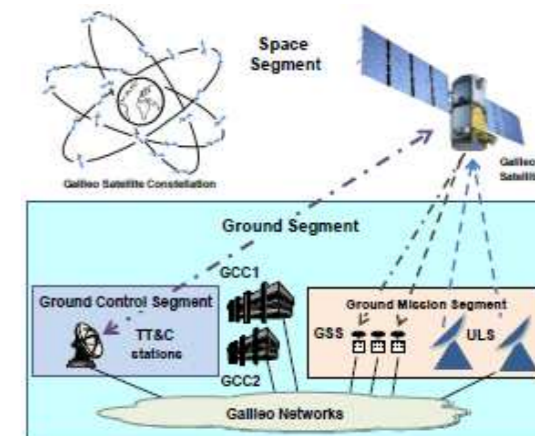
3.2.1. Segmento espacial:

CARACTERÍSTICA	GPS	GLONASS	GALILEO	NAVIC	OZSS	BEIDOU(Compass)
Primer Lanzamiento	22/02/1978	12/10/1982	28/12/2005	11/09/2010	01/07/2013	30/10/2000
Planos orbitales	6	3	3	2	3	3
Número de SV	32(MEO)	24(MEO)	27 MEO	3 GEO	3 QZO	27 MEO
				4 IGSO	1 GEO	5 GEO
Inclinación Orbital	55°	64.8°	56°	5°, 27°, 29°	0°, 55°, 41°, 44.3°	55°
				34°E, 83°E, 129.5°E, 55°E, 111.75°E	83°E, 129.5°E, 111.75°E, 32.5°E	58.75°E, 80°E, 110.5°E, 140°E, 160°E
Altitud(km)	20200	19100	23222	35875.9	39000	21528
				35819.3		35786
				35882.4		35786
Período de revolución	11H58'2"	11H15'44"	14H15'44"	23H56'	2H15'54"	12H53'00"
				23H56'54"	23H56'	
				23H56'06"	23H56'06"	
Período de repetición de geometría	1 día sidéreo	8 días sidéreos	10 días sidéreos	No se conoce	No se conoce	7 días sidéreos

Fuente: Centro USC

3.2.2. Segmento de control: El segmento de control (también llamado segmento de tierra) es el responsable de mantener las operaciones de GNSS (ESA, 2013). Sus funciones básicas son:

- Controlar y mantener el estado y configuración de la constelación de satélites.
- Predecir efemérides y evolución de los relojes de los satélites.
- Mantener la escala de tiempo GNSS correspondiente (a través de los relojes atómicos).
- Actualizar los mensajes de navegación de todos los satélites.



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.2. Estructura GNSS

3.2.3. Segmento usuario: El segmento de usuario se compone de receptores GNSS (ESA, 2013).

Su función principal es:

- Recibir señales GNSS.
- Determinar pseudodistancias (y otros observables).
- Resolver las ecuaciones de navegación con el fin de obtener las coordenadas.
- Proporcionar un tiempo muy preciso.

Los elementos básicos de un receptor GNSS genérico son:

- Una antena con preamplificación.
- Una sección de radiofrecuencia, un microprocesador.
- Un oscilador de precisión intermedia.
- Una fuente de alimentación, memoria para los datos almacenados y una interfaz con el usuario.

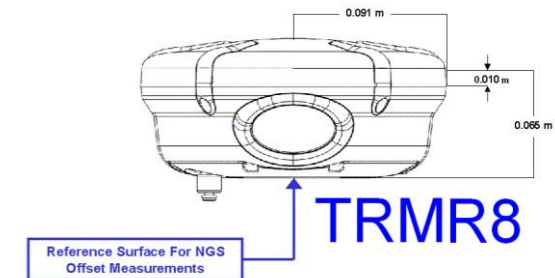


Fuente: Centro USC

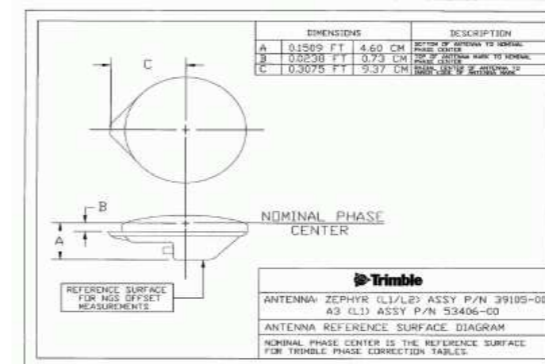


Fuente: (Noaa, 2023), <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>

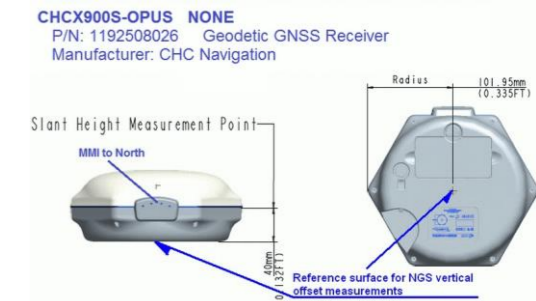
<https://files.igs.org/pub/station/general/>



Fuente: (Noaa, 2023), <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>



Fuente: (Noaa, 2023), <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>



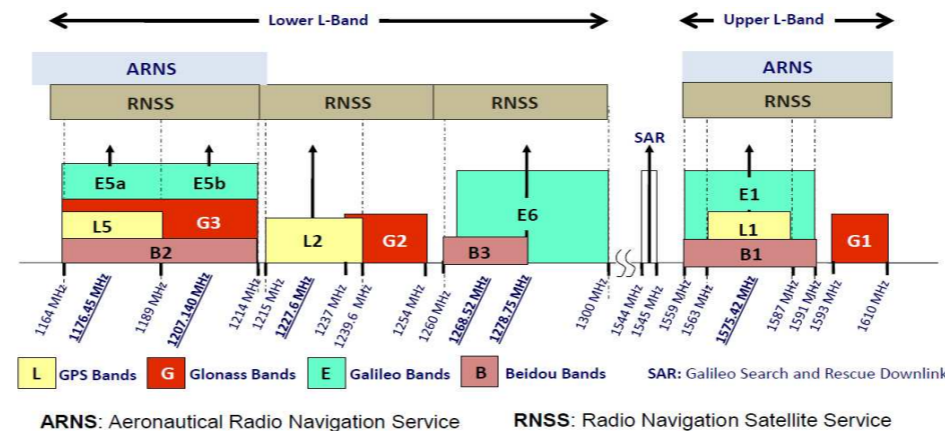
Fuente: (Noaa, 2023), <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>

3.2. Estructura GNSS

3.2.4. Señales GNSS: Los satélites GNSS transmiten continuamente señales de navegación en dos o más frecuencias de la banda L. Estas señales contienen pseudodistancias de código y datos de navegación que permiten al usuario calcular el tiempo de viaje desde el satélite al receptor y las coordenadas del satélite en cualquier época (ESA,2013). Los componentes principales de la señal se describen a continuación:

- **PORTADORA:** señal de radiofrecuencia sinusoidal en una frecuencia determinada.
- **CÓDIGO:** secuencia de ceros y unos que permiten que el receptor determine el tiempo de viaje de la señal de radio desde el satélite al receptor. Presentan características de ruido aleatorio de ahí que se denominan secuencias PRN o código PRN .
- **DATOS DE NAVEGACIÓN:** un mensaje en código binario proporciona información sobre las efemérides del satélite (elementos pseudo-keplerianos o posición del satélite y velocidad), parámetros de desviación del reloj, almanaque, estado de salud del satélite e información complementaria.

La asignación de bandas de frecuencia es un proceso complejo, pues múltiples servicios y usuarios pueden estar dentro del mismo rango, es decir, se pueden asignar las mismas frecuencias para diferentes propósitos en diferentes países. La UIT es una agencia de las Naciones Unidas que coordina el uso global compartido del espectro radioeléctrico (ESA, 2013)



(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

Fuente: (ESA,2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.2. Estructura GNSS

3.2.4. Señales GNSS (ESA, 2013):

3.2.4.1. Señal GPS: Las señales GPS transmiten en dos frecuencias de radio en la banda L, denominadas L1 y L2, sus frecuencias se derivan de una frecuencia fundamental $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$, generada por relojes atómicos integrados. (ESA,2013). GPS moderniza su señal, añadiendo una nueva frecuencia de banda L denominada L5.

$$L1(0.190) = 154 \times 10,23 \text{ MHz} = 1575,420 \text{ MHz} \quad \text{ec.}(105)$$

$$L2(0.244) = 120 \times 10,23 \text{ MHz} = 1227,600 \text{ MHz} \quad \text{ec.}(106)$$

$$L5(0.255) = 115 \times 10,23 \text{ MHz} = 1176,450 \text{ MHz} \quad \text{ec.}(107)$$

Hay dos servicios disponibles en el sistema GPS actual:

- SPS: El Servicio de Posicionamiento Estándar, es un servicio abierto, gratuito para usuarios de todo el mundo. Es un servicio monofrecuencia en la banda de frecuencias L1.
- PPS: El Servicio de Posicionamiento Preciso, está restringido a usuarios militares y autorizados. Se proporcionan dos señales de navegación en dos bandas diferentes, L1 y L2.

3.2.4.2. Señal Glonass: Las señales Glonass transmiten en dos frecuencias de radio en la banda L, denominadas G1 y G2, con los satelites Glonass-K se añadió la frecuencia G3, actualmente hay dos servicios disponibles de Glonass:

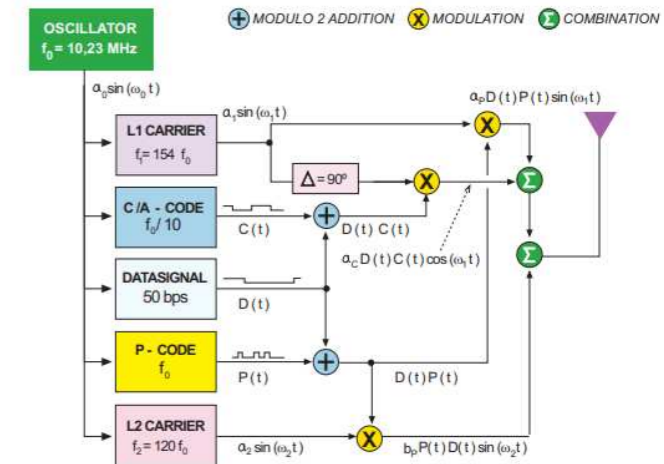
- SPS: El Servicio de Posicionamiento Estándar, es un servicio abierto, gratuito para todos. La señal de navegación se proporcionaba en G1 y G2 desde el 2004 gracias a los satélites Glonass-M.
- PPS: El Servicio de Posicionamiento Preciso está restringido a militares y usuarios autorizados. Se proporcionan dos señales de navegación en las dos bandas de frecuencia G1 y G2.

$$G1(0.187): f_1(k) = 1602 + k \times 9/16 = (2848 + k) \times 9/16 \text{ MHz} \quad \text{ec.}(108)$$

$$G2(0.240): f_2(k) = 1246 + k \times 7/16 = (2848 + k) \times 7/16 \text{ MHz} \quad \text{ec.}(109)$$

$$G3(0.249): f_3(k) = 1201 + k \times 7/16 = (2745.14 + k) \times 7/16 \text{ MHz} \quad \text{ec.}(110)$$

Donde k corresponde al número de frecuencia de uno de los 24 canales



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.2. Estructura GNSS

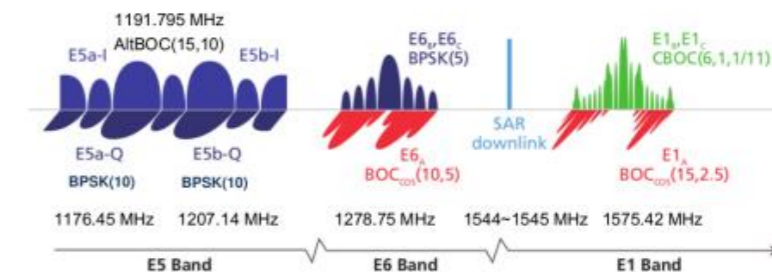
3.2.4. Señales GNSS (ESA, 2013):

3.2.4.3. Señal Galileo: Las señales Galileo transmiten bandas de frecuencia E1, E6, E5a y E5b y ofrecen los siguientes servicios:

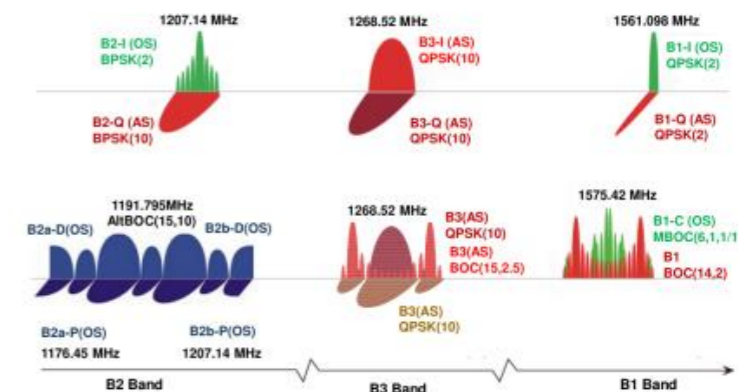
- OS: El Servicio Abierto (OS) es gratuito para los usuarios de todo el mundo. Dentro de él se ofrecen hasta tres frecuencias de señal separadas. Los receptores de una sola frecuencia proporcionarán un rendimiento similar al GPS C/A.
- PRS: El Servicio Público Regulado (PRS) está destinado a las autoridades de seguridad (policiales, militares, etc.) que requieren una alta continuidad de servicio con acceso controlado.
- CS: El Servicio Comercial (CS) brinda acceso a dos señales adicionales protegidas por encriptación comercial (datos de rango y mensajes). Se requieren velocidades de datos más altas (hasta 500 bps) para transmitir datos.
- SAR: Este servicio contribuye al sistema internacional Cospas-Sarsat para Búsqueda y Salvamento (SAR). Se transmitirá una señal de socorro al Centro de Coordinación de Rescate y Galileo informará a los usuarios que se ha detectado su situación.
- SoL: El servicio Safety-of-Life (SoL) ya está disponible para la aviación según los estándares de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) gracias a EGNOS; Galileo mejorará aún más el rendimiento del servicio.
- HAS: Servicio de Alta Precisión de Galileo, proporciona acceso gratuito a través de la señal de Galileo (E6-B) y por medios terrestres (Internet) a la información necesaria para estimar una solución de posicionamiento precisa utilizando un algoritmo de Posicionamiento de Punto Preciso en tiempo real. (EUSPA, 2023)

3.2.4.4. Señal Beidou: Las señales Beidou transmiten en tres radiofrecuencias en la banda L, denominadas aquí bandas B1, B2 y B3 y ofrecen los siguientes servicios:

- Servicio Abierto: El SPS (o Servicio de Señal de Precisión Estándar) es un servicio abierto, gratuito para todos los usuarios.
- Servicio Autorizado: Este servicio asegurará un uso muy confiable, brindando servicios más seguros de posicionamiento, velocidad y temporización, así como información del sistema, para usuarios autorizados



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms (EUSPA, 2023). <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>

3.3. Sistemas de Referencia, Tiempo y Marcos de Referencia.

3.3.1. Sistemas de Referencia y Marcos de Referencia: GNSS, es decir, las constelaciones que componen este sistema global de navegación por satélite, poseen sus propios marcos de referencia terrestres asociados a sistema de referencia internacional (ITRS) y compatibles con el marco de referencia internacional (ITRF).

3.3.1.1. WGS84 (World Geodetic System 1984): Corresponde al marco de referencia terrestre de GPS, WGS84 cuenta con varias realizaciones, una de ellas es la WGS-84 (G1762) la cual esta alineada y es coincidente con la realización ITRF2008. (ESA, 2013)

3.3.1.2. PZ-90 (Parametry Zemli 1990): Corresponde al marco de referencia terrestre de Glonass, PZ-90 cuenta con varias realizaciones, la más cercana al ITRF es la PZ-90.11 la cual es compatible con el ITRF2008 y para transformar las coordenadas de PZ-90.11 a ITRF2008 solo se contiene un parámetro que corresponde a un vector para el cambio de origen (no posee escala ni rotaciones). (ESA, 2013)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF2008} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{PZ-90.11} + \begin{bmatrix} 0.003 \text{ m} \pm 0.002 \text{ m} \\ 0.001 \text{ m} \pm 0.002 \text{ m} \\ 0.001 \text{ m} \pm 0.002 \text{ m} \end{bmatrix} \quad \text{ec. (111)}$$

3.3.1.3. GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame): Corresponde al marco de referencia terrestre de Galileo, GTRF es compatible con el ITRF, es decir, esta alineado al ITRF y existen parámetros de transformación para pasar de un marco a otro. La realización GTRF23v01, esta alineada al IGB08 (ITRF2008). (ESA, 2016)

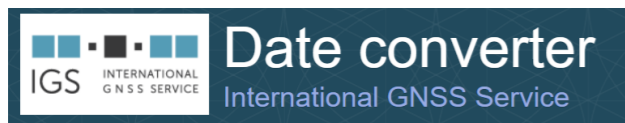
3.3.1.4. BDCS (BeiDou Coordinate System): Corresponde al sistema de referencia de BeiDou, el cual es definido de acuerdo a las especificaciones del IERS y sus realizaciones están alineadas al ITRF. La realización BDCS(2019v01) esta alineada al ITRF2014 con una precisión de 1cm. (ZHOU and LIU, 2022)

(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms
(ESA, 2016), Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)- Status
(ZHOU and LIU, 2022), BeiDou Coordinate System(BDCS) Status and Precise Transfer

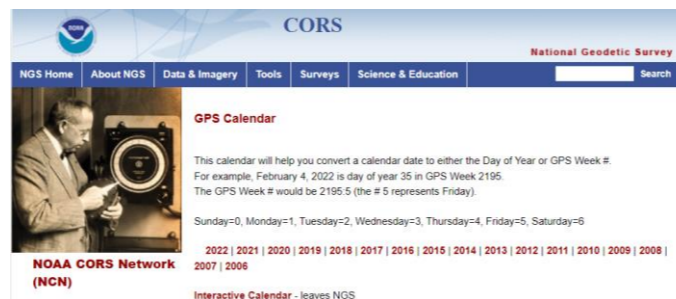
3.3. Sistemas de Referencia, Tiempo y Marcos de Referencia.

Uno de los atributos de un CRS dinámico es la época de referencia en la que se definen las coordenadas y velocidades de la estación del marco. La época de referencia del marco es una elección realizada en el procesamiento de datos de la solución.

3.3.2. Tiempo GNSS: Comienza a las 0h UTC (medianoche) del 5 al 6 de enero de 1980 (6.d0). Se mide en Semanas GPS, y la semana empieza en domingo (0 domingo, 1 lunes, 2 martes, 3 miércoles, 4 jueves, 5 viernes, 6 sábado).



<https://webigs.ign.fr/gdc/en/tools/date>



<https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Gpscal.shtml>

GNSS CALENDAR AND UTILITY			
Friday, July 29, 2022 (UTC)			
Julian Day Number:	2459789.5	Day of Year:	210
GPS Week:	2220	GPS Week Number:	22205

<http://www.gnsscalendar.com/>

3.3.3. Día Juliano: Es una referencia de tiempo que toma como origen el 1 de enero del año 4713 a.C, y empieza desde ahí. Los días se cuentan de forma correlativa, el día juliano (JD) empieza a las 12h del correspondiente día civil (por ejemplo, el 6 de enero de 1980 = JD 2 444 244.5). La época de referencia estándar actual para la comunidad científica es (ESA, 2013):

$$J2000.0 = 1d.5 \text{ Enero } 2000 = JD \ 2 \ 451 \ 545.0 \text{ ec. (112)}$$

3.3.4. Tiempo Sidéreo: Corresponde a la medida del ángulo definido por el movimiento diurno aparente del equinoccio; por lo tanto, una medida de la rotación de la Tierra con respecto al marco de referencia celeste en lugar del Sol. A menudo se expresa en horas, minutos y segundos, siendo una hora igual a 15°. (IAU, 2006)



<https://youtu.be/q2s8rKy0Rlw>

(IAU, 2006), https://synte.obspm.fr/iauWGnfa/NFA_Glossary.html
 (ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.3. Sistemas de Referencia, Tiempo y Marcos de Referencia.

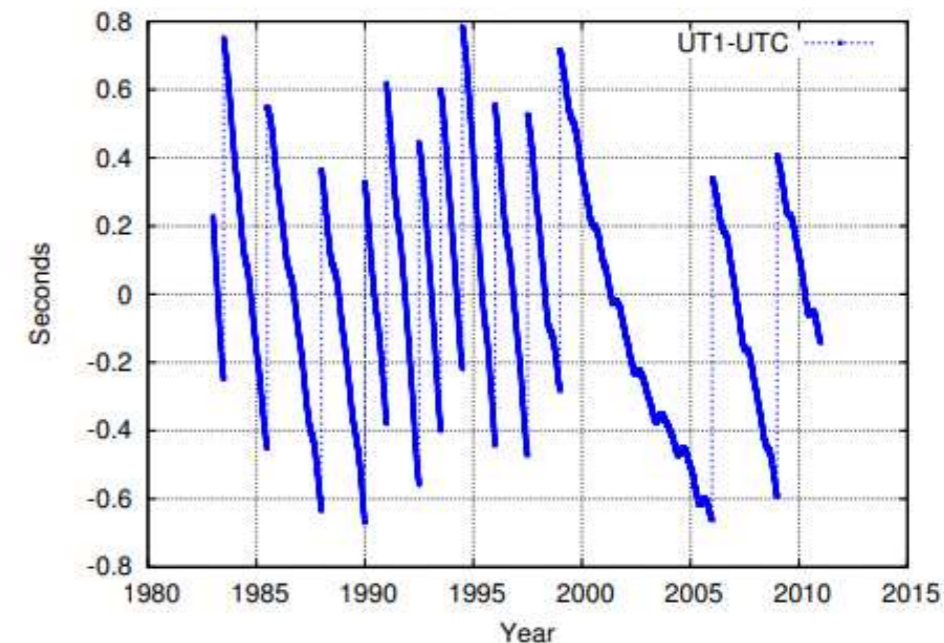
UT (Tiempo Universal) es la escala de tiempo utilizada para el cronometraje civil general y se basa aproximadamente en el movimiento diurno del Sol. Se define como el tiempo solar medio en el meridiano de Greenwich. La unidad básica de UT es el día solar medio, siendo el intervalo de tiempo entre dos tránsitos consecutivos del Sol medio a través del meridiano. El tiempo universal como escala derivada de la rotación de la Tierra se separa en:

- UT0: Tiempo Universal determinado a partir de observaciones con respecto al meridiano fijado al polo de referencia.
- UT1: Tiempo Universal determinado con respecto al meridiano unido al eje de giro.
- UT2: Tiempo Universal UT1 corregido por variaciones estacionales.

UTC (Tiempo universal coordinado) es la escala de tiempo mantenida por el BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) con la asistencia del IERS, que constituye la base de una difusión coordinada de frecuencias patrón y señales horarias. Corresponde exactamente en tasa con TAI (Tiempo Atómico Internacional) pero difiere de él por un número entero de segundos. La escala UTC se ajusta mediante la inserción o eliminación de segundos (segundos intercalares positivos o negativos) para garantizar una concordancia aproximada con UT1 (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O., 2017).

La relación entre UTC y UT1 es la siguiente:

$$|UT1 - UTC| < 0.9s \quad \text{ec. (113)}$$



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.3. Sistemas de Referencia, Tiempo y Marcos de Referencia.

