

GEODESIA EN CHILE, TEORÍA Y APLICACIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS (SIRGAS)

Santiago de Chile
2018

"Geodesia en Chile, teoría y aplicación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) por el grupo de Geodesia del Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial SNIT.

CONTENIDOS

| | | |
|--|----------|--------|
| Introducción | 1 | pág.1 |
| Sistemas Geodésicos de Referencia Empleados en Chile | 2 | pág.2 |
| | 2 | |
| 2.1 Sistemas de Coordenadas | 2 | |
| 2.2 Sistemas de Referencia: ITRF, WGS 84, SIRGAS | 7 | |
| 2.3 Marcos de Referencia | 8 | |
| 2.4 Red Geodésica Nacional | 11 | |
| 2.5 Datum Clásicos en Chile | 14 | |
| 2.6 Sistemas Verticales | 15 | |
| 2.7 Modelos Geoidales | 19 | |
| 2.8 Códigos EPSG y su utilización en Chile | 23 | |
| | | |
| Conversión y transformación de coordenadas | 3 | pág.24 |
| | | |
| 3.1 Armonización de Marcos de Referencia de Distintas Épocas | 24 | |
| 3.2 Parámetros para la Transformaciones entre Sistemas Geodésicos de Referencia | 27 | |
| | | |
| Metodología SIG para la transformación y conversión de sistemas de referencia de coordenadas (SRC) en ARCGIS y QGIS, para diferentes escalas, incluyendo parámetros IGM | 4 | pág.31 |
| | | |
| 4.1 Metodología en ArcGIS | 31 | |
| 4.2 Metodología en QGIS | 34 | |
| | | |
| Generalidades de Escalas Cartograficas | 5 | |
| | | |
| 5.1 Límite de Percepción Visual (LPV) | 40 | |
| 5.2 Ground Sample Distance (GSD) | 41 | |
| | | |
| Recomendaciones generales | 6 | pág.44 |
| | | |
| 6.1 Recomendación de Sistemas de referencia de coordenadas a utilizar en Chile | 44 | |
| 6.2 Recomendaciones de tipos de coordenadas a utilizar, dependiendo de cada caso u objetivo del trabajo | 44 | |
| 6.3 Precisiones asociadas a los sistemas geodésicos en uso y sus limitaciones de acuerdo a escala | 44 | |
| 6.4 Indicar recomendación, hasta qué escala, se recomienda utilizar parámetros IGM | 44 | |
| 6.5 Uso de clase de Sistemas de Coordenadas Cartográficas según necesidad y escala de representación | 45 | |
| | | |
| Bibliografía | 7 | pág.46 |
| Acronimos | 8 | pág.48 |

1 INTRODUCCIÓN

El Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial de Chile (SNIT), conocido también como la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile), mediante su Grupo de Trabajo de Geodesia, se complace en presentar el documento “Geodesia en Chile, teoría y la aplicación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)”.

En el texto, se presentan los principales aspectos de la Geodesia en Chile, desde el punto de vista teórico y práctico, incluyendo una descripción de los Sistemas Geodésicos de Referencia empleados en el país; metodologías para la transformación y conversión de sistemas de referencia de coordenadas (SRC) en software de sistemas de información geográfica (SIG); y recomendaciones generales. Entre estas recomendaciones cabe destacar orientaciones respecto a exactitud posicional y tipos de sistemas de referencia de coordenadas a utilizar dependiendo del objetivo de trabajo, entre otros temas de interés.

Para el desarrollo del presente documento, se utilizó de referencia el estudio “Geodesia y Cartografía aplicada a SIG”, ejecutado durante el año 2017 por la Universidad de Santiago de Chile para la Secretaría Ejecutiva SNIT, e importantes aportes de las instituciones y profesionales participantes de este grupo de trabajo.

Esta primera versión, se entrega a la comunidad nacional para su consideración y aplicación en materias de gestión de información, y de este modo, contribuir a la interoperabilidad y estandarización de la información geográfica nacional.

Secretaría Ejecutiva SNIT, Diciembre.2018

2 SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERENCIA EMPLEADOS EN CHILE

Para determinar la posición de puntos u otro objeto sobre una superficie y dar ubicación geográfica en el espacio, es necesario definir un sistema de coordenadas con características métricas, principio básico y esencial de disciplinas tales como la cartografía, geodesia, topografía, etc. Para ello se necesitan los Sistemas Geodésicos de Referencia (SGR), y su materialización sobre el terreno obteniendo coordenadas que se pueden representar en diferentes sistemas.

2.1 SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA

Los sistemas de coordenadas son construcciones abstractas que permiten describir posiciones geoespaciales matemáticamente, la construcción matemática se realiza a partir de al menos una definición del sistema de coordenadas junto con su relación con la Tierra. La cantidad de sistemas de coordenadas y sus relaciones, obligan a una rigurosa gestión de los mismos: empleo de herramientas digitales, estandarización e implementación documentada en la práctica.

Un sistema de coordenadas es un conjunto de valores y puntos (convenciones) que permiten determinar unívocamente la posición de cualquier punto (P) de un espacio (1D, 2D, 3D, 4D). **Para definir un sistema de coordenadas se deben especificar:**

- Ubicación del origen (o)
- Orientación de los tres ejes
- Parámetros (cartesianos, curvilíneos, etc.) que definen la posición de un punto con respecto al sistema de coordenadas.
- La unidad de medida.

Según la norma **NCh - ISO 19111:2011** (ISO, Instituto Nacional de Normalización, 2011), se define coordenada como cualquiera de los números de una secuencia que designa la posición de un punto en un sistema.

Los sistemas de coordenadas forman la base de cálculo para describir la posición de un punto a partir de mediciones geodésicas: distancias, proporciones de distancias (sin escala) y ángulos. Las coordenadas nunca pueden medirse, solamente se calculan con referencia a un sistema de coordenadas bien definido.

Los tipos de sistemas de coordenadas que existen son:

1. Coordenadas cartesianas tridimensionales globales, o también llamadas coordenadas **ECEF** (Earth Centered, Earth Fixed): se representan por $[X, Y, Z]$.

2. Coordenadas elipsoidales: son la representación de las coordenadas ECEF sobre la superficie de un elipsoide determinado, se representan $[\varphi, \lambda, h]$ siendo respectivamente, la latitud, longitud y altura elipsoidal.

3. Coordenadas proyectadas o cartográficas. Según la proyección empleada, las coordenadas elipsoidales pueden representarse en un plano, en el caso de Chile continental, se emplea la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), huso 19 y huso 18. Su representación es $[E, N, h]$, que si además se añade un modelo geoidal podemos tener $[E, N, h, H]$ siendo Este, Norte, altura elipsoidal y altura ortométrica. En este tipo de coordenadas deben tenerse en cuenta que según el tipo de proyección empleado, la reducción de la distorsión puede ser en ángulos, distancias, áreas. En el caso de UTM es una proyección que conserva los ángulos que se miden sobre la tierra, con respecto al respectivo sobre el plano, por lo que distancias no serán iguales, aplicando lo que se denomina, "coeficiente de anamorfosis".

4. Coordenadas locales: en determinadas ocasiones, sobre todo en ingeniería, pueden resultar necesarias. Este tipo de coordenadas se emplean generando un plano tangente en un punto sobre la tierra, tienen una aplicación limitada debido a que a medida que nos alejamos del punto de tangencia, la curvatura terrestre se pone de manifiesto. Se representan por $[e, n, u]$ o también por $[x, y, z]$. En algunos casos pueden denominarse también topocéntricas, pero en estricto rigor, deben denominarse planas locales. (Hofmann-Wellenhof, 2008)

En los sistemas de referencia modernos globales se emplean primariamente coordenadas cartesianas tridimensionales, todas las demás pueden derivarse a partir de éstas.

A continuación, se procede a explicar detalladamente cada una de ellas:

COORDENADAS TRIDIMENSIONALES. ECEF

Sistema de coordenadas cartesianas que entrega la posición de puntos relacionados con ejes mutuamente perpendiculares n es 2 o 3 según (ISO, Instituto Nacional de Normalización, 2011). Se distinguen los sistemas de mano derecha e izquierda. En geodesia se usa el sistema de mano derecha.

En sistemas globales, el origen es el centro de masa del planeta (geocentro), incluyendo la atmósfera y la hidrósfera, la dirección del eje Z es hacia el polo convencional de rotación, la dirección del eje X es cercana al meridiano de Greenwich, el eje Y perpendicular a los dos anteriores, la unidad de medida es métrica. Estos parámetros se llaman datum.

Estas coordenadas también se denominan ECEF (Earth Centered, Earth Fixed), debido a que en los sistemas de referencia modernos el origen de coordenadas $(0,0,0)$ coincide con el geocentro terrestre.

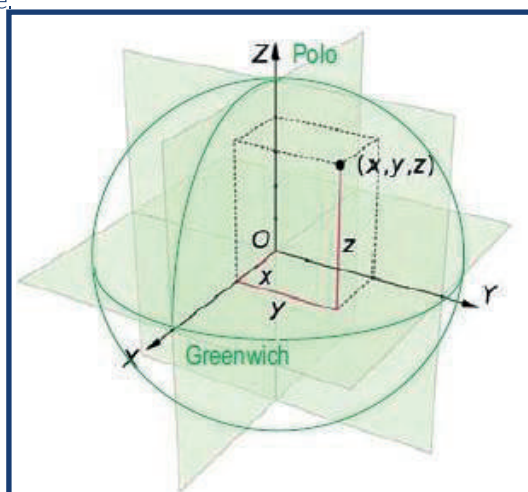


Ilustración 1. Coordenadas ECEF.
Fuente: (Drewes & Sánchez, 2011)

COORDENADAS GEODÉSICAS O ELIPSOIDALES (λ , Φ , h)

Se introdujo el concepto (modelo) de elipsoide de revolución para satisfacer las siguientes consideraciones:

- Contar con una referencia para la superficie real y el campo de gravedad externo de la Tierra.
- Lograr un ajuste adecuado con respecto al geoide (superficie formada por puntos con igual potencial de la gravedad, coincidente con el nivel medio del mar) dentro de ± 100 m.
- Linealizar problemas no lineales.
- Permitir cálculos a partir de fórmulas cerradas.

Sistema de coordenadas elipsoidales, es decir con referencia al elipsoide, en el que se especifica la posición mediante la latitud geodésica (φ), la cual es el ángulo medido desde el centro de la tierra entre la línea del Ecuador y un punto sobre la superficie. La latitud entrega la localización con respecto al Paralelo del Ecuador. La longitud geodésica (λ), es el ángulo medido desde el centro de la tierra entre un punto de la superficie y el Meridiano de Greenwich. La longitud permite conocer la localización con respecto al meridiano de Greenwich. 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 (en el caso tridimensional). En geodesia se usa un elipsoide que óptimamente se aproxima al geoide según la definición Gauss-Listing, o sea que coincide con el nivel medio del mar (en calma).

La forma del elipsoide se representa mediante el semieje mayor (a) y la excentricidad (e). El sistema elipsoidal de superficie se extiende al espacio mediante la inclusión de la altura h (elipsoidal o geométrica) del punto P sobre el elipsoide, medida a lo largo de la normal. La proyección de P sobre el elipsoide corresponde al punto Q . **La terna de coordenadas** $[\varphi, \lambda, h]$ **se conoce como coordenadas curvilíneas:**

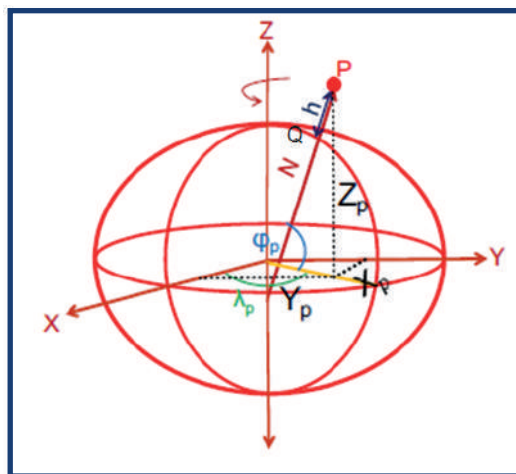


Ilustración 2. Coordenadas Geodésicas. Fuente: (Drewes & Sánchez, 2011)

COORDENADAS PROYECTADAS O CARTOGRÁFICAS

Los sistemas de coordenadas proyectados o cartográficos, permiten representar la superficie del elipsoide (o de la esfera) sobre un plano a partir de reglas matemáticas o geométricas, por ejemplo, por proyecciones. Como la representación de una superficie curva sobre un plano no es posible sin distorsión, hay que buscar la representación que distorsione menos los ángulos, las distancias o las áreas. En principio se usan tres proyecciones:

1. Proyección sobre un cono.
2. Proyección sobre un cilindro.
3. Proyección sobre un plano.

La orientación de las superficies puede ser:

- Normal (eje de la superficie paralelo al eje de rotación terrestre.)
- Transversal (eje paralelo al ecuador).
- Oblicua (eje en cualquier dirección).
- **Las distorsiones métricas pueden agruparse en:**
 - **Conformes:** no presenta distorsión angular (diferencial). Un ángulo sobre el elipsoide se conserva después de ser cartografiado en el plano.
 - **Equidistantes:** los meridianos y los paralelos se representan en verdadera longitud, es decir, las distancias son conservadas. Equivalentes: propiedades equiáreas, es decir, conserva las superficies.

Las distorsiones métricas pueden agruparse en:

- Conformes: no presenta distorsión angular (diferencial). Un ángulo sobre el elipsoide se conserva después de ser cartografiado en el plano.
- Equidistantes: los meridianos y los paralelos se representan en verdadera longitud, es decir, las distancias son conservadas.
- Equivalentes: propiedades equiáreas, es decir, conserva las superficies.

El sistema UTM se basa la Proyección Cilíndrica Transversa de Mercator, la que ha sido modificada para adaptar la superficie de la tierra y eliminar la casi totalidad de las deformaciones terrestres en la representación cartográfica.

