



Dirección General de Geografía y Medio Ambiente

Procesamiento de Datos GPS Considerando Deformaciones del Marco Geodésico en el Tiempo

Actualización:
Mayo de 2012

Contenido

| | |
|---|-----------|
| I. Introducción | 1 |
| II. Antecedentes..... | 2 |
| II.1. Actividad tectónica en territorio mexicano | 2 |
| II.2. Evolución de la geodesia satelital | 3 |
| III. Elementos de Apoyo para el Procesamiento y Ajuste..... | 4 |
| III.1. Modelos de tectónica de placas..... | 4 |
| III.2. Velocidades de las estaciones de rastreo GPS continuo | 5 |
| III.3. Desplazamientos episódicos..... | 7 |
| IV. Procedimiento General | 8 |
| IV.1. Obtener coordenadas de las estaciones de referencia en la época de los datos a procesar. | 10 |
| IV.2. Procesamiento y Ajuste. | 12 |
| IV.3. Llevar las coordenadas resultado del ajuste a la época oficial del marco. | 12 |
| V. Herramientas de Apoyo | 15 |
| VI. Consideraciones | 19 |
| Bibliografía: | 20 |
| Anexo 1. Coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de estaciones de la RGNA. | 21 |
| Anexo 2. Velocidades asociadas a las estaciones de la RGNA..... | 22 |
| Anexo 3. Fórmulas para la conversión de coordenadas geodésicas latitud (ϕ), longitud (λ) y altura geodésica (h) a coordenadas cartesianas tridimensionales (X, Y, Z) y viceversa. | 23 |

I. Introducción

Una de las actividades sustantivas del área de geodesia del INEGI es el procesamiento diferencial de los datos de levantamientos GPS realizados con receptores de una o doble frecuencia. Esta actividad se lleva a cabo para minimizar o eliminar los errores más significativos inherentes al sistema de posicionamiento, así como para incorporar los nuevos levantamientos al marco de referencia oficial adoptado en México.

Durante muchos años en los procedimientos adoptados para el procesamiento de datos GPS se asumía una cierta estabilidad espacial en el marco de referencia oficial, considerando las coordenadas de las estaciones de la red geodésica horizontal como fijas en el tiempo. Para gran parte del territorio nacional, dicho procedimiento “tradicional” de procesamiento de datos proporciona una precisión suficiente para la mayoría de las aplicaciones cartográficas, sin embargo el dinamismo de la corteza terrestre en algunas zonas del país, que afecta la consistencia de las redes geodésicas, y la existencia de proyectos en los que por su naturaleza y objetivos se requiere obtener las mejores exactitudes posibles, hacen necesaria la aplicación de un procedimiento que considere los desplazamientos que sufre la red geodésica con el tiempo.

La aplicación del efecto del tiempo en el procesamiento de datos GPS se traduce en la obtención de órdenes de exactitud más altos y una mejora en la consistencia con el marco de referencia adoptado, en especial para las zonas en donde intervienen en el procesamiento de datos estaciones de referencia en diferentes placas tectónicas o en las que existan otro tipo de desplazamientos, como vulcanismo, sismicidad o subsidencia. Dichos casos hacen necesaria la implementación de este procedimiento.

II. Antecedentes

II.1. Actividad tectónica en territorio mexicano

El territorio de México se encuentra situado en su mayor parte en la placa de Norteamérica, no obstante, el hecho de que la península de Baja California esté en la placa del pacífico representa la mayor complicación para mantener la consistencia de la red geodésica mexicana. En el sur del país, estudios tectónicos sitúan una porción del Estado de Chiapas en la placa del Caribe. Además, algunos autores, como Kostoglodov et al. (2003), han detectado que debido a la interacción de la Placa de Cocos con la Norteamericana, en los estados de Guerrero, Oaxaca, Michoacán y Colima se presentan desplazamientos que no se ajustan a los modelos de tectónica de placas (ver sección III.1) que describen el desplazamiento de la placa de Norteamérica.



Figura II.1, Placas Tectónicas en las que se encuentra el Territorio Mexicano.
Límites de las Placas Tectónicas por Coffin et al, 1998,
(<http://www.ig.utexas.edu/research/projects/plates/plates.htm>).

A lo anterior se añan los eventos sísmicos que afectan nuestro territorio, sobre todo a lo largo de la costa del pacífico, así como la actividad volcánica en el centro-sur del país. La componente vertical de las redes geodésicas también se ve afectada por la subsidencia que se da en varias regiones, como en la ciudad de México, el valle de Aguascalientes y otras más, con casos en que el hundimiento es de algunos decímetros al año.

II.2. Evolución de la geodesia satelital

En las últimas décadas los sistemas satelitales de navegación global y otras técnicas de geodesia espacial han permitido el desarrollo de sistemas de referencia geocéntricos, que dan origen a los marcos de referencia globales con los que ha sido posible también estudiar a detalle las deformaciones en la superficie de la corteza terrestre.

El marco de referencia global ITRF (International Terrestrial Reference Frame), desarrollado por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS), ha sido adoptado internacionalmente como la base para el establecimiento y actualización de las redes geodésicas nacionales y regionales. Con la densificación continua de estaciones de recepción GNSS¹ y la creciente temporalidad de datos de estas estaciones ha sido posible refinar cada vez más las realizaciones más recientes de los ITRF y además, calcular las velocidades de las estaciones de referencia con respecto al marco.

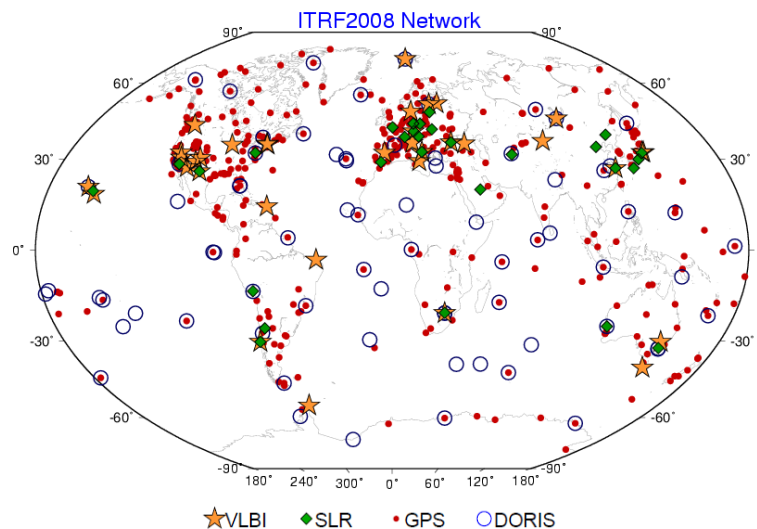


Figura II.2 Estaciones geodésicas consideradas por el IERS para el desarrollo del ITRF, y las técnicas disponibles en dichas estaciones (Altamimi, 2009).