3.3.4. Época: Según IAU (IAU, 2006) se define época como una fecha fija utilizada para calcular el tiempo para expresar cantidades variables de tiempo. A menudo se expresa en el sistema de fecha juliana, marcado por el prefijo J (por ejemplo, J2000.0), con el año juliano de 365.25 días como unidad.

Desde el punto de vista geodésico vamos a definir época como el momento o fecha de n evento, se suele determinar en función del día GPS de calendario dividido entre el número de días totales del año, a la parte fraccionaria de la anterior ecuación se le suma el año.

En el caso de la Geodesia Satelital existen tres épocas (ISO, 2019):

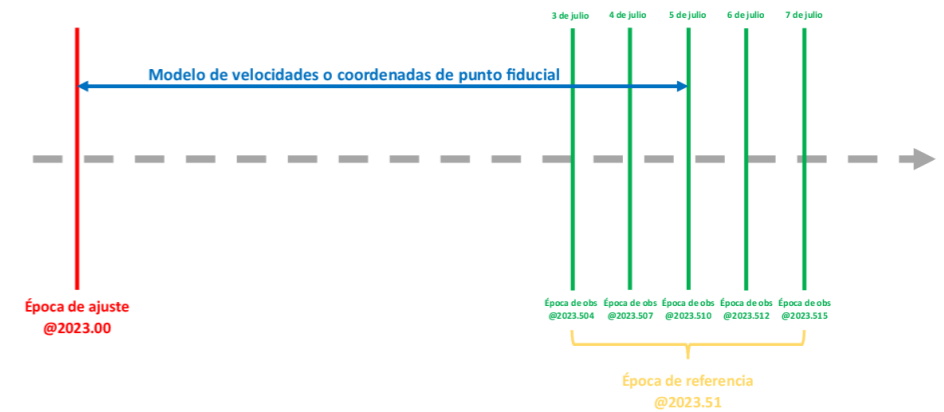
- Época de Observación: momento en el que se realiza la observación, en este caso GPS. Por ejemplo, el día 1 de febrero de 2018, sería la época siguiente:

$$e_{obs} = Año + \left(\frac{\text{Días totales hasta el día de observación}}{365 \text{ o } 365.25 \text{ o } 366} \right) = 2018 + \text{frac} \left(\frac{32}{365.25} \right) = 2018.09 \text{ ec. (114)}$$

Los días 365 y 366 corresponden a un año normal y año bisiesto respectivamente (ISO, 2019) y 365,25 corresponde a los días del año juliano (IAU, 2006).

- Época de Referencia: es la época media de una serie de épocas de observación consecutivas, es decir, para una observación de domingo a sábado (0 a 6), como la de SIRGAS, la época a la que se refiere el cálculo de toda la semana sería el miércoles, si son días pares se realiza una media de ambos.
- Época de Ajuste: es la época a la que se refieren la época de observación, pero una vez se procesa y ajusta el posicionamiento, se realiza mediante un modelo de velocidades, y generalmente coincide con el inicio del año, es decir, para el caso anterior con un modelo de velocidades podría ajustar a 2018.00 la época de observación.

Para designar un marco de referencia con su época, se hace con “@”, por ejemplo: SIRI7P01@2015.00



Fuente: Centro USC

(ISO, 2019), ISO/CD 19111 Geographic information — Referencing by coordinates (IAU, 2006), IAU 2006 NFA GLOSSARY, https://syrtre.obspm.fr/iauWGnfa/NFA_Glossary.html

3.4. Teoría orbital

3.4.1. **Leyes de Kepler:** Las leyes de Kepler describen el movimiento planetario alrededor del Sol. Consideran el sistema solar como un sistema homogéneo y puntual, sin embargo, para el movimiento de un satélite alrededor de la Tierra proveen solo una aproximación (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O., 2017).

1° Ley de Kepler: “LAS ÓRBITAS DE LOS PLANETAS SON ELIPSES, CON EL SOL EN UNO DE SUS FOCOS”. (Esta ley describe la **forma** de la órbita).

Los planetas se mueven alrededor del Sol en elipses, estando el Sol en un foco. La excentricidad e de una elipse es una medida de lo alejado que se encuentran los focos del centro. Su valor viene dado por:

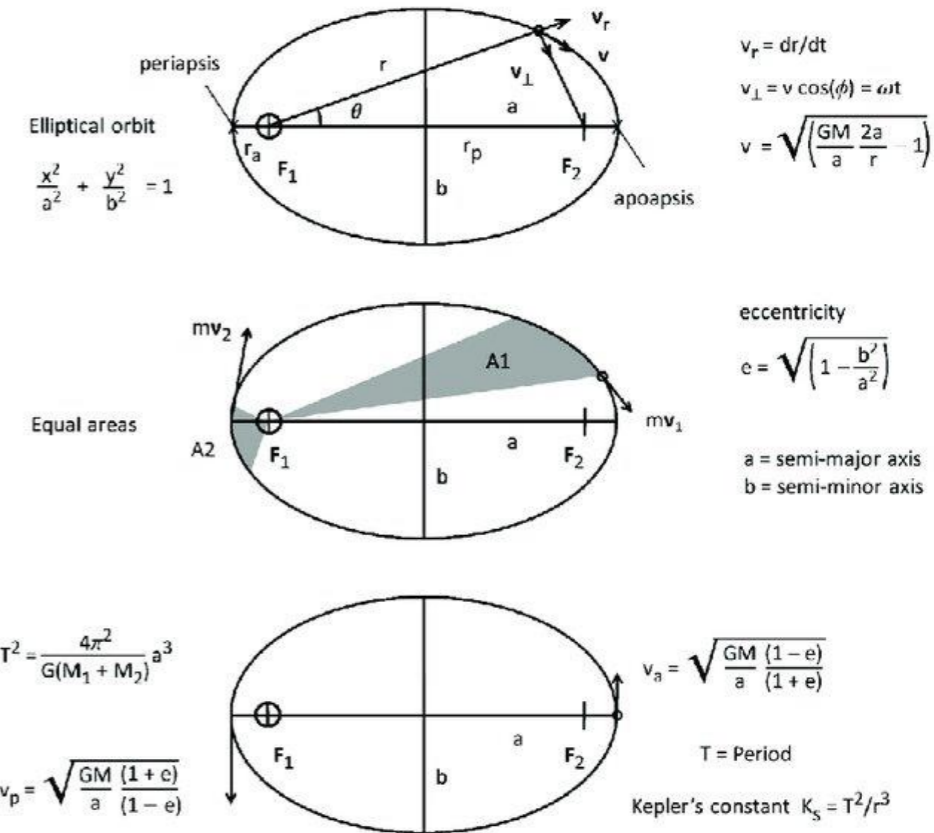
$$e = \sqrt{(b^2/a^2)} \quad \text{ec. (115)}$$

2° Ley de Kepler: “EL RADIO VECTOR DESDE EL SOL A CUALQUIER PLANETA BARRE ÁREAS IGUALES EN TIEMPO IGUALES”. (Esta ley describe la **velocidad** de un planeta en su órbita). La línea que conecta a Sol con un planeta recorre áreas iguales en tiempos iguales.

3° Ley de Kepler: “EL CUBO DEL SEMIEJE MAYOR DE LA ÓRBITA ES PROPORCIONAL AL CUADRADO DEL PERIODO DE REVOLUCIÓN” (Esta ley permite definir la **velocidad** angular media del satélite).

El cuadrado del período orbital de un planeta es proporcional al cubo (tercera potencia) de la distancia media desde el Sol (o dicho de otra manera, desde el "semieje mayor" de la elipse, la mitad de la suma de la distancia mayor y menor desde el Sol).

$$T^2 = k * r^3 \quad \text{ec. (116)}$$

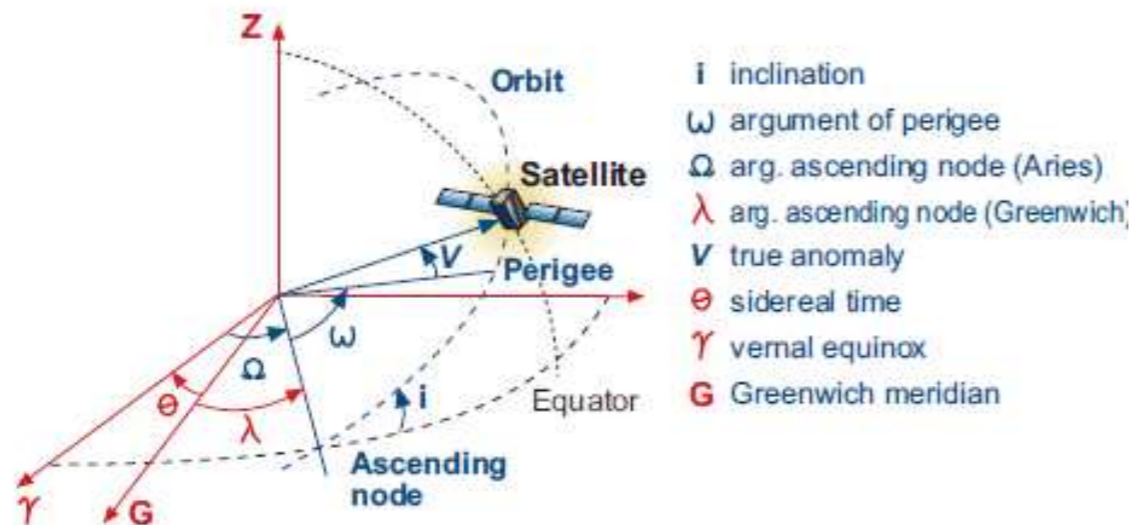


Fuente: (Reed, 2022), Quantum Wave Mechanics 4th ed.

(Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), 2017), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1

3.4. Teoría orbital

3.4.2. Movimiento orbital Kepleriano de un satélite artificial: Para la definición de la posición de un satélite orbitando alrededor de la Tierra son precisos seis parámetros, que corresponden a las seis constantes de integración que se obtienen al resolver la ecuación diferencial vectorial de segundo orden. Esta órbita se corresponde con una elipse, y los parámetros que definen el movimiento kepleriano vienen dados por (ESA, 2013):



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

- Ω , ascensión recta del nodo ascendente. Es el ángulo geocéntrico entre la dirección del nodo ascendente y el punto Aries.
- i , inclinación del plano orbital, es el ángulo entre el plano orbital y el del ecuador.
- ω , el argumento del perigeo es el ángulo entre el nodo ascendente y la dirección del perigeo, medido a lo largo del plano orbital.
- a , es el semieje mayor de la elipse orbital.
- e , es el valor de excentricidad de la órbita.
- T_0 , época de paso por el perigeo.

RINEX de Navegación estación SANT

Versión RINEX	3.04	N: GNSS NAV DATA	G: GPS	RINEX VERSION / TYPE
Nombre estación	SANT	20230419 000625 UTC		PGM / RUN BY / DATE
Dome Number	41705M03	1769693.5880 -5044574.1840 -3468320.9070		IONOSPHERIC CORR
				IONOSPHERIC CORR
				LEAP SECONDS
				COMMENT
				COMMENT
				COMMENT
				COMMENT
				COMMENT
				COMMENT
				COMMENT
				END OF HEADER

Orbita del satélite expresada en parámetros Keplerianos

e	0.0000000000E+00	5.518750000000E+01	4.943063041274E-09	-2.429887033977E-02	$M(t)$
T_0	1.728000000000E+05	3.725290298462E-09	-2.278347640884E+00	1.862645149331E-08	\sqrt{a}
i	9.652871314207E-01	2.983750000000E+02	1.133629519648E+00	8.540213210249E-09	Ω
	2.625109346341E-10	1.000000000000E+00	2.258000000000E+03	0.000000000000E+00	ω
	2.000000000000E+00	0.000000000000E+00	-1.117587089539E-08	8.400000000000E+01	
	1.656180000000E+05	4.000000000000E+00			

(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.4. Teoría orbital

3.4.2. Movimiento orbital Kepleriano de un satélite artificial: La posición instantánea del satélite en su órbita en un tiempo t viene dada por una cantidad angular conocida como anomalía, denominada así por razones históricas. Las anomalías comúnmente usadas son las siguientes (ESA, 2023):

- $V(t)$, anomalía verdadera, es el ángulo geocéntrico entre la dirección del perigeo y la dirección del satélite. La suma de la anomalía verdadera y el argumento del perigeo define el argumento de latitud. Nótese que para una órbita circular ($e=0$) el argumento del perigeo y la anomalía verdadera están indefinidos. La posición del satélite, sin embargo, puede especificarse por el argumento de latitud.
- $E(t)$, anomalía excéntrica. Una línea que es normal al semieje mayor y pasa a través del satélite define un punto que intersecta a un círculo de radio a . Por lo tanto, la anomalía excéntrica es el ángulo (medido desde el centro de la órbita) entre el perigeo y ese punto.
- $M(t)$, anomalía media, es una abstracción matemática relacionada en el sentido de movimiento angular.

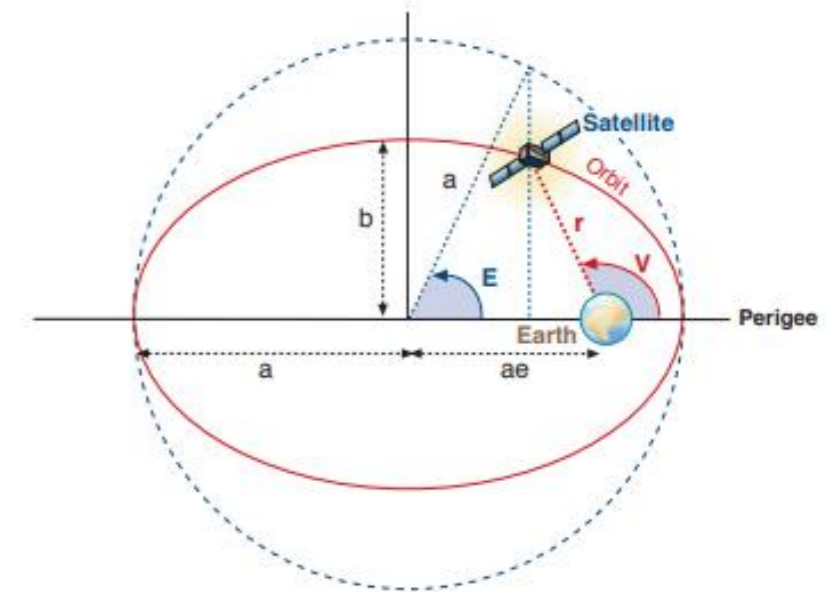
Las tres anomalías se relacionan por mediante las fórmulas:

$$M(t) = n(t - T_0) \quad \text{ec.(117)}$$

$$E(t) = M(t) + e \sin E(t) \quad \text{ec.(118)}$$

$$V(t) = 2 * \arctan\left[\sqrt{(1 + e)/(1 - e)} \tan E(t)/2\right] \quad \text{ec.(119)}$$

$$n = \frac{2\pi}{P} = \sqrt{\mu/a^3} \quad \text{ec.(120)}$$



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.4. Teoría orbital

3.4.3. Determinación de la órbita del satélite: La órbita (coordenadas ECEF y velocidades) se determina en base a las siguientes ecuaciones:

$$n = \sqrt{\frac{GM_e}{a^3}}; \text{ Movimiento medio } \quad \text{ec. (121)}$$

$$b = a * \sqrt{1 - e^2}; \text{ Semi eje menor de la orbita } \quad \text{ec. (122)}$$

$$\left. \begin{aligned} x &= a * (\cos E - e) \\ y &= b * \sin E \\ z &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ Coordenadas en el plano de la orbita } \quad \text{ec. (123)}$$

$$\left. \begin{aligned} R_3(-\Omega) &= \begin{pmatrix} \cos(-\Omega) & \sin(-\Omega) & 0 \\ -\sin(-\Omega) & \cos(-\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ R_1(-i) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-i) & \sin(-i) \\ 0 & -\sin(-i) & \cos(-i) \end{pmatrix} \\ R_3(-\omega) &= \begin{pmatrix} \cos(-\omega) & \sin(-\omega) & 0 \\ -\sin(-\omega) & \cos(-\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \text{ Matrices de rotación } \quad \text{ec. (124)}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_3(-\Omega)R_1(-i)R_3(-\omega) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \text{ Vector posicion del satelite en el sistema tridimensional } \quad \text{ec. (125)}$$

$$\begin{pmatrix} xv \\ yv \\ zv \end{pmatrix} = \frac{(n * a)}{1 - e * \cos E} \begin{pmatrix} -\sin E \\ \sqrt{1 - e^2} \cos E \\ 0 \end{pmatrix}; \text{ Velocidades en el plano orbital } \quad \text{ec. (126)}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = R_3(-\Omega)R_1(-i)R_3(-\omega) \begin{pmatrix} xv \\ yv \\ zv \end{pmatrix}; \text{ Vector velocidad del satelite en el sistema tridimensional } \quad \text{ec. (127)}$$

Los siguientes son conocidos:

$\mu = GM_e = 3986004.418 * 10^8 m^3 s^{-2}$; Constante gravitacional

a = Semi eje mayor

e = Excentricidad del elipse

Ω = Ascensión recta del nodo ascendente

i = Inclinación del plano orbital

ω = Argumento del perigeo

E = Anomalía excentrica

3.4. Teoría orbital

Ejercicio de determinación de órbita del satélite: Se tienen los siguientes datos para determinar la órbita y velocidad del satélite:

$$\mu = GM_e = 398600.4418$$

$$a = 25015.181035$$

$$e = 0.70797716996$$

$$\Omega = 173.290163192^\circ$$

$$i = 6.970729209^\circ$$

$$\omega = 91.552887388^\circ$$

$$E = 158.856600574^\circ$$

Las distancias están en kilómetros y los ángulos se deben trabajar en radianes, es decir, se deben multiplicar por $\frac{\pi}{180}$:

$$\Omega = 3.024483909 \text{ rad}$$

$$i = 0.121662176 \text{ rad}$$

$$\omega = 1.597899325 \text{ rad}$$

$$E = 2.772570719 \text{ rad}$$

Se calcula el movimiento medio y el semi eje menor de la órbita

$$n = 0.00015957 \quad b = 17666.604376$$

Se calcula el movimiento medio y el semi eje menor de la órbita

$$x = -41041.35071$$

$$y = 6372.40395$$

$$z = 0$$

Se calculan las matrices de rotación

$$R_3(-\Omega) = \begin{pmatrix} -0.993150604 & -0.116841248 & 0 \\ 0.116841248 & -0.993150604 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_1(-i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9926082817 & -0.1213622638 \\ 0 & 0.1213622638 & 0.9926082817 \end{pmatrix}$$

$$R_3(-\omega) = \begin{pmatrix} -0.0270996798 & -0.9996327362 & 0 \\ 0.9996327362 & -0.0270996798 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Se calcula el vector posición del satélite en el sistema tridimensional

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10000 \\ 40000 \\ -5000 \end{pmatrix}$$

Se calculan las velocidades en el plano orbital

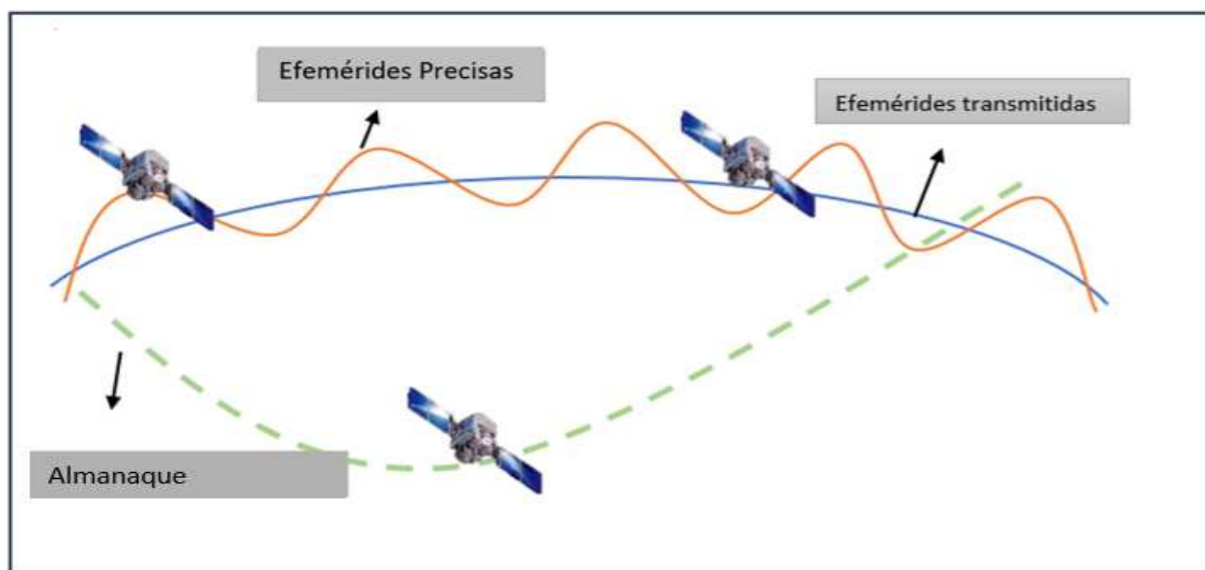
$$\begin{pmatrix} xv \\ yv \\ zv \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.86721 \\ -1.58365 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Se calcula el vector velocidad del satélite en el sistema tridimensional

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.5 \\ 1.0 \\ -0.1 \end{pmatrix}$$

3.4. Teoría orbital

3.4.5. Efemérides: Se definen como la ubicación y velocidad del satélite en el espacio, se suelen dar en forma de parámetros Keplerianos o coordenadas ECEF. Se disponen de tres diferentes tipos de efemérides las cuales son, almanaque, efemérides radiodifundidas y efemérides precisas, estas difieren en precisión y rango de tiempo en el cual están disponibles.



Fuente: Centro USC

Orbit Error	Baseline Length	Baseline Error	Baseline Error
2.5 m	1 km	0.1 ppm	– mm
2.5 m	10 km	0.1 ppm	1 mm
2.5 m	100 km	0.1 ppm	10 mm
2.5 m	1000 km	0.1 ppm	100 mm
0.05 m	1 km	0.002 ppm	– mm
0.05 m	10 km	0.002 ppm	– mm
0.05 m	100 km	0.002 ppm	0.2 mm
0.05 m	1000 km	0.002 ppm	2 mm

Fuente: Manual Bernese AUIB.