Algunas de sus cualidades son:

- Se aplica globalmente y entre los 84°N y 80°S la tierra se divide en 60 zonas o husos de 6° de ancho en longitud cada uno.
- Los husos poseen un huso central o meridiano 0, origen o eje del huso, siendo el ancho de 3° al oeste y 3° al este del meridiano central.
- Para reducir la distorsión en los límites de las zonas, se emplea un factor de escala 0,9996, en el meridiano central, así que las líneas a 1°37' al Este y Oeste presentarán escala verdadera.
- De Sur a Norte, se emplean letras (C a la X sin I ni O) en la designación de las zonas de 8°, comenzando por C en 80°S.

COORDENADAS LOCALES

Consisten en un sistema de referencia local, ligado al campo de gravedad: orientación en función de la vertical local (cenit, línea de la plomada). El origen es el punto del observador (P): "topocentro", donde lo que se hace es un plano tangente a la tierra.

El eje z apunta en la dirección del cenit, perpendicular al plano x, y.

El eje x apunta hacia el norte elipsoidal (meridiano). x, y, z equivalen a norte (n), este (e) y "up" (u).

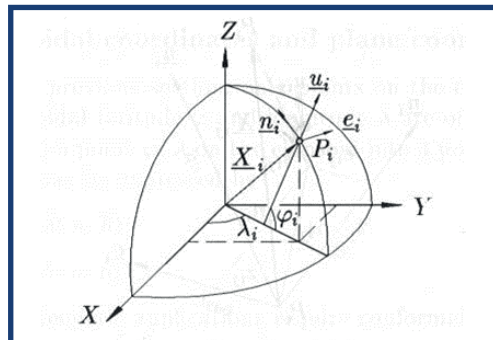


Ilustración 3. Coordenadas Locales. Fuente: (Höfmann-Wellenhof, 2008)

Los sistemas de coordenadas locales, tienen especial relevancia cuando se combinan observaciones GPS y observaciones clásicas con equipos, como por ejemplo, estaciones totales.

La extensión de aplicación debe ser limitada ya que se asume la zona plana cuando no lo es.

La conversión entre los distintos sistemas de coordenadas se puede establecer con el siguiente diagrama de flujo:

FLUJO DE CONVERSIÓN DE COORDENADAS

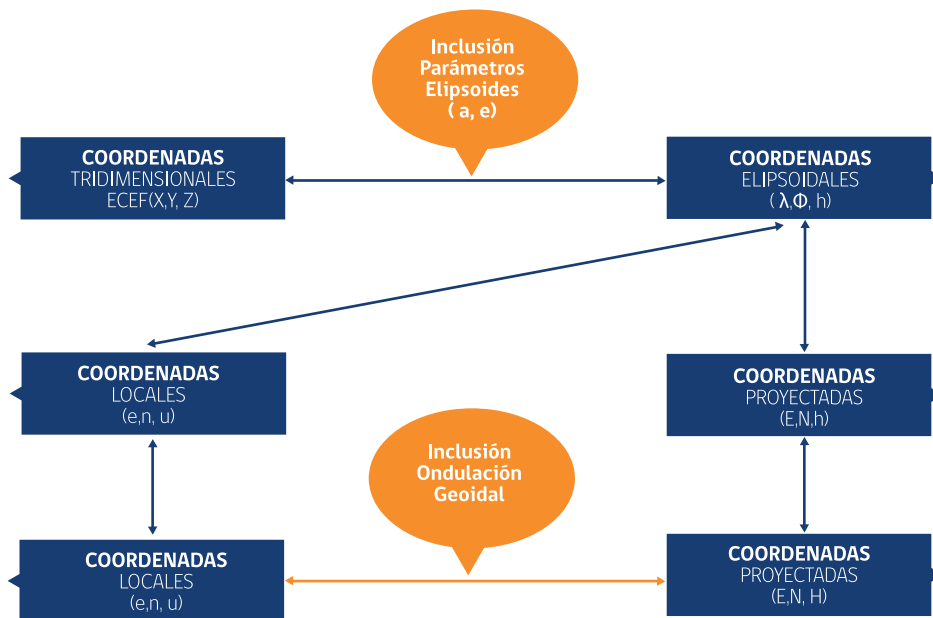


Ilustración 4. Flujo Conversión de Coordenadas. Fuente: elaboración propia

2.2 SISTEMAS DE REFERENCIA

Se define sistema de referencia como: Definición de estándares, parámetros, modelos, etc., que sirven como base para la representación de la geometría de la superficie terrestre y su variación en el tiempo. (Pej., velocidad de la luz C_0 , parámetro gravitacional estándar GM, modelos de la relatividad especial y general, modelos de la atmósfera (ionosfera y troposfera), sistema de coordenadas cartesianas tridimensionales ortogonales con variación temporal consistente con la rotación de la Tierra). (Drewes, y otros, 2011). Se detallan a continuación sistemas globales de referencia.

INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM (ITRS)

Sistema de referencia del Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia (IERS) establecido para la determinación de los sistemas de referencia celeste (ICRS) y terrestre (ITRS) y la relación entre los dos, o sea la orientación y rotación de la Tierra en el espacio (EOP, ERP).

WORLD GEODETTIC SYSTEM 1984 (WGS84)

Sistema de referencia terrestre global que originalmente fue establecido para determinar las coordenadas de las órbitas de los satélites Doppler (WGS72). Fue adoptado para las órbitas de los satélites NAVSTAR GPS (broadcast ephemerides). WGS84 adoptó el ITRS en 2002.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS (SIRGAS)

Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas. Su definición es idéntica a la del Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS: International Terrestrial Reference System) y su realización es una densificación regional del Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF: International Terrestrial Reference Frame). Además del sistema de referencia geométrico, SIRGAS se ocupa de la definición y realización de un sistema vertical de referencia basado en alturas elipsoidales como componente geométrica y en números geopotenciales. (referidos a un valor W_0 global convencional) como componente física. (SIRGAS, 2017).

2.3 MARCOS DE REFERENCIA

Se define Marco de referencia como: Realización (materialización) de un sistema de referencia por un conjunto de entidades físicas y matemáticas. (Pej., un número de puntos monumentados sobre la superficie terrestre con sus coordenadas cartesianas tridimensionales X, Y, Z dadas en una época fija y variaciones lineales en el tiempo, o sea velocidades constantes. $(dx/dt, dy/dt, dz/dt)$)

INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME (ITRF)

Materialización del ITRS por estaciones en la superficie terrestre (más de 900 puntos en más de 500 sitios) con coordenadas dadas para una época fija y sus variaciones en el tiempo (velocidades). Sirve también para la determinación de las órbitas precisas de los satélites GPS por el International GNSS Service (IGS). **Desde la semana GPS1150 (enero 2002), WGS84 e ITRF son coincidentes.**

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS (SIRGAS)

Densificación del ITRF, inicialmente establecido para América del Sur por 58 estaciones en campaña de 1995 y extendido al Caribe, Norte y Centroamérica en 2000 con 184 estaciones. Actualmente tiene más de 240 estaciones permanentes.

SIRGAS-CON

SIRGAS-CON es la red SIRGAS de Operación Continua y tercera realización de SIRGAS (anteriormente SIRGAS95 y SIRGAS2000). Actualmente está compuesta por cerca de 400 estaciones GNSS de funcionamiento permanente, de las cuales 59 pertenecen a la red global del IGS. Las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS-CON se refieren a la época de observación y al mismo marco de referencia utilizado por el IGS para el cálculo de las órbitas finales de los satélites GNSS, en cuyo caso son referidas a IGS14 a partir del 29 de enero de 2017 (semana GPS 1934).

Las coordenadas y velocidades de las estaciones SIRGAS-CON se encuentran a disposición en el servidor ftp.sirgas.org, el cual es mantenido y administrado por el IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS, el que opera en Alemania.

La relación entre las diferentes realizaciones de SIRGAS (o sus densificaciones) están dadas por los parámetros de transformación entre los ITRF correspondientes y la reducción de las coordenadas a la misma época de referencia.

Los productos finales SIRGAS comprenden: soluciones semanales semilibres para la integración de SIRGAS-CON en el poliedro global del IGS y el cálculo de soluciones multianuales, coordenadas semanales ajustadas al ITRF (referidas a la época de observación) para aplicaciones en América Latina, y soluciones multianuales (acumuladas) con coordenadas y velocidades para aplicaciones prácticas y científicas que requieran de la variabilidad de las posiciones geodésicas con el tiempo. (SIRGAS, 2017)

La cinemática de la red de referencia SIRGAS es determinada mediante el cálculo rutinario de soluciones multianuales, las cuales resultan de la combinación de las soluciones semanales semilibres enviadas al IGS.

Las coordenadas (asociadas a una época de referencia) y las velocidades de las estaciones SIRGAS, son estimadas introduciendo como marco de referencia una selección de estaciones ITRF ubicadas en la región.

La solución multianual más reciente, denominada SIR15P01, ha sido calculada a partir de mediciones GNSS (GPS+GLONASS) registradas después de los fuertes sismos ocurridos en Chile y México en 2010. Esta solución cubre un periodo de cinco años entre 2010-03-14 y 2015-04-11. SIR15P01 incluye posiciones y velocidades para 303 estaciones de referencia SIRGAS y 153 estaciones adicionales, las cuales fueron incluidas para mejorar la distribución geográfica de las estaciones disponibles a fin de calcular un nuevo modelo de velocidades para SIRGAS. SIR15P01 se refiere al marco IGb08, época 2013.0.

Dado que el IGS utiliza para la generación de sus productos el nuevo marco de referencia IGS14, SIRGAS incluye en el procesamiento semanal del marco de referencia SIRGAS las órbitas finales, los parámetros de orientación terrestre y las correcciones a los relojes de los satélites publicados por el IGS, ya que las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS se refieren también al IGS14 a partir de la semana GPS 1934 (29 de enero de 2017).

IGS14 es un subconjunto de 252 estaciones IGS estables y de buen desempeño de ITRF2014. En comparación con IGb08, IGS14 contiene 65 nuevas estaciones, la mayoría en áreas escasamente cubiertas anteriormente. Por otro lado, 48 estaciones anteriores referidas a IGb08 no cumplían con los criterios de selección de IGS14.

La interacción entre los diferentes Centros Operacionales, los Centros Nacionales de Datos, los Centros de Procesamiento y los Centros de Combinación es coordinada por el SIRGAS-GTI (Sistema de Referencia):

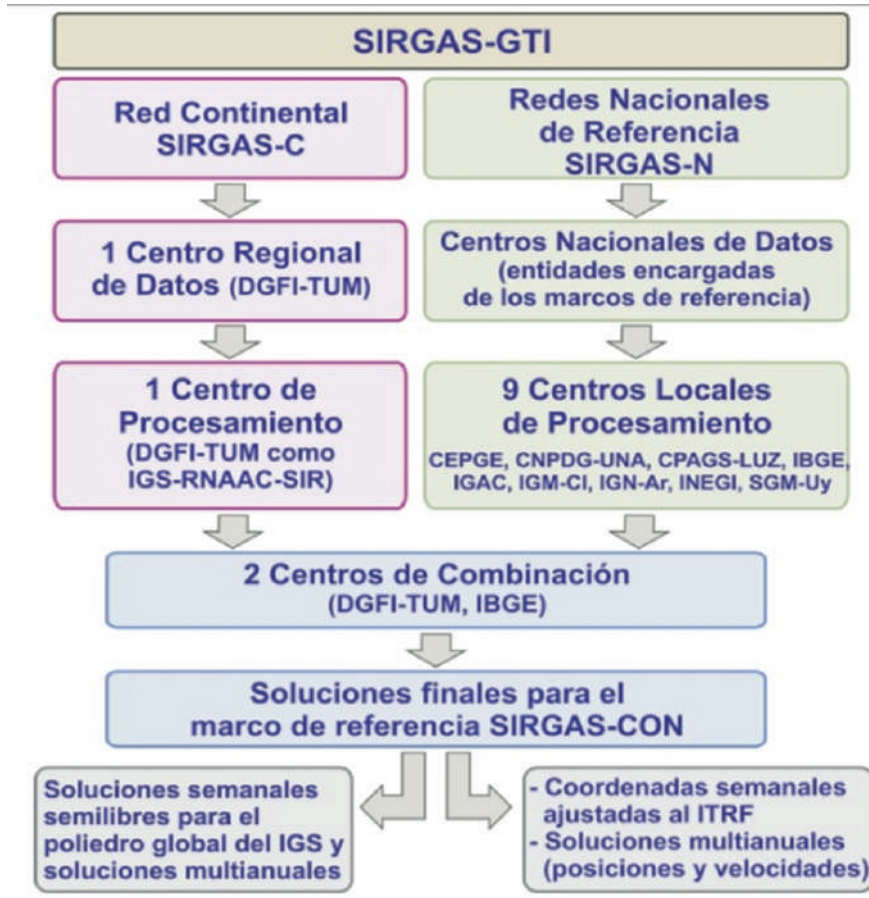


Ilustración 5: Organización de procesamiento SIRGAS
Fuente: www.sirgas.org

En Chile actualmente, se dispone de acceso libre a estaciones igs, para realizar cálculos, empleando sus coordenadas como puntos fiducial:

| ORGANISMO | ESTACIÓN | ID | FTP DATOS | SISTEMA DE REFERENCIA | MARCO DE REFERENCIA |
|-----------|----------------------|------|---|-----------------------|---------------------|
| IGS | IQUIQUE | IQQE | ftp://ftp.igs.org/pub/station/log/iqqe_20150917.log | ITRS | IGS14 |
| | SANTIAGO | SANT | ftp://ftp.igs.org/pub/station/log/sant_20170126.log | ITRS | IGS14 |
| | ANTUCO (Los Angeles) | ANTC | ftp://ftp.igs.org/pub/station/log/antc_20150828.log | ITRS | IGS14 |
| | COYHAIQUE | COYQ | ftp://ftp.igs.org/pub/station/log/coyq_20170607.log | ITRS | IGS14 |
| | PUNTA ARENAS | PARC | ftp://ftp.igs.org/pub/station/log/parc_20150318.log | ITRS | IGS14 |
| | ISLA DE PASCUA | ISPA | ftp://ftp.igs.org/pub/station/log/ispa_20170502.log | ITRS | IGS14 |

Tabla 1. Accesos a datos IGS en Chile. Fuente: Elaboración Propia.