Tales desarrollos han contribuido con elementos que actualmente permiten conocer y aplicar desplazamientos o deformaciones que acontecen en la superficie de la corteza terrestre para mantener en el tiempo una mejor consistencia interna en las redes geodésicas locales o regionales, y de éstas con los marcos de referencia globales, dando pie a la geodesia tetradimensional.

¹ Se utiliza el término Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS por sus siglas en inglés) para referirse a las constelaciones de satélites que proporcionan señales en las que se transmiten datos de posicionamiento y tiempo, tales como GPS, GLONASS y Galileo.

Actualmente, las coordenadas de las estaciones de las redes geodésicas nacionales o regionales, se publican con respecto a un marco de referencia y en una época específica en el tiempo, lo que significa, desde un punto de vista estricto, que **la coordenada publicada para un punto con respecto a algún marco de referencia es válida solamente para la fecha o época especificada**, se dice que las coordenadas de una red en un marco y época definida son como “una fotografía” de dicha red.

La entrada en vigor de la nueva Norma del Sistema Geodésico Nacional en diciembre de 2010 permite implementar el nuevo esquema de procesamiento y ajuste de datos GPS para las actividades geodésicas, con el que se pueden aprovechar las ventajas en precisión que ofrecen las realizaciones recientes del ITRF.

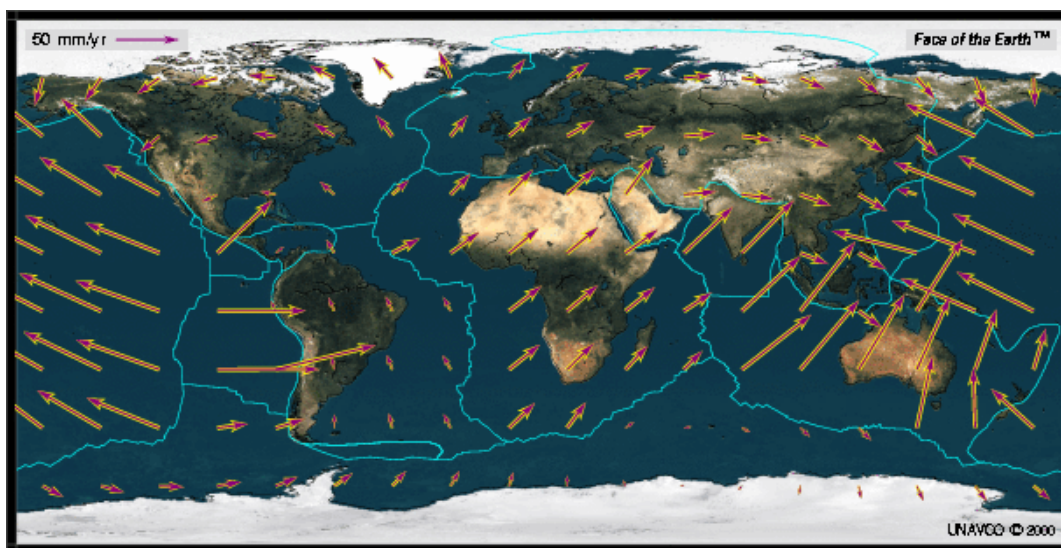
Con la aplicación del nuevo esquema de procesamiento y ajuste de datos se busca dar cumplimiento a lo dispuesto en las nuevas normas del Sistema Geodésico Nacional y de Estándares de Exactitud Posicional. Para ello se utilizarán elementos de apoyo que se describen en la siguiente sección, que permitirán mantener una buena consistencia de la red geodésica horizontal durante varios años, mejorando la exactitud de los levantamientos geodésicos con GPS.

III. Elementos de Apoyo para el Procesamiento y Ajuste

III.1. Modelos de tectónica de placas

Investigadores y diferentes agencias internacionales han desarrollado modelos globales de desplazamientos de las placas tectónicas, con los que se pueden inferir los desplazamientos horizontales por movimiento de las placas en puntos sobre la superficie de la corteza terrestre. Algunos de estos modelos globales son NNR-NUVEL-1A (DeMets et al., 1990, 1994), APKIM (Drewes, 1998, 2009), REVEL (Sella, et al., 2002), ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) y el del SOPAC (Scripps Orbit and Array Center). Los modelos se realizan en base a técnicas geofísicas y/o técnicas geodésicas satelitales.

Para algunas regiones, en las que se presenta una fuerte actividad tectónica y donde se cuenta con información sobre su comportamiento, se pueden generar modelos que describen, en ocasiones con mayor detalle que los modelos globales, los desplazamientos en la zona que cubren. En el caso de la zona de interacción entre la placa de Norteamérica y la del Pacífico se tienen los modelos de Snay (Snay, 2008) y McCaffrey (McCaffrey, 2007). Existe también un modelo del territorio mexicano realizado con base en datos de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) y otras estaciones de recepción continua (Márquez-Azúa et al., 2003).



| Placa Abbr. | Vector de Rotación (geográficas) | | | Vector de Rotación (cartesianas) | | | Nombre de Placa |
|----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| | PHI [grados] | LAM [grados] | OMEGA [grados/Ma] | omega(x) [rad/Ma] | omega(y) [rad/Ma] | omega(z) [rad/Ma] | |
| NOAM | -4.222 | -84.880 | 0.1980 | 0.000308 | -0.003433 | -0.000254 | N. América |
| PCFC | -63.791 | 110.244 | 0.6720 | -0.001792 | 0.004860 | -0.010523 | Pacífico |

Figura III.1, Ejemplo de un campo de velocidades asociado a un modelo de placas tectónicas (arriba) y valores del Modelo de Velocidades de Placas Tectónicas del SOPAC para las Placas Norteamericana y del Pacífico (abajo).