WWW: semana GPS
D: Día de la semana (0 al 6), 7 indica la semana
DDD: Día del año GPS (3 dígitos)
HH: 2 dígitos hora (00, 06, 12, 18)

Long Línea Base	Efe. Navegación	Efe. Ultra y Rápidas	Efe. Precisas	ERP	Software
0-70 km	✓	✓	✓	X	Comercial
70-200 km	X	✓	✓	✓	TBC 4.0 y >
>200 km	X	X	✓	✓	Científico/Comercial con modulo Científico

Fuente: Centro USC/ (Schütz, 2017), Comparing analysis of processing-and error models used in the Trimble Baseline Processor and the Bernese GNSS software



<https://www.igs.org/products/>

CDDIS

NASA's Archive of Space Geodesy Data

https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/GNSS_data_and_product_archive.html

GPS	Efemérides precisas finales	igsWWWWD.sp3.Z
	Efemérides precisas rápidas	igrWWWWD.sp3.Z
	Efemérides precisas ultra rápidas	iguWWWWD_HH.sp3.Z
	Efemérides broadcast	brdcDDD0.YYn.Z
GLONASS	Efemérides precisas finales	iglWWWWD.sp3.Z
	Efemérides precisas ultra rápidas	igvWWWWD_HH.sp3.Z
	Efemérides broadcast	brdcDDD0.YYg.Z

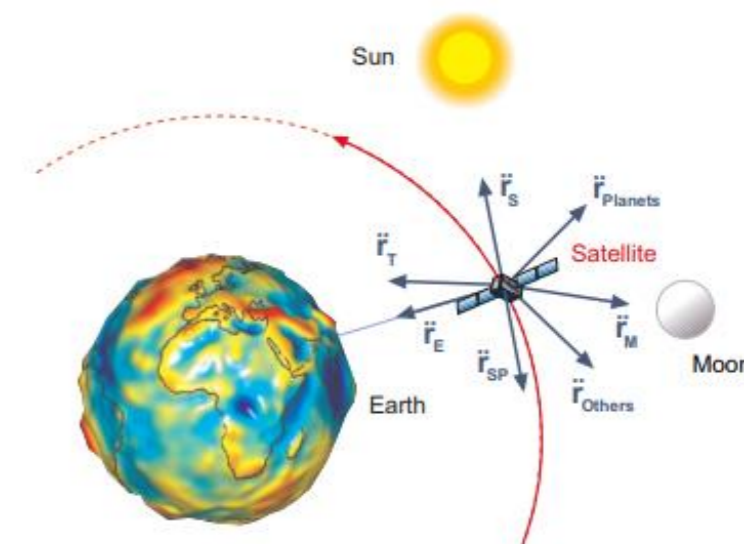
3.4. Teoría orbital

3.4.6. Perturbaciones orbitales: En la práctica hay una serie de aceleraciones y perturbaciones adicionales que se deben considerar en la ecuación:

$$\ddot{r} + \frac{G(m_1 + m_2)}{r^3} r = 0 \quad \text{ec.(128)}$$

Dichas perturbaciones son las siguientes (ESA, 2013):

1. Falta de esfericidad de la tierra y distribución de masas no homogénea: Como se mencionó anteriormente, la forma de la Tierra se puede aproximar por un elipsoide, con un radio ecuatorial a unos 21 km más grande que el radio polar. Por otro lado, la densidad de la Tierra no es uniforme y la fuerza de la gravedad depende de la latitud y la longitud, así como la distancia radial.
2. Presencia de otros cuerpos celestes, principalmente la luna y el sol: El campo gravitacional del Sol y la Luna actúan como fuerzas perturbadoras en los satélites, siendo la Luna el cuerpo que produce el efecto más grande. Estas fuerzas gravitatorias también producen mareas que deforman la forma de la Tierra y afectan a su potencial gravitatorio. A pesar de eso, estos efectos de marea producen aceleraciones en los satélites GNSS del orden de 10^{-9} m/s^2 , que son tres veces inferiores a las aceleraciones gravitacionales lunares y solares.
3. Presión de la radiación solar: Producido por fotones que impactan en la superficie del satélite y depende principalmente de las propiedades reactivas y de la relación área-masa del satélite. También depende de un factor de eclipse cuando el satélite está en la sombra de la Tierra. El efecto de la presión de la radiación solar en la órbita del satélite es muy difícil de modelar, y alguna contribución se estima estocásticamente como parámetros de aceleración la estimación de la órbita.



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.4. Teoría orbital

3.4.6. Perturbaciones orbitales:

Perturbation	GPS Average acceleration (m/s^2)	Orbit error after 2 rev. Initial conditions		Galileo Average acceleration (m/s^2)	Orbit error after 2 rev. Initial conditions		IGSO Average acceleration (m/s^2)	Orbit error after 2 rev. Initial conditions	
		Fixed (m)	Adjusted (m)		Fixed (m)	Adjusted (m)		Fixed (m)	Adjusted (m)
Earth oblateness	$5.7 * 10^{-5}$	23000	3000	$3.8 * 10^{-5}$	22000	2700	$9.1 * 10^{-6}$	16000	1900
Direct tides Moon	$3.0 * 10^{-6}$	1900	170	$3.3 * 10^{-6}$	2700	270	$4.7 * 10^{-6}$	12000	1100
Direct tides Sun	$1.6 * 10^{-6}$	930	90	$1.7 * 10^{-6}$	1700	110	$2.5 * 10^{-6}$	6900	480
Higher potential terms	$3.7 * 10^{-7}$	360	32	$2.4 * 10^{-7}$	340	30	$5.6 * 10^{-8}$	1100	85
Direct solar rad.press.	$1.0 * 10^{-7}$	220	32	$1.0 * 10^{-7}$	290	44	$1.0 * 10^{-7}$	860	130
Earth albedo	$9.8 * 10^{-10}$	1.1	0.050	$1.4 * 10^{-9}$	2.2	0.11	$7.0 * 10^{-10}$	3.1	0.15
Solid Earth tides	$1.1 * 10^{-9}$	0.70	0.044	$7.4 * 10^{-9}$	0.67	0.034	$1.8 * 10^{-10}$	0.47	0.024
Antenna thrust (100 W)	$3.1 * 10^{-10}$	0.37	0.005	$4.9 * 10^{-10}$	0.79	0.010	$4.9 * 10^{-10}$	2.3	0.030
General relativity	$2.8 * 10^{-10}$	0.33	0.004	$2.1 * 10^{-10}$	0.33	0.004	$7.1 * 10^{-11}$	0.33	0.004
Venus (inf.conj.)	$1.7 * 10^{-10}$	0.11	0.010	$1.9 * 10^{-10}$	0.20	0.011	$2.8 * 10^{-10}$	0.83	0.046
Ocean tides	$1.2 * 10^{-10}$	0.10	0.009	$7.5 * 10^{-11}$	0.09	0.010	$1.8 * 10^{-11}$	0.13	0.009
Jupiter (opposit.)	$2.3 * 10^{-11}$	0.014	0.0014	$2.5 * 10^{-11}$	0.024	0.0018	$3.6 * 10^{-11}$	0.099	0.007
Pot. terms degree > 8	$9.1 * 10^{-12}$	0.0054	0.0006	$2.8 * 10^{-12}$	0.0022	0.0004	$5.5 * 10^{-14}$	0.0009	0.0003
Mars (opposit.)	$1.6 * 10^{-12}$	0.0011	0.0004	$1.7 * 10^{-12}$	0.0016	0.0004	$2.5 * 10^{-12}$	0.0067	0.0008

Fuente: (Teunissen, Peter J.G., & Montenbruck, O. (Eds.), 2017), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967-982). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1

3.5. Observables

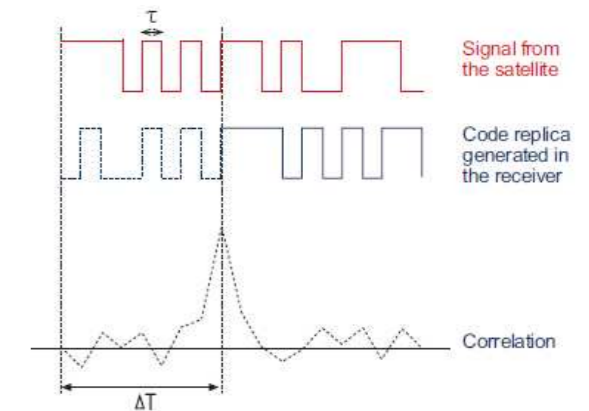
Las observaciones GPS son distancias las cuales son deducidas de medidas de tiempo o diferencias de fase, basadas en una comparación entre la señal recibida del satélite y la generada por el receptor. La pseudodistancia es una medida de la distancia entre el satélite y la antena receptora referida a las épocas de emisión y recepción de los datos.

3.5.1. Pseudodistancia de código

$$R_K^P = \underbrace{c [t_R(\text{rec}) - t_S(\text{sat})]}_{\rho_K^P} - c [\delta^S - \delta_R] + \underbrace{T_K^P(t_R)}_2 + \underbrace{I_{K,P}^R(t_R)}_3 + \underbrace{d_{K,P}(t_R)}_4 + \underbrace{d_P^p(t_R)}_5 + \underbrace{d_{K,P}^p(t_R)}_6 + \underbrace{\varepsilon_p}_7 \quad \text{ec.}(129)$$

$$\rho_K^P = \sqrt{(X^P - X_K)^2 + (Y^P - Y_K)^2 + (Z^P - Z_K)^2} \quad \text{ec.}(130)$$

- ρ_K^P distancia geométrica entre el receptor K y el satélite P .
- 2. error por RETARDO TROPOSFÉRICO, siempre (+). No depende la frecuencia de la portadora.
- 3. error por RETARDO IONOSFÉRICO, siempre (+). Es función de la frecuencia de la portadora y del contenido total de electrones en el camino de la señal (TEC).
- 4 y 5. representan los retrasos debido al hardware tanto del receptor como del satélite, en la práctica puede suponerse que son independientes del tiempo y estables. Son dependientes del código y de la frecuencia.
- 6. representa el efecto multipath, depende del tipo de código y frecuencia.
- 7. representa el retardo por la existencia de ruidos aleatorios.



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

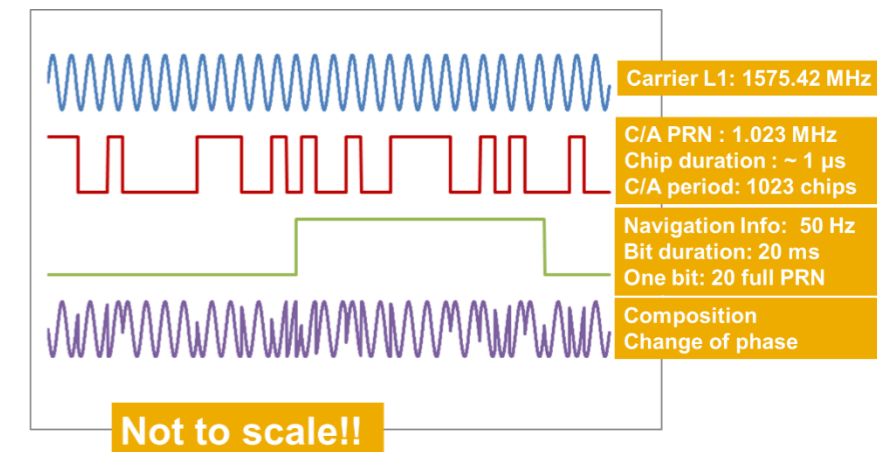
3.5. Observables

3.5.2. Pseudodistancia de fase

$$\varphi_k^p(t) = \varphi_k(t) - \varphi^p(t) + N_k^p(t_0) + I_{k,\varphi}^p(t) + \frac{f}{c} T_k^p(t) + d_{k,\varphi}(t) + d_{k,\varphi}^p(t) + d_\varphi^p(t) + \varepsilon_\varphi \quad \text{ec.(131)}$$

- $\varphi_k(t) - \varphi^p(t)$ el primero la fase de la onda generada en el receptor y el segundo, la fase de la onda generada en el satélite en el momento t de su recepción por la antena del receptor.
- $N_k^p(t_0)$ representa el número completo de ciclos entre el satélite y el receptor en el momento inicial de captación de la señal en el receptor.
- $I_{k,\varphi}^p(t)$ $T_k^p(t)$ representan los errores ionosférico y troposférico. Estos términos tienen un valor negativo, debido a que la fase de la portadora avanza, con lo que, al compararla con la fase de la onda generada en el receptor, y por lo tanto, la diferencia entre ambas será menor de lo que sería en el caso de la no existencia de estas dos capas, con lo que estos términos habrá que restarlos a la fase de la onda emitida por el satélite, y aparecerán sumando en la fórmula que nos da la diferencia entre ambas.
- $d_{k,\varphi}(t)$ $d_{k,\varphi}^p(t)$ reflejan los desfases en las ondas producidos por el hardware tanto en satélite como en el receptor.
- $d_\varphi^p(t)$ hace referencia al posible efecto multipath.
- ε_φ recoge los efectos en la medida de la diferencia de fase producido por los ruidos aleatorios.

Los términos que tienen el subíndice ϕ vienen medidos en ciclos. El término que expresa el efecto troposférico se expresa en ciclos multiplicando por el término $\frac{f}{c}$, donde f es la frecuencia nominal de la portadora.



Fuente: ESA, 2022. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/File:GPS_Signals.png

3.5. Observables

3.5.3. Observables en software científico: Los observables en el software científico Bernese, se clasifican en L1, L2, L3, L4 y L5, cada uno de ellos cumple una función en el procesado, L1 y L2 corresponden a la primera y segunda frecuencia, L3, L4 y L5, son combinaciones lineales que cumplen funciones específicas las cuales se plantean a continuación.

3.5.3.1. L3: Corresponde a la Ionosphere-Free Linear Combination, es decir, la combinación lineal libre de ionosfera, a menudo se denomina "sin ionosfera" porque se elimina el retraso de la ruta ionosférica de primer orden (Dach and Lutz (AIUB), 2015), y se expresa de la siguiente manera:

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad \text{ec.(132)}$$

La ecuación se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_{3R}^S - \rho_{R,0}^S - \Delta\rho_R^S = \cos(\alpha_{R,0,e}^S) * \Delta e_R + \cos(\alpha_{R,0,n}^S) * \Delta n_R + \cos(\alpha_{R,0,v}^S) * \Delta v_R - c * \Delta t_R - b_{3R}^S + m_W(z_R^S) * \delta\rho_{TR} + v_{3R}^S \quad \text{ec.(133)}$$

Donde:

L_{3R}^S = Combinación libre de ionosfera en la medición de fase

$\rho_{R,0}^S$ = Distancia Satélite-receptor calculada desde las efem. del satélite y las coord. Aproximadas del receptor

$\Delta\rho_R^S$ = Correcciones (reloj, refractividad, centro de fase, entre otros)

$\cos(\alpha_{R,0,e}^S), \cos(\alpha_{R,0,n}^S), \cos(\alpha_{R,0,v}^S)$ = Cosenos directores Satelite-Receptor

$\Delta e_R, \Delta n_R, \Delta v_R$ = Corrección a las coordenadas aproximadas del receptor

Δt_R = Corrección del reloj del receptor

b_{3R}^S = Bias de la combinación libre de ionosfera (bias instrumental del satélite y del receptor y wind-up)

$m_W(z_R^S)$ = Función de mapeo modelo troposférico

$\delta\rho_{TR}$ = Estimación parámetros troposféricos (corrección al modelo apriori)

v_{3R}^S = Error de medición y multipath en la combinación libre de ionosfera

3.5. Observables

3.5.3. Observables en software científico: Los observables en el software científico Bernese, se clasifican en L1, L2, L3, L4 y L5, cada uno de ellos cumple una función en el procesado, L1 y L2 corresponden a la primera y segunda frecuencia, L3, L4 y L5, son combinaciones lineales que cumplen funciones específicas las cuales se plantean a continuación.

3.5.3.2. L4: Corresponde a la Geometry-Free Linear Combination, es decir, la combinación lineal libre de geometría es independiente de los relojes del receptor, los relojes de los satélites y la geometría (órbitas, coordenadas de la estación), solo contiene el retardo ionosférico y las ambigüedades de fase inicial y puede utilizarse para la estimación de modelos de ionosfera (Dach and Lutz (AIUB), 2015). L4 se expresa de la siguiente manera:

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad \text{ec.(134)}$$

3.5.3.3. L5: Corresponde a la Wide-Lane Linear Combination, es decir, la combinación lineal de carril ancho se utiliza en la aplicación de dobles diferencias de fase para corregir desfases de ciclo y resolver ambigüedades en sus valores enteros (Dach and Lutz (AIUB), 2015). L5 se expresa de la siguiente manera:

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad \text{ec.(135)}$$

3.5. Observables

3.5.4. Desviaciones y ruido: Las fuentes de error pueden ser clasificadas en tres tipos, errores relacionados con el satélite, con el medio de propagación y con el receptor (ESA, 2013):

FUENTE DE ERROR	EFECTO	CORRECCIÓN/MODELADO
SATÉLITE	Desviaciones del reloj	Cálculo o archivos CLK
	Errores orbitales	Empleando orbitas precisas
MEDIO DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL	Retardo ionosférico	Modelos en formato IONEX
	Retardo troposférico	Modelos como pej VMFI
RECEPTOR	Variaciones del centro de fase de la antena	Calibraciones de Antena
	Desviaciones del reloj	Cálculo
	Multipath	Tipo de antena, máscara elevación, modelos

DISTANCIA	Magnitud
CÓDIGO C/A	300 cm
CODIGO P	30 cm
FASE	5 mm

Magnitudes típicas de desviaciones en distancias por ruido aleatorio. Fuente GNNS Hoffman Wellenhof 2007

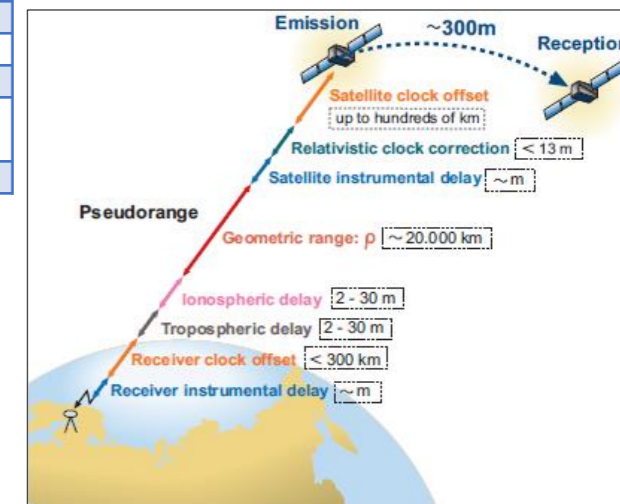
El URE (User Range Error) es un estimador que comprende los errores de:

- Los datos de efemérides.
- El reloj del satélite.
- Retardo ionosférico.
- Retardo troposférico.

FUENTE DE ERROR	DESVIACIÓN [m]	ALEATORIO [m]	TOTAL [m]
DATOS DE EFEMÉRIDES	2.1	0.0	2.1
RELOJ DEL SATÉLITE	2.0	0.7	2.1
IONOSFERA	4.0	0.5	4.0
TROPOSFERA	0.5	0.5	0.7
MULTIPATH	1.0	1.0	1.4
RECEPTOR(reloj receptor-ruido blanco)	0.5	0.2	0.5
UERE	5.1	1.4	5.3

Errores UERE. Fuente GNNS Hoffman Wellenhof 2007

Pero no tiene en cuenta errores del entorno (p ej. multipath) o del equipamiento del usuario (p. ej. offset antena). Ampliando el URE a los anteriores errores se tiene el UERE (User Equivalent Range Error).



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.5. Observables

3.5.5, Efectos atmosféricos: Estos efectos incluyen los excesos en el tiempo de viaje de la señal GNSS debido a la variación del índice de refracción en la atmósfera, sobre todo, los retrasos o adelantos en la señal debido a su velocidad de propagación en la ionosfera y troposfera (ESA, 2013).

3.5.5.1. Retardo Ionosférico: La velocidad de propagación de las señales electromagnéticas GNSS en la ionosfera depende de su densidad de electrones (TEC, Total Electron Content), la cual tiene dos procesos principales:

1. Durante el día, la radiación solar ioniza átomos neutros (sin carga eléctrica) para producir electrones e iones libres.
2. Durante la noche, la recombinación del proceso prevalece, donde los electrones libres se recombinan con los iones para producir partículas neutras, lo que conduce a una reducción en la densidad de electrones.

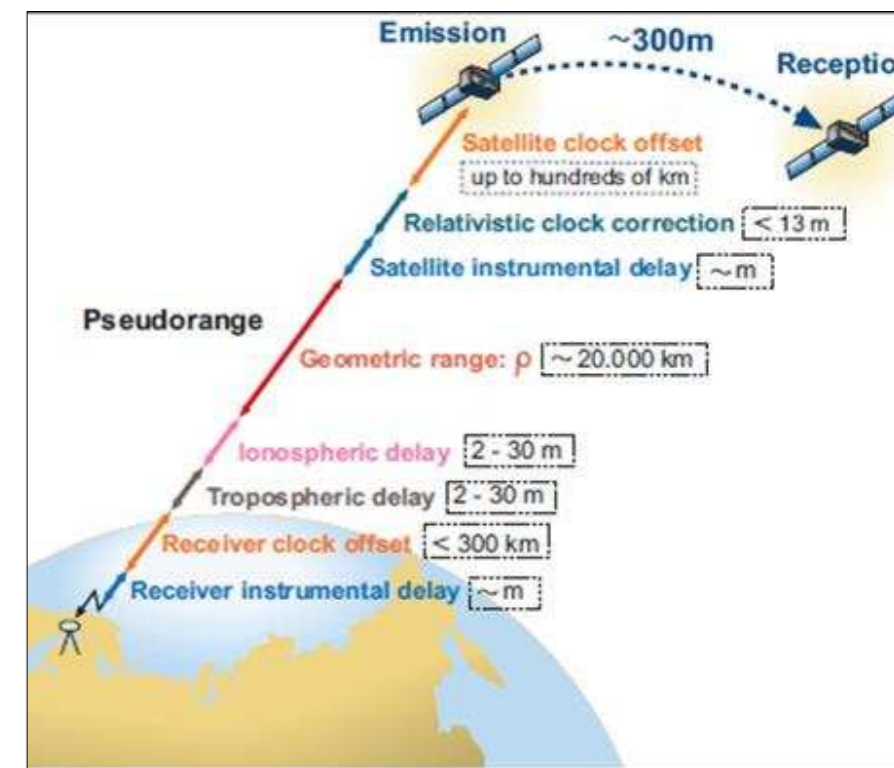
La unidad de medida del TEC es el TECU (TEC Unit) donde $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrons/m}^2$, y se puede observar a tiempo real en: http://iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html

3.5.5.2. Retardo Troposférico: El efecto de la troposfera en las señales GNSS aparece como un retardo en el viaje de la señal del satélite al receptor. Este retardo depende de la altura, presión y humedad así como también de la ubicación geográfica de la antena tanto del receptor como del emisor, se puede escribir como:

$$Tr = \int (n - 1) dl = 10^{-6} \int N dl \quad \text{ec. (136)}$$

n es el índice refractivo en el aire y $N = 106(n - 1)$ es la refractividad, que puede ser dividido en dos componentes, en hidrostática (debido a gases húmedos, generalmente N_2 y O_2) y componente húmeda (vapor de agua):

$$N = N_{hydr} + N_{wet} \quad \text{ec. (137)}$$



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.5. Observables

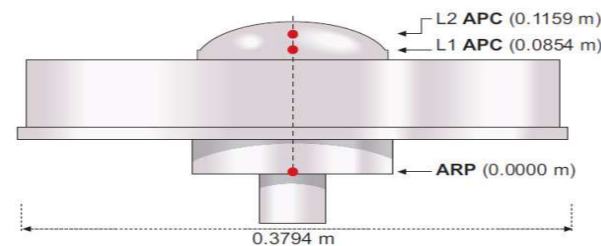
3.5.6. Variación del Centro de Fase de la antena: El centro de fase de la antena corresponde al punto al cual se refiere la señal de radio medida y que generalmente no coincide con el centro geométrico de la antena. Este desplazamiento no es constante y depende de la elevación, el acimut y la intensidad del satélite y además es diferente para las distintas frecuencias, un modelo simple es asumir que los centros de fase difieren únicamente en el eje vertical de la antena(ESA, 2013).