No es menor indicar que estos datos son de libre acceso, y compatibles perfectamente con la red sirgas-con.

2.4 REDGEODÉSICA NACIONAL RGN-SIRGAS CHILE

La densificación de SIRGAS en Chile, la realiza el IGM, mediante la combinación de observaciones de vértices activos y vértices pasivos; y se denomina Red Geodésica Nacional SIRGAS-CHILE.

La actual Red Geodésica Nacional SIRGAS-CHILE está conformada por una red Horizontal y Vertical, las cuales incluyen la siguiente información:

1. RED HORIZONTAL

Red de Estaciones Activas Fijas, que permiten calcular diariamente coordenadas para apoyar cualquier medición diferencial GNSS, y además, monitorear el desplazamiento de las placas tectónicas determinando velocidades y desplazamientos.

Esta red está compuesta por estaciones GNSS del IGM, de la Red Sismológica Nacional administrada por el Centro Sismológico Nacional (CSN) y estaciones del Proyecto de los Andes Centrales CAP de la Universidad de Ohio, USA., además de estaciones incorporadas en el 2010 en apoyo al estudio del terremoto de Maule 8.8, por las Universidades de Concepción, Universidad de Talca, Universidad de Magallanes y Ministerio de Obras Públicas, constituyendo una única y robusta red geodésica, la cual es procesada y analizada por el IGM, poniendo a disposición de los usuarios, coordenadas referidas al sistema de referencia oficial del país SIRGAS- CHILE.

Red Pasiva, conformada por puntos con coordenadas SIRGAS-CHILE, PSAD-56 y SAD-69, distribuidos a lo largo y ancho del país, de manera que los usuarios tengan acceso a una mayor densificación de vértices

2. RED VERTICAL

Red de Nivelación y Gravedad, que consta de puntos con información de altura referida al nivel medio del mar y valores de gravedad absolutos y relativos, que conforman el Datum vertical oficial del país.

La dinámica de placas en nuestra parte del continente, obliga al IGM a monitorear constantemente el marco de referencia nacional, con el objeto de garantizar que las coordenadas puestas a disposición de los usuarios sean las más precisas y actualizadas, sobre todo después de eventos sísmicos de gran envergadura como son los ocurridos en Chile en los últimos años. Esto hace que el IGM desde el año 2001 esté re-midiendo, calculando y ajustando coordenadas SIRGAS-CHILE referidas a las épocas 2002.0, 2010.0, 2013.0 y actualmente 2016.0, destacando que la última época de referencia deja obsoletas las anteriores.

En resumen, el actual Marco de Referencia utilizado en Chile corresponde a SIRGAS- CHILE y su definición es idéntica a la del Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS: International Terrestrial Reference System) y su realización es una densificación regional del Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF: International Terrestrial Reference Frame) en América Latina. Su uso fue recomendado por la Organización de las Naciones Unidas en su Séptima conferencia Cartográfica de las Américas (Nueva York, enero 22 al 26 de 2001), y adoptado por el IGM como sistema de referencia oficial en el año 2002, constituyéndose en la capa fundamental de la infraestructura de datos espaciales en la región y ofreciendo apoyo permanente al Comité Regional de las Naciones Unidas sobre la Gestión de Información Geoespacial para Las Américas (UN-GGIM: Américas), cuyo objetivo inmediato es la promoción de la Resolución sobre el Marco Geodésico Global de Referencia para el Desarrollo Sostenible, emanada de la Asamblea General de la Naciones Unidas el 26 de febrero de 2015.

- **MARCO DE REFERENCIA: SIRGAS-CHILE**
- **ÉPOCA DE REFERENCIA: 2016.0**
- **ELIPSOIDE: GRS80**
- **MARCO DE REFERENCIA GLOBAL: IGb08**

La Red Geodésica Nacional SIRGAS-CHILE ha tenido los siguientes ajustes:

| | REALIZACIÓN 1 | REALIZACIÓN 2 | REALIZACIÓN 3 | REALIZACIÓN ACTUAL |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|
| SISTEMA DE REFERENCIA | SIRGAS | SIRGAS | SIRGAS | SIRGAS |
| MARCO DE REFERENCIA | ITRF 2000 | IGS08 | IGB08 | IGB08 |
| DATUM | GEOCÉNTRICO | GEOCÉNTRICO | GEOCÉNTRICO | GEOCÉNTRICO |
| ELIPSOIDE | GRS-80 | GRS-80 | GRS-80 | GRS-80 |
| TOTAL DE PUNTOS | 580 | 120 | 130 | 200 |
| ÉPOCA DE AJUSTES | 2002.0 | 2010.0 | 2013.0 | 2016.0 |

Tabla 2. Parámetros RGN Sirgas Chile. Fuente (IGM.CHILE, 2008) modificada.

Las coordenadas anteriores la época 2016.0, no se consideran válidas debido a “la serie de eventos sísmicos de importancia ocurridos entre los años 2010 a 2015”. A continuación ilustración con parte de la Red Geodésica Nacional.

PERIODO DE TRANSICIÓN

Con la adopción del nuevo Sistema de referencia Geocéntrico en el año 2002, se inicia un periodo de transición en el cual se reemplazaron los Sistemas Geodésicos vigentes a esa fecha en la cartografía nacional, donde el Datum PSAD-56 (de los 17°30' a los 43°30' de latitud) y SAD-69 (de los 43°30' a los 56° de latitud) eran utilizados para la cartografía regular a escalas 1:50.000 y la Red Geodésica Nacional.

Para mantener vigente los Datum antiguos, se utilizaron los parámetros de transformación entre los sistemas antiguos tradicionales y el nuevo sistema de referencia, utilizando tres juegos de parámetros para PSAD-56 y cuatro en SAD-69, los que fueron obtenidos a través de la remediación de vértices geodésicos seleccionados de la antigua Red Geodésica Nacional.

En la determinación de los parámetros de transformación se utilizó el modelo de Molodensky, obteniendo una precisión de transformación de Datum de +/- 5 metros, realizados principalmente con fines cartográficos.

Parámetros de transformación:

| SIRGAS A PSAD56 | | | | SIRGAS A SAD69 | | | |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| | 17°30'-26°00' | 26°00'-36°00' | 36°00'-44°00' | 17°30'-32°00' | 32°00'-36°00' | 36°00'-44°00' | 44°00'-56°00' |
| X | 302 | 328 | 352 | 59 | 64 | 72 | 79 |
| Y | -272 | -340 | -403 | 11 | 0 | -10 | -13 |
| Z | 360 | 329 | 287 | 52 | 32 | 32 | 14 |

Tabla 3. Parámetros de transformación. Fuente (Guía de aplicación IGM.CHILE, 2018).

| PSAD56 A SIRGAS | | | | SAD69 A SIRGAS | | | |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| | 17°30'-26°00' | 26°00'-36°00' | 36°00'-44°00' | 17°30'-32°00' | 32°00'-36°00' | 36°00'-44°00' | 44°00'-56°00' |
| X | -302 | -328 | -352 | -59 | -64 | -72 | -79 |
| Y | 272 | 340 | 403 | -11 | 0 | 10 | 13 |
| Z | -360 | -329 | -287 | -52 | -32 | -32 | -14 |

Tabla 4. Parámetros de transformación. Fuente (Guía de aplicación IGM.CHILE, 2018).

2.5 DATUM CLÁSICOS EN CHILE:

DATUM PSAD-56

Datum Provisorio Sudamericano del año 1956 (PSAD-56) utilizado para la Cartografía Regular a escalas 1:50.000 y 1:100.000 del país. Su punto de origen se encuentra en La Canoa, Venezuela, utiliza el elipsoide de referencia internacional 1924 (Hayford) [$a = 6378388$; $1/f = 1/297$]. Cubre a Chile en el rango de coordenadas de $17^{\circ}30' - 43^{\circ}30'$ de latitud Sur. Se aplica además en Ecuador, Perú y Bolivia. Desviación del geocentro: $\Delta X = -288$ m, $\Delta Y = 175$ m, $\Delta Z = -376$ m.

DATUM SAD-69

Datum Geodésico Sudamericano (Chúa - Brasil) del año 1969 (SAD-69) empleado para la elaboración de la Cartografía Regular 1:50.000 de la zona austral y la cubierta Cartográfica Nacional a escala 1:25.000 del país. Su punto de origen está ubicado en Chuá, Brasil, su elipse de referencia corresponde al Sudamericano 1969 [$a = 6378160$; $1/f = 1/298.25$]. Es empleado desde los $43^{\circ}30'$ a los 56° latitud sur, correspondiente a la zona sur austral de Chile. Su área de aplicación corresponde a América del Sur. Desviación del geocentro: $\Delta X = -57$ m, $\Delta Y = 1$ m, $\Delta Z = -41$ m.

HITO XVIII

Datum clásico correspondiente al año 1963, su punto fundamental ubicado en Tierra del Fuego, su elipse de referencia es el elipsoide Internacional 1924 (Hayford), abarca desde los $45^{\circ}30'$ Sur hacia el sur del continente. Fue aplicado para la inspección de la frontera Chile-Argentina. Su uso empezó el año 1963 para el uso de compañías petroleras. Desviación del geocentro: $\Delta X = 16$ m, $\Delta Y = 196$ m, $\Delta Z = 93$ m.

Los sistemas clásicos se definen a nivel regional, fueron observados con medios ópticos y calculados de forma expedita, mientras que los sistemas modernos, como lo es SIRGAS, son definidos a nivel global, observados con instrumental satelital y compensados de forma rigurosa, teniendo además un datum geocéntrico, en contraposición con los sistemas clásicos cuyo datum es regional, por lo que a medida que la lejanía al datum es mayor, los errores también aumentan. Es importante indicar que no se conocen modelos geoidales con respecto a los datums clásicos.

Se detalla a continuación una tabla con los sistemas de referencia empleados actualmente en Chile:

| SRG | AÑO IMPLANTACIÓN | EMPLEO ACTUAL | SISTEMA DE REFERENCIA |
|------------|------------------|----------------|-----------------------|
| HITO XVIII | 1963 | SHOA | CLÁSICO |
| PSAD 56 | 1956 | SHOA - MINERÍA | CLÁSICO |
| SAD 69 | 1969 | SHOA - MINERÍA | CLÁSICO |
| SIRGAS | 2003 | IGM | MODERNO |

Tabla 5. SGR Empleados en Chile. Fuente: Elaboración Propia.

2.6 SISTEMAS VERTICALES

La Norma Chilena NCh-ISO 19111-2011 define lo siguiente respecto a los Sistemas verticales.

- 1. Sistema de Referencia de Coordenadas Verticales:** Sistema de referencia de coordenadas unidimensionales basado en un Datum Vertical.
- 2. Sistema de Coordenadas Verticales:** sistema de coordenadas unidimensionales usados para mediciones de altura o profundidad relacionada con la gravedad.
- 3. Datum Vertical:** datum que describe la relación de alturas o profundidades relacionadas con la gravedad a la tierra.

En la mayoría de los casos, el datum vertical se debe relacionar con el nivel promedio del mar. Las alturas elipsoidales se tratan como relacionadas a un sistema de coordenadas elipsoidales tridimensionales referidas a un Datum Geodésico. Los Datums Verticales incluyen datums de sondeo (usados para propósitos hidrográficos), en cuyo caso las alturas pueden ser alturas o profundidades negativas. Actualmente se está trabajando en la unificación del sistema vertical a nivel mundial, para evitar los problemas de la definición clásicos del datum altimétrico procedente del registro de algún mareógrafo. (Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRIS), 2017).

Actualmente el datum vertical de Chile, lo establece el SHOA según los mareógrafos de Arica, Antofagasta, Valparaíso, Talcahuano, Puerto Montt y Punta Arenas; la densificación de las líneas de nivelación a partir del dato de estos mareógrafos lo realiza el IGM:



Ilustración 6. Mareógrafos de Referencia en Sudamérica y estado líneas de Nivelación. Fuente: Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRIS), 2017.

TIPOS DE ALTURA

Altura elipsoidal

Distancia entre la superficie terrestre (punto de medición) y el elipsoide de referencia (definido según parámetros elipsoidales), medida sobre la perpendicular al elipsoide en ese punto. Esta altura ha empezado a tener relevancia debido a que es la empleada por los sistemas GNSS calculada a partir de las coordenadas tridimensionales ECEF y los parámetros del elipsoide de referencia (el semieje mayor y la excentricidad, principalmente).

Actualmente el elipsoide utilizado por convención para GNSS y SIRGAS, es el GRS80 (Geodetic Reference System 1980). La conversión de coordenadas geocéntricas $[x, y, z]$ a elipsoidales $[\varphi, \lambda, h]$ debe hacerse utilizando el **elipsoide GRS80** (Drewes, y otros, 2011). Los parámetros de este elipsoide son los siguientes:

- **Semieje mayor:** $a = 6378137.00 \text{ m}$
- **Cte. Gravitacional Geocéntrica:** $GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$
- **Factor forma dinámica:** $J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$
- **Velocidad angular:** $\omega = 7\,292\,115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS:

- Primera excentricidad: $e^2 = 0.006694380022900$
- Achatamiento: $f = 0.003352810681180$
- Excentricidad lineal $\epsilon = 521854.0097 \text{ m}$

PARÁMETROS FÍSICOS:

- Potencial normal del elipsoide: $U_0 = 6\,263\,686.085 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$
- Gravedad normal en el ecuador: $= 9.7803267715 \text{ m s}^{-2}$
- Gravedad normal en el polo: $= 9.8321863685 \text{ m s}^{-2}$
- Radio entre la aceleración centrífuga y la gravedad normal en el Ecuador $m = 0.00044978600308$

ALTURA ORTOMÉTRICA

Se define como valor promedio de la gravedad real medida a lo largo de la línea de la plomada entre el geoide y el punto de observación. Distancia, sobre la línea de la plomada real, entre el geoide y el punto de observación.