III.2. Velocidades de las estaciones de rastreo GPS continuo

Las agencias que administran o analizan los marcos de referencia, así como las redes geodésicas regionales o internacionales, calculan velocidades para las estaciones de recepción continua con base en series de tiempo que se obtienen de las observaciones recabadas en cada estación. Estas velocidades permiten conocer y aplicar con alto grado de exactitud los desplazamientos que ha sufrido cada estación con respecto al marco de referencia de interés, con lo que se pueden deducir las coordenadas de estos puntos o estaciones en épocas anteriores o predecirlas para una fecha futura.

El Instituto de Geodesia Alemán (DGFI) realiza un cálculo de las velocidades en ITRF2008 para las estaciones de la RGNA y otras estaciones de la región como parte de los cálculos para determinar el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). Márquez-Azúa y DeMets (2003) calcularon las velocidades para las estaciones de la RGNA con respecto a ITRF2000, velocidades utilizadas por la agencia National Geodetic Survey (NGS) de Estados Unidos.

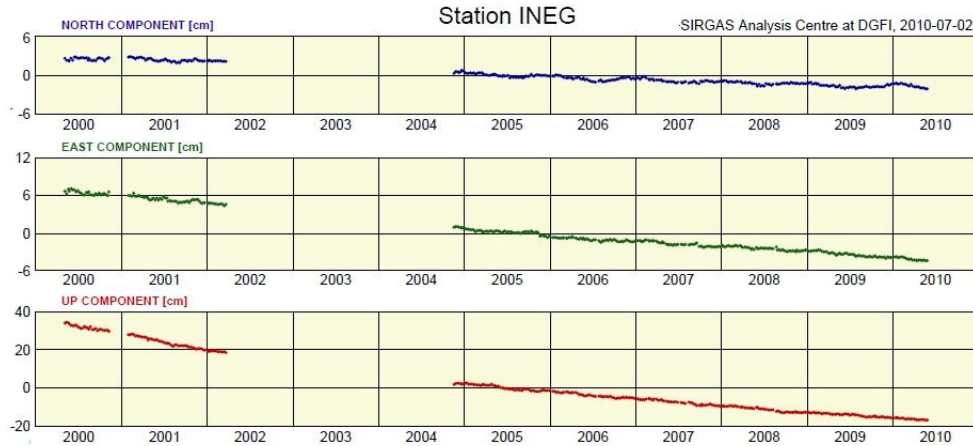


Figura III.3, Series de tiempo de la estación INEG.

Para el procesamiento de datos GPS en el INEGI se adoptan las velocidades ITRF2008 calculadas por el DGFI para estaciones de la RGNA (Ver anexo 2) y otras estaciones en territorio mexicano (Figura III.4). En el caso de las estaciones para las cuales no se cuenta con velocidades publicadas por el DGFI a la fecha, principalmente por ser estaciones establecidas recientemente, las velocidades se obtuvieron por interpolación a partir de otras estaciones cercanas a ellas. Para obtener las velocidades de la estación IITJ se realizó un cálculo en GAMIT/GLOBK con los datos disponibles hasta mediados del 2010.

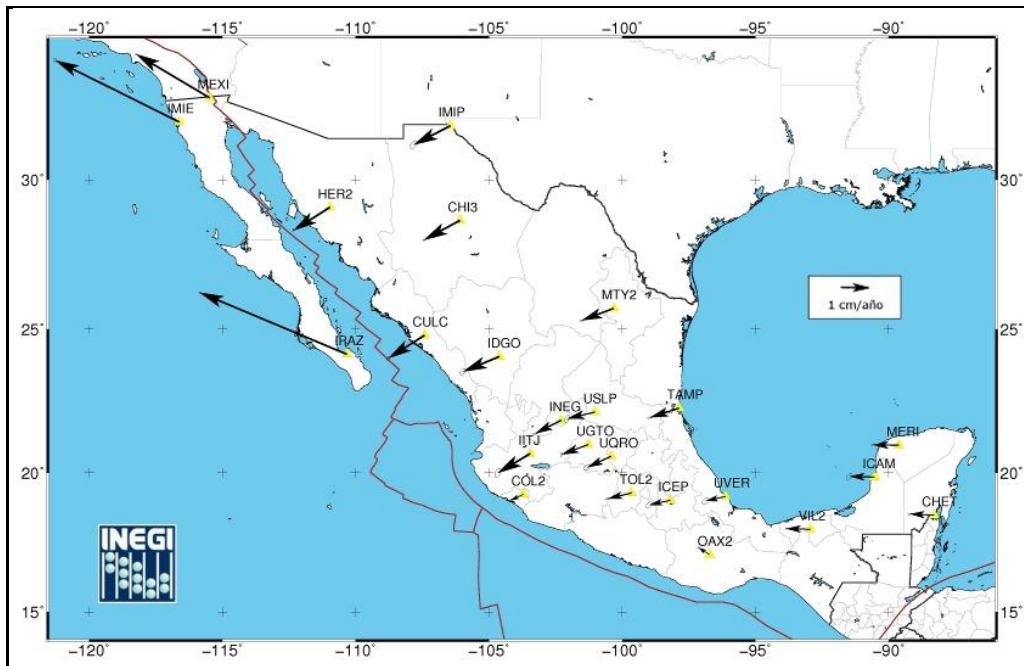


Figura III.4, Desplazamientos horizontales de las estaciones de rastreo GPS continuo de la RGNA.

III.3. Desplazamientos episódicos.

Los desplazamientos episódicos por lo general se deben a eventos sísmicos que afectan regiones específicas. En el caso de las estaciones de rastreo GNSS continuo ubicadas en la zona afectada por uno de estos eventos, los desplazamientos ocurridos pueden ser identificados y cuantificados mediante las series de tiempo de la estación afectada. Una vez identificados y cuantificados pueden utilizarse para llevar con mejor precisión las coordenadas de la estación a diferentes épocas dentro del marco, discriminando en el cálculo de las velocidades el desplazamiento episódico detectado.