Se distinguen dos efectos a tener en cuenta en las antenas:

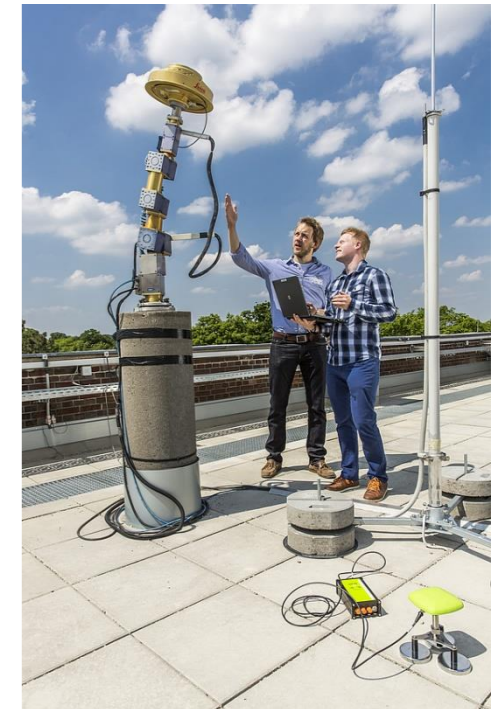
- PCO (Antenna Phase Center Offset), el cual corresponde al desplazamiento del centro de fase de la antena.
- PCV (Antenna Phase Center Variation), el cual corresponde a la variación del centro de fase de la antena.

IGS recopila las correcciones absolutas al centro de fase de la antena para satélites y receptores, los cuales son proporcionados en un archivo denominado ANTEX (Antenna Exchange Format).

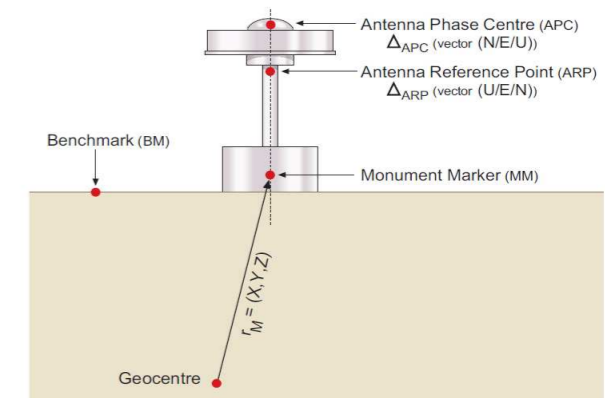
Las medidas GNSS se refieren a la posición del Centro de Fase de la Antena (APC, Antenna Phase Centre). Como esta ubicación depende de la frecuencia, se emplea otra referencia más adecuada que está en la su mayoría en la base de la antena. Este punto se llama, punto de referencia de la antena (ARP, Antenna Reference Point). Los distintos fabricantes de las antenas entregan información con respecto a la ubicación de los puntos antes mencionados (ARP y APC) en la antena.



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms



Fuente: (IFE, 2023), <https://www.ife.uni-hannover.de/en/services/gnss-antenna-calibration/>

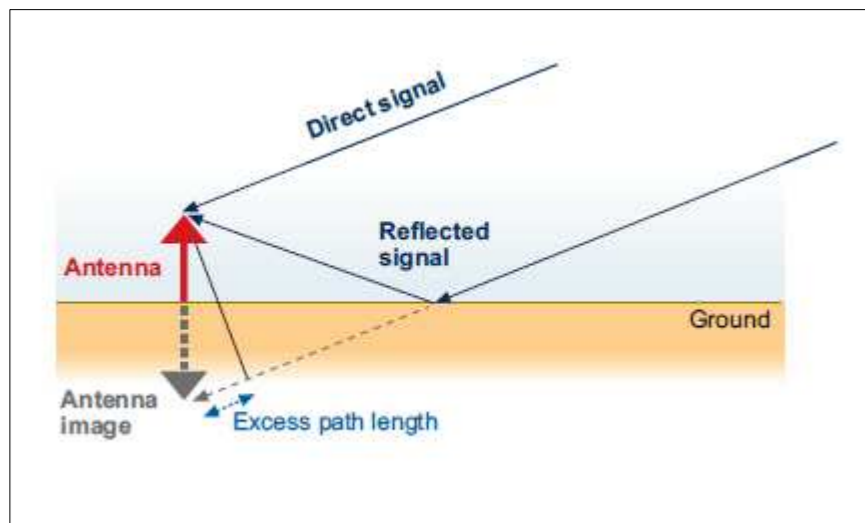


Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

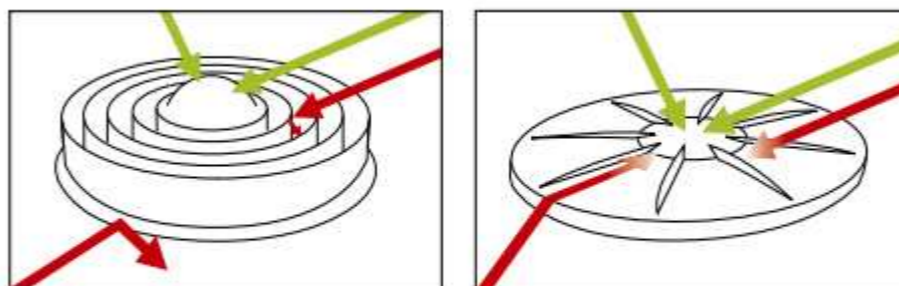
(ESA 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms

3.5. Observables

3.5.7 Multipath: El efecto Multipath (Multicamino-multitrayectoria) se produce cuando las señales GNSS no llegan directamente a la antena del receptor, sino que como su nombre indica, llegan por diferentes caminos, producto de rebotes con superficies reflectantes. La causa principal es la cercanía de la antena a estructuras metálicas reflectantes, y es importante y más marcada cuando la señal proviene de un satélite con poca elevación (ESA, 2013).



Fuente: (ESA, 2013), GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms



1) Choke Ring weakens multipath signals 2) Zephyr Geodetic 2 consumes multipath signals

Desirable signals are shown in green; undesirable signals are shown in red.

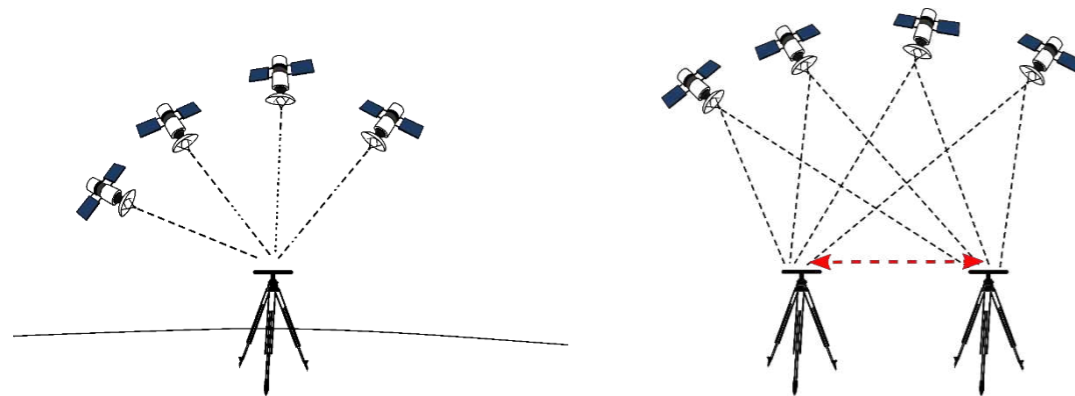
Fuente: (Trimble, 2023), <https://monitoring.trimble.com/products-and-solutions/antennas-monitoring-gnss>



Fuente: (Insidegnss, 2011), Topcon Full Wave GNSS Reference Station Antenna with Convex Impedance Ground Plane.

El efecto multipath puede reducirse mejorando la dirección y ubicación de la antena, es decir, mediante la atenuación de la señal procedente de ciertas direcciones con baja elevación, y obviamente situando la antena lejos de objetos potencialmente reflectivos.

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento



Fuente: Centro USC

MEDICIONES CON GNSS

- **TIPO DE OBSERVABLE**
(MEDICIONES DE CÓDIGO Y FASE)
- **TIPO DE PROCESADO**
(EN TIEMPO REAL Y EN POSTPROCESO)
- **MOVIMIENTO DEL RECEPTOR**
(MEDIDAS ESTÁTICAS Y CINEMÁTICAS)
- **TIPO DE POSICIONAMIENTO**
(ABSOLUTO Y RELATIVO)
 - POSICIONAMIENTO ABSOLUTO ESTÁTICO
 - POSICIONAMIENTO ABSOLUTO CINEMÁTICO
 - POSICIONAMIENTO RELATIVO ESTÁTICO
 - POSICIONAMIENTO RELATIVO CINEMÁTICO

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo: El objetivo de este tipo de posicionamiento es determinar las coordenadas de un punto desconocido con respecto a un punto conocido, para ello se genera un vector entre estos dos puntos (línea base) al tener tiempo de medición en común.

3.6.1.1. Diferencias de fase: Asumiendo observaciones simultáneas en los dos puntos A (conocido) y B (desconocido) a los satélites j y k, se pueden formar combinaciones lineales de diferencias de fase que conducen a simples diferencias (SD), dobles diferencias (DD) y triples diferencias (TD).

La diferenciación se logra a través de tres métodos: de receptores, de satélites y de tiempo.

Simple Diferencia (Elimina el error de reloj del satélite)	Doble Diferencia (Elimina el error de reloj de los receptores)	Triple Diferencia (Elimina las ambigüedades)
$\Phi_A^j(t) + f^j \delta^j(t) = \frac{\rho_A^j(t)}{\lambda} + N_A^j + f^j \delta_A(t) \quad \text{ec.(138)}$	$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{\rho_{AB}^j(t)}{\lambda} + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \quad \text{ec.(146)}$	$\Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{\rho_{AB}^{jk}(t_1)}{\lambda} + N_{AB}^{jk} \quad \text{ec.(153)}$
$\Phi_B^j(t) + f^j \delta^j(t) = \frac{\rho_B^j(t)}{\lambda} + N_B^j + f^j \delta_B(t) \quad \text{ec.(139)}$	$\Phi_{AB}^k(t) = \frac{\rho_{AB}^k(t)}{\lambda} + N_{AB}^k - f^k \delta_{AB}(t) \quad \text{ec.(147)}$	$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{\rho_{AB}^{jk}(t_2)}{\lambda} + N_{AB}^{jk} \quad \text{ec.(154)}$
$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \left[\frac{\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)}{\lambda} \right] + N_B^j - N_A^j - f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)] \quad \text{ec.(140)}$	$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \left[\frac{\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)}{\lambda} \right] + N_{AB}^k - N_{AB}^j \quad \text{ec.(148)}$	$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) - \Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{\rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1)}{\lambda} \quad \text{ec.(155)}$
$N_{AB}^j = N_B^j - N_A^j \quad \text{ec.(141)}$	$N_{AB}^{jk} = N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j \quad \text{ec.(149)}$	
$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t) \quad \text{ec.(142)}$	$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \Phi_B^k(t) - \Phi_B^j(t) - \Phi_A^k(t) + \Phi_A^j(t) \quad \text{ec.(150)}$	
$\Phi_{AB}^j(t) = \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) \quad \text{ec.(143)}$	$\rho_{AB}^{jk} = \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^j(t) \quad \text{ec.(151)}$	
$\rho_{AB}^j = \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) \quad \text{ec.(144)}$	$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{\rho_{AB}^{jk}(t)}{\lambda} + N_{AB}^{jk} \quad \text{ec.(152)}$	$\Phi_{AB}^{jk}(t_2 - t_1) = \frac{\rho_{AB}^{jk}(t_2 - t_1)}{\lambda} \quad \text{ec.(156)}$
$n_j n_t \geq \frac{n_j + 3}{n_j - 1}$	$n_t \geq \frac{n_j + 2}{n_j - 1}$	$n_t \geq \frac{n_j + 2}{n_j - 1}$
<p>Un solo satélite no proporciona solución pues el denominador se hace 0</p>	<p>Mínimo 2 satélites con 4 épocas. Ideal 4 satélites.</p>	<p>Mínimo 2 satélites con 4 épocas.</p>

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo:

Para el desarrollo del ejercicio, se emplea el Software MatLab, por lo tanto, el primer paso es ingresar las observaciones en los puntos A y B, coordenadas de satélites, tiempos, coordenadas iniciales (valores definitivos para el punto A) y la longitud de onda para las frecuencias L1 y L2 (Sánchez Benjamin, 2015).

```
obsenal.m= observaciones en el punto A.  
obsenbl.m= observaciones en el punto B.  
xxx.dat; yyy.dat; zzz.dat= coordenadas de satélites.  
tiempos.dat= tiempos de observación.  
coorinic.dat= coordenadas definitivas para el punto A (punto conocido).  
LANDAL1= longitud de onda para frecuencia L1.  
LANDAL2= longitud de onda para frecuencia L2.
```

Las observaciones realizadas desde los puntos A y B, vienen contenidas en los archivos obsenal.dat y obsenbl.dat

El contenido de la matriz obsenal.dat se ve la siguiente manera:

Las dos primeras líneas del archivo corresponden a los números identificativos de cada satélite observado por el punto A, la época a la que se refiere cada observación se muestra en la tercera línea. En las columnas 1 y 3 se encuentran las pseudodistancias de código C/A para L1 y L2. Por su parte las columnas 2 y 4 incluyen las medidas de fase en ciclos de la portadora en L1 y L2, las que serán utilizadas en el desarrollo del ejercicio. Para formular las ecuaciones de los satélites, se deben conocer las coordenadas de estos en las distintas épocas de medición, además de los datos contenidos en tiempos.dat, LANDAL1 y LANDAL2.

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo:

Como último requerimiento, se necesitan las coordenadas iniciales de los puntos, que en el caso del punto A serán fijas durante el desarrollo y para el punto B serán variables. Las coordenadas de los puntos se expresan de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} 4605134.683 & -550975.712 & 4365040.225 \\ 4598400.000 & -556750.000 & 4370300.000 \end{bmatrix}$$

Luego, se debe definir el número de épocas de medición a partir de las horas de inicio y final de observación y el intervalo entre mediciones:

Cálculo de épocas:

```
N1=(tiempos(3,1)*3600+tiempos(3,2)*60+tiempos(3,3)-(tiempos(2,1)*3600+tiempos(2,2)*60+tiempos(2,3)))/tiempos(1,1)+1
```

Cálculo del número de satélites:

```
N4=length(find(observal(1:2, :)~=0))  
N1=10  
N4=8
```

Para la formulación del sistema de ecuaciones, se generan 3 funciones:

1) royaddfas.m: función encargada de formular las matrices de coeficientes de los ajustes. Calcula las distancias entre receptor y satélites (rob, roa), a partir de las coordenadas de los puntos A y B:

```
function [A, rob, roa]=  
ROyAddfas(XB0, YB0, ZB0, XXX, YYY, ZZZ, XA, YA, ZA)
```

Posteriormente se construye la matriz A

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo: CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS RECEPTOR-SATÉLITE

Se calcula la distancia de cada satélite al receptor con las coordenadas

```
[N1, N4]=size(XXX);
Xo=ones (N1, N4) *XB0; Yo=ones (N1, N4) *YB0; Zo=ones (N1, N4) *ZB0;
rob=sqrt ([XXX-Xo).^2+(YYY-Yo).^2+(ZZZ-Zo).^2]);
Xo=ones (N1, N4) *XA; Yo=ones (N1, N4) *YA; Zo=ones (N1, N4) *ZA;
roa=sqrt ([XXX-Xo).^2+(YYY-Yo).^2+(ZZZ-Zo).^2]);
%Luego, se genera la matriz: 1 fila por ecuación, para todos los satélites en una
época y luego se repite para las épocas siguientes.
for J=1: N1 %épocas
    for I=1: N4 %N° satélites
        A((N4-1) * (J-1) +I,1) = -(XXX (J, I+1)-XB0) /rob (J, I+1) + (XXX(J,1)-XB0) /rob(J,1);
        A((N4-1) * (J-1) +I,2) = -(YYY (J, I+1)-YB0) /rob (J, I+1) + (YYY(J,1)-YB0) /rob(J,1);
        A((N4-1) * (J-1) +I,3) = -(ZZZ (J, I+1)-ZB0) /rob (J, I+1) + (ZZZ(J,1)-ZB0) /rob(J,1);
        A((N4-1) * (J-1) +I,3+I) = 1;
```

3) indepddf.m: construye los vectores que forman los términos independientes de los ajustes, a partir de las observaciones GPS desde A (obsreal.m) y B (obsrerbl.m), el número de épocas (N1), de satélites (N4) y de iteraciones (niter), además del tipo de ajuste “L” (L1, L2, L3) y las distancias calculadas en la función anterior (rob, roa:

```
function [LL]=
indepddf (obsreal, obsrerbl, tiempos, N4, N1, niter, L, rob, roa)
```

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo: CÁLCULO DE LOS TÉRMINOS INDEPENDIENTES

```

LANDAL1=0.1902936728; LANDAL2=0.2442102134; C=2.99792458e^8;
f1=C/LANDAL1; f2=C/LANDAL2;

for J=1: N1 %épocas
    T=tiempos (2,1) *3600+tiempos (2,2) *60+tiempos (2,3) +(J-1) *tiempos (1,1);
    if strcmp (L, 'L1')
        for I=2: N4 %N°satélites
            LL((N4-1) * (J-1) +I-1,1)=LANDAL1*[obserbl (3*J+(J-1) *N4+1,2) -obserbl (3*J+(J-1) *N4+I,2) ]-
            LANDAL1*[obseral (3*J+(J-1) *N4+1,2) -obseral (3*J+(J-1) *N4+I,2) ]-rob (J, I) +rob (J,1) +
            roa (J, I) -roa (J,1) ;
        end
    elseif strcmp(L, 'L2');
        for I=2; N4 %N°satélites
            LL((N4-1) * (J-1) +I-1,1)=LANDAL2*[obserbl (3*J+(J-1) *N4+1,4) -obserbl (3*J+(J-1) *N4+I,4) ]-
            LANDAL2*[obseral (3*J+(J-1) *N4+1,4) -obseral (3*J+(J-1) *N4+I,4) ]-rob (J, I) +rob (J,1) +
            roa (J, I) -roa (J,1) ;
        end
    elseif strcmp(L, 'L3');
        for I=2; N4 %N°satélites
            LL2((N4-1) * (J-1) +I-1,1)=LANDAL2*[obserbl (3*J+(J-1) *N4+1,4) -obserbl (3*J+(J-1)
            *N4+I,4) ]-LANDAL2*[obseral (3*J+(J-1) *N4+1,4) -obseral (3*J+(J-1) *N4+I,4) ];
        end
    LL1((N4-1) * (J-1) +I-1,1)=LANDAL1*[obserbl (3*J+(J-1) *N4+1,2) -obserbl (3*J+(J-1)
    *N4+I,2) ]-LANDAL1*[obseral (3*J+(J-1) *N4+1,2) -obseral (3*J+(J-1) *N4+I,2) ];

    LL((N4-1) * (J-1) +I-1,1)=[1/ (f1^2-f2^2) ]*[f1^2*LL1((N4-1) * (J-1) +I-1,1) -f2^2*LL2((N4-
    1) (J-1) +I-1,1) ]-rob (J, I) +rob (J,1) +roa (J, I) -roa (J,1) ;
end
end
end
end

```

2) solmmcc.m: resuelve los ajustes mediante MMCC, por medio del comando lscov, que emplea una matriz de pesos que se toma como la identidad, además almacena las correcciones de las incógnitas a lo largo de las iteraciones en el vector delta

```

function [DELTA, RES, delta]solmmcc (A, L, P, niter, delta)
%A*X-L=V%
DELTA=lscov (A, L, P);
RES=A*DELTA-L;
delta(:,niter+1)=DELTA;

```

El ejercicio y los datos fueron sacados del libro **Cálculos geodésicos y GPS con MATLAB**

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo:

Se plantean 3 ajustes diferentes: para L1 y L2, y la combinación de ambas, denominada L3. Respecto a las interacciones, en este caso se definen 3 y en cada una de ellas se calcula correcciones a los parámetros incógnitos que deseamos calcular.

BUCLE PARA RESOLUCION ITERATIVA

INICIALIZACIÓN DE LOS VECTORES DE CORRECCIÓN

```
nitermax=3;  
delta (:,1) =zeros (3+N4-1,1);  
deltap=delta;  
deltac=delta;  
niter=1;  
while niter<nitermax
```

SISTEMA DE ECUACIONES DE OBSERVACIÓN

```
%Matriz de coeficientes L1  
[AL1,rob1,roa1]=ROyAddfas (XB01,YB01,ZB01,XXX,YYY,ZZZ,XA,YA,ZA);  
[LL1]=indepddf (obsenal, obserbl, tiempos, N4, N1, niter, 'L1', roa1, rob1);  
[DELTAL1,RESL1,deltac]=solmmcc (AL1,LL1,eye (length (AL1)),niter,deltac);  
  
%Matriz de coeficientes L2  
[AL2,rob2,roa2]=ROyAddfas (XB02,YB02,ZB02,XXX,YYY,ZZZ,XA,YA,ZA);  
[LL2]=indepddf (obsenal, obserbl, tiempos, N4, N1, niter, 'L2', roa2, rob2);  
[DELTAL2,RESL2,deltap]=solmmcc (AL2,LL2,eye (length (AL2)),niter,deltap);  
  
%Matriz de coeficientes L3  
[AL3,rob3,roa3]=ROyAddfas (XB03,YB03,ZB03,XXX,YYY,ZZZ,XA,YA,ZA);  
[LL3]=indepddf (obsenal, obserbl, tiempos, N4, N1, niter, 'L3', roa3, rob3);  
[DELTAL3,RESL3,delta]=solmmcc (AL3,LL3,eye (length (AL3)),niter,delta);  
  
niter=niter+1;
```

```
XB01=XB01-DELTAL1 (1); YB01=YB01-DELTAL1 (2); ZB01=ZB01-DELTAL1 (3);  
XB02=XB02-DELTAL2 (1); YB02=YB02-DELTAL2 (2); ZB02=ZB02-DELTAL2 (3);  
XB03=XB03-DELTAL3 (1); YB03=YB03-DELTAL3 (2); ZB03=ZB03-DELTAL3 (3);  
  
xyz=[XB01,YB01,ZB01;XB02,YB02,ZB02;XB03,YB03,ZB03]
```

ACTUALIZACIÓN INCÓGNITAS

El ejercicio y los datos fueron sacados del libro **Cálculos geodésicos y GPS con MATLAB**

3.6. Modelos matemáticos para posicionamiento

3.6.1. Cálculo de un posicionamiento estático relativo:

Los valores finales de las coordenadas (fila 1 solución en L1, fila 2 solución en L2 y fila 3 solución en L3) y las correcciones (para el ajuste en L3) de las incógnitas en cada iteración, se muestran en la variable delta:

```
xyz  
delta(:,2:end)
```

$$\text{xyz} = \begin{pmatrix} 4598458.28890358 & -556720.46695241 & 4370365.40086987 \\ 4598458.47377591 & -556720.389737483 & 4370365.1031946 \\ 4598458.00314136 & -556720.586306034 & 4370365.8609947 \end{pmatrix}$$

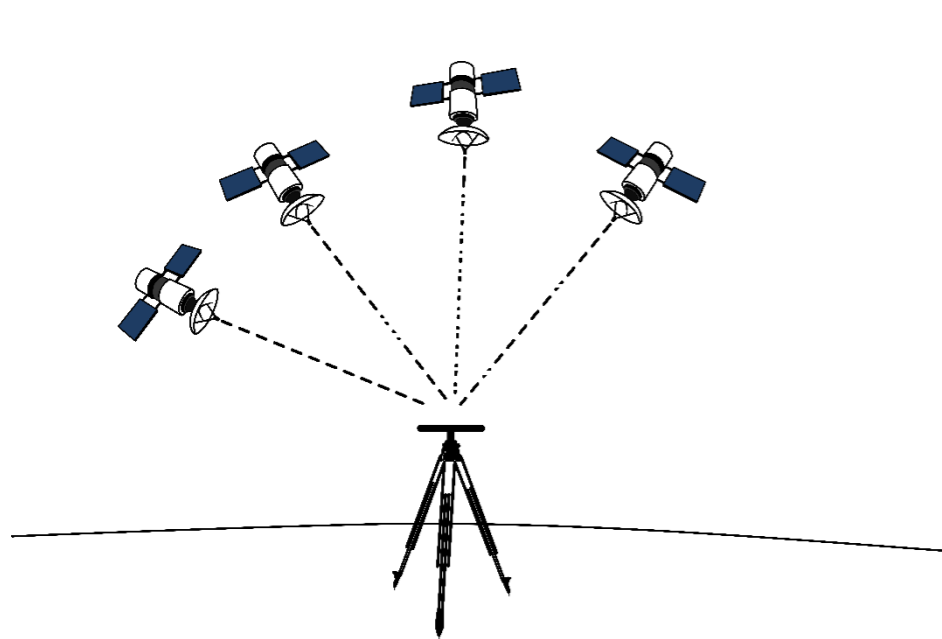
$$\text{ans} = \begin{pmatrix} -58.0032117443693 & 7.03874297669884e-005 \\ -29.4138844210708 & 0.000190455340439715 \\ -65.8610855387132 & 9.08434240171725e-005 \\ 0.112210952674307 & 0.112194625453128 \\ -0.294504499680291 & -0.29463684980857 \\ -3.27285604521478 & -3.27274931134034 \\ 1.17830880905167 & 1.17836037162468 \\ -0.896209004452663 & -0.896102600377751 \\ 0.0680777782349252 & 0.0682072554758349 \\ -2.26355600835496 & -2.263581505989 \end{pmatrix}$$

Las coordenadas exactas del punto B son:

$$X = 4598457.104 \quad Y = -556719.711 \quad Z = 4370364.723$$

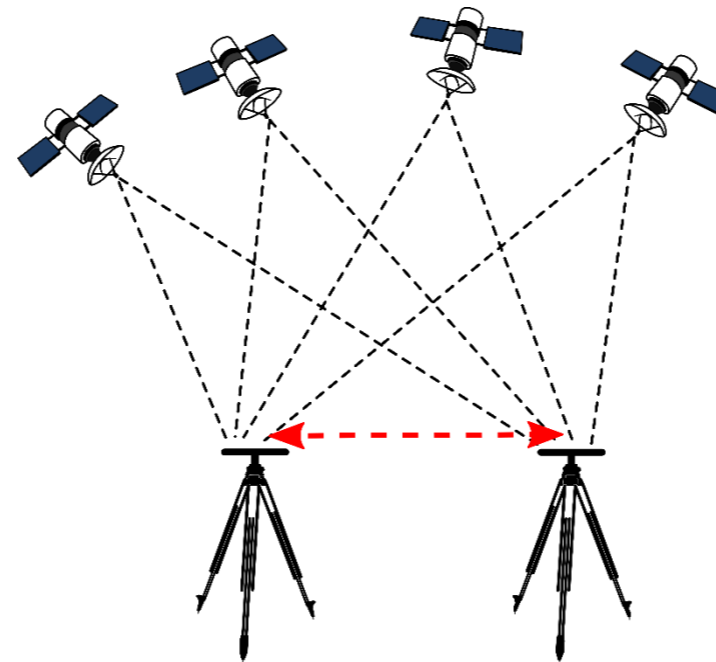
3.7. Observación y procesamiento

3.5.5. Observaciones GNSS:



Absoluto: Se utiliza un único receptor que mide pseudodistancias a cuatro o más satélites.