Su superficie de referencia ($H^0 = 0$) es el Geoide, definido como: $H^0 = h - N$ donde h es la altura elipsoidal y N es la ondulación geoidal.

A modo de ejemplo, la siguiente tabla muestra algunas diferencias entre elipsoide y geoide, debido a que una superficie es física y la otra geométrica:

| Diferencias | ELIPSOIDE | GEOIDE |
|------------------------|--------------------|----------------------|
| Radio ecuatorial: | a | a |
| Aplanamiento: | J2 | C2 |
| Velocidad de rotación: | ω | ω |
| Masa: | M | M |
| Distribución: | Homogénea de masas | Heterogénea de masas |
| Campo de gravedad: | Teórico | Real |
| Campo de Potencia | Teórico | Real |
| Variación Radial: | Constante | Desconocida |
| Superficie de nivel: | Elipsoide | Geoide |

Tabla 6. Comparación entre Elipsoide y Geoide Fuente: Elaboración Propia.

ALTURA NORMAL

Se define como el valor medio de la gravedad normal a lo largo de la línea de la plomada teórica, entre el cuasi geoide y la superficie terrestre. Es la distancia, sobre la línea de la plomada teórica, entre el cuasi geoide y el punto de observación.

Su superficie de referencia es el Cuasi Geoide, definido como $H^N = h - \zeta$ donde h es la altura elipsoidal y ζ es la altura anómala. **Las alturas normales son determinables unívocamente.** Su precisión depende de las diferencias de nivel medidas, de los valores de gravedad observada o interpolada, de la latitud del punto de medición y de la precisión de la fórmula de gravedad teórica.

El cálculo del cuasigeoide se establece en la siguiente ilustración:

Cálculo del geoide (cuasigeoide)

Potencial anómalo:

$$T = W - U = (V + \Phi) - (u + \Phi)$$

$$= V - U$$

V : potencial gravitacional verdadero (Tierra)
 U : potencial gravitacional teórico o normal (elipsoide)
 Φ : potencial centrífugo

Teorema de Bruns:

$$N = \frac{T}{\gamma}$$

T : Potencial anómalo,
 γ : Gravedad teórica (elipsoide)

Ilustración 7. Cálculo del Cuasigeoide Fuente: Drewes, y otros, 2011.

ALTURA DINÁMICA

γ^{ϕ} es el valor de la gravedad normal sobre el elipsoide para una latitud ϕ específica (normalmente: $\phi= 45^{\circ}$), con respecto a este valor se define la altura dinámica. Números geopotenciales escalados. Así $H^{DN} = \frac{C}{\gamma^{\phi}}$

GEOIDE - CUASI GEOIDE

El geoide y el cuasi geoide son idénticos en las zonas oceánicas ($H^g = H^c=0$). Allí, son realizados (materializados) mediante la superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre que coincide con la superficie no perturbada del mar (estado de equilibrio que alcanzan las aguas marinas al estar bajo la influencia exclusiva de la fuerza de gravedad terrestre). **En las áreas continentales (tierra sólida), el geoide y el cuasigeoide se diferencian en:**

$$N - \zeta = \frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} H^g = H^N - H^g$$

\bar{g} es el valor medio de la gravedad real, a lo largo de la línea de la plomada, entre el geoide y el punto de cálculo ubicado sobre la superficie terrestre.

$\bar{\gamma}$ es el valor medio de la gravedad teórica, a lo largo de la línea de la plomada del campo de gravedad normal, entre el elipsoide y el teluroide, o entre el cuasigeoide y el punto de cálculo ubicado sobre la superficie terrestre.

$\bar{g} - \bar{\gamma}$ corresponde, en muy buena aproximación, a la anomalía de Bouguer. A través de esta ecuación puede derivarse el geoide del cuasigeoide o viceversa. Las hipótesis utilizadas para el cálculo del geoide corresponden con el método de Helmert para el cálculo de las alturas ortométricas (Drewes, y otros, 2011).

MÉTODO GEOMÉTRICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL (CUASI) GEOIDE

1. Las alturas elipsoidales h deben referirse al mismo elipsoide utilizado en el cálculo del (cuasi)geoide (N, ζ) .
2. Las alturas ortométricas H o normales derivadas H de nivelación deben incluir las reducciones gravimétricas apropiadas.
3. Si se trabaja con el geoide, geoide N y alturas ortométricas H deben ser calculados con las mismas hipótesis referentes a la densidad de las masas terrestres internas y el gradiente vertical de la gravedad.
4. Las alturas $h, H, N (\zeta)$ deben estar en el mismo sistema de mareas.

2.7 MODELOS GEOIDALES

2

IDE Chile

Actualmente el Centro Internacional de Modelos Globales de la Tierra pone a disposición del usuario diferentes Modelos Globales de Geopotencial, para poder analizar las diferencias gravitatorias, en forma de modelos geoidales, en el siguiente enlace http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime, alguno de ellos probado ya en Chile con éxito (III Congreso Geoespacial Geocom, 2017). Previo al análisis de esas diferencias vamos a definir una serie de conceptos.

El potencial gravitacional verdadero v se determina a partir de diferentes tipos de observaciones del campo de gravedad (drewes, y otros, 2011), estas pueden ser:

- mediciones directas sobre la superficie de la Tierra (gravimetría terrestre, marina y aérea, números geopotenciales, deflexiones de la vertical, etc.)
- análisis del movimiento perturbado de satélites (método dinámico)
- mediciones directas del campo de gravedad desde satélites (satélite a satélite tracking - CHAMP, GRACE, gradiometría - GOCE)



V es representado usualmente por una sumatoria de funciones (llamadas funciones armónicas esféricas) que describen diferentes componentes espectrales del potencial:

- Mediciones satelitales proveen longitudes de onda larga ~ > 500 km. Estas representan la influencia gravitacional de rasgos globales terrestres, p. ej. aplanamiento de la Tierra, cambio de densidades de masa entre las capas terrestres, dorsales oceánicas, zonas de fuerte actividad tectónica, etc.
- Mediciones terrestres regionales proveen longitudes de onda media ~ 200 km. Estas representan la influencia gravitacional de rasgos regionales, p. ej. cadenas montañosas, áreas sedimentarias lacustres y fluviales continentales, etc.
- Mediciones terrestres de alta densidad proveen longitudes de onda corta < ~ 50m km. Estas representan rasgos locales, p. ej. relieve, cuencas sedimentarias, etc.

EGM-96

Fue desarrollado en 1996 por las organizaciones NASA, GSFC, NIMA (National Imagery and Mapping Agency) y la Universidad Estatal de Ohio. Los datos utilizados para el cálculo son:

- **Datos de satélites y datos altimétricos del TOPEX; GEOSAT Y ERS-1**
- **Anomalías de gravedad 30'x30' derivadas de la misión geodésica GEOSAT**
- **Datos de gravedad terrestre 30'x30' de los archivos del NIMA**
- **Modelo topográfico global**

Para la ejecución del cálculo se realizó un ajuste mínimo cuadrático obteniendo un grado 70, una combinación diagonal de bloques para ecuaciones normales hasta el grado 359 y fórmulas de cuadratura alcanzando un grado de 360.

La gran ventaja de este proyecto fue que por primera vez se utilizaron conjuntos nuevos de datos de gravedad de diferentes regiones del mundo para desarrollar un modelo geopotencial global.

Los Parámetros Elipsoidales Correspondientes Al Modelo Son:

- $a = 6378136.46 \text{ m}$
- $\omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$
- $1/a = 298.25765$
- $GM = 3986004.415 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}^2$

Las calibraciones realizadas sobre el error cometido en la determinación de este geoide/modelo geopotencial proporciona los errores medios cuadráticos siguientes, en áreas continentales 28 cm, en latitudes comprendidas entre 66° y 82° , 21 cm, considerando toda la superficie terrestre 18 cm, en áreas oceánicas 12 cm y en latitudes inferiores a 66° solo 11 cm.

EGM-08

Es un modelo armónico esférico del potencial gravitatorio de la Tierra desarrollado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) utilizando los datos de GRACE y también un conjunto global de anomalías terrestres (terrestres y marinas) de gravedad de aire libre de un área media equivalente a una grilla de 5 minutos de arco.

Este modelo está completo para el grado y orden 2159 y contiene coeficientes adicionales hasta el grado 2190 y orden 2159. Sobre las áreas cubiertas con datos de gravedad de alta calidad, las discrepancias entre las ondulaciones del geoide EGM2008 y los valores independientes GPS / Nivelación son del orden de ± 5 a ± 10 cm.

Los datos de nivelación de los diferentes países consisten generalmente en alturas en su sistema nacional de altura, que pueden diferir de un país a otro (alturas ortométricas, alturas normales), pero también en la forma en que están ligados al Nivel Medio del Mar a través de un mareógrafo (datum vertical). El acceso a los datos es gratuito y se pueden conseguir desde la página: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.html

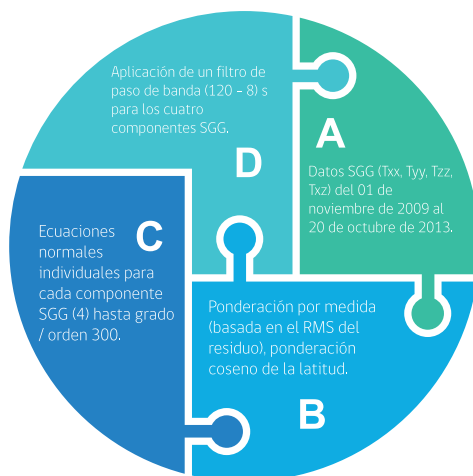
Una de las aplicaciones de este modelo es el cálculo del geoide y hasta el momento se han reportado buenos resultados entre su modelo geoide y los datos GNSS y datos de nivelación en diferentes lugares, por ejemplo, su desviación estándar obtenida por (TROJANOWICS, y otros, 2015) es de 27 mm.

EIGEN-6C4

Modelo EIGEN-6C4 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques) modelo de campo de gravedad global estático combinado hasta el grado y orden 2190, en término de armónicos esféricos. Ha sido elaborado por GFZ Potsdam y GRGS Toulouse, correspondiente a la última versión de la Serie EIGEN-6C, la cual contiene los datos SGG de la misión GOCE.

Los Datos Utilizados Para Eigen-6c4 Son:

- Datos **LAGEOS-1/2 SLR: (1985-210) GRGS** libera dos ecuaciones normales de grado y orden 30.
- Datos **GRACE GPS-SST** y banda K: (Feb 2003-Dec 2012) GRGS libera tres ecuaciones normales al grado 175.
- Datos **GOCE**:



- DATOS DE LA SUPERFICIE:**
- Altimetría sobre los océanos, EGM2008 (Pavlis et al., 2012) sobre continentes.
 - Solución diagonal de bloque para grados 371-2190.

La combinación de los diferentes conjuntos de datos de satélites y superficies se ha hecho mediante una combinación limitada de bandas de ecuaciones normales (hasta el grado máximo 370), que se generan a partir de ecuaciones de observación para los coeficientes armónicos esféricos. La solución resultante al grado / orden 370 se ha extendido al grado / orden 2190 mediante una solución de diagonal de bloque usando la cuadrícula de datos de anomalía de gravedad global DTU10.

Desde la presentación del estudio (TROJANOWICS, y otros, 2015) se obtienen los parámetros de precisión básica del modelo EIGEN-6C4, donde la desviación estándar correspondiente es de 25 mm.

LA SIGUIENTE TABLA ES UNA COMPARACIÓN A MODO DE SÍNTESIS DE LOS TRES MODELOS GEOIDALES VISTOS EN EL ANTERIOR APARTADO.

| MODELO | AÑO DE DESARROLLO | GRADO Y ORDEN | SEMI EJE MAYOR (a)GM | DATOS USADOS |
|-----------|-------------------|---------------|---|---|
| EGM96 | 1996 | 360/360 | 6378136,46 m $3,986004415 \times 10^{14}$ m ³ /s ² | -TOPEX; GEOSAT y ERS-1. -Anomalías y datos de gravedad para una grilla de 30'x30'. -Modelo topográfico global. |
| EGM2008 | 2008 | 2190/2159 | 6378137,00 m $3,986004418 \times 10^{14}$ m ³ /s ² | -ITG-GRACE03S (180/180). -Anomalías de gravedad al aire libre para una grilla de 5'x5'. |
| EIGEN-6C4 | 2014 | 2190/2190 | 6378136,46 m $3,986004415 \times 10^{14}$ m ³ /s ² | - LAGEOS(30) y GRACE (130) -Datos GOCE SGG Txx, Tyy, Tzz, Txz (235) -Anomalías de gravedad al aire libre para una grilla de 2'x2'.. |

Tabla 7. Comparación de parámetros de Modelos Geoidales fuente: TROJANOWICS, y otros, 2015.

2.8 CÓDIGOS EPSG Y SU UTILIZACIÓN EN CHILE

EPSG es el acrónimo de European Petroleum Survey Group, organización relacionada con la industria petrolífera. Este organismo estuvo formado por especialistas en geodesia, topografía y cartografía aplicadas al área de exploración y desarrolló un repositorio de parámetros geodésicos que contiene información sobre sistemas (marcos) de referencia antiguos y modernos (geocéntricos), proyecciones cartográficas y elipsoides de todo el mundo. Las tareas del EPSG son desarrolladas en este momento por el Subcomité de Geodesia del Comité de Geomática de la International Association of Oil and Gas Producers (IOGP), aunque el conjunto de datos continúa denominándose EPSG.