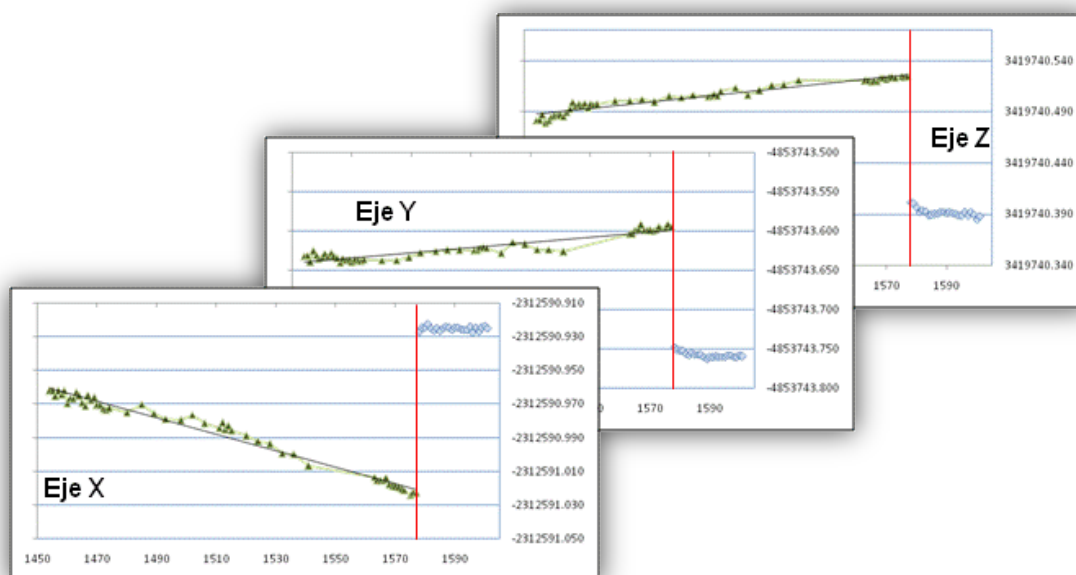


Figura III.5, Serie de tiempo de soluciones GPS semanales que muestra el desplazamiento de la estación MEXI en Mexicali, Baja California por el sismo del 4 de abril de 2010. Los valores de tiempo en los ejes x de cada gráfica corresponden a la semana GPS, los valores en y son los componentes X,Y y Z, de las coordenadas geocéntricas cartesianas de la estación en cada semana.

El modelado de estos desplazamientos en toda la región afectada se puede realizar con datos geofísicos, o bien con una cantidad suficiente de observaciones geodésicas antes y después del episodio; que permitan, además de estimar los desplazamientos, delimitar la región afectada.

Tras el sismo del 4 de abril de 2010 con epicentro a 60 km al sur-sureste de Mexicali, B.C., se calculó con base en las series de tiempo de la estación MEXI un desplazamiento de 22.3 centímetros (Figura III.5). Mediante observaciones GPS realizadas unas semanas después y utilizando las estaciones GPS de operación continua de la zona se obtuvieron los desplazamientos en la región mostrados en la figura III.6.

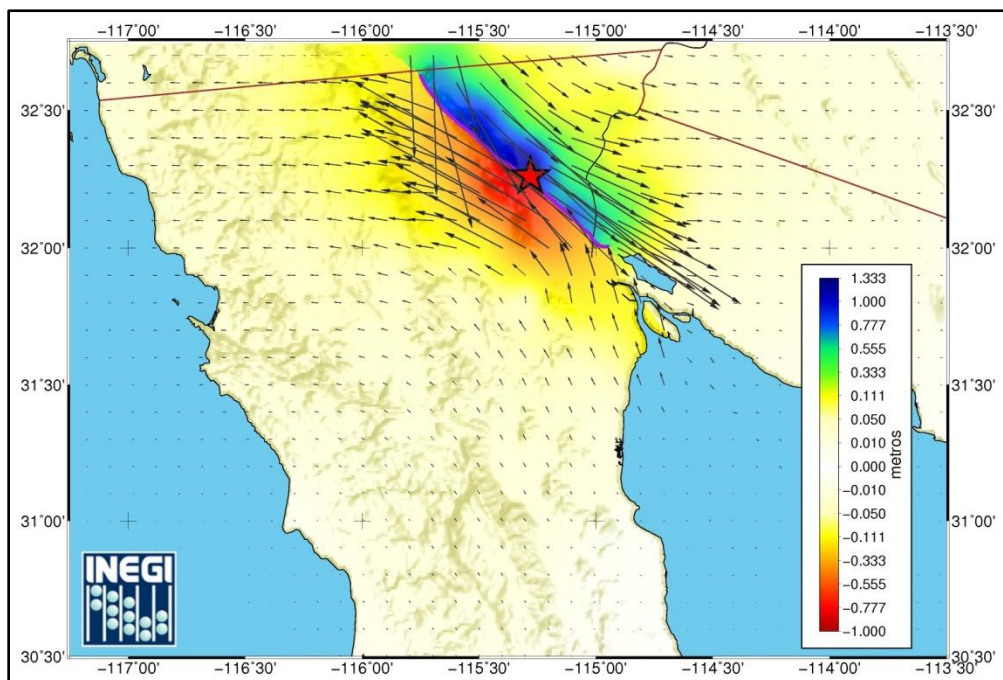


Figura III.6, Desplazamientos horizontales ocasionados por el sismo del 4 de abril de 2010.

IV. Procedimiento General

En el antiguo esquema de procesamiento y ajuste se ingresaban directamente las coordenadas de las estaciones de la RGNA de referencia y se asumía que las coordenadas resultantes estaban en el marco y época oficial.