No se genera línea base



Relativo: Se utilizan dos o más receptores, realizando mediciones (código o fase) a los mismos satélites simultáneamente en dos sitios.

Se genera línea base

	TÉCNICA DE OBSERVACIÓN	PRECISIÓN TÍPICA	TIEMPO DE OBSERVACIÓN	APLICACIONES	MÁSCARA DE ELEVACIÓN
	CORS	(mm) procesada con Software Científico	continua	Deformación de la corteza, geofísica, geodesia y meteorología	0°
	Estático relativo convencional	mm procesada con Software Científico	Desde horas a meses	Deformación de la corteza, geofísica, geodesia continental	0°
	Absoluto Posicionamiento Puntual Preciso	≤ 1 cm y mejores procesadas con Software Científico	24 horas	Geodesia y monitoreo	0°
		2 cm-3 cm	Mínimo 3 horas	Geodesia y monitoreo ingeniería.	0°
	Estático rápido	1cm-3cm	Desde minutos a horas	Ingeniería, establecimiento de redes geodésicas cortas(<70km)	0°
	Network Real Time Kinematic NRTK	1 cm – 5 cm	Tiempo real	Ingeniería, toma de datos para topografía, replanteos, fotogrametría	10°
	Real Time Kinematic RTK	1 cm – 5 cm	Tiempo real	Ingeniería, toma de datos para topografía, replanteos, fotogrametría	10°
	DGNSS	< 1 m	Tiempo real o postproceso	Catastro	10-

Fuente: (Adaptado de UNAVCO, 2010), UNAVCO Campaign GPS Handbook

3.7. Observación y procesamiento

3.7.1. Observaciones GNSS: Para realizar observaciones GNSS se plantean una serie de cuestiones prácticas como por ejemplo, la elección del equipo, la técnica de observación y la organización del trabajo. Para los levantamientos pasivos de alto orden se requiere un esfuerzo importante para la planificación de los mismos, sin embargo, en el resto no suele requerir una planificación excesiva, excepto cuando se trata de zonas con obstrucciones importantes.

3.7.1.1. Sesiones: Corresponde periodo de tiempo elegido para una observación donde se realizan observaciones simultáneas y con la misma tasa de grabación. El mínimo número de sesiones s en un trabajo que implica la medición de n puntos y usando r receptores viene, en función del número o de puntos de solape entre sesiones, viene dado por:

$$s = \left\lceil \frac{n - o}{r - o} \right\rceil \quad \text{ec. (157)}$$

3.7.1.1. Línea Base: Es la línea imaginaria entre dos receptores GNSS, que miden simultáneamente y con la misma tasa de grabación. Cuanto mayor sea la longitud de la línea base, mayor será el error absoluto cometido. Existen dos tipos de líneas base, la línea base dependiente y la línea base independiente. Las líneas base independientes son aquellas que se utilizarán para realizar el procesamiento y las líneas base dependientes son aquellas que no aportan información adicional, por ende, no deben ser procesadas.

Se pueden calcular las líneas base totales, las independientes y las líneas base que fueron medidas dos veces a través de las siguientes ecuaciones:

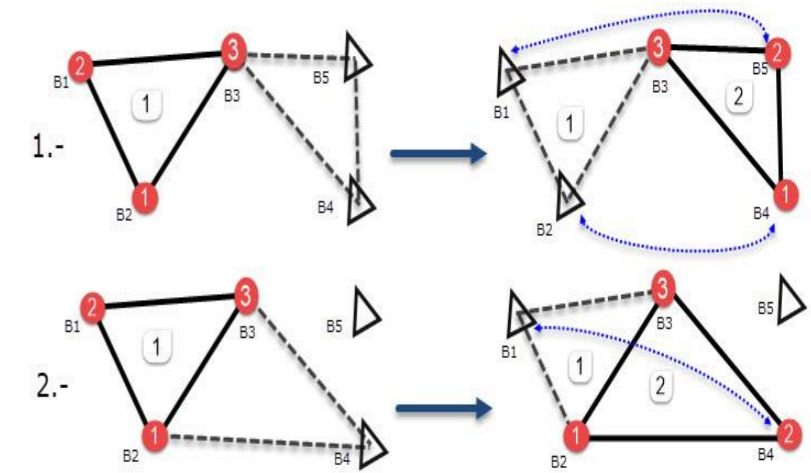
Donde:

$n = N^\circ$ total de puntos

$r = N^\circ$ receptores

$o = N^\circ$ estaciones de solape o con más de una observación en sesiones distintas

$s = N^\circ$ mínimo de sesiones en común.



Fuente Centro USC

$$N_{LBT} = \frac{r * (r - 1)}{2} \quad \text{ec. (158)}$$

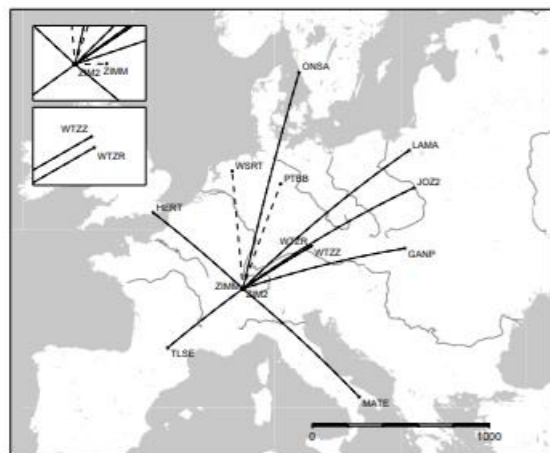
$$N_{LBI} = s * (r - 1) \quad \text{ec. (159)}$$

$$N_{LBI2} = (s - 1) * (o - 1) \quad \text{ec. (160)}$$

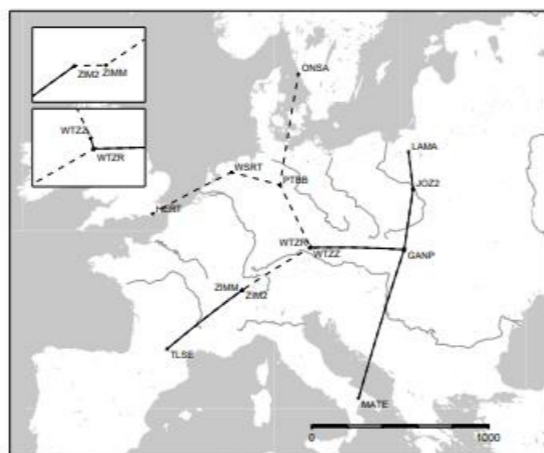
3.7. Observación y procesamiento

3.7.1.2. Línea Base en Bernese: en Bernese existen tres estrategias para el procesamiento de líneas base, estas son (Dach and Lutz (AIUB), 2015):

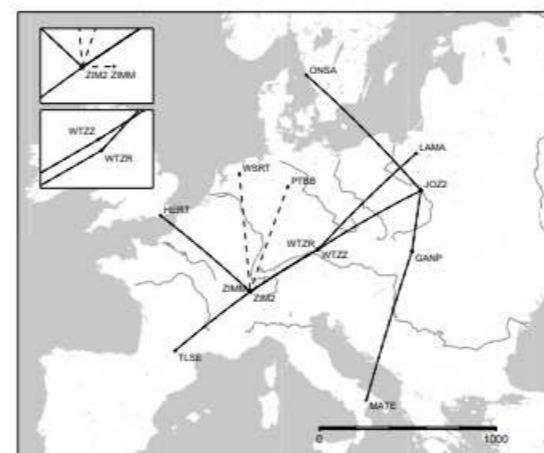
1. STAR: Las líneas base se construyen conectando una estación de referencia con todas las estaciones restantes
2. SHORTEST: Consiste en procesar las líneas base más cortas. Solo se puede utilizar si las observaciones de todas las estaciones cubren el mismo intervalo de tiempo y el mismo GNSS.
3. OBS-MAX: Las líneas base se crean teniendo en cuenta el número de observaciones comunes para las estaciones asociadas. De todas las combinaciones posibles, se elige un conjunto de líneas base con el máximo de observaciones comunes. Este método se puede combinar con el SHORTEST.



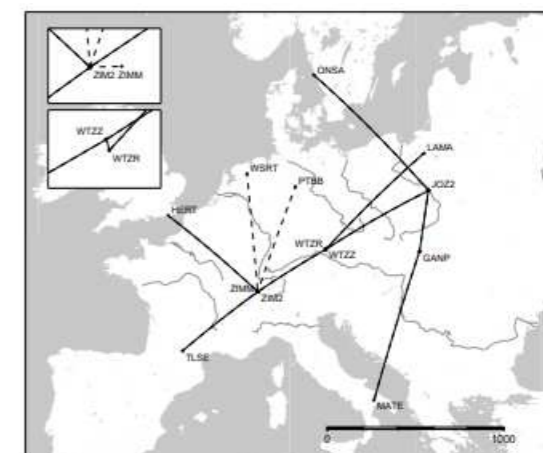
(a) Strategy: STAR



(b) Strategy: SHORTEST



(c) Strategy: OBS-MAX without bonus option



(d) Strategy: OBS-MAX with bonus option for short baselines

Fuente (Dach and Lutz (AIUB), 2015), User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2

Fuente (Dach and Lutz (AIUB), 2015), User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2

(Dach and Lutz (AIUB), 2015), User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2

3.7. Observación y procesamiento

3.7.1. Observaciones GNSS:

SOFTWARE	BSW 5.2	GG 10.71
PARAMETER	SETTINGS	
MEASUREMENT MODELS		
Pre-processing	Phase pre-processing in a baseline-by-baseline mode using triple-differences. In most cases, cycle slips are fixed, looking simultaneously at different linear combinations of L1 and L2. If a cycle slip cannot be fixed reliably, bad data points are removed, or new ambiguities are set up.	Phase pre-processing in a baseline-by-baseline mode using triple-differences. In most cases, cycle slips are fixed, looking simultaneously at different linear combinations of L1 and L2. If a cycle slip cannot be fixed reliably, bad data points are removed, or new ambiguities are set up.
Basic Observable	Carrier phase, the code is only used for receiver clock sync. Use of elevation dependant weighting (cos (z)) Elevation angle cut off: 3 degrees	GNSS carrier phase. Code-only for receiver clock sync and ambiguity resolution. Melbourne-Wübbena wide lane combination
	Data sampling: 30 s	

Fuente Centro USC

3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos: Los datos corresponden a lo que se obtiene de nuestro posicionamiento, es decir, archivos RINEX que salen de las estaciones y por metadatos se entiende por todos los archivos necesarios para darle posición de manera precisa a nuestra estación (efemérides, parámetros de orientación, coordenadas de puntos fijos, etc.)

Archivo Observación RINEX IGS, p. ej. DOY 122 año 2021 (GPS Week 2156)

1. https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/daily_30second_data.html
2. <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/122/21o/>
<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/122/21o/sant1220.21o.gz> (RINEX v.2xx)
3. <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/122/21d/>
https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/122/21d/SANT00CHL_R_20211220000_01D_30S_MO.crux.gz (RINEX v.4xx)



RINEX 4.00 IGS

<https://igs.org/news/rinex-4-now-available/>

3. Tema: Posicionamiento GNSS

3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos

Efemérides con nombre corto

Efemérides precisas IGS: GPS. 2021.33(GPS Week 2156): Se descarga una por día del 0 al 6

- https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2156/igs21560.sp3.Z>

Efemérides precisas IGL: GLONASS. 2021.33(GPS Week 2156): Se descarga una por día del 0 al 6

- https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html
- <https://cddis.nasa.gov/archive/glonass/products/>
- <https://cddis.nasa.gov/archive/glonass/products/2156/igl21560.sp3.Z>

Efemérides Transmitidas GPS y GLONASS. DOY122 año 2021 (GPS Week 2156)

- https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/broadcast_ephemeris_data.html
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/brdc/>
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/brdc/brdc1220.21g.gz> (GLONASS)
<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2021/brdc/brdc1220.21n.gz> (GPS)

Efemérides con nombre largo

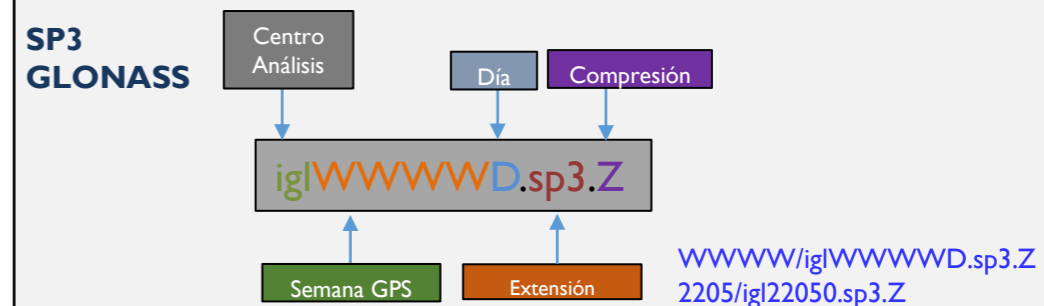
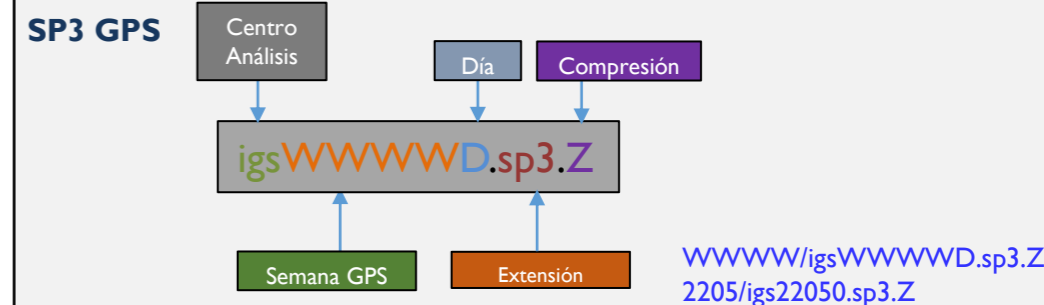
Efemérides precisas IGS: GPS. DOY 331 año 2022 (GPS Week 2238)

- https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>
- https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/IGS0OPSFIN_20223310000_01D_15M_ORB.SP3.gz

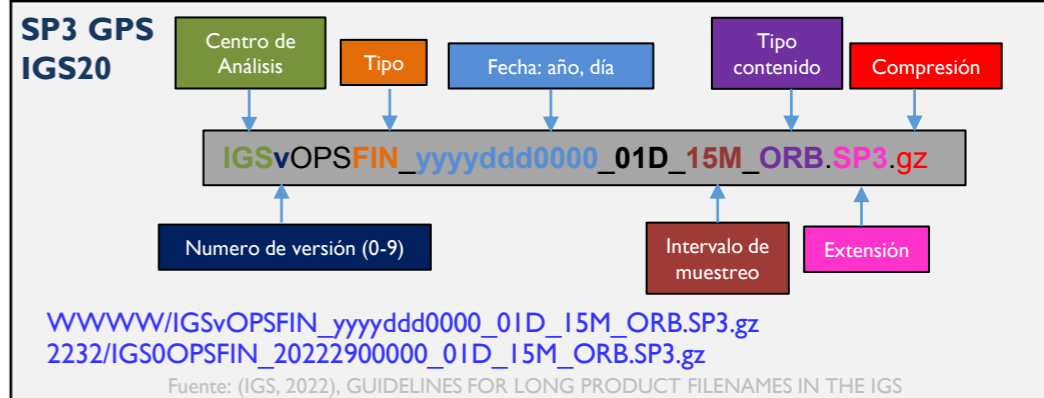
Efemérides Transmitidas GPS. DOY 331 año 2022 (GPS Week 2238)

- https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/broadcast_ephemeris_data.html
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2022/brdc/>
- https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2022/brdc/BRDM00DLR_S_20223310000_01D_MN.rnx.gz

Nombre corto Órbitas Finales



Nombre largo Órbitas Finales



Fuente: (IGS, 2022), GUIDELINES FOR LONG PRODUCT FILENAMES IN THE IGS

Desde la semana 2238, las efemérides precisas para GPS, solo se pueden encontrar con nombre largo en la página en de CDDIS.

3. Tema: Posicionamiento GNSS



3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos

PCV formato Bernese

- <http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER54/REF/>
- http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER54/REF/ANTENNA_I20.PCV

Productos de reloj y parámetros de rotación de la Tierra. 2021.33(GPS Week 2156) (Nombre Corto)

- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2156/>
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2156/igs2156l.clk.z>
- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2156/igs21567.erp.z>

Productos de reloj y parámetros de rotación de la Tierra. DOY 331 año 2022 (GPS Week 2238) (Nombre Largo)

- <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/>
- https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/IGS0OPSFIN_20223310000_01D_30S_CLK.CLK.gz
- https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/IGS0OPSFIN_20223310000_07D_01D_ERP.ERP.gz

Archivo IONEX. año 2022(GPS Week 2218) (Nombre Corto)

- <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>
- <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2022/>
- <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2022/COD22180.ION.Z>

Archivo IONEX. DOY 339 año 2022(GPS Week 2239) (Nombre Largo)

- <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>
- <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2022/>
- http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2022/COD0OPSFIN_20223390000_01D_01H_GIM.ION.gz