En cuanto a la importancia de los códigos EPSG, cabe señalar que son ampliamente utilizados en la definición de datos de posición en los Sistemas de Información Geográfica, por lo que es muy útil conocerlos para todas aquellas actividades que requieran gestionar o manipular datos espaciales en ambientes digitales. En la siguiente tabla se muestran los códigos EPSG utilizados en Chile, según sistema de referencia y de coordenadas empleado:

| Códigos EPSG | Datums geodésicos | SRC Geocéntrico | SRC Geográficos | SRC Proyectados |
|---|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 8719: Ester Island 1967 | ✓ | | | |
| 8254: Hitos XVIII 1963 | ✓ | | x | |
| 8248: Provisional South American Datum 1956 | ✓ | | | |
| 1084: SIRGAS-CHILE | ✓ | | x | |
| Sin Código: IGb06 | | ✓ | | |
| 7789: ITRF2014 | | ✓ | | |
| 5332: ITRF2008 | x | ✓ | | x |
| 5358: SIRGAS-Chile | | ✓ | | |
| 4719: Easter Island 1967 | | | ✓ | |
| 4254: Hito XVIII 1967 | | | ✓ | |
| 4248: PSAD56 | | | ✓ | x |
| 5359: SIRGAS-Chile | | | ✓ | |
| 5380: SIRGAS-Chile | | | ✓ | |
| 4979: WGS 84 | x | x | ✓ | |
| 24878: PSAD56 / UTM zone 18s | | | | ✓ |
| 24879: PSAD56 / UTM zone 19s | | | | ✓ |
| 5382: SIRGAS-Chile / UTM zone 18s | | | x | ✓ |
| 5381: SIRGAS-Chile / UTM zone 19s | | | | ✓ |
| 32718: WGS 84 / UTM zone 18s | | | | ✓ |
| 32719: WGS 84 / UTM zone 19s | | | | ✓ |

Tabla 8. Códigos EPSG para Chile Fuente: Elaboración Propia.

Los mencionados códigos geodésicos se encuentran compilados en una base de datos en formato Microsoft Access que se puede descargar en <http://www.epsg.org/>, ingresando a la sección Geodetic Dataset ubicada en el menú de la página principal.

Es importante mencionar que la estructura de la base de datos es compatible con la norma ISO 19111, la cual está referida a los sistemas de referencia espaciales por coordenadas y dicha base de datos es actualizada permanentemente (Ivars, y otros, 2011).

3 CONVERSIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

Es importante no confundir conversión de coordenadas, con transformación de coordenadas. **Convertir** es cambiar de un sistema de coordenadas a otro, pero siempre en el mismo sistema de referencia, sin embargo, **Transformar** coordenadas es cambiar de un sistema de referencia a otro, generalmente mediante transformaciones Helmert3D, para lo cual las coordenadas han debido de ser previamente convertidas a ECEF en los respectivos sistemas.

CONVERSIÓN DE COORDENADAS

Una conversión de coordenadas es el cambio de coordenadas basado en una relación uno a uno, desde un sistema de coordenadas a otro basado en el mismo datum. En una conversión de coordenadas los valores de los parámetros son exactos (constantes). Por ejemplo, entre sistemas de coordenadas geodésicas y cartesianas, o entre coordenadas geodésicas y coordenadas proyectadas, o cambios de unidades tales como de radianes a grados o de pies a metros. El mejor ejemplo conocido de conversión de coordenadas es una proyección de mapa (ISO, Instituto Nacional de Normalización, 2011). Una proyección cartográfica es una conversión de coordenadas desde un sistema de coordenadas geodésicas a uno plano.

TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

Se define a las transformaciones de coordenadas como un cambio de coordenadas desde un sistema de referencia de coordenadas a otro sistema de referencia de coordenadas basado en un datum diferente a través de una relación uno a uno. Una transformación de coordenadas difiere de una conversión de coordenadas en que los valores de los parámetros de transformación de coordenadas se obtienen empíricamente a partir de un conjunto de puntos con coordenadas conocidas en ambos sistemas de referencia de coordenadas; por consiguiente, puede haber varias estimaciones (o realizaciones) diferentes.

Una transformación de coordenadas o una conversión de coordenadas opera en coordenadas, no en sistemas de referencia de coordenadas (ISO, Instituto Nacional de Normalización, 2011).

3.1 ARMONIZACIÓN DE MARCOS DE REFERENCIA DE DISTINTAS ÉPOCAS

En el apartado 2.3 se dejaba constancia del cálculo semanal de SIRGAS-CON (Drewes, y otros, 2011), debido a que:

- Las coordenadas de las estaciones sobre la superficie terrestre se ven afectadas por fenómenos seculares (p.ej. tectónica de placas), estacionales (p.ej. períodos de lluvia) y esporádicos (p.ej. terremotos), que las modifican en cantidades mayores que el nivel de precisión requerido (~ mm)
- Es necesario hacer un seguimiento permanente de los marcos de referencia para poder modelar el «movimiento» de sus estaciones. Por tanto, ellos deben:
 - Estar conformados por estaciones de operación continua
 - Ser procesados también de manera continua.

Lo anterior provoca que en ambientes con fuerte actividad sísmica como lo es Chile, se deba tener en cuenta el uso de velocidades en el procesamiento de datos GNSS (SIRGAS, 2017). El procesamiento preciso de datos GNSS requiere que las coordenadas de las estaciones de referencia estén dadas en la misma época en que se adelanta la medición y que estén asociadas al mismo marco de referencia de las órbitas satelitales. Las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS de operación continua (SIRGAS-CON) satisfacen estas dos condiciones y, en consecuencia, se recomienda utilizar estos puntos (en combinación con sus coordenadas semanales) como estaciones de referencia en los levantamientos GNSS en la región SIRGAS. Si la estación base en un levantamiento dado no es de operación continua, el procedimiento a seguir incluye:

1. Transformación de las coordenadas de referencia (puntos fiduciales) al ITRF al cual se refieren las efemérides satelitales, actualmente al ITRF2014 (IGS14) empleando los parámetros de transformación publicados por el ITRF http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php.

2. Traslado de las coordenadas fiduciales desde la época de referencia a la época de observación. Es decir, las coordenadas asociadas a RGN SIRGAS Chile Realización 2 deben trasladarse desde 2016.0 al día en que se hace el levantamiento GNSS, por ejemplo 2017.50. Igualmente, las coordenadas referidas a RGN SIRGAS Chile Realización 1 deben trasladarse desde 2002.01. Dicho traslado se hace, en notación matricial, mediante:

$$[X Y Z]_t = [X Y Z]_{t_0} + [t - t_0 \ t - t_0 \ t - t_0] [V_x \ V_y \ V_z]$$

siendo $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ las coordenadas en la época deseada, $X(t_0)$, $Y(t_0)$, $Z(t_0)$ las coordenadas en la época de referencia, $(t - t_0)$ el intervalo de tiempo transcurrido entre la realización del sistema de referencia y el levantamiento GNSS y V_x , V_y , V_z las velocidades de la estación de referencia.

Las velocidades V_x , V_y , V_z de las estaciones de referencia deben obtenerse preferiblemente del análisis de posicionamientos GNSS repetitivos que cubran un intervalo mínimo de tiempo de dos años. Si las velocidades de la estación de referencia no son conocidas, puede utilizarse el modelo de velocidades para SIRGAS VEMOS.

3. Una vez las coordenadas de referencia se encuentran en la época de observación, se realiza el procesamiento de los puntos GNSS nuevos.

4. Las coordenadas de los puntos nuevos se trasladan de la época de observación a la época de referencia (ver ítem 2), ya sea utilizando las velocidades conocidas de un punto muy cercano, o las velocidades del modelo VEMOS.

$$[X Y Z]_{t_0} = [X Y Z]_t - [t - t_0 \ t - t_0 \ t - t_0] [V_x \ V_y \ V_z]$$

5. Finalmente, las coordenadas de los puntos nuevos deben transformarse al marco de referencia oficial. En todos los casos las coordenadas de los puntos nuevos deben almacenarse **junto con los valores de velocidad utilizados para trasladarlas a la época de referencia y estas mismas velocidades deben aplicarse para llevar las coordenadas hacia adelante cuando los puntos nuevos sirvan de base en levantamientos GPS posteriores.** Aquellos puntos cuyas velocidades no han sido derivadas de diferentes ocupaciones GNSS (o de operación continua), sino interpoladas a partir del modelo VEMOS, no pueden clasificarse como estación de referencia.

Debe tenerse presente que los efectos cosmicos que generan discontinuidades (saltos) en la posición de las estaciones deben ser considerados con cálculos adicionales. (Procesamiento de información GPS con relación a marcos de referencia de épocas diferentes, 2004).

3.2 PARÁMETROS PARA LA TRANSFORMACIONES ENTRE SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERENCIA

Los métodos de transformación en general se obtienen mediante el uso de modelos geométricos que permiten la realización de este proceso geodésico fundamental. Los avances tecnológicos permiten que estos modelos de transformación sean integrados en distintos tipos de software, como los tipo CAD o aquellos aplicables a los Sistemas de Información Geográfica, tales como ArcGIS de Esri o el software libre QGIS. En el caso de ArcGIS es posible definir el método de transformación e incluso el valor de cada parámetro, en el caso de QGIS el proceso es el mismo, con la salvedad de que los parámetros de transformación se introducen en diferente ubicación.

CÁLCULO DE PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN

Para estimar Parámetros de Transformación, se necesitan datos de puntos con coordenadas referidas a ambos sistemas, lo que facilita que matemáticamente existan mayor cantidad de grados de libertad, realizándose la estimación de los parámetros necesarios utilizando el método de mínimos cuadrados, en modelos H3D, por ejemplo.

Es posible modelar la relación espacial entre sistemas de referencia tridimensionales (3D) considerando 7 parámetros (3 rotaciones, 3 traslaciones y 1 factor de escala) o simplificadaamente utilizando 3 traslaciones. Para tipos de sistemas bidimensionales (2D), por ejemplo, sistemas proyectivos cartográficos UTM, pueden ser modelados por 4 parámetros (2 traslaciones, 1 rotación y 1 factor de escala).

MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN DE TRES PARÁMETROS

El método de transformación de datum más simple es una transformación geocéntrica, o de tres parámetros. La transformación geocéntrica modela las diferencias entre dos datums en el sistema de coordenadas cartesianas X Y Z o 3D. Un datum se define con su centro en 0,0,0. El centro del otro datum se define a una determinada distancia en (dx , dy , dz o T_x , T_y , T_z) metros.

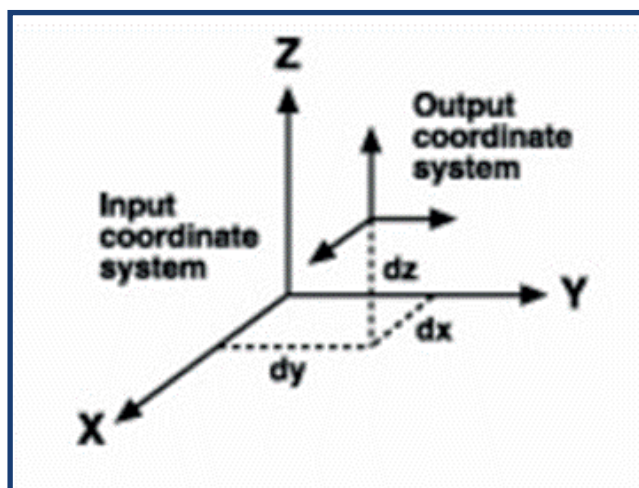


Ilustración 8. Representación de desplazamiento en transformación de 3 parámetros, Fuente: <http://desktop.arcgis.com>

Habitualmente, los parámetros de transformación se definen en el sentido "desde" un datum local "hasta" el Sistema Geodésico de tipo global o continental. El método matemático que representa este método es:

$$[X Y Z]_{GLOBAL} = [T_x T_y T_z] + [X Y Z]_{LOCAL}$$

Este tipo de transformación es la oficial empleada por el IGM (IGM.CHILE, 2008) para transformar coordenadas SIRGAS a PSAD56 y SIRGAS a SAD69, cuyo ámbito de aplicación y parámetros son respectivamente:

| Transformación de SIRGAS a PSAD-56 | | |
|--|--|--|
| Lat. inicial 17° 30' Lat. final 26° 00' | Lat. inicial 26° 00' Lat. final 36° 00' | Lat. inicial 36° 00' Lat. final 44° 00' |
| Δ X = 302 m | Δ X = 328 m | Δ X = 352 m |
| Δ Y = -272 m | Δ Y = -340 m | Δ Y = -403 m |
| Δ Z = 360 m | Δ Z = 329 m | Δ Z = 287 m |

| Transformación de PSAD-56 a SIRGAS | | |
|--|--|--|
| Lat. inicial 17° 30' Lat. final 26° 00' | Lat. inicial 26° 00' Lat. final 36° 00' | Lat. inicial 36° 00' Lat. final 44° 00' |
| Δ X = -302 m | Δ X = -328 m | Δ X = -352 m |
| Δ Y = 272 m | Δ Y = 340 m | Δ Y = 403 m |
| Δ Z = -360 m | Δ Z = -329 m | Δ Z = -287 m |

Tabla 9. Parámetros de Transf. de SIRGAS a PSAD56 y Viceversa. Fuente: IGM.CHILE, 2008.

| Transformación de SIRGAS a SAD-69 | | | |
|--|--|--|--|
| Lat. inicial 17° 30' Lat. final 32° 00' | Lat. inicial 32° 00' Lat. final 36° 00' | Lat. inicial 36° 00' Lat. final 44° 00' | Lat. inicial 44° 00' Lat. final 56° 00' |
| Δ X = 59 m | Δ X = 64 m | Δ X = 72 m | Δ X = 79 m |
| Δ Y = 11 m | Δ Y = 0 m | Δ Y = -10 m | Δ Y = -13 m |
| Δ Z = 52 m | Δ Z = 32 m | Δ Z = 32 m | Δ Z = 14 m |

| Transformación de SAD-69 a SIRGAS | | | |
|--|--|--|--|
| Lat. inicial 17° 30' Lat. final 32° 00' | Lat. inicial 32° 00' Lat. final 36° 00' | Lat. inicial 36° 00' Lat. final 44° 00' | Lat. inicial 44° 00' Lat. final 56° 00' |
| Δ X = -59 m | Δ X = -64 m | Δ X = -72 m | Δ X = -79 m |
| Δ Y = -11 m | Δ Y = 0 m | Δ Y = 10 m | Δ Y = 13 m |
| Δ Z = -52 m | Δ Z = -32 m | Δ Z = -32 m | Δ Z = -14 m |

Tabla 10. Parámetros de Transf. de SIRGAS a SAD69 y Viceversa. Fuente: IGM.CHILE, 2008.