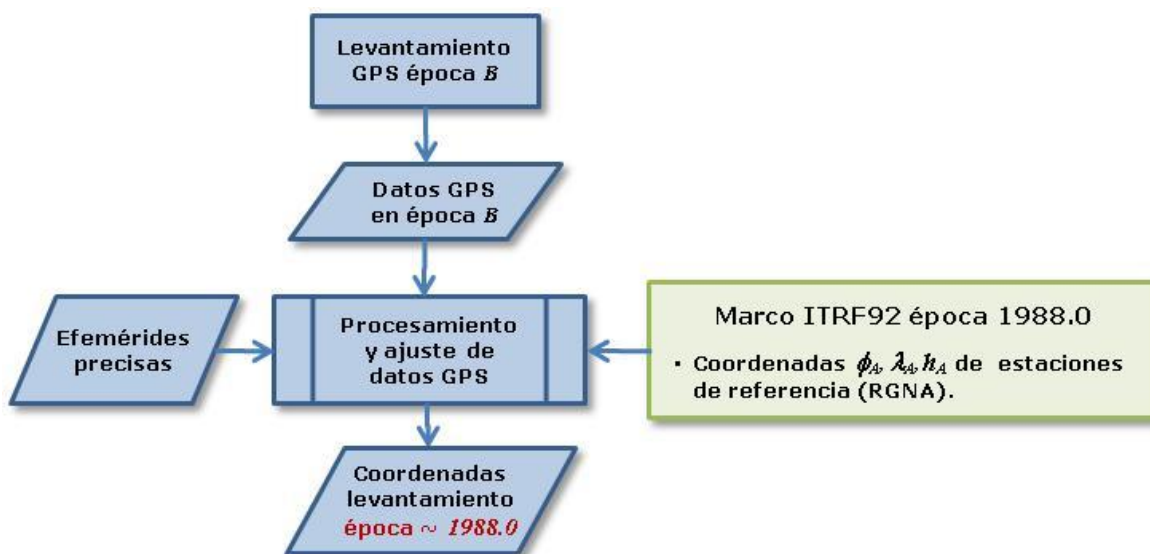


Figura IV.1, Antiguo esquema de procesamiento de datos GPS, en el que se ingresaban directamente las coordenadas publicadas de las estaciones de referencia en la época oficial. Se asumía que las coordenadas resultantes de los puntos posprocesados estaban también en la época oficial.

En el nuevo esquema se consideran las deformaciones del marco geodésico en el tiempo para obtener coordenadas en el marco y época oficial. El procedimiento implica la incorporación de actividades antes y después de la actividad propia de procesamiento y ajuste:

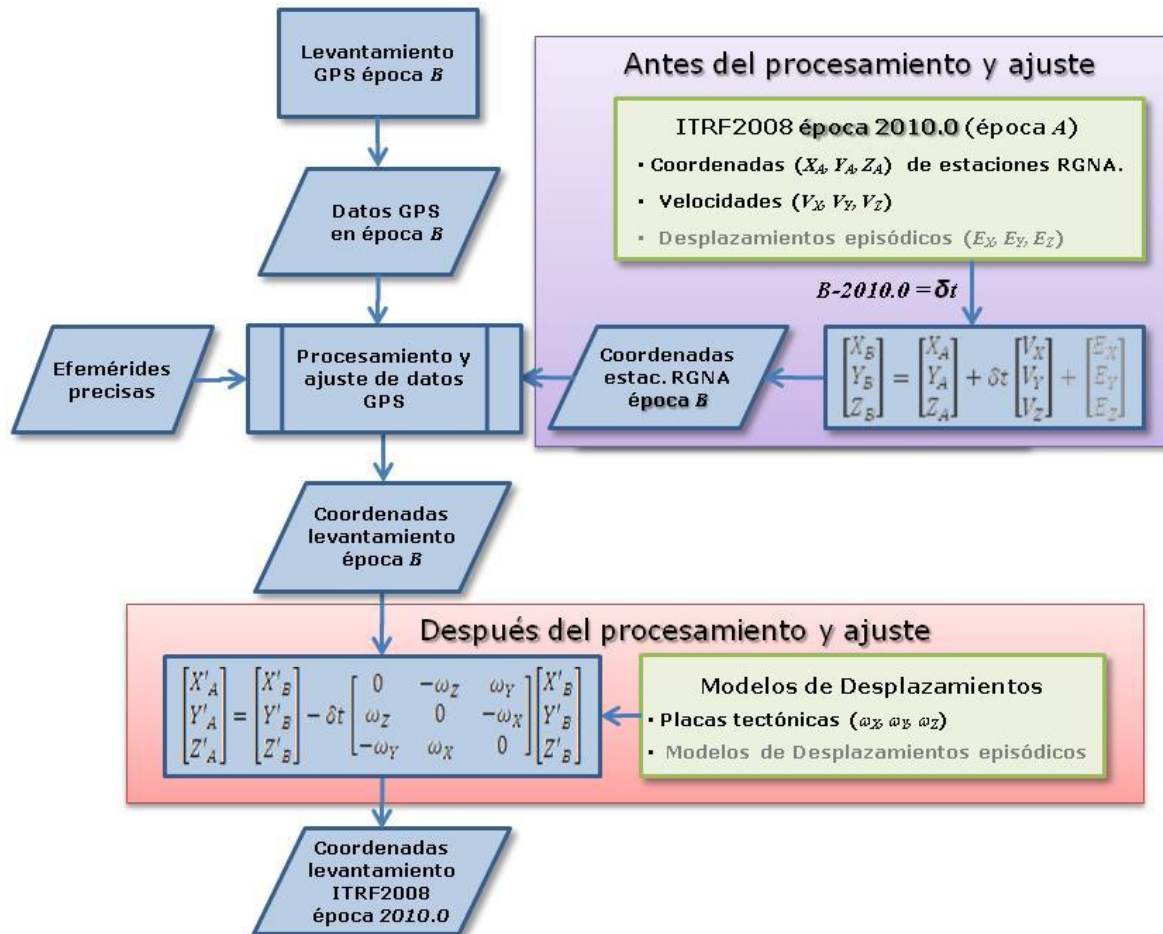


Figura IV.2, Procedimiento general para el procesamiento de datos GNSS considerando deformaciones del marco geodésico en el tiempo.

Antes del procesamiento y ajuste. Obtener coordenadas de las estaciones de referencia en la época de medición de los datos a procesar.

Procesamiento y ajuste de los datos utilizando las coordenadas de las estaciones de referencia en la época de medición de los datos.

Después del procesamiento y ajuste. Llevar las coordenadas resultantes del ajuste, que están en la época de medición, a la época 2010.0.