ANTENNA/RADOME	TYPE	NUMBER	SYS	FRQ	TYP	D(O)	D(Z)	D(A)	M(Z)	SINEX	METHOD	DATE	REMARK								
SEPCHOKE_B3E6	SPKE	0	G	3	1	0	5	5	90	IGS20_2247	ROBOT	09-JUN-19									
		R	4	1	0	5	5	90	IGS20_2247	ROBOT		09-JUN-19									
		E	5	1	0	5	5	90	IGS20_2247	ROBOT		09-JUN-19									
		S	2	1	0	5	5	90	IGS20_2247	ROBOT		09-JUN-19									
		C	6	1	0	5	5	90	IGS20_2247	ROBOT		09-JUN-19									
		J	4	1	0	5	5	90	IGS20_2247	ROBOT		09-JUN-19									
NORTH	MM	EAST	MM	UP	MM	FACTOR															
G01	0	0.94	-0.59	127.35	0.100E+01																
G02	0	0.22	-0.35	141.43	0.100E+01																
G05	0	0.11	-0.35	141.36	0.100E+01																
R01	0	-0.06	0.69	126.32	0.100E+01																
R04	0	-0.06	0.69	126.32	0.100E+01																
R02	0	0.18	-0.41	141.11	0.100E+01																
R06	0	0.18	-0.41	141.11	0.100E+01																
E01	0	0.94	-0.59	127.35	0.100E+01																
E05	0	0.11	-0.35	141.36	0.100E+01																
E06	0	0.20	-0.18	139.94	0.100E+01																
E07	0	0.09	-0.36	141.31	0.100E+01																
E08	0	-0.63	0.33	141.45	0.100E+01																
S01	0	0.94	-0.59	127.35	0.100E+01																
S05	0	0.11	-0.35	141.36	0.100E+01																
C01	0	0.94	-0.59	127.35	0.100E+01																
C05	0	0.11	-0.35	141.36	0.100E+01																
C07	0	0.09	-0.36	141.31	0.100E+01																
C08	0	-0.63	0.33	141.45	0.100E+01																
C02	0	0.15	-0.43	128.98	0.100E+01																
C06	0	0.19	-0.51	139.98	0.100E+01																
J01	0	0.94	-0.59	127.35	0.100E+01																
J02	0	0.22	-0.35	141.43	0.100E+01																
J05	0	0.11	-0.35	141.36	0.100E+01																
J06	0	0.20	-0.18	139.94	0.100E+01																
G01	0	A\Z	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
G01	0	0	0.00	-0.04	-0.20	-0.46	-0.83	-1.28	-1.78	-2.29	-2.78	-3.18	-3.45	-3.52	-3.37	-2.92	-2.09	-0.73	1.31	4.14	7.69
G01	0	5	0.00	-0.04	-0.19	-0.46	-0.82	-1.26	-1.76	-2.28	-2.77	-3.17	-3.44	-3.52	-3.37	-2.92	-2.08	-0.72	1.33	4.18	7.73
G01	0	10	0.00	-0.04	-0.19	-0.45	-0.81	-1.25	-1.74	-2.26	-2.75	-3.15	-3.42	-3.50	-3.35	-2.90	-2.06	-0.69	1.38	4.23	7.80
G01	0	15	0.00	-0.04	-0.19	-0.45	-0.80	-1.23	-1.72	-2.23	-2.72	-3.13	-3.40	-3.48	-3.33	-2.88	-2.03	-0.64	1.44	4.31	7.88
G01	0	20	0.00	-0.04	-0.19	-0.44	-0.79	-1.22	-1.70	-2.21	-2.69	-3.09	-3.36	-3.45	-3.30	-2.85	-1.99	-0.59	1.51	4.40	7.97
G01	0	25	0.00	-0.04	-0.19	-0.44	-0.78	-1.20	-1.68	-2.18	-2.65	-3.05	-3.33	-3.42	-3.27	-2.82	-1.96	-0.54	1.58	4.49	8.06
G01	0	30	0.00	-0.04	-0.18	-0.43	-0.77	-1.19	-1.65	-2.14	-2.61	-3.01	-3.28	-3.38	-3.24	-2.79	-1.93	-0.50	1.64	4.57	8.14
G01	0	35	0.00	-0.04	-0.18	-0.43	-0.76	-1.17	-1.63	-2.12	-2.58	-2.97	-3.24	-3.34	-3.21	-2.77	-1.91	-0.47	1.68	4.62	8.19
G01	0	40	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.76	-1.16	-1.61	-2.09	-2.55	-2.93	-3.20	-3.30	-3.18	-2.75	-1.90	-0.47	1.70	4.65	8.22
G01	0	45	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.75	-1.15	-1.60	-2.07	-2.52	-2.90	-3.17	-3.28	-3.16	-2.75	-1.91	-0.49	1.68	4.64	8.22
G01	0	50	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.14	-1.58	-2.05	-2.50	-2.88	-3.15	-3.25	-3.15	-2.76	-1.94	-0.54	1.62	4.59	8.18
G01	0	55	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.13	-1.58	-2.04	-2.48	-2.86	-3.13	-3.24	-3.15	-2.78	-1.99	-0.61	1.54	4.51	8.12
G01	0	60	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.13	-1.57	-2.04	-2.48	-2.85	-3.12	-3.24	-3.17	-2.81	-2.05	-0.70	1.43	4.40	8.03
G01	0	65	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.13	-1.57	-2.04	-2.48	-2.86	-3.13	-3.25	-3.19	-2.86	-2.13	-0.80	1.30	4.27	7.92
G01	0	70	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.13	-1.57	-2.04	-2.49	-2.87	-3.14	-3.27	-3.22	-2.91	-2.20	-0.91	1.18	4.13	7.80
G01	0	75	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.13	-1.58	-2.05	-2.50	-2.88	-3.16	-3.30	-3.25	-2.96	-2.27	-1.00	1.06	4.01	7.68
G01	0	80	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.14	-1.59	-2.06	-2.52	-2.90	-3.18	-3.33	-3.29	-3.01	-2.34	-1.08	0.96	3.90	7.58
G01	0	85	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.74	-1.14	-1.59	-2.07	-2.53	-2.92	-3.21	-3.36	-3.32	-3.05	-2.39	-1.14	0.90	3.83	7.51
G01	0	90	0.00	-0.04	-0.18	-0.42	-0.75	-1.14	-1.60	-2.08	-2.55	-2.95	-3.23	-3.38	-3.35	-3.07	-2.41	-1.17	0.87	3.80	7.46
G01	0	95	0.00	-0.04	-0.19	-0.42	-0.75	-1.15	-1.61	-2.09	-2.56	-2.96	-3.26	-3.40	-3.37	-3.09	-2.42	-1.16	0.88	3.81	7.46
G01	0	100	0.00	-0.04	-0.19	-0.43	-0.75	-1.15	-1.61	-2.10	-2.57	-2.98	-3.27	-3.42	-3.38	-3.08	-2.40	-1.13	0.92	3.86	7.50
G01	0	105	0.00	-0.04	-0.19	-0.43	-0.76	-1.16	-1.62	-2.11	-2.58	-2.98	-3.28	-3.42	-3.37	-3.06	-2.36	-1.07	1.00	3.94	7.57
G01	0	110	0.00	-0.05	-0.19	-0.43	-0.76	-1.16	-1.63	-2.12	-2.59	-2.99	-3.27	-3.41	-3.35	-3.03	-2.31	-0.99	1.10	4.05	7.67
G01	0	115	0.00	-0.05	-0.20	-0.44	-0.77	-1.17	-1.63	-2.12	-2.59	-2.98	-3.26	-3.39	-3.32	-2.98	-2.24	-0.91	1.21	4.17	7.77
G01	0	120	0.00	-0.05	-0.20	-0.44	-0.77	-1.17	-1.64	-2.12	-2.58	-2.97	-3.24	-3.36	-3.28	-2.93	-2.18	-0.82	1.31	4.27	7.87

3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos

Descarga de datos

RINEX Versión 2

```
echo on
set /A Dia=120
set /A Year=23
:bucle
wget Contraseña Usuario --no-check-certificate

wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/data/daily/20%Year%/%Dia%/%Year%d/cti%Dia%0.%Year%d.gz

set /A Dia=%Dia%+1
if %Dia% ==121 goto :finalizar
goto :bucle
:finalizar
```

Contraseña Usuario, corresponde a la contraseña y usuario que tiene cada persona o Centro de procesamiento para realizar la descarga de datos desde CDDIS

RINEX Versión 4

```
echo on
set /A Dia=120
set /A Year=23
:bucle
wget Contraseña Usuario --no-check-certificate

wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/data/daily/20%Year%/%Dia%/%Year%d/SANT00CHL_R_20%Year%%Dia%0000_01D_30S_MO.crx.gz

set /A Dia=%Dia%+1
if %Dia% ==121 goto :finalizar
goto :bucle
:finalizar
```

Es importante destacar que, para realizar la descarga, el código debe guardarse como un BAT y se debe contar con el ejecutable wget.exe

3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos

Descarga de datos

Efemérides IGS y parámetros de rotación

```
echo on
set /A Dia=120
set /A Year=2023

set /A Week=2250
:bucle
wget Contraseña Usuario
--no-check-certificate

wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/%Week%/IGS00PSFIN_%Year%0%Día%0000_01D_15M_ORB.SP3.gz
wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gnss/products /%Week%/IGS00PSFIN_%Year%0%Día% 0000_07D_01D_ERP.ERP.gz

set /A Dia=%Dia%+1
if %Dia% ==121 goto :finalizar
goto :bucle
:finalizar
```

Efemérides Glonass

```
echo on
set /A Year=2023
set /A Week=2248
:bucle
wget Contraseña Usuario
--no-check-certificate

wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/glonass/products/%Week%/igl%Week%0.sp3.Z
wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/glonass/products/%Week%/igl%Week%0.sp3.Z
wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/glonass/products/%Week%/igl%Week%0.sp3.Z
wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/glonass/products/%Week%/igl%Week%0.sp3.Z
wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/glonass/products/%Week%/igl%Week%0.sp3.Z
wget -c --no-check-certificate ftps://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/glonass/products/%Week%/igl%Week%0.sp3.Z

set /A Week=%Week%+1
if %Week% ==2249 goto :finalizar
goto :bucle
:finalizar
```

Contraseña Usuario, corresponde a la contraseña y usuario que tiene cada persona o Centro de procesamiento para realizar la descarga de datos desde CDDIS

Es importante destacar que, para realizar la descarga, el código debe guardarse como un BAT y se debe contar con el ejecutable wget.exe

3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos

Grillas VMF (Vienna Mapping Function). Año 2022

1. https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/IxI/VMF3/VMF3_OP/
2. https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/IxI/VMF3/VMF3_OP/2022/
3. https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/IxI/VMF3/VMF3_OP/2022/VMF3_20220101.H00

Productos parámetros de rotación de la Tierra. DOY 331 año 2022 (GPS Week 2238) (Nombre Largo multi constelación)

1. <https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/>
2. https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/COD0MGXFIN_20223310000_01D_12H_ERP.ERP.gz

Efemérides precisas IGS: GPS. DOY 331 año 2022 (GPS Week 2238) (Nombre Largo multi constelación)

1. <https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/>
2. https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/2238/COD0MGXFIN_20223310000_01D_05M_ORB.SP3.gz

Archivo BIAS. DOY 339 año 2022 (GPS Week 2239) (Nombre Largo)

1. <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>
2. <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2022/>
3. http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2022/COD0OPSFIN_20223390000_01D_01D_OSB.BIA.gz

Mareas oceánicas

1. <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>

El archivo BIAS corresponde a un archivo que posee los sesgos asociados a GNSS (sesgos de estación, satélite, ambos o de sistema), se debe definir el intervalo de tiempo de los sesgos. (AIUB and Schaer, 2018)

COD0OPSFIN_20173360000_01D_05M_ORB.SP3 denotes a Final Operational orbit file in SP3 format of the CODE analysis center covering one day (day of year 336/2017) with 5 min sampling and uncompressed.

SHA0MGXRAP_20182700000_01D_05M_CLK.CLK.gz denotes a Rapid MGEX clock file in clock RINEX format from the Shanghai Observatory analysis center covering one day (270/2018) with 5 min sampling and gzip compressed.

EUR0OPSFIN_20190480000_07D_01H_TRO.SUM denotes a Final EUREF TZD summary file from a weekly combination process. The corresponding TZD values would be in the file; **EUR0OPSFIN_20190480000_07D_01H_TRO.TRO**

IGS00PSSNX_1994002_2019159_00U_S0L.SNX denotes the GPS week 2056 release of the operational IGS cumulative SINEX solution (old filename: IGS19P23.snx). The same cumulative SINEX solution, but without covariance matrix (old filename: IGS19P23.ssc), would be called **IGS00PSSNX_1994002_2019159_00U_CRD.SNX**.

GFZ10PSRAP_20220300900_05M_05M_POTS00DEU_TRO.TRO denotes a Rapid Operational TZD file processed by the GFZ analysis center and for the IGS station POTS00DEU (Potsdam, Germany). The solution identifier is set to "1", meaning that one resubmission occurred.

IGS00PSULT.SP3 denotes the latest release of an IGS operational Ultra-Rapid file (old filename: igu.sp3). It is a shortened version of the long product filename standard for user convenience.

Fuente: (IGS, 2022), GUIDELINES FOR LONG PRODUCT FILENAMES IN THE IGS

(AIUB and Schaer, 2018), SINEX BIAS—Solution (Software/technique) Independent EXchange Format for GNSS Biases Version 1.00

3. Tema: Posicionamiento GNSS



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

3.7. Observación y procesamiento

3.7.2. Datos y Metadatos

Archivo SINEX: es un archivo ASCII con líneas de 80 caracteres o menos. Consiste en una serie de bloques que están mutuamente referenciados (relacionados) a través de códigos/nombres de estación, épocas y/o contadores de índice. (IERS, 2006)

El SINEX se estructura de la siguiente manera:

- FILE/REFERENCE
- FILE/COMMENT
- INPUT/HISTORY
- INPUT/FILES
- INPUT/ACKNOWLEDGEMENTS
- NUTATION/DATA
- PRECESSION/DATA
- SOURCE/ID
- SITE/ID
- SITE/DATA
- SITE/RECEIVER
- SITE/ANTENNA
- SITE/GPS_PHASE_CENTER
- SITE/ECCENTRICITY
- SATELLITE/ID
- SATELLITE/PHASE_CENTER
- BIAS/EPOCHS
- SOLUTION/EPOCHS
- SOLUTION/STATISTICS
- SOLUTION/ESTIMATE
- SOLUTION/APRIORI
- SOLUTION/MATRIX_ESTIMATE {p} {type}
- SOLUTION/MATRIX_APRIORI {p} {type}
- SOLUTION/NORMAL_EQUATION_VECTOR
- SOLUTION/NORMAL_EQUATION_MATRIX {p}
- SOLUTION/MATRIX_ESTIMATE L COVA
- SOLUTION/MATRIX_APRIORI L COVA

```

%=SNX 2.01 XYZ 23:128:13293 IGS 23:099:00000 23:105:86370 P 00597 2 S
*-----*
+FILE/REFERENCE
*INFO_TYPE INFO
DESCRIPTION CENTRO DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS GEODÉSICO USC
OUTPUT Loosely constrained weekly solution for some SIRGAS stations
CONTACT Jose Antonio Tarrío Mosquera - jose.tarrío@sach.cl
SOFTWARE Bernese GNSS Software Version 5.2
HARDWARE Windows PC
INPUT SIRGAS, IGS/IGL GNSS tracking data
-FILE/REFERENCE
*-----*
+INPUT/ACKNOWLEDGMENTS
*AGY DESCRIPTION
CENTRO DE PROCESAMIENTO UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
SIRGAS operational and data centres
IGS International GNSS Service
-INPUT/ACKNOWLEDGMENTS
*-----*
+SOLUTION/STATISTICS
* STATISTICAL PARAMETER VALUE (S)
NUMBER OF OBSERVATIONS 46652704
NUMBER OF UNKNOWNNS 216318
NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM 46436386
PHASE MEASUREMENTS SIGMA 0.00200
SAMPLING INTERVAL (SECONDS) 30
VARIANCE FACTOR 0.577880999782863
-SOLUTION/STATISTICS
*-----*
+SITE/ID
*CODE PT DOMES T STATION DESCRIPTION APPROX LON APPROX LAT APP H
AB21 A 49381M001 P ab2100usa_20211230.log 183 20 14.5 51 51 50.9 59.4
AB43 A 49298M001 P ab4300usa_20230213.log 223 21 33.1 58 11 55.8 27.2
    
```

```

-SITE/ID
*-----*
+SITE/RECEIVER
*SITE PT SOLN T DATA START DATA END DESCRIPTION S/N FIRMWARE
AB21 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 TRIMBLE NETR9 -----
AB43 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 SEPT POLARX5 -----
    
```

```

-SITE/RECEIVER
*-----*
+SITE/ANTENNA
*SITE PT SOLN T DATA START DATA END DESCRIPTION S/N
AB21 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 TRM59800.80 SCIT -----
AB43 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 TRM59800.80 SCIT -----
    
```

```

-SITE/ANTENNA
*-----*
+SITE/GPS_PHASE_CENTER
*DESCRIPTION S/N L1->ARP (M) L2->ARP (M)
AOAD/M T NONE ----- 0.0918 0.0007 -.0005 0.1203 -.0003 -.0007 IGS20_2247
ASH700936D_M NONE ----- 0.0910 0.0004 -.0003 0.1204 -.0001 -.0001 IGS20_2247
    
```

```

-SITE/GPS_PHASE_CENTER
*-----*
+SITE/ECCENTRICITY
*SITE PT SOLN T DATA START DATA END AXE ARP->BENCHMARK (M)
AB21 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 UNE 0.0083 0.0000 0.0000
AB43 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 UNE 0.0083 0.0000 0.0000
    
```

```

-SITE/ECCENTRICITY
*-----*
+SOLUTION/EPOCHS
*CODE PT SOLN T DATA START DATA END MEAN EPOCH
AB21 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 23:102:43185
AB43 A 1 P 23:099:00000 23:105:86370 23:102:43185
    
```

```

-SOLUTION/EPOCHS
*-----*
+SOLUTION/ESTIMATE
*INDEX TYPE CODE PT SOLN REF EPOCH UNIT S ESTIMATED VALUE STD_DEV
1 STAX AB21 A 1 23:102:43200 m 2 -.394020381744013E+07 .270498E-03
2 STAY AB21 A 1 23:102:43200 m 2 -.229767902708528E+06 .235143E-03
3 STAZ AB21 A 1 23:102:43200 m 2 0.499352980041710E+07 .298305E-03
    
```

```

-SOLUTION/ESTIMATE
*-----*
+SOLUTION/APRIORI
*INDEX TYPE CODE PT SOLN REF EPOCH UNIT S APRIORI VALUE STD_DEV
1 STAX AB21 A 1 23:102:43200 m 2 -.394020381394000E+07 .999014E+00
2 STAY AB21 A 1 23:102:43200 m 2 -.229767903640000E+06 .995875E+00
3 STAZ AB21 A 1 23:102:43200 m 2 0.499352980494000E+07 .999399E+00
    
```

```

-SOLUTION/APRIORI
*-----*
+SOLUTION/MATRIX_ESTIMATE L COVA
*PARA1 PARA2 PARA2+0 PARA2+1 PARA2+2
1 1 0.73168919799911E-07
2 1 -0.47402384814676E-08 0.55292378736059E-07
3 1 -0.29144555045926E-07 -0.51690530911778E-08 0.88985764013548E-07
4 1 0.46502291623961E-07 -0.35084879899199E-08 -0.27490509240828E-08
    
```

```

-SOLUTION/MATRIX_ESTIMATE L COVA
*-----*
+SOLUTION/MATRIX_APRIORI L COVA
*PARA1 PARA2 PARA2+0 PARA2+1 PARA2+2
1 1 0.57674209252241E+00
2 1 0.21177552678561E-03 0.57312278266417E+00
3 1 -0.88297306613923E-03 -0.5148943561583E-04 0.57718659016879E+00
4 4 0.57394757066145E+00
    
```

(IERS, 2006), SINEX - Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format Version 2.02.

3.7. Observación y procesamiento

3.7.3. Análisis de precisión: Dependiendo del software utilizado y del tipo de red que se desea procesar en análisis de las precisiones obtenidas se realiza de diferente forma.

3.7.3.1. Software Comercial: El software comercial es utilizado para procesar redes pequeñas las cuales poseen vectores (Líneas bases) con longitud menor a 200km. Una vez procesadas las líneas base utilizando los archivos necesarios para realizar un adecuado procesamiento (utilización de efemérides precisas, parámetros de orientación según corresponda, archivos de antena, etc.) el software entrega un informe con las líneas base procesadas, el cual contiene información de las precisión horizontal y vertical, RMS, satélites utilizados y parámetros configurados para el procesado.

RCSD_2019 - MNZA (11:00:56-14:10:34) (S15)

Observación de línea base:	RCSD_2019 --- MNZA (B15)
Procesados:	04-10-2021 11:16:01
Tipo de solución:	Fija
Frecuencia utilizada:	Frecuencia doble
Precisión horizontal:	0.005 m
Precisión vertical:	0.022 m
RMS:	0.020 m
PDOP máximo:	2.601
Efemérides utilizadas:	Preciso/a
Modelo de antena:	IGS Absolute
Hora de inicio de procesamiento:	09-08-2021 11:00:56 (Local: UTC-4hr)
Hora de detención de procesamiento:	09-08-2021 14:10:34 (Local: UTC-4hr)
Duración del procesamiento:	03:09:38
Intervalo de procesamiento:	1 segundo
Modo de procesamiento	Modo carril ancho

3. Tema: Posicionamiento GNSS



3.7. Observación y procesamiento

3.7.3. Análisis de precisión: Dependiendo del software utilizado y del tipo de red que se desea procesar en análisis de las precisiones obtenidas se realiza de diferente forma.

3.7.3.2. Software Científico: El software científico es utilizado para procesar redes continentales y mundiales, las líneas base procesadas superan los 200 km. Al realizar el procesamiento de datos se deben utilizar adicionalmente a los metadatos antes mencionados, otros metadatos tales como los archivos ionosféricos, troposféricos y de mareas. Para el caso del software BERNESE, el script GPEST es utilizado en la resolución de ambigüedades, este script entrega archivos binarios los cuales son utilizados en el script RESRMS que entrega como resultado un archivo de extensión .OUT con los estadísticos de los residuales. Se generarán tantos archivos como cluster.

```
Number of parameters:
-----
Parameter type      Adjusted  Explicitly  Implicitly  (elim)*  Deleted  Ref.  Singular  No obs.
-----
Station coordinates / velocities      42         42         0           0         0         0         0         0
Ambiguities                          1804        1804         0           0         0         0         1         0
Site-specific troposphere parameters   238         238         0           0         0         0         0         0
-----
Total number                          2084        2084         0           0         0         0         1         0

*Abbreviation pre-elimination (elim): before stacking (bfst), after stacking (afst), epoch-wise (epow), after inversion (afin)

Statistics:
-----
Total number of authentic observations      352692
Total number of pseudo-observations        52

Total number of explicit parameters        2084
Total number of implicit parameters        0

Total number of observations                352744
Total number of adjusted parameters        2084
Degree of freedom (DOF)                   350660

A posteriori RMS of unit weight             0.000908 m
Chi**2/DOF                                 0.82

Total number of observation files          10
Total number of unobserved ambiguities    141
Total number of stations                   14

Station coordinates and velocities:
-----
Sol Station name  Typ Correction  Estimated value  RMS error  A priori value Unit  From  To  MJD  Num Abb
-----
1 ANTF 41780M001  X  0.01829  1958241.49610  0.01438  1958241.47781  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 1 #CRD
1 ANTF 41780M001  Y -0.16901 -5505483.68701  0.01966  -5505483.51800  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 2 #CRD
1 ANTF 41780M001  Z  0.26473  -2548075.99404  0.01477  -2548076.25877  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 3 #CRD
1 IACR 41721M001  X  0.02814  2036608.50792  0.01450  2036608.47978  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 4 #CRD
1 IACR 41721M001  Y -0.18412  -5698319.86524  0.01986  -5698319.68112  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 5 #CRD
1 IACR 41721M001  Z  0.26144  -2008830.56744  0.01478  -2008830.82888  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 6 #CRD
1 JBAL 41537M001  X  0.02147  2335115.65857  0.01420  2335115.63710  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 7 #CRD
1 JBAL 41537M001  Y -0.15512  -5153171.66646  0.01970  -5153171.51134  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 8 #CRD
1 JBAL 41537M001  Z  0.27559  -2935952.74621  0.01479  -2935953.02180  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 9 #CRD
1 CEFT 41682M001  X  0.01324  4983062.71139  0.01263  4983062.69815  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 10 #CRD
1 CEFT 41682M001  Y  0.06602  -3959862.90326  0.00859  -3959862.96928  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 11 #CRD
1 CEFT 41682M001  Z -0.03616  -410039.33691  0.00744  -410039.30075  meters  2022-11-27 00:00:00 2022-11-27 23:59:30 59910.49983 12 #CRD
```

```
LIST OF RESIDUAL FILES
-----
File  Input file
-----
1    ..8_GR\OUT\EDL_20223310_010.RES
-----

PROGRAM INPUT OPTIONS:
-----
Outlier detection level (phase)           : 0.004 meter
Outlier detection level (code)           : 0.004 meter
Outlier detection level (range)          : disabled

Sampling interval of residuals             : 30 second

Minimum time interval for small pieces    : 361 second

Minimum number of observations per ambiguity : disabled
Sampling interval for counting observations : disabled

Size of the histogram                     : -50 ... 50
Bin width for the histogram                : 1.0 millimeters

Station observation sigma factor computation : disabled

FILE INFORMATION AND STATISTIC:
-----
Num  Station 1  Station 2  Total RMS  med.Resi  Sigma  numObs  nSat  nDel  ObsTyp  Session  fileIdx  File name
-----
1    ANTF 41780M001  IACR 41721M001  0.6  0.3  0.0  26007  31  0  PHASE  3310  0  1  1  EDL_20223310_010
2    ANTF 41780M001  JBAL 41537M001  0.7  0.3  0.0  41021  50  1  PHASE  3310  0  2  1  EDL_20223310_010
3    CEFT 41682M001  CRAT 41619M001  1.9  0.5  1.0  34358  50  187  PHASE  3310  0  3  1  EDL_20223310_010
4    CEFT 41682M001  CPVG 39601M001  0.9  0.3  0.0  35939  50  9  PHASE  3310  0  4  1  EDL_20223310_010
5    CEFT 41682M001  MABB 48089M001  1.1  0.3  1.0  42711  50  20  PHASE  3310  0  5  1  EDL_20223310_010
6    CEFT 41682M001  PITN 41691M001  1.0  0.3  0.0  41856  50  5  PHASE  3310  0  6  1  EDL_20223310_010
7    CHEC 42030M001  QUII 42003S003  0.7  0.2  0.0  44984  50  1  PHASE  3310  0  7  1  EDL_20223310_010
8    CHET 40526M001  NYCO 40607M002  1.4  0.6  1.0  38738  50  19  PHASE  3310  0  8  1  EDL_20223310_010
9    CHET 40526M001  OAX2 40517M001  1.0  0.5  1.0  37964  50  3  PHASE  3310  0  9  1  EDL_20223310_010
10   CHET 40526M001  ICAM 40514M002  1.0  0.5  1.0  39395  50  3  PHASE  3310  0  10 1  EDL_20223310_010
-----
```

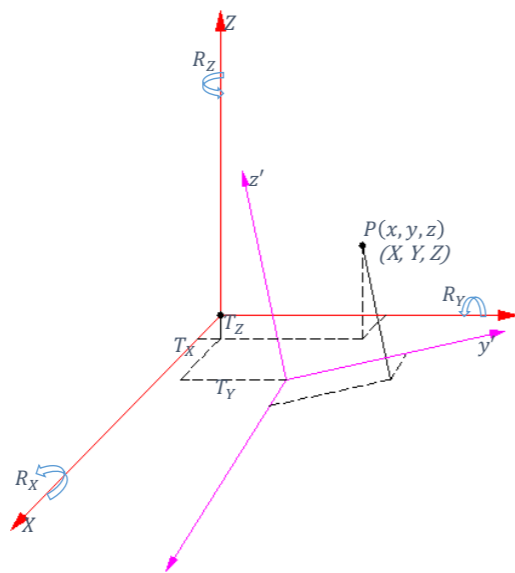
3.8. Ajuste GNSS

La combinación entre redes geodésicas 3D y 2D estudiada a fondo por muchos investigadores y técnicos. El objetivo principal de la combinación es alinear la red combinada con un marco de referencia unificado (a un TRF moderno deseado) (Ampatzidis and Tzanou, 2022).