La precisión de estos parámetros está en el orden de los ± 5 metros según (IGM,CHILE, 2008) pero que según (Báez, y otros, 2006) puede llegar a diferencias de ± 20 metros, estando por tanto esta transformación limitada a escalas entre 1:25.000-1:100.000 y menores, siguiendo las recomendaciones de la ASPRS para que el error en la transformación no supere la precisión de la cartografía.

CÓDIGOS EPSG

La estandarización necesaria en las IDE, ha generado que las transformaciones de las Tablas 9. y 10. cuenten con códigos EPSG también:

| Transformación datum geodésicos | Código EPSG | ϕ Inicial | ϕ Final |
|---------------------------------|-------------|----------------|--------------|
| Eastern Island 1967 a WGS84 | 15806 | - | - |
| Hito XVIII 1963 a WGS84 | 1892 | - | - |
| PSAD56 a WGS84 (1) | 6971 | 17°30' | 26°00' |
| PSAD56 a WGS84 (2) | 6972 | 26°00' | 36°00' |
| PSAD56 a WGS84 (3) | 6973 | 36°00' | 44°00' |
| SAD69 a WGS84 (1) | 6974 | 17°30' | 32°00' |
| SAD69 a WGS84 (2) | 6975 | 32°00' | 36°00' |
| SAD69 a WGS84 (3) | 6976 | 36°00' | 44°00' |
| SAD69 a WGS84 (4) | 6977 | 44°00' | 56°00' |
| SIRGAS-Chile to WGS84 | 5375 | - | - |
| Psad56 a SIRGAS (1) | 6949 | 17°30' | 26°00' |
| Psad56 a SIRGAS (2) | 6950 | 26°00' | 36°00' |
| Psad56 a SIRGAS (3) | 6951 | 36°00' | 44°00' |
| Sad69 a SIRGAS (1) | 7448 | 17°30' | 32°00' |
| Sad69 a SIRGAS (2) | 6968 | 32°00' | 36°00' |
| Sad69 a SIRGAS (3) | 7449 | 36°00' | 44°00' |
| Sad69 a SIRGAS (4) | 6970 | 44°00' | 56°00' |

Tabla 11. Códigos EPSG de transformación de Datum Fuente: Elaboración Propia

Siendo como se ha visto, la precisión de esta transformación pobre en lo que se refiere a escalas mayores a 1:25.000.

MODELADOS DE DISTORSIÓN

Según (Matesanz, 2012), el cambio de datum debería poder llevarse a cabo mediante traslación, rotación y factor de escala, es decir mediante una transformación de 7 o 10 parámetros. Las transformaciones descritas anteriormente se basan en esta característica, sin embargo, la materialización de la realidad terreno en cada caso provoca ligeros cambios de forma a lo largo de la red, fundamentalmente provocado por el uso de los métodos de medida descritos anteriormente, criterios de ajuste diferentes, errores de medida, etc; por tanto, este hecho no puede ser modelado mediante una simple transformación conforme. Un procedimiento ya realizado por otros países consiste en seguir secuencialmente los siguientes pasos:

1. Calcular la mejor transformación conforme posible entre los dos datums, esto eliminaría la diferencia entre los mismos debida únicamente al cambio de Sistema Geodésico de Referencia, pero no tendría en cuenta el cambio de forma.
2. Obtener las diferencias entre el valor en el datum de llegada y calculado a partir de esta transformación conforme. Este residuo representaría la distorsión de la red.
3. Modelar la distorsión.
4. Obtener la transformación conjunta "conformidad + modelo de distorsión"

La forma de modelar la distorsión generalmente ha sido llevada a cabo por cuatro técnicas:

1. Superficies de Mínima Curvatura (SMC).
2. Colocación Mínimo Cuadrática (CMC).
3. Regresión Múltiple (MRE).
4. Rubber-Sheeting (RS).

Comentar, por último, que para la realización de este procedimiento se debe contar con la mayor cantidad de puntos en ambos sistemas, siendo las fuentes actuales de datos el IGM y el MBN.

SOLUCIÓN INTERMEDIA CON MDT

Debido a lo anterior, actualmente se recomienda emplear como solución intermedia hasta que se cuente con parámetros calculados mediante modelados de distorsión; un software ágil que tenga incorporadas soluciones de algoritmos de transformaciones de semejanza 2D y 3D, junto con una calculadora geodésica completa, con acceso a códigos EPSG.

En la actualidad el software que cumple con estas directrices sería el desarrollado por la empresa APLITOP, y denominado MDT. El módulo que debería adquirir sería exclusivamente MDT-Topografía, el cual además de contar con las herramientas anteriores, funciona en entorno CAD, siendo así fácilmente implementable en pequeñas municipalidades e instituciones debido a que su curva de aprendizaje requiere poco tiempo de empleo, para adquirir un buen uso del mismo. **Las transformaciones implementadas en el mismo son:**

- Transformación 2D.
- Helmert 2D.
- Afín 2D.
- Proyectiva 2D
- Helmert 3D.
- Helmert 2D + Desplazamiento Vertical.
- Helmert 2D + Desplazamiento Vertical y Pendientes

Si a futuro se generase un modelo de distorsión, en formato por ejemplo NTV2, este software también lo podría incorporar, siendo por tanto una adquisición de bajo costo y que cubriría las necesidades que requieren, aunque sin solventar el problema cartográfico.

4 PROCEDIMIENTO DE TRASFORMACIÓN EN SOFTWARE SIG

Las siguientes metodologías y videos, muestran procedimientos para la transformación de sistemas de referencia a SIRGAS Chile en los software ArcGIS y QGIS. Estos procedimientos son utilizables en escalas inferiores a 1:25.000.

4.1 PROCEDIMIENTO EN ARCGIS

En ArcGIS (versión 10.6.1), inicialmente si es un proyecto nuevo, se debe definir el sistema de referencia, haciendo clic derecho en "Layers" -> "Properties" y en la pestaña "Coordinate System", aquí se podrá definir PSAD56, SAD69, WGS84, SIRGAS2000, SIRGAS-CHILE, etc., ya sea con coordenadas geográficas o proyectadas de acuerdo a los datos de entrada.

Cabe destacar si los datos de entrada ya traen un archivo PRJ, es decir, un sistema de referencia definido, no habría que realizar el primer punto.

Para realizar las transformaciones se debe acceder a la herramienta ArcToolbox e ingresar a las siguientes pestañas "Data Management Tools" -> "Projections and Transformations" -> "Project"

Luego dentro del menú "Project" se definen las entradas y salidas para poder realizar la transformación y conversión entre sistemas. Para transformar los sistemas de referencia a SIRGAS Chile coordenadas geográficas se debe considerar el EPSG 5360.

- "Input Dataset of Feature Class" se define el archivo vectorial a transformar.
- "input Coordinate System (optional)" se ingresa el datum de entrada.
- "Output Dataset of Feature Class" se define en que ruta se guardará el nuevo vectorial transformado.
- "Output Coordinate System" se define el datum de salida.
- "Geographic Transformation (optional)" se define la transformación a realizar según el nombre correspondiente a los códigos EPSG.

Ver ejemplo, transformación de PSAD56 UTM a SIRGAS Chile GCS:

<https://drive.google.com/file/d/1tCxsHH68AmIckRoZvR5-yH-u9Sck5NQL/view?usp=sharing>

4.2 PROCEDIMIENTO EN QGIS

En QGIS (3.4.1) inicialmente si es un proyecto nuevo se define la proyección. En la interfaz se selecciona "Proyecto" y luego "Propiedades"

Se debe seleccionar la pestaña que indica SRC y en el segundo recuadro definir el sistema de referencia, ya sea, con coordenadas geográficas o proyectadas de acuerdo a los datos de entrada.

Luego de importar las capas, se vuelve a ingresar a "propiedades" en donde fue configurado el Sistema de Referencia del proyecto y en SRC --> "transformación de datum" se agrega la transformación de coordenadas a utilizar.

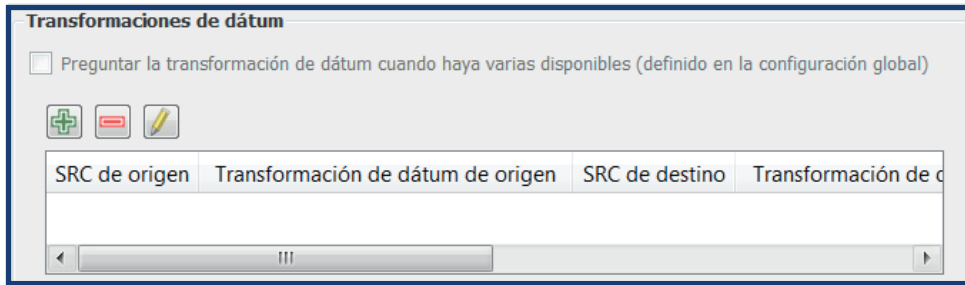


Ilustración 9: Transformación de Datum. Fuente: Elaboración propia.

Al seleccionar el símbolo de (+) aparece la siguiente pantalla, la cual se configurará según la transformación requerida

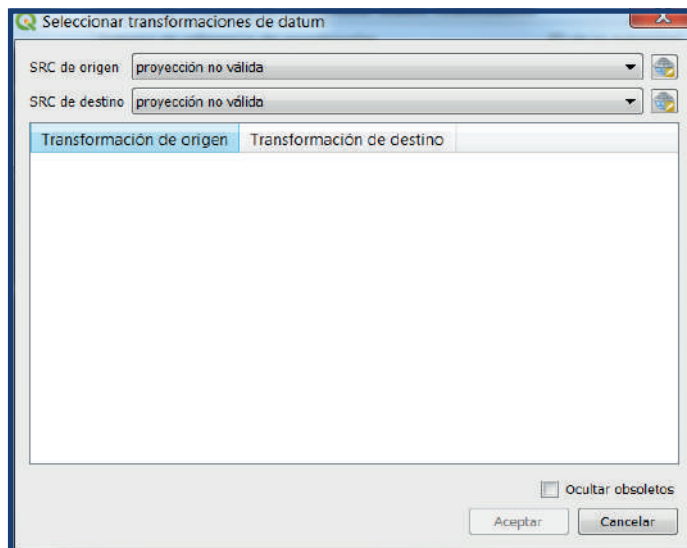


Ilustración 10: Transformación de Datum. Fuente: Elaboración propia.

En la cual definiremos el SRC de origen y de destino, además de la transformación a emplear según los códigos EPSG. Para transformar los sistemas de referencia a SIRGAS Chile coordenadas geográficas se debe considerar el EPSG 5360.

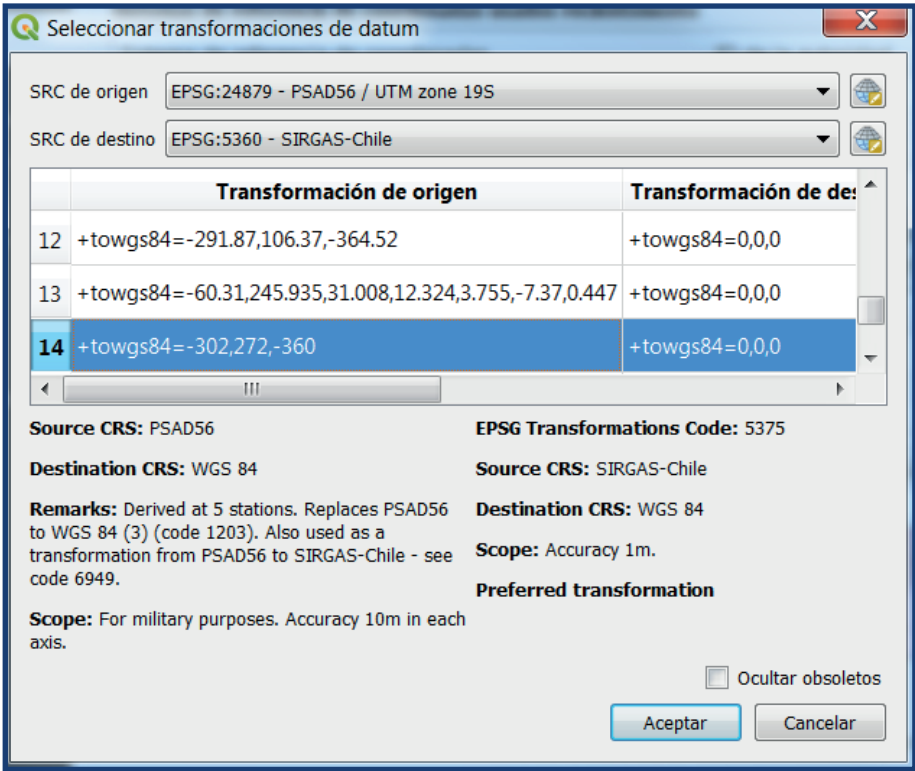
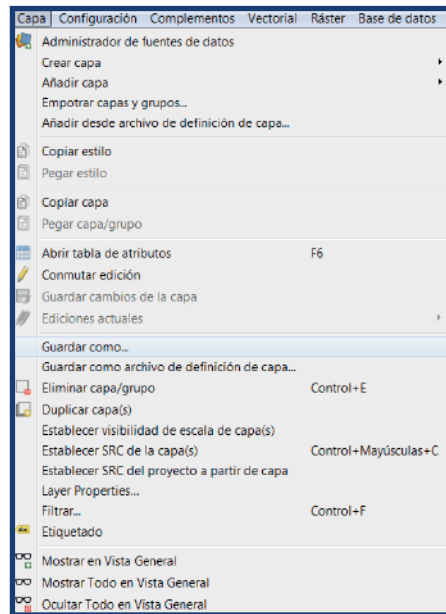


Ilustración 11: Transformación de Datum, Fuente: Elaboración propia.