El no aplicar el procedimiento descrito tiene un efecto en las coordenadas y exactitud resultantes de los puntos procesados que depende de varios factores, principalmente:

- La ubicación de las estaciones de la RNGA involucradas, en especial si se encuentran en diferentes placas tectónicas.
- La ubicación de los puntos por calcular (si están en diferente placa tectónica que las estaciones de referencia o bien en alguna zona afectada por otro fenómeno que cause desplazamientos del terreno).
- El tiempo transcurrido entre la definición del marco y la fecha del levantamiento GPS. Entre mayor sea la diferencia entre la época de las coordenadas del marco oficial y la época o fecha del levantamiento habrá mayores deformaciones que afecten los resultados del procesamiento y ajuste.

Para las actividades antes y después del procesamiento se contará con una herramienta de apoyo (ver sección V) que facilite la tarea de aplicar los modelos, a continuación se describe solamente como referencia el procedimiento manual de aplicar los modelos.

IV.1. Obtener coordenadas de las estaciones de referencia en la época de los datos a procesar.

Para que haya consistencia en el procesamiento y ajuste, las coordenadas de las estaciones de la RNGA que se utilizarán como referencia en el proyecto deben de estar en la de medición de los datos GPS a procesar (época B).

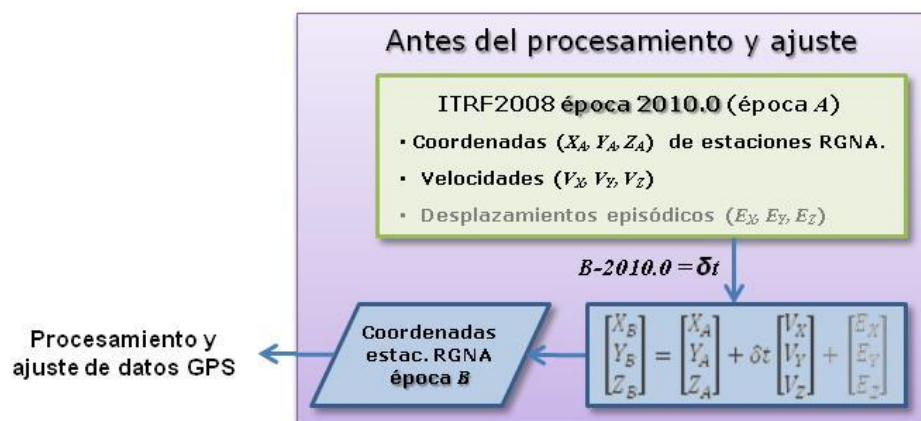


Figura IV.3, Antes del procesamiento y ajuste de los datos GPS. Se conocen los vectores de coordenadas de la RINGA en el marco oficial (X_A, Y_A, Z_A) , las velocidades de cada estación (V_X, V_Y, V_Z) , y en su caso los desplazamientos episódicos (E_X, E_Y, E_Z) . δt está determinado por la época de medición de los datos a procesar y la época del marco oficial.

Para llevar las coordenadas de una estación de la RGNA desde una época origen “A” (X_A, Y_A, Z_A) a una época destino (época B), se deben sumar a éstas coordenadas los desplazamientos que ha sufrido la estación en el tiempo δt ($\delta t = B - A$) debido a movimientos por tectónica de placas u otros movimientos constantes locales (V_X, V_Y, V_Z), que se obtienen de las velocidades publicadas para la estación; y en dado caso, los desplazamientos episódicos (E_X, E_Y, E_Z) ocurridos en el lapso de tiempo entre la época de las coordenadas oficiales y la fecha de medición.

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \delta t \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \end{bmatrix} \quad 4.1$$

La época está determinada por el instante medio de cobertura de los datos, por ejemplo, si tenemos datos continuos del 29 de enero al 5 de febrero de 2011 cubriendo las 24 horas para todos los días, el instante intermedio es a las 24 horas del día 1 de febrero, es decir han transcurrido 32 días del año y por lo tanto la época es igual a $2011 + 32/365 = 2011.0877$. Comúnmente las velocidades en las estaciones de referencia en cualquiera de sus componentes son menores a 1centímetro por mes por lo que calculando la época con base en los días transcurridos es suficiente.

Por lo general, para campañas de medición que duren hasta 1 mes, se puede calcular un juego de coordenadas de la RGNA para el proyecto de posprocesamiento de datos en la época intermedia del periodo del proyecto de medición. Para campañas de medición con más de un mes de duración, será necesario generar proyectos de procesamiento y ajuste donde se incluyan datos de periodos no mayores a 1 mes.

En la mayoría de los casos las estaciones de referencia a usar no habrán sufrido desplazamientos episódicos, bajo estas condiciones, la ecuación 4.1 se reduce a:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \delta t \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \quad 4.2$$

Así pues para llevar, por ejemplo, las coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de la estación CHET (Anexo 1)²:

$$\begin{aligned} X_A &= 179584.7352 \\ Y_A &= -6048080.6609 \\ Z_A &= 2010447.3576 \end{aligned}$$

² Para la conversión de coordenadas geodésicas de latitud, longitud y altura a coordenadas cartesianas geocéntricas (X,Y,Z) y viceversa, se aplican las fórmulas del Anexo 3.

a la época 2011.0877 empleando las velocidades publicadas por el DGFI (Anexo 2):

$$V_X = -0.0080 \text{ m/año}$$

$$V_Y = 0.0022 \text{ m/año}$$

$$V_Z = -0.0004 \text{ m/año}$$

aplicando la ecuación 4.2 se tiene que:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 179584.7352 \\ -6048080.6609 \\ 2010447.3576 \end{bmatrix} + (2011.0877 - 2010) \begin{bmatrix} -0.0080 \\ 0.0022 \\ -0.0004 \end{bmatrix}$$

Y resultan las coordenadas ITRF2008 época 2011.0877 de la estación CHET:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 179584.7265 \\ -6048080.6585 \\ 2010447.3572 \end{bmatrix}$$

Convertidas a geodésicas:

18° 29' 42.99643"N
88° 17' 57.20990"W
2.952 m

Este procedimiento se aplicaría a todas las estaciones de la RGNA a usar como referencia en el proyecto de procesamiento y ajuste de datos.

IV.2. Procesamiento y Ajuste.

Las coordenadas para las estaciones de referencia calculadas en la época destino, que es la época de medición de los nuevos puntos (época *B*) son las que, una vez transformadas a coordenadas geodésicas, se deben utilizar como fijas en el procesamiento y ajuste de los nuevos puntos a incorporar a la red. El resto del procedimiento de procesamiento y ajuste no varía con respecto al que se venía realizando de manera tradicional.