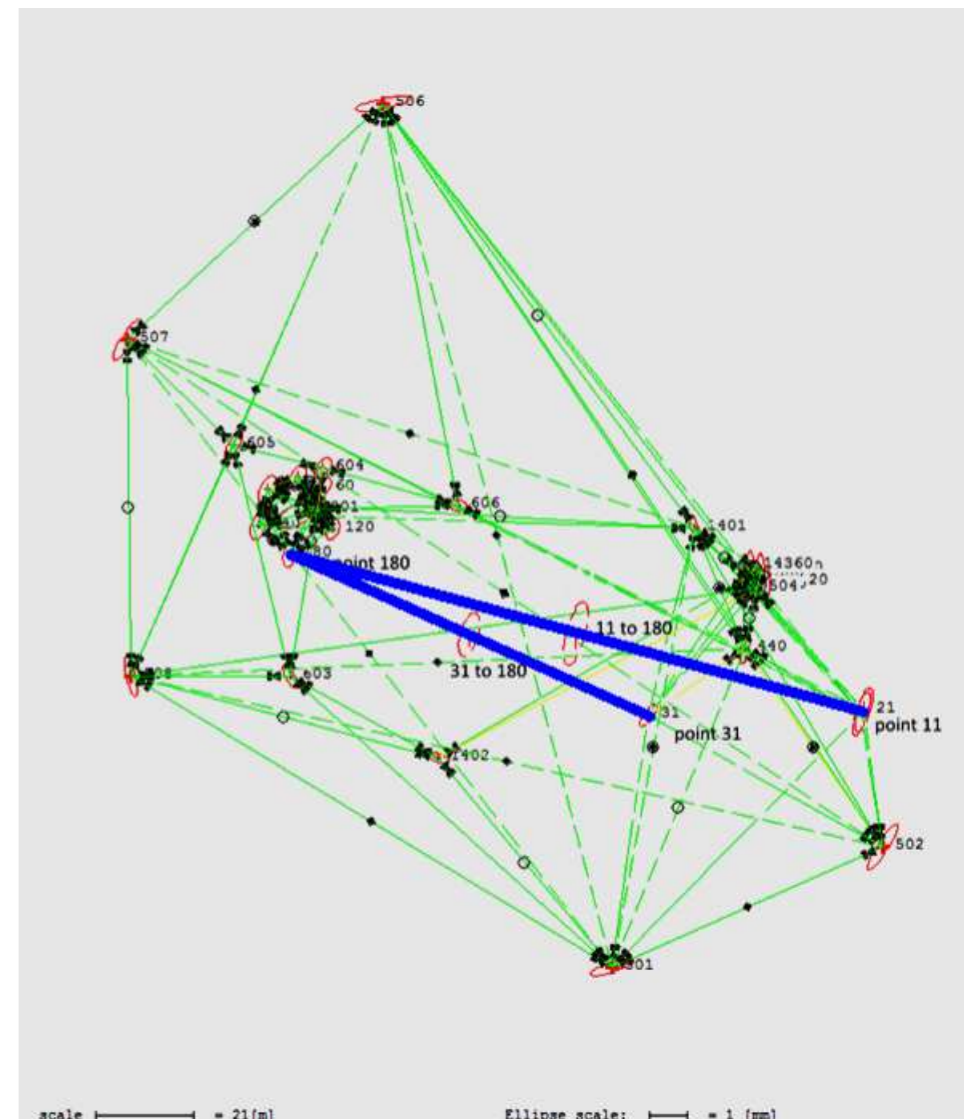
Dos son las metodologías más utilizadas:

3.8.1. Ajuste de líneas base por Mínimos cuadrados: Las observaciones GNSS se introducen como líneas base 3D (dX, dY, dZ).

3.8.2. Transformación Helmert: A través de puntos comunes, un conjunto de estaciones se transforma al marco de referencia del otro.



Fuente: Centro USC



Fuente: (Niemeier and Tengen, 2017), Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and MC

(Ampatzidis and Tzanou, 2022), Strategies for the optimal combination between local 3D modern GNSS and 2D classical networks, expressed in different reference frames: Case study in Greece

3.8. Ajuste GNSS

3.8.1. Ajuste de líneas base por MMCC (Mínimos cuadrados): Para el ajuste se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij} \quad \text{ec. (161)}$$

$$\Delta \widehat{X}_{ij} = \widehat{X}_j - \widehat{X}_i \quad \text{ec. (162)}$$

$$\Delta \widehat{X}_{ij} = \Delta X_{ij} - v_{ij} \Rightarrow v_{ij} = X_j - X_i - \Delta X_{ij} \quad \text{ec. (163)}$$

$$[v_{ij}] = [-1 \quad 1] \begin{bmatrix} X_i \\ X_j \end{bmatrix} - [\Delta X_{ij}] \quad \text{conociendo que } (V = Jx - L) \quad \text{ec. (164)}$$

$$\Delta \widehat{X}_{ij} = \widehat{X}_j - \widehat{X}_i \quad \text{ec. (165)}$$

$$\Delta \widehat{X}_{ij} = \Delta X_{ij}^0 + \left(\frac{\partial \Delta X}{\partial X_i} \right) d\Delta X_i + \left(\frac{\partial \Delta X}{\partial X_j} \right) d\Delta X_j \quad \text{ec. (166)}$$

$$\begin{aligned} \Delta \widehat{X}_{ij} &= \Delta X_{ij}^0 - d\Delta X_i + d\Delta X_j \Rightarrow v\Delta X_{ij} \\ &= -d\Delta X_i + d\Delta X_j - \left[-\frac{(\Delta X_{ji}^0 - \Delta X_{ij})}{f_{ji}} \right] \quad \text{ec. (167)} \\ \Delta \widehat{X}_{ij} &= x_{ij} - v_{ij} \quad \text{ec. (168)} \end{aligned}$$

$$\Delta \widehat{Y}_{ij} = \widehat{Y}_j - \widehat{Y}_i \quad \text{ec. (169)}$$

$$\Delta \widehat{Y}_{ij} = \Delta Y_{ij}^0 + \left(\frac{\partial \Delta Y}{\partial Y_i} \right) d\Delta Y_i + \left(\frac{\partial \Delta Y}{\partial Y_j} \right) d\Delta Y_j \quad \text{ec. (170)}$$

$$\begin{aligned} \Delta \widehat{Y}_{ij} &= \Delta Y_{ij}^0 - d\Delta Y_i + d\Delta Y_j \Rightarrow v\Delta Y_{ij} \\ &= -d\Delta Y_i + d\Delta Y_j - \left[-\frac{(\Delta Y_{ji}^0 - \Delta Y_{ij})}{f_{ji}} \right] \quad \text{ec. (171)} \\ \Delta \widehat{Y}_{ij} &= y_{ij} - v_{ij} \quad \text{ec. (172)} \end{aligned}$$

$$\Delta \widehat{Z}_{ij} = \widehat{Z}_j - \widehat{Z}_i \quad \text{ec. (173)}$$

$$\Delta \widehat{Z}_{ij} = \Delta Z_{ij}^0 + \left(\frac{\partial \Delta Z}{\partial Z_i} \right) d\Delta Z_i + \left(\frac{\partial \Delta Z}{\partial Z_j} \right) d\Delta Z_j \quad \text{ec. (174)}$$

$$\begin{aligned} \Delta \widehat{Z}_{ij} &= \Delta Z_{ij}^0 - d\Delta Z_i + d\Delta Z_j \Rightarrow v\Delta Z_{ij} \\ &= -d\Delta Z_i + d\Delta Z_j - \left[-\frac{(\Delta Z_{ji}^0 - \Delta Z_{ij})}{f_{ji}} \right] \quad \text{ec. (175)} \\ \Delta \widehat{Z}_{ij} &= z_{ij} - v_{ij} \quad \text{ec. (176)} \end{aligned}$$

(Ampatzidis and Tzanou, 2022), Strategies for the optimal combination between local 3D modern GNSS and 2D classical networks, expressed in different reference frames: Case study in Greece

3.8. Ajuste GNSS

3.8.1. Ajuste común (MMCC)

Planteamiento de matrices para el ajuste

$$\begin{bmatrix} v\Delta X_{ij} \\ v\Delta Y_{ij} \\ v\Delta Z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\Delta X_i \\ d\Delta X_j \\ d\Delta Y_i \\ d\Delta Y_j \\ d\Delta Z_i \\ d\Delta Z_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_{ij}^0 - \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij}^0 - \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij}^0 - \Delta Z_{ij} \end{bmatrix}$$

con $(V = Jx - L)$

$$X_i = \Delta X_i^0 - d\Delta X_i \quad \text{ec. (177)}$$

$$X_j = \Delta X_j^0 - d\Delta X_j$$

$$Y_i = \Delta Y_i^0 - d\Delta Y_i$$

$$Y_j = \Delta Y_j^0 - d\Delta Y_j$$

$$Z_i = \Delta Z_i^0 - d\Delta Z_i$$

$$Z_j = \Delta Z_j^0 - d\Delta Z_j$$

$$P = \text{diag}[Q^{-1}] \quad \text{ec. (178)}$$

$$N = J^T * P * J \quad \text{ec. (179)}$$

$$T = J^T * P * L \quad \text{ec. (180)}$$

$$dX = (J^T * P * J)^{-1} * (J^T * P * L) \quad \text{ec. (181)}$$

$$V = J * dX - L \quad \text{ec. (182)}$$

$$X_{ja} = X_j + \Delta X_a \quad \text{ec. (183)}$$

$$Y_{ja} = Y_j + \Delta Y_a \quad \text{ec. (184)}$$

$$Z_{ja} = Z_j + \Delta Z_a \quad \text{ec. (185)}$$

$$r = 3 * \text{lineas base} - 3 * \text{puntos a calcular} \quad \text{ec. (186)}$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T * P * V}{r}} \quad \text{ec. (187)}$$

Al comenzar a realizar el ajuste, se establece una varianza de referencia a priori de 1 ($\sigma_0^2=1$). La varianza de referencia debe ser calculada posterior al ajuste y es inversamente proporcional a los pesos, es decir a mayor varianza, menor peso (varianza de referencia a posteriori) (ec. 186), el resultado de su cálculo puede indicar lo siguiente:

- si es distinto de 1, puede indicar que los pesos están mal establecidos, es decir σ_0^2 :

>1 → >P → < σ_i^2 se han dado ponderaciones por defecto, es decir las observaciones son peores de lo indicado habiendo indicado mediante la matriz pesos lo contrario, debiendo revisar la matriz varianzas covarianzas a priori.

<1 → <P → > σ_i^2 se han dado ponderaciones por exceso, es decir se las observaciones son mejores de lo indicado.

3. Tema: Posicionamiento GNSS



3.8. Ajuste GNSS

3.8.2. Transformación Helmert: Asociada comúnmente a la transformación Helmert 7 parámetros, en algunos softwares científicos se entrega la posibilidad de realizar transformaciones Helmert de 10 parámetros donde a los 7 antes mencionados se le agregan 3 correspondientes a un geocentro.

Como ejemplo se tiene el caso del procesamiento en software científico en el cual se calcula una transformación Helmert 3D para obtener una comparativa entre las coordenadas del archivo CRD de entrada y las coordenadas calculadas a través de la combinación.

```

=====
Bernese GNSS Software, Version 5.2
-----
Program       : HELMR1
Purpose       : Helmert Transformation
-----
Campaign      : ${P}/Transfor
Default session: 2630 year 2021
Date         : 27-Nov-2021 20:10:15
User name    : kata_
=====

Helmert transformation
-----

FILE 1: SIR17P01B2.CRD: SIRGASCON station coordinates
FILE 2: SIR00B.CRD: SIRGAS2000 station coordinates

TRANSFORMATION IN EQUATORIAL SYSTEM (X, Y, Z):
RESIDUALS IN LOCAL SYSTEM (NORTH, EAST, UP)

-----
| NUM | NAME | FLG | RESIDUALS IN MILLIMETERS | |
-----
| 25 | AUTF 41515S001 | G I | -3.00 43.03 -1.52 | |
| 51 | BOMJ 41612M001 | G I | 3.25 -0.36 18.52 | |
| 57 | BRAZ 41606M001 | G I | -2.10 1.26 4.84 | |
| 59 | BRMU 42501S004 | G I | 15.52 -9.80 21.81 | |
| 99 | CORD 41511M001 | G I | -15.45 -52.15 -20.56 | |
| 102 | CRAT | G I | -3.75 44.07 15.01 | |
| 114 | CUIB 41603M001 | G I | 14.98 -6.54 11.51 | |
| 156 | HER2 40522M001 | G I | -20.53 -13.66 14.56 | |
| 178 | IMPZ 41615M001 | G I | 7.06 15.68 -4.80 | |
| 195 | KOUR 97301M210 | G I | 35.70 37.78 31.82 | |
| 205 | LPGS 41510M001 | G I | -8.06 -55.99 3.12 | |
| 229 | MERI 40520M001 | G I | -5.82 7.32 -33.62 | |
| 256 | MTY2 40518M001 | G I | -24.44 -4.00 -14.30 | |
| 295 | PARC 41716S001 | G I | 8.22 -25.34 -29.77 | |
| 316 | POAL 41616M001 | G I | -17.09 -18.04 5.40 | |

```

```

| 316 | POAL 41616M001 | G I | -17.09 -18.04 5.40 | |
| 346 | RECF 41617M001 | G I | -1.36 22.46 -13.58 | |
| 355 | RIOD 41608M001 | G I | -10.42 -3.48 16.12 | |
| 373 | RWSN 41513M001 | G I | 31.76 -42.57 9.45 | |
| 430 | TAMP 40516M001 | G I | -26.90 1.44 5.53 | |
| 445 | TUCU 41520S001 | G I | -1.47 22.58 -46.29 | |
| 464 | UNSA 41514M001 | G I | 18.66 26.55 11.34 | |
| 470 | USNO 40451S003 | G I | -10.14 -24.92 25.15 | |
| 494 | VICO 41613M001 | G I | -16.97 -5.57 21.17 | |
| 496 | VIL2 | G I | 5.77 13.65 -51.13 | |
-----
| | RMS / COMPONENT | | 16.37 27.24 22.52 | |
| | MEAN | | -1.11 -1.11 -0.01 | |
| | MIN | | -26.90 -55.99 -51.13 | |
| | MAX | | 35.70 44.07 31.82 | |
-----

NUMBER OF PARAMETERS : 7
NUMBER OF COORDINATES : 72
RMS OF TRANSFORMATION : 23.17 MM

PARAMETERS:

TRANSLATION IN X : -17.23 +- 13.61 MM
TRANSLATION IN Y : -54.07 +- 9.63 MM
TRANSLATION IN Z : -47.08 +- 11.13 MM
ROTATION AROUND X-AXIS: 0 0 0.002982 +- 0.000385 "
ROTATION AROUND Y-AXIS: 0 0 0.007541 +- 0.000297 "
ROTATION AROUND Z-AXIS: 0 0 0.001194 +- 0.000523 "
SCALE FACTOR : -0.00962 +- 0.00136 MM/KM

NUMBER OF ITERATIONS : 2

-----
>>> CPU/Real time for pgm "HELMR1": 0:00:00.000 / 0:00:00.014
>>> Program finished successfully

```

3.8. Ajuste GNSS

3.8.2. Puntos a tener en cuenta en el ajuste:

1. Ajuste de líneas base por mínimos cuadrados:

a. Uso de líneas base 3D:

- ¿Qué tal, tener un archivo SINEX en lugar de líneas de base?
- ¿Cómo se calculan las líneas base?
- ¿Qué pasa con la información completa de su covarianza?
- ¿Qué pasa con su dependencia del marco de referencia (restricciones)?

b. Uso de ángulos cenitales:

- ¿Se corrigen para que sean consistentes con la información 3D con respecto a un sistema geodésico (Desviaciones de la Vertical-DoV)?

c. Normalmente, el método de ajuste de líneas base se lleva a cabo en una red bien diseñada con buena geometría.

- ¿Qué hay de analizar redes independientes (diseñadas para diferentes propósitos)?

2. Ajuste de líneas base por mínimos cuadrados:

a. Geometría pobre:

- ¿Qué ocurre con los puntos comunes existentes que no encierran el área?

b. Fuertes correlaciones entre parámetros, especialmente para un área pequeña. Baja calidad de los parámetros.

c. Cuando se usa información 2D, la componente de altura inevitablemente desaparece perdiendo la información vertical.

(Ampatzidis and Tzanou, 2022), Strategies for the optimal combination between local 3D modern GNSS and 2D classical networks, expressed in different reference frames: Case study in Greece

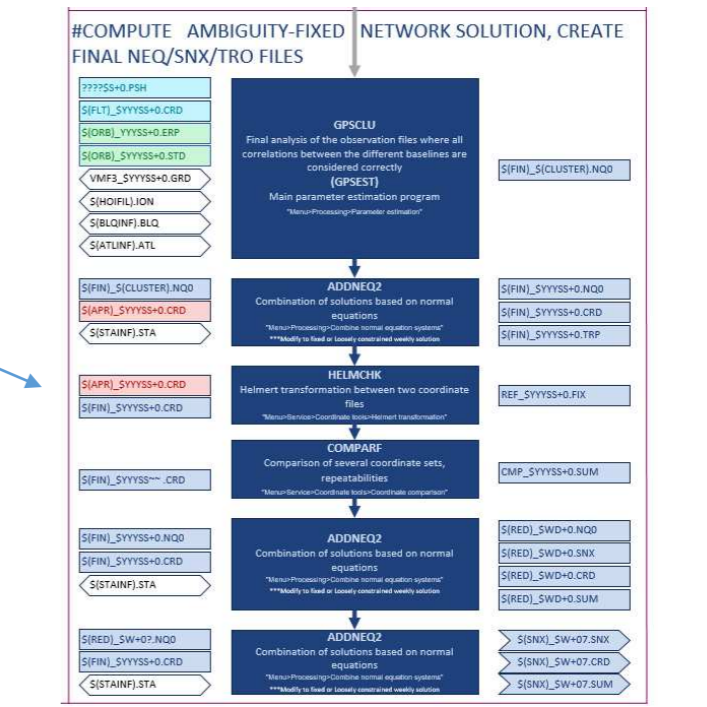
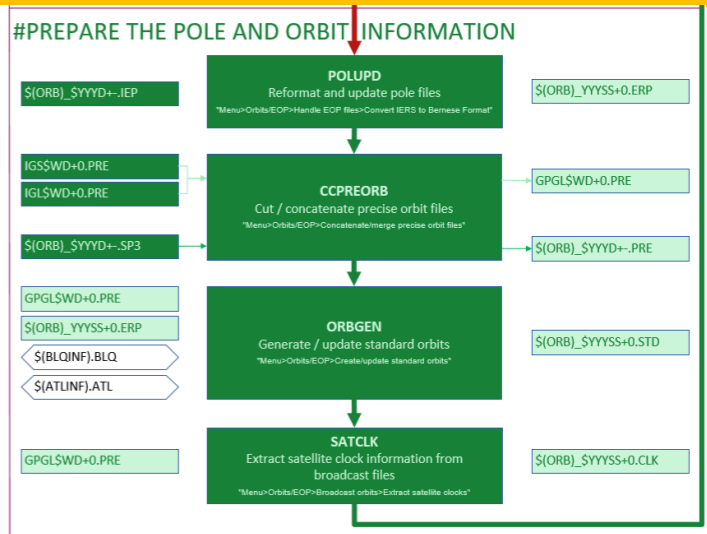
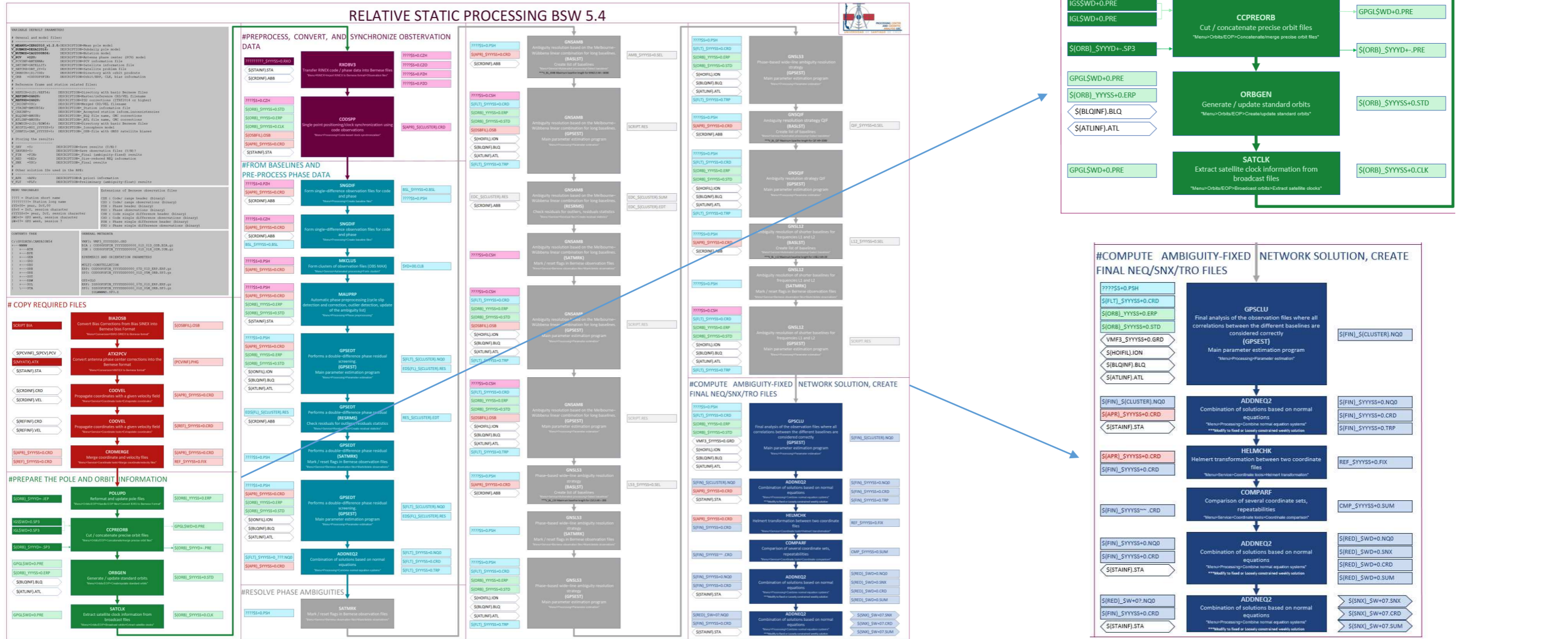
3. Tema: Posicionamiento GNSS