Para poder realizar las conversiones y transformaciones de coordenadas en QGIS es necesario guardar la capa con un nuevo sistema de referencia, para esto ingresamos al menú “Capa” y seleccionamos en “Guardar Como”



Se nos abrirá la siguiente ventana a configurar, en la cual se definirá el nuevo sistema de referencia.

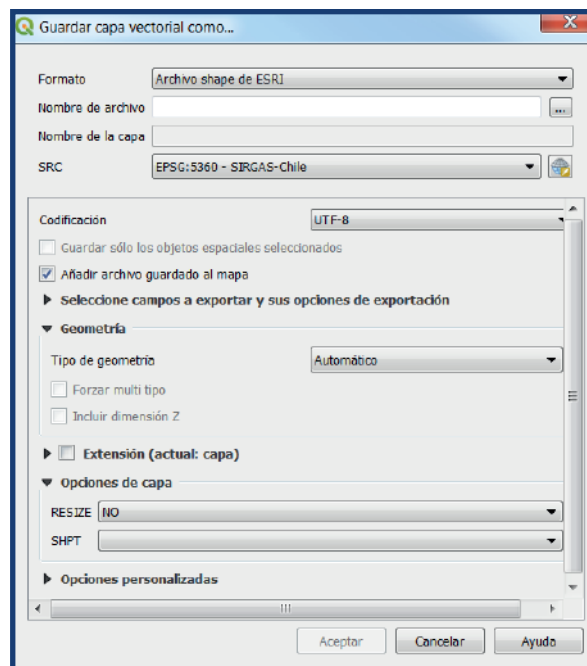


Ilustración 13: Configuración para definir SRC. Fuente: Elaboración propia.

-En "Formato", seleccionaremos "Archivo Vectorial de ESRI"

-En "Nombre del Archivo", se debe seleccionar la carpeta en donde se guardará y el nombre de este.

-En "SRC", para definir el sistema de referencia, se debe seleccionar el símbolo de sistema en la parte derecha para que se despliegue la siguiente ventana.

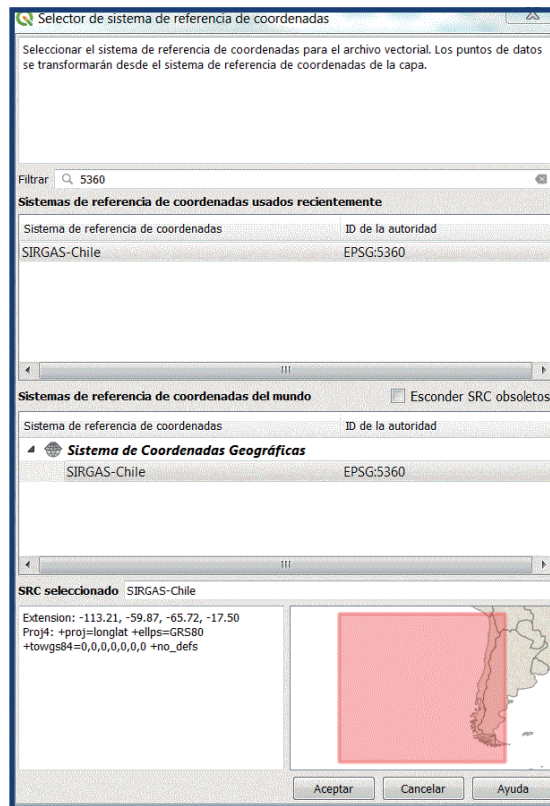


Ilustración 14: Configuración para definir SRC. Fuente: Elaboración propia.

Aquí podremos seleccionar el sistema SIRGAS Chile. Además, es importante recalcar que al lado de cada sistema aparece el código EPSG correspondiente, por lo que se puede realizar una búsqueda mediante el nombre del sistema o el código EPSG. Para transformar los sistemas de referencia a SIRGAS Chile coordenadas geográficas se debe considerar el EPSG 5360.

Ver ejemplo en QGIS versión 3.4.1, transformación de PSAD56 UTM a SIRGAS Chile GCS:

<https://drive.google.com/file/d/1uPxLeHrfXF4H34Cfi1LPhAUX9jIwGfTM/view?usp=sharing>

5 GENERALIDADES DE ESCALAS CARTOGRÁFICAS

El desarrollo de estándares para la evaluación de la exactitud de los productos Cartográficos se genera con vistas a la mayor economía y facilidad en la producción de píxel.

Mapas que satisfagan no sólo las amplias necesidades de mapas estándar, sino también las necesidades particulares de los distintos organismos. Existen diversos análisis de la precisión de los mapas en función de la escala, pero al no ser materia de la asesoría, se abordará de forma tangencial y centrándose solamente en el límite de percepción visual y el tamaño del píxel.

5.1 LÍMITE DE PERCEPCIÓN VISUAL (LPV)

El LPV está relacionado directamente con la escala. El concepto de límite de percepción visual representa la mínima separación entre dos elementos en el mapa para que el ojo los perciba como distintos. Fisiológicamente esta magnitud es 0.2 mm. De esta manera, en un mapa a escala 1:5.000, no serían representables todos aquellos elementos que tuvieran una dimensión inferior a 1 metro o deberían juntarse aquellas líneas separadas por una magnitud inferior. En este último sentido, la escala está explicitando el grado de precisión de los datos, si se hiciese un mapa directamente a escala 1:50.000, los métodos de adquisición de los datos deberían asegurar una precisión mínima de 1 metro en el posicionamiento y medida de los elementos del mapa (Palomar Vázquez, 2009). Las precisiones asociadas según escala respectiva de trabajo se muestran en la tabla siguiente:

| Escalas | E (m) | Precisión (m) |
|-------------------------------|---------|---------------|
| Ingeniería 1:50 - 1:10000 | 50 | 0.010 |
| | 200 | 0.040 |
| | 500 | 0.100 |
| | 1000 | 0.200 |
| | 5000 | 1.000 |
| Cartografía 1:10000 - 1:50000 | 10000 | 2.000 |
| | 20000 | 4.000 |
| | 25000 | 5.000 |
| Mundiales 1:50000 - 1:1000000 | 50000 | 10.000 |
| | 250000 | 50.000 |
| | 500000 | 100.000 |
| | 1000000 | 200.000 |
| LPV (mm) : | 0.2 | |

Tabla 14. Precisiones de escalas respecto del tipo de trabajo.



Este tipo de precisión se suele centrar en mapas analógicos, aunque se usa para analizar de forma rápida precisiones a priori en mediciones GNSS, en función de la instrumentación y proyecto a desarrollar.

5.2 GROUND SAMPLE DISTANCE (GSD)

El GSD es la dimensión lineal de la huella de un píxel de muestra respecto de la superficie en la imagen original; y se supone que el "tamaño de píxel" es el tamaño de superficie real de un píxel en un producto de ortofotograma digital después de la realización de todas las rectificaciones y procedimientos para el tratamiento de imágenes. Además, el GSD está destinado a referirse a las imágenes casi verticales y no a imágenes oblicuas, reconociendo también que los valores GSD pueden variar mucho en ciudades y áreas montañosas (ASPRS, 2013).

La precisión horizontal es probada comparando las coordenadas planimétricas de puntos bien definidos en el conjunto de datos con coordenadas de los mismos puntos de una fuente independiente de mayor precisión. Un punto bien definido representa una característica para la cual la posición horizontal es conocida con un alto grado de exactitud y posición con respecto al dato geodésico. Para los ensayos de precisión, los puntos bien definidos deben ser fácilmente visibles o recuperables en el suelo, en la fuente independiente de mayor precisión y en el propio producto. Los datos del contorno gráfico y los datos hipsográficos digitales pueden no contener puntos bien definidos.

El estándar de exactitud horizontal de **ASPRS** se basa en clases de exactitud usando estadísticas de **RMSE**. Los tipos de clase son las siguientes:

1. Clase Horizontal I refieren a los datos geoespaciales de más alta precisión en el grado de levantamiento para aplicaciones más exigentes de ingeniería.
2. Clase II se refieren a datos geoespaciales estándar de alta precisión.
3. Clase III (y mayores) se refieren a datos geoespaciales de grado de visualización de baja precisión adecuados para aplicaciones de usuario menos exigentes.

Es responsabilidad del proveedor de datos hacer lo que sea necesario para que éstos cumplan con las normas de exactitud.

Para las Clases I, II y III la Tabla 15. proporciona ejemplos de exactitud horizontal y otros criterios de calidad para ortofotos digitales producidos a partir de imágenes que tienen diez tamaños de píxeles comunes.

| Ortofoto Tamaño píxel | Clase de datos horizontal exactitud | RMSE X o RMSEy (cm) | RMSEr (cm) | Orthophoto Mosaic Seamline Máximo coincidencia (cm) | Exactitud horizontal al nivel de confianza del 95% \pm (cm) |
|--------------------------|---|------------------------------|---------------|--|--|
| 2,5 cm | I | 2,5 | 3,5 | 5,0 | 6,1 |
| | II | 5,0 | 7,1 | 10,0 | 12,2 |
| | III | 7,5 | 10,6 | 15,0 | 18,4 |
| 5 cm | I | 5,0 | 7,1 | 10,0 | 12,2 |
| | II | 10,0 | 14,1 | 20,0 | 24,5 |
| | III | 15,0 | 21,2 | 30,0 | 36,7 |
| 7,5 cm | I | 7,5 | 10,6 | 15,0 | 18,4 |
| | II | 15,0 | 21,2 | 30,0 | 36,7 |
| | III | 22,5 | 31,8 | 45,0 | 55,1 |
| 15 cm | I | 15,0 | 21,2 | 30,0 | 36,7 |
| | II | 30,0 | 42,4 | 60,0 | 73,4 |
| | III | 45,0 | 63,6 | 90,0 | 110,1 |
| 30 cm | I | 30,0 | 42,4 | 60,0 | 73,4 |
| | II | 60,0 | 84,9 | 120,0 | 145,9 |
| | III | 90,0 | 127,3 | 180,0 | 220,3 |
| 60 cm | I | 60,0 | 84,9 | 120,0 | 145,9 |
| | II | 120,0 | 169,7 | 240,0 | 293,7 |
| | III | 180,0 | 254,6 | 380,0 | 440,6 |
| 1 metro | I | 100,0 | 141,4 | 200,0 | 244,7 |
| | II | 200,0 | 282,8 | 400,0 | 489,5 |
| | III | 300,0 | 424,3 | 600,0 | 734,3 |
| 2 metros | I | 200,0 | 282,8 | 400,0 | 489,5 |
| | II | 400,0 | 565,7 | 800,0 | 979,1 |
| | III | 600,0 | 848,5 | 1200,0 | 1468,6 |
| 5 metros | I | 500,0 | 707,1 | 1000,0 | 1224,0 |
| | II | 1000,0 | 1414,2 | 2000,0 | 2447,7 |
| | III | 1500,0 | 2121,3 | 3000,0 | 3671,5 |
| 10 metros | I | 1000,0 | 1414,2 | 2000,0 | 2448,0 |
| | II | 2000,0 | 2828,4 | 4000,0 | 4895,4 |
| | III | 3000,0 | 4242,8 | 6000,0 | 7343,1 |

Tabla 15. Exactitud horizontal respecto al tamaño de píxel según clases. Fuente: ASPRS.

La Tabla 16. proporciona ejemplos de exactitud horizontal y otros criterios de calidad para mapas planimétricos compilados con diez escalas de mapa que van desde 1:100 a 1:25000.

Estos estándares se aplican en forma más rigurosa debido a los avances en imágenes digitales. Aunque estas normas están destinadas principalmente a los datos planimétricos compilados a partir de estereofotogrametría, son igualmente relevantes para mapas planimétricos producidos a partir de ortofotos digitales, imágenes radar orto-rectificadas (ORI) de IFSAR o líneas de ruptura compiladas a partir de Lidar.