De esta forma, las coordenadas resultantes del procesamiento y ajuste de los nuevos puntos se generan también en la época de medición de los datos (época *B*).

IV.3. Llevar las coordenadas resultado del ajuste a la época oficial del marco.

Para que los puntos medidos queden debidamente incorporados a la red existente (marco oficial) y con el objetivo de mantener una consistencia en el marco, después del procesamiento y ajuste realizado en la época de medición de los datos GPS, es

necesario obtener las coordenadas de estos puntos en la época del marco de referencia oficial, en este caso se realiza un procedimiento para “regresar” a la época deseada, es decir, ahora para los datos del ejemplo las coordenadas obtenidas del procesamiento y ajuste en la época 2011.0877, deben trasladarse a la época 2010.0.

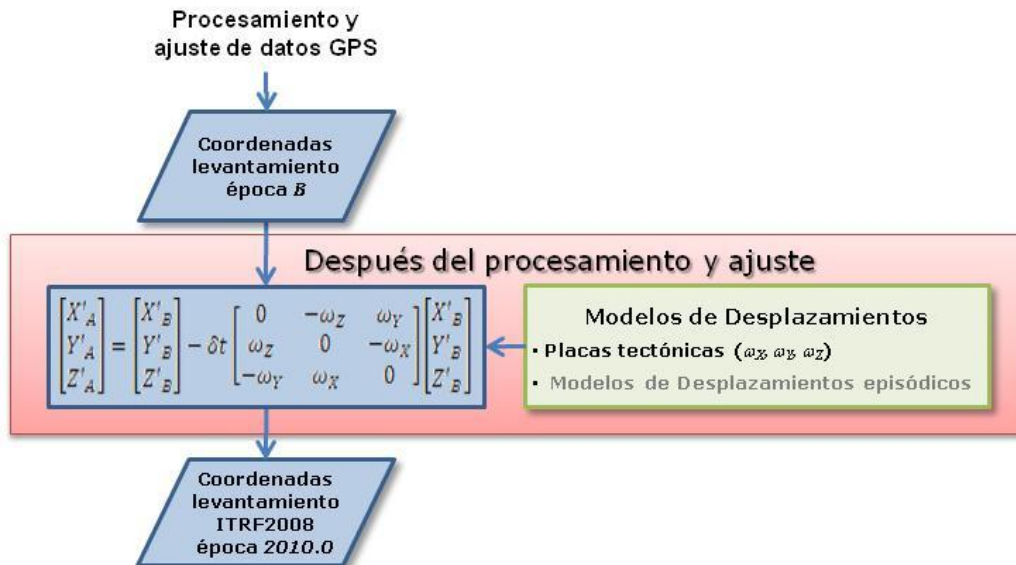


Figura IV.3, Después del procesamiento y ajuste de los datos GPS en la época de medición. Se debe contar con un modelo de velocidades de placas tectónicas ya sea global o regional para aplicar los desplazamientos ocurridos en cada punto medido, desde la época del marco oficial hasta la época de medición, para llevar las coordenadas (X'_B, Y'_B, Z'_B) a la época del marco oficial (X'_A, Y'_A, Z'_A).

Dado que comúnmente no se cuenta con velocidades para los puntos medidos se aplica un modelo de velocidades de placas tectónicas para este fin. El modelo adoptado para aplicar este procedimiento es el ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) ya que en una evaluación se detectó que es el que mejor modela los desplazamientos en territorio mexicano.

| Placa | Vector de Rotación (geográficas) | | | Vector de rotación (cartesianas) | | |
|--------------|----------------------------------|---------|-----------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| | lat (°) | lon (°) | Ω (°/Ma) | ω_X (Rad/Ma) | ω_Y (Rad/Ma) | ω_Z (Rad/Ma) |
| Norteamérica | -4.291 | -87.385 | 0.192 | 0.000152 | -0.003338 | -0.000251 |
| Pacífico | -62.569 | 112.873 | 0.682 | -0.002131 | 0.005052 | -0.010565 |

Tabla IV.1, Valores del Modelo de Velocidades de Placas Tectónicas ITRF2005 (Altamimi et al, 2007) para las Placas Norteamericana y del Pacífico.

El modelo para la transformación entre diferentes épocas aplicando modelo de placas tectónicas es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} X'_A \\ Y'_A \\ Z'_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_B \\ Y'_B \\ Z'_B \end{bmatrix} - \delta t \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_B \\ Y'_B \\ Z'_B \end{bmatrix} \quad 4.3$$

Los valores de los elementos ω_X , ω_Y y ω_Z de la matriz de rotación de Euler, corresponden al vector de rotación del modelo de placas, en coordenadas cartesianas geocéntricas, para la placa donde se localiza el punto.

Retomando el ejemplo del punto IV.1, conocidos los valores ω_X , ω_Y y ω_Z del modelo ITRF2005 para la placa de Norteamérica (Tabla IV.1):

$$\omega_X = 0.000152 \text{ Rad/Ma}$$

$$\omega_Y = -0.003338 \text{ Rad/Ma}$$

$$\omega_Z = -0.000251 \text{ Rad/Ma}$$

Para **un punto medido en época 2011.0877** que está ubicado en la placa de Norteamérica y que fue procesado diferencialmente y ajustado usando coordenadas de estaciones de referencia también en la época 2011.0877 (época B) y que sus coordenadas resultantes son:

$$\text{Lat.: } 20^\circ 58' 36.76569''\text{N}$$

$$\text{Lon.: } 89^\circ 37' 23.08179''\text{O}$$

$$h: 56.487 \text{ m}$$

...convertidas a cartesianas:

$$X_B = 39194.7991$$

$$Y_B = -5957905.8890$$

$$Z_B = 2269025.2345$$

la aplicación de la ecuación 4.3 para llevar las coordenadas a la época 2010.0 sería:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39194.7991 \\ -5957905.8890 \\ 2269025.2345 \end{bmatrix} - 1.0877 \begin{bmatrix} 0 & 2.507E-10 & -3.338E-09 \\ -2.507E-10 & 0 & -1.525E-10 \\ 3.338E-09 & 1.525E-10 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 39194.7991 \\ -5957905.8890 \\ 2269025.2345 \end{bmatrix}$$

De lo que resulta:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39194.8090 \\ -5957905.8886 \\ 2269025.2353 \end{bmatrix}$$

...que son las coordenadas del punto en ITRF2008 época 2010.0. Como paso final, solo resta convertirlas de coordenadas cartesianas a coordenadas geodésicas:

Lat.: 20° 58' 36.76572"N
Lon: 89° 37' 23.08145"O
h: 56.487 m

Como se mencionó anteriormente, en la zona de transición entre las placas tectónicas de Norteamérica y del Pacífico los modelos de velocidades de placas no describen adecuadamente los desplazamientos que se presentan. En este caso es necesario aplicar un modelo regional de velocidades y un modelo de desplazamientos por el episodio sísmico. Los desplazamientos episódicos ocurridos en la región por el sismo del 4 de abril de 2010 también se deben corregir mediante un modelo regional (ver siguiente sección).