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

3.8. Ajuste GNSS

3.8.3. Flujo Bernese:



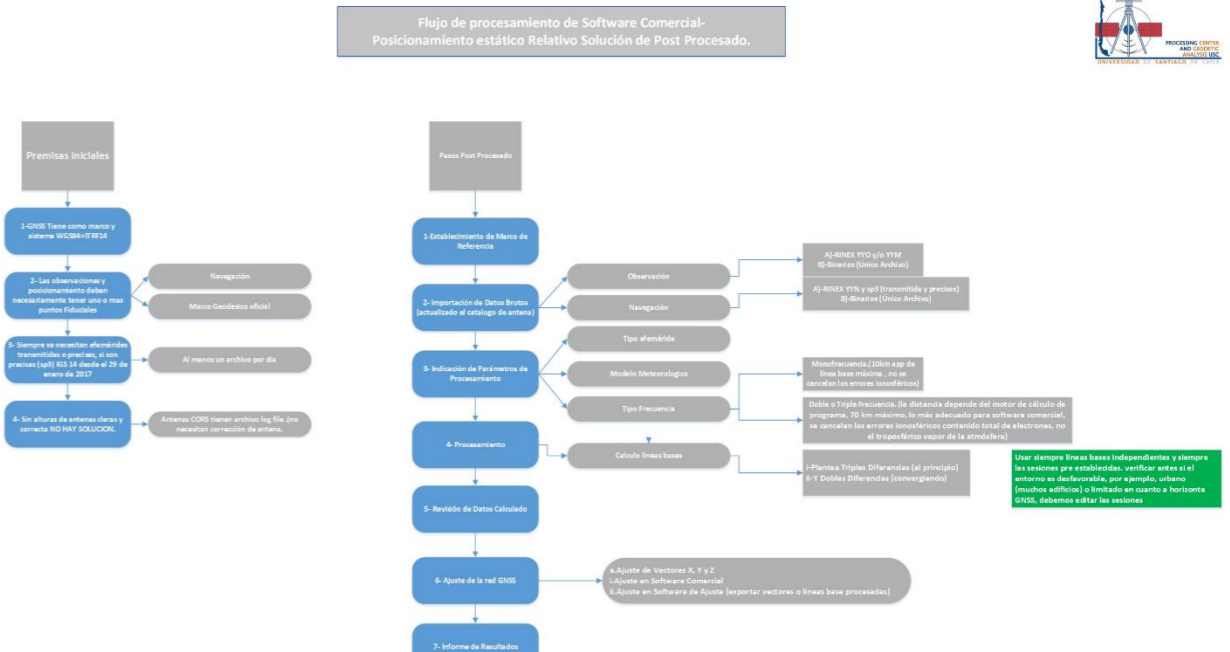
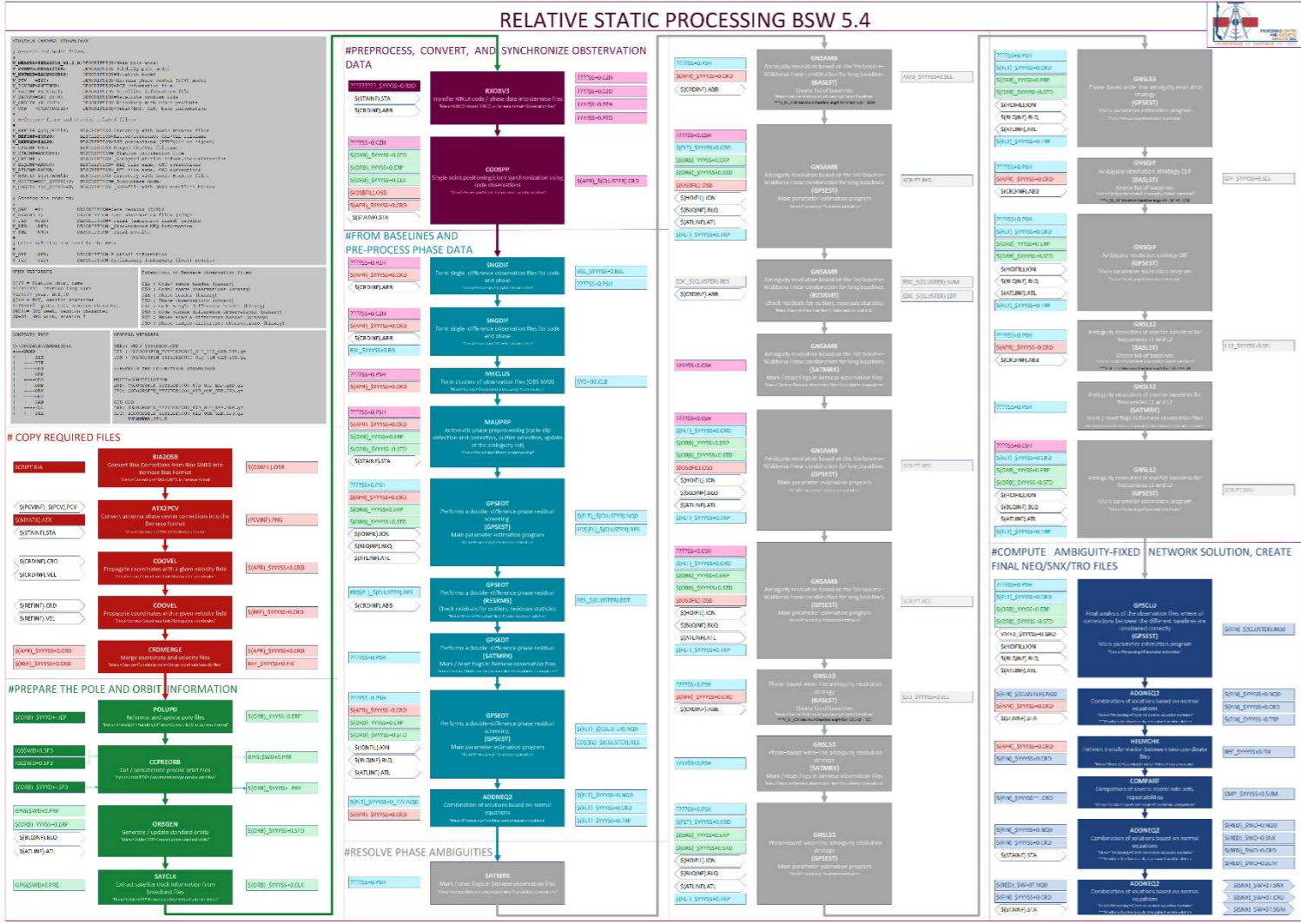
3. Tema: Posicionamiento GNSS



UNIVERSIDAD DE CHILE

3.8. Ajuste GNSS

3.8.3. Flujo Bernese vs Flujo software comercial:



3.8. Ajuste GNSS

3.8.3. Análisis de precisión: En un ajuste común por mínimos cuadrados, se puede analizar la precisión mediante la varianza de referencia, esta varianza es un indicador que permite dilucidar si el ajuste fue realizado correctamente (factor de referencia menor o igual a 1). Otro factor de análisis son los residuos obtenidos del ajuste, estos permiten observar si existen residuos con un valor mayor (outliers) al de la mayoría de los residuos.

Con respecto a la transformación Helmert 3D, se puede analizar la precisión mediante los parámetros calculados, obteniendo los residuos por punto lo que entrega una noción de si el punto corresponde a un outliers o no.

Estadísticas del ajuste

Número de iteraciones para un ajuste exitoso:	2
Factor de referencia de red:	1.34
Prueba de chi al cuadrado (95%):	Pasado
Nivel de confianza de la precisión:	1-sigma
Grados de libertad:	224
Estadísticas de vectores con posprocesamiento	
Factor de referencia:	1.34
Número de redundancias:	224.00
Escalar a priori:	1.26

```

NUMBER OF PARAMETERS :      7
NUMBER OF COORDINATES :     72
RMS OF TRANSFORMATION :    23.17 MM

PARAMETERS:

TRANSLATION IN X      :      -17.23    +- 13.61    MM
TRANSLATION IN Y      :      -54.07    +-  9.63    MM
TRANSLATION IN Z      :      -47.08    +- 11.13    MM
ROTATION AROUND X-AXIS:    0 0 0.002982 +- 0.000385 "
ROTATION AROUND Y-AXIS:    0 0 0.007541 +- 0.000297 "
ROTATION AROUND Z-AXIS:    0 0 0.001194 +- 0.000523 "
SCALE FACTOR          :      -0.00962 +- 0.00136 MM/KM

NUMBER OF ITERATIONS :      2
    
```

355	RIOD 41608M001	G I	-10.42	-3.48	16.12	
373	RWSN 41513M001	G I	31.76	-42.57	9.45	
430	TAMP 40516M001	G I	-26.90	1.44	5.53	
445	TUCU 41520S001	G I	-1.47	22.58	-46.29	
464	UNSA 41514M001	G I	18.66	26.55	11.34	
470	USNO 40451S003	G I	-10.14	-24.92	25.15	
494	VICO 41613M001	G I	-16.97	-5.57	21.17	
496	VIL2	G I	5.77	13.65	-51.13	

	RMS / COMPONENT		16.37	27.24	22.52	
	MEAN		-1.11	-1.11	-0.01	
	MIN		-26.90	-55.99	-51.13	
	MAX		35.70	44.07	31.82	

3.8. Ajuste GNSS

Combinación en Bernese: El resultado de un ajuste por mínimos cuadrados (utilizando todas las observaciones en un solo paso) es el mismo que si la estimación por mínimos cuadrados se dividiera en diferentes partes y luego se combinara; sin embargo, estas dos partes tienen que ser independientes. Para probar la equivalencia de ambos métodos, primero resolvemos los parámetros de acuerdo con el procedimiento común de ajuste de un solo paso. Posteriormente, verificamos que se obtiene el mismo resultado utilizando un ajuste secuencial (Dach and Lutz (AIUB), 2015).

El ajuste secuencial por mínimos cuadrados trata cada serie de observación de forma independiente. Se realiza una estimación para los parámetros desconocidos usando solo las observaciones de una serie de observación particular. En el segundo paso, se calcula la contribución de cada estimación de parámetro secuencial a la estimación de parámetro común.

Para la combinación de soluciones en Bernese se debe tener en él cuenta lo siguiente :

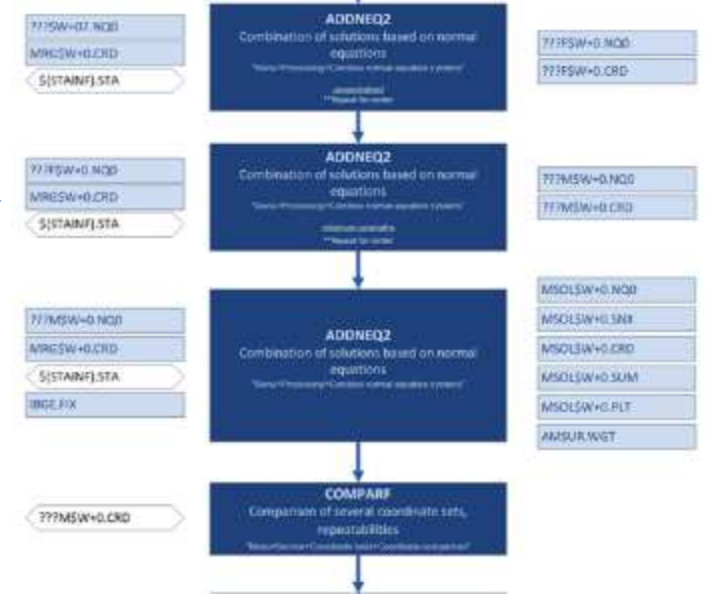
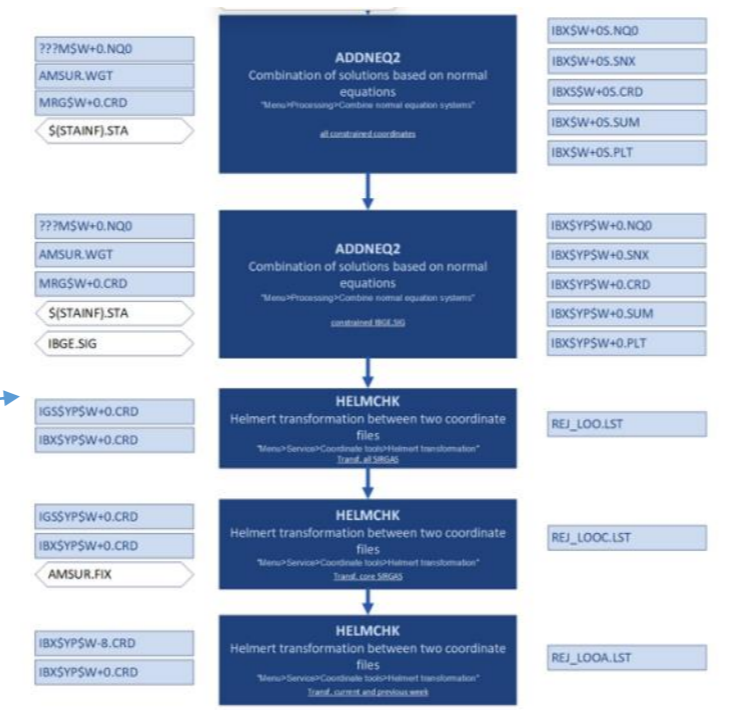
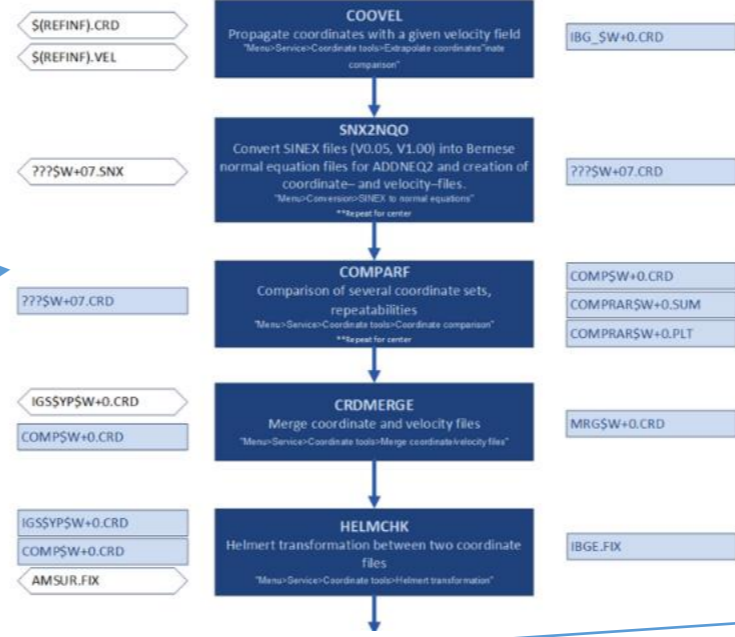
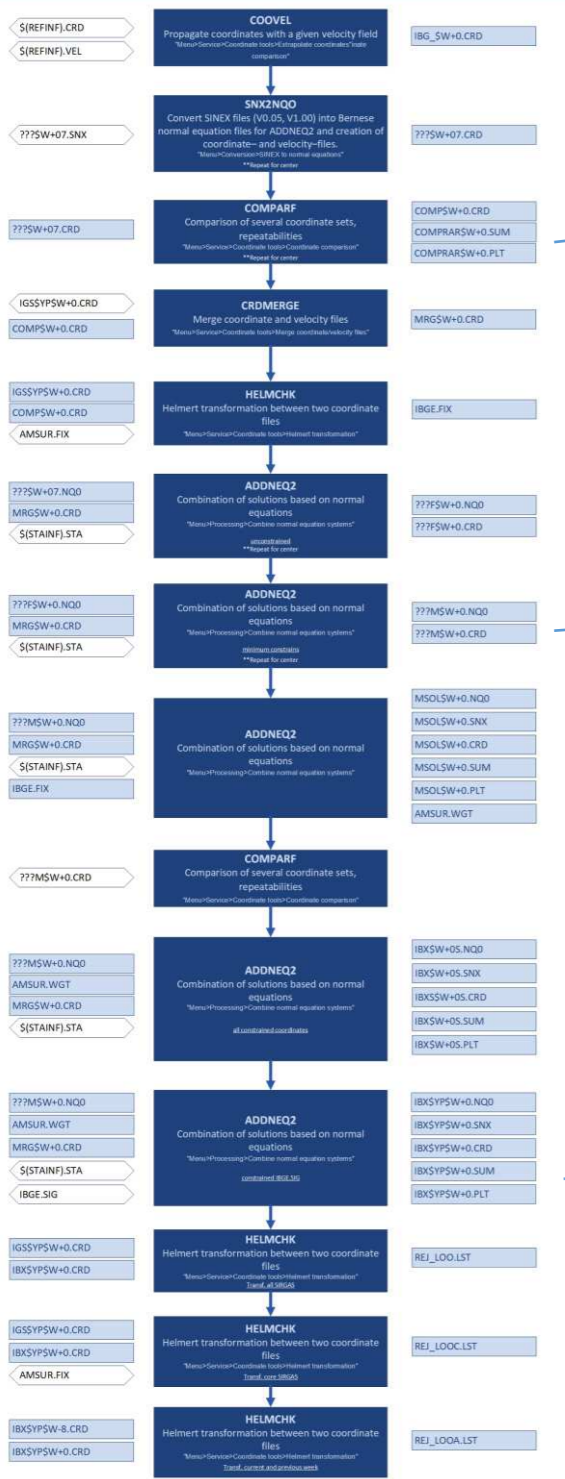
1. **Ajuste secuencial por mínimos cuadrados:** El ajuste secuencial por mínimos cuadrados trata cada serie de observación de forma independiente. Se realiza una estimación para los parámetros desconocidos usando solo las observaciones de una serie de observación particular. En el segundo paso, se calcula la contribución de cada estimación de parámetro secuencial a la estimación de parámetro común (Dach and Lutz (AIUB), 2015).
2. **Manipulación de ecuaciones normales:** Las ecuaciones normales se pueden manipular de varias maneras diferentes, como el cambio de escala de la ecuación normal, la expansión de las ecuaciones normales, la transformación de parámetros, el cambio de información de parámetros a priori, el apilamiento de parámetros, la reducción del número de parámetros, introducción de parámetros adicionales, restricción de parámetros y eliminación previa de parámetros (Dach and Lutz (AIUB), 2015).

```
Results
=====
SIR22567.SNX      covariance matrix loosely constrained weekly combination
SIR22567.SUM      this text file
sir23P2256.snrx   covariance matrix weekly combination aligned to
IGS14sir23P2256.crd final positions for week 2256
The loosely constrained solution (SIR22567.SNX, SIR22567.SUM) and final
coordinates (sir23P2256.snrx, sir23P2256.crd) are available at
ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/2256/ or at
https://www.sirgas.org/en/weekly-solutions/.
=====
FILES SENT TO GLOBAL IGS DATA CENTERS:
=====
sir22567.snrx     SINEX FILE FOR WEEK 2256
sir22567.sum      SUMMARY FILE FOR WEEK 2256
=====
SUMMARY OF WEEKLY COMBINED SOLUTION
=====
SOL      SIRGAS      IGS20      RMS*      Variance      Repeatability [mm]
stations stations [mm]      factor      N      E      U
-----
SIR      444         40         1.56      0.61         1.08      1.26      4.34
```

STATISTICS OF INDIVIDUAL SOLUTIONS (after alignment to the IGS reference frame)

SOL	No. Stations	RMS [mm]	Variance factor	Weighting factor
CHL	87	1.54	0.60	1.017
CRI	56	1.63	0.66	0.924
DGF	205	1.52	0.58	1.052
ECU	84	1.58	0.62	0.984
GNA	189	2.13	1.14	0.535
IBG	184	1.62	0.66	0.924
IGA	75	1.56	0.61	1.000
INE	44	1.34	0.45	1.356
PER	66	1.45	0.53	1.151
URY	103	1.53	0.58	1.052
USC	198	1.53	0.58	1.052

(Dach and Lutz (AIUB), 2015), User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2



3. Tema: Posicionamiento GNSS



Acrónimos

ANTEX: Antenna Exchange Format	ISO: International Organization for Standardization	VLBI: Very Long Baseline Interferometry
APC: Antenna Phase Center	ITRF: International Terrestrial Reference Frame	VMF: Vienna Mapping Function
ARP: Antenna Reference Point	ITRS: International Terrestrial Reference System	WGS84: World Geodetic System 84
BDCS: BeiDou Coordinate System	IUGG: The International Union of Geodesy and Geophysics	
BIH: Bureau International de l'Heure	JD: Julian Day	
BIPM: Bureau International des Poids et Mesures	NNR: No-net-rotation	
CDDIS: Crustal Dynamics Data Information System	OS: Open Service	
CEP: Conventional Ephemeris Pole	PCO: Phase Center Offset	
CRF: Celestial Reference Frame	PCV: Phase Center Variation	
CRS: Celestial Reference System	PR: Public Regulated Service	
CS: Commercial Service	PZ-90: Parametry Zemli 1990 (Parameters of the Earth 1990)	
CTP: Conventional Terrestrial Pole	RINEX: Receiver Independent Exchange Format	
DORIS: Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite	SAR: Search and Rescue	
DOY: Day Of Year	SGR: Geodetic Reference System	
ECEF: Earth-centered, Earth-fixed coordinate system	SINEX: Solution (Software/Technique) Independent Exchange	
EPSG: European Petroleum Survey Group	SIRGAS: Geodetic Reference System for the Americas	
GGOS: Global Geodetic Observing System	SLR: Satellite laser ranging	
GNSS: Global Navigation Satellite System	TAI: International Atomic Time	
GPS: Global Positioning System	TBC: Trimble Business Center	
GRS80: Geodetic Reference System 1980	TEC: Total Electron Content	
GTRF: Galileo Terrestrial Reference Frame	TECU: Total Electron Content Unit	
IAG: International Association of Geodesy	TRF: Terrestrial Reference Frame	
IAU: International Astronomical Union	TRS: Terrestrial Reference System	
ICRF: International Celestial Reference Frame	UERE: User Equivalent Range Error	
ICRS: International Celestial Reference System	URE: User Range Error	
IERS: International Earth Rotation and Reference Systems Service	UT: Universal Time	
IGS: International GNSS Service	UTC: Coordinated Universal Time	
IONEX: Ionosphere Exchange Format	UTM: Universal Transverse Mercator	

ESCUELA SIRGAS 2023

3.9. Espacio de consulta y discusión. 10 MINUTOS

ESCUELA SIRGAS 2023

“Sistema de Referencia”



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE

J.A. Tarrío¹, Catalina Cáceres¹, Jesarella Inzunza¹, Valeria Vásquez¹, Fernando Isla¹.

¹ Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico de la Universidad de Santiago de Chile, Chile.