Las Imágenes de origen **GSD** no se pueden equiparar universalmente a la resolución de la imagen o a la exactitud soportada. Esto varía ampliamente con diferentes sensores. Los valores de **GSD** mostrados en la **Tabla 16** son típicos del **GSD** requerido para alcanzar el nivel de detalle necesario para las escalas de mapa indicadas.

| Escala mapa | Imágenes aproximadas de origen GSD | Clase de datos horizontal exactitud | RMSEX o RMSEy (cm) | RMSEr (cm) | Exactitud horizontal al nivel de confianza del 95% 6 (cm) |
|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------|---|
| 1:100 | 1-2 cm | I | 1.3 | 1.8 | 3.1 |
| | | II | 2.5 | 3.5 | 6.1 |
| | | III | 3.8 | 5.3 | 9.2 |
| 1:200 | 2-3 cm | I | 2.5 | 3.5 | 6.1 |
| | | II | 5.0 | 7.1 | 12.2 |
| | | III | 7.5 | 10.6 | 18.4 |
| 1:250 | 3-4 cm | I | 3.1 | 4.4 | 7.6 |
| | | II | 6.3 | 8.8 | 15.3 |
| | | III | 9.4 | 13.3 | 22.9 |
| 1:500 | 4-10 cm | I | 6.3 | 8.8 | 15.3 |
| | | II | 12.5 | 17.7 | 30.6 |
| | | III | 18.8 | 26.5 | 45.9 |
| 1:1,000 | 10-20 cm | I | 12.5 | 17.7 | 30.6 |
| | | II | 25.0 | 35.4 | 61.2 |
| | | III | 37.5 | 53.0 | 91.9 |
| 1:2 000 | 20-30 cm | I | 25.0 | 35.4 | 61.2 |
| | | II | 50.0 | 70.7 | 122.4 |
| | | III | 75.0 | 106.1 | 183.6 |
| 1:2 500 | 30-40 cm | I | 31.3 | 44.2 | 76.5 |
| | | II | 62.5 | 88.4 | 153.0 |
| | | III | 93.8 | 132.6 | 229.5 |
| 1:5 000 | 40-100 cm | I | 62.5 | 88.4 | 153.0 |
| | | II | 125.0 | 176.8 | 306.0 |
| | | III | 187.5 | 265.2 | 458.9 |
| 1:10 000 | 1-2 m | I | 125.0 | 176.8 | 306.0 |
| | | II | 250.0 | 353.6 | 611.9 |
| | | III | 375.0 | 530.3 | 917.9 |
| 1:25 000 | 3-4 m | I | 312.5 | 441.9 | 764.9 |
| | | II | 625.0 | 883.9 | 1529.8 |
| | | III | 937.5 | 1325.8 | 2294.7 |

Tabla 16. Ejemplos de exactitud Horizontal según escala de Mapa Fuente: ASPRS.

Las exactitudes alcanzables y la clase de precisión del mapa resultante para un GSD determinado, dependerán de las capacidades de los sensores, las metodologías de control, ajuste y compilación.

Se puede ver claramente que existe una pequeña diferencia entre la precisión según el GSD y el LPV, al ser la asesoría en materia geodésica, tomaremos el valor mayor, que lo da el LPV

6 RECOMENDACIONES

6.1 EL SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO PARA CHILE

El Sistema de Referencia Geodésico a utilizar en Chile es SIRGAS, con su densificación para nuestro país denominada SIRGAS - Chile.

6.2 RECOMENDACIONES DE TIPOS DE COORDENADAS A UTILIZAR, DEPENDIENDO DE CADA CASO U OBJETIVO DEL TRABAJO.

Según lo indicado, se indican en el siguiente cuadro los sistemas de coordenadas a emplear según el objetivo:

| SISTEMA DE COORDENADAS | OBJETIVO DEL TRABAJO | SISTEMA DE REFERENCIA |
|------------------------|---|-----------------------|
| ECEF-TRIDIMENSIONALES | CÁLCULOS GEODÉSICOS | SIRGAS |
| GEODÉSICAS | Certificados Geodésicos e IDE en Confluencia de Husos 19-18 | SIRGAS |
| PROYECTADAS | Certificados Geodésicos, Capas de IDE y Construcción Civil | SIRGAS |
| LOCALES | Ejecución de infraestructuras | SIRGAS |

Tabla 17. Recomendación de Sistemas de Coordenadas a Emplear. Fuente: elaboración propia.

6.3 PRECISIONES Y EXACTITUD ASOCIADAS A LOS SISTEMAS GEODÉSICOS EN USO Y SUS LIMITACIONES DE ACUERDO A ESCALA.

Se detallan a continuación las precisiones y limitaciones en escala:

| SRG | PRECISIÓN | EXACTITUD | ESCALA ACTUACIÓN |
|-------------------|-------------------|-----------|------------------|
| HITO XVIII | 5m - 20m | 20m | < 1:25.000 |
| PSAD 56 | 5m - 20m | 20m | < 1:25.000 |
| SAD 69 | 5m - 20m | 20m | < 1:25.000 |
| SIRGAS | NIVEL MILIMÉTRICO | | 1:1 |
| RGN- SIRGAS CHILE | ≈ 0,025 | ≈ 0,050 | < 1:250 |

Tabla 18. Precisiones de los SGR en uso. Fuente: Elaboración Propia.

Debido a la falta de información sobre las elipses de error en RGN-Sirgas Chile, ésta se estima según la propagación de las distancias a puntos fiduciales, e incluyendo vértices activos y pasivos.

Para la precisión de los datums clásicos se emplean las desviaciones de las transformaciones, siendo la escala de actuación 1:25.000 un caso óptimo.

6.4 ESCALAS RECOMENDADAS A UTILIZAR EN PARÁMETROS IGM.

Se recomienda emplear los parámetros del IGM para escalas menores a 1:25.000.

6.5 USO DE CLASE DE SISTEMAS DE COORDENADAS CARTOGRÁFICAS SEGÚN NECESIDAD Y ESCALA DE REPRESENTACIÓN.

Según lo visto, se recomienda emplear coordenadas en proyección UTM para escalas mayores a 1:25.000 y coordenadas no proyectadas para escalas menores a 1:25.000. Se recomienda únicamente el empleo de la proyección UTM en el territorio continental. Para el territorio antártico, el comité internacional que se preocupa de estandarizar la actividad científica en la antártica (Scientific Committee On Antarctic Research, SCAR), del cual Chile es partícipe, no recomienda un sistema de proyección en particular y si bien toda superficie curva representada en un plano es alterada en mayor o menor grado, para mantener la uniformidad en Chile en lo que se refiere a un sistema de proyección (continental, insular y antártico), para uso cartográfico es aconsejable utilizar proyección UTM por reunir las características de conformidad, equivalencia y equidistancia. Esta proyección se recomienda utilizarla hasta los 79° 30' de latitud sur, como máximo, para posteriormente utilizar la Proyección Estereográfica Polar.

En los sitios web de descarga de datos geográficos, se acuerda dejar a disposición de la comunidad la información a escala nacional en SIRGAS - CHILE, coordenadas geográficas.



7 BIBLIOGRAFÍA

ASPRS. 2013. Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. 2013.

Báez and Báez Soto, Juan Carlos. 2006. MONITORAMENTO DAS DEFORMAÇÕES DA REDE DE REFERÊNCIA DO SIRGAS EM ÁREA COM ATIVIDADE TECTÔNICA. Curitiba : s.n., 2006.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 1930. Decreto con Fuerza de Ley 2090; Decreto 2090. [Online] Septiembre 06, 1930. <https://www.leychile.cl/N?i=252923&f=1930-09-06&p=>.

BLITZKOW, Denizar. 2015. ESTUDIOS DE GRAVEDAD Y DEL MODELO DE CUASI-GEOIDE PARA LA AMÉRICA DEL SUR. 2015.

Buhodra Ingeniería. 2017. Manual ISPOL. Proyectos de Obras Lineales. Asturias : Buhodra Ingeniería, 2017.

Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **H. Drewes, L. Sanchez, 2016. 2016, Journal of Geodynamic.**

Drewes, Hermann and Sánchez, Laura. 2011. Curso en Sistema de Referencia. Santiago de Chile : Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI, 2011.

Error analysis of high-rate GNSS precise point positioning for seismic wave measurement. **Yuanming, Shu, et al. 2017.** 59, Wuhan : Elsevier, 2017, Advances in Space Research, Vol. 59.

Evaluation of EIGEN-6C4 by means of various functions of gravity potential, and by GNSS/levelling. **Kostelecký, Jan. 2015.** 1, s.l. : Geoinformatics FCE CTU, 2015, Vol. 14.

Hofmann-Wellenhof. 2008. GNSS Global Navigation Satellite Systems. 2008.

IGM.CHILE. 2008. Nuevo de Marco de Referencia Geodésico. 2008.

III Congreso Geoespacial Geocom. **Tarrío Mosquera, José Antonio. 2017.** Santiago de Chile : s.n., 2017. Calibración del Modelo Global de Geopotencial EIGEN-6C4 en la comuna de Providencia con tecnología GNSS/Nivelación.

ISO, Instituto Nacional de Normalización. 2011. Norma Chilena NCh ISO 19111-2011. Santiago de Chile : s.n., 2011.

Ivars, Leonardo and Rubén, Rodríguez. 2011. ¿Qué son los códigos EPSG? Café Geodésico: espacio dedicado a temas Geodésicos. [Online] Diciembre 23, 2011. <http://cafegeodesico.blogspot.cl/2011/12/que-son-los-codigos-epsg.html>.

Matesanz, Francisco Javier González. 2012. Transformaciones entre Sistemas Geodésicos de Referencia. 2012.

NGA/NASA. 2014. NGA/NASA EGM96. [Online] 2014.
<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>.

Palomar Vázquez, Jesús. 2009. Escala y LPV. Obtención y Análisis de la Información Topográfica. [Online] 2009. <http://personales.upv.es/jpalomav/cursos/master/curso.htm?t53.html>.

Procesamiento de información GPS con relación a marcos de referencia de épocas diferentes. **Drewes, Hermann. 2004** . Aguascalientes. México : s.n., 2004 . SIRGAS Workshop .

SIRGAS. 2017. Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. [Online] 2017. www.sirgas.org.

Tarrío Mosquera José, Rebolledo Araya Estefanía. 2016. Análisis de metodología PPP para implantación de Redes de Detalle en Ingeniería. Santiago de Chile : s.n., 2016.

TROJANOWICS, Marek, JAMROZ, Olgierd and OSADA, Edward. 2015. COMPARISON OF THE ACCURACY OF TWO HIGH RESOLUTION GLOBAL GEOPOTENTIAL MODELS: EGM-08 AND EIGEN-6C4 CASE STUDY AT THE AREA OF POLLAND. 2015.

USCL. 2017. Datos GPS Estación SIRGAS USCL. [Online] 2017. <ftp://158.170.64.220/>.

Vemos-Sirgas. 2016. VEMOS: Velocity Model for SIRGAS. [Online] 08 08, 2016.
<http://www.sirgas.org/index.php?id=241>.



8 ACRÓNIMOS

ANTEX: Antenna Exchange Format

ASPRS: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

CNR: Comisión Nacional de Riego

CSN: Centro Sismológico Nacional

EAF: Estaciones Activas Fijas

ECEF: Earth Centered Earth Fixed (Sistema de Coordenadas Geocéntricas)

EGM08: Earth Gravitational Model 2008

EGM96: Earth Gravitational Model 1996

EIGEN: European Improved Gravity model of the Earth by New techniques

EOP: Earth Orbit Parameters

EPSG: European Petroleum Survey Group

ERP: Earth Rotation Parameters

GDOP: Geometric Dilution of Precision

GGOS: Global Geodetic Observing System

GNSS: Global Navigation Satellite System

GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

GPS: Global Positioning System

GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment

GRGS: Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale

GRS80: Geodetic Reference System 1980

GSD: Ground Sample Distance

IAG: International Association of Geodesy

ICRS: International Celestial Reference System

IDS: International DORIS Service

IERS: International Earth Rotation Service

IGM: Instituto Geográfico Militar

IGS: International GNSS Service

ILRS: International Laser Ranging Service

IOGP: International Association of Oil and Gas Producers

ISO: International Standardization Organization

ITRF: International Terrestrial Reference Frame

ITRS: International Terrestrial Reference System

IUGG: International Union Of Geodesy and Geophysics

IVS: International VLBI Service

LB: Línea Base

LPV: Límite de Percepción Visual

LTM: Local Transversal de Mercator

MBN: Ministerio de Bienes Nacionales

MC: Manual de Carreteras

MOP: Ministerio de Obras Públicas

NCh: Norma Chilena

NGA: National Geospatial-Intelligence Agency

OVDAS: Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur

PPP: Posicionamiento por Punto Preciso

PSAD56: Provisional South American Datum 1956

PTL: Plano Transverso Local

RGN: Red Geodésica Nacional

RINEX: Receiver Independent Exchange

RTK: Real Time Kinematic

SAD69: South American Datum 1969

SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada



SNIT- IDE CHILE

SIG: Sistema de Información Geográfica (GIS: Geographic Information System)

SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

SIRGAS-CON: Red de Operación Continua de SIRGAS

SLR: Satellite Laser Ranging

SMC: Superficies de Mínima Curvatura

SNIT: Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial

SRC: Sistema de Referencia de Coordenadas

SRG: Sistema de Referencia Geodésico

UTM: Universal Transversal de Mercator

VEMOS: Velocity Model for SIRGAS

WGS84: World Geodetic System 1984

Grupo de Geodesia del Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial SNIT, se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Secretaría Ejecutiva SNIT: Macarena Pérez García.

Coordinador de Grupo de Trabajo: Pablo Morales Hermosilla, Secretaría Ejecutiva SNIT.

Nuestro especial agradecimiento a las instituciones y profesionales participantes:

Ministerio de Relaciones Exteriores

Juan Andrés Miranda
Juan Pablo Benavides
Carol Ganter

Ministerio de Obras Públicas

Claudio Valdenegro

Ministerio de Bienes Nacionales

César Ocares

Instituto Geográfico Militar

Mayor Julio Neira
Héctor Parra
Sergio Rozas
Ignacio Parada

Servicio Nacional de Geología y Minería

Hugo Neira
Gilma Pantoja
Alberto Utreras
Rodrigo Urrutia
Jorge León

Centro de Información de Recursos Naturales

Esteban Vojkovic
Felipe Albornoz

Universidad de Santiago de Chile

Dr. José Antonio Tarrío
Dr. Marcelo Caverlotti

Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile

Dr. Juan Carlos Báez

Secretaría Ejecutiva SNIT

Catalina Tapia Johnson
Felipe Guerra Astur

Ministerio de Bienes Nacionales
Secretaría Ejecutiva
Sistema Nacional de Coordinación de
Información Territorial **SNIT IDE - Chile**
Alameda 720, piso 8, Santiago.
+56 2 29375804



IDE CHILE

Infraestructura de Datos Geoespaciales