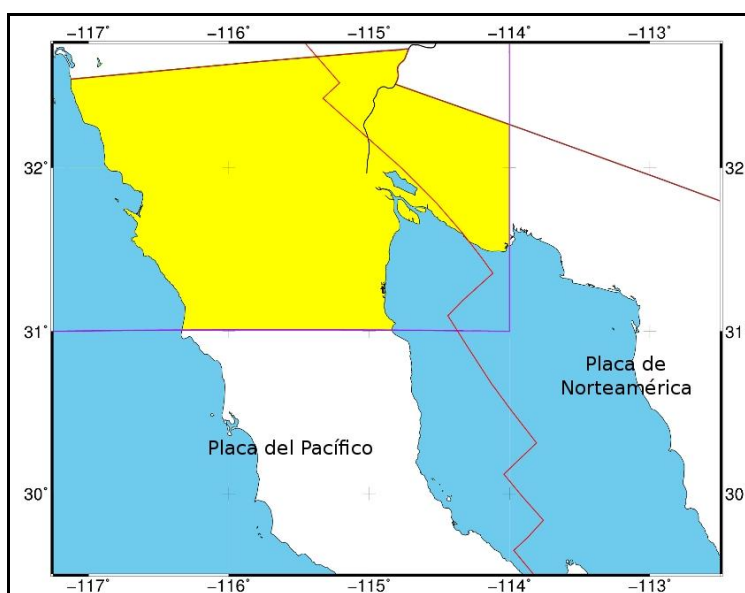


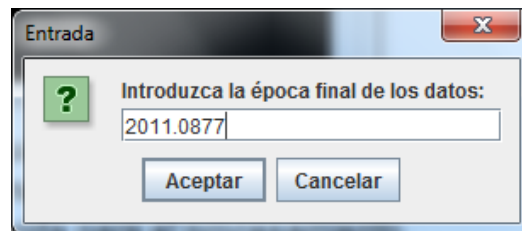
Figura IV.3, Área de influencia de la zona de transición entre las placas del Pacífico y Norteamericana, en donde se utiliza un modelo regional de velocidades (Snay, 2008). La línea roja representa el límite teórico entre ambas placas.

Nuevos estudios geofísicos y levantamientos geodésicos permiten conocer con más detalle los desplazamientos por tectónica de placas en algunas regiones, lo que permite mejorar los modelos globales o regionales ya existentes, o bien generar nuevos modelos en zonas de transición no modeladas previamente. Esto implica que para el procedimiento descrito pueden cambiarse los modelos adoptados o bien incorporarse nuevos modelos regionales.

V. Herramientas de Apoyo

Para facilitar las actividades de procesamiento y ajuste bajo el nuevo esquema, se generó el programa **ITRF08PR**, que cuenta con 3 utilerías:

ITRF08 RGNA. Para obtener las coordenadas de las estaciones de la RGNA en la época de medición de los datos del proyecto. Para aplicarse antes del procesamiento y ajuste de los datos.



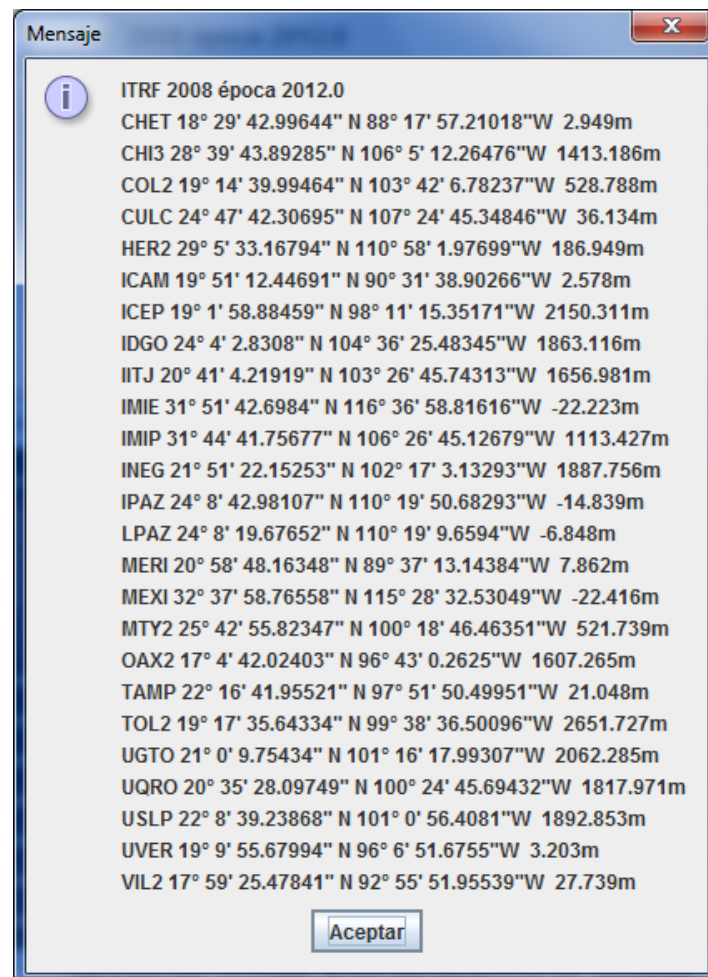
Entrada

Introduzca la época final de los datos:

2011.0877

Aceptar Cancelar

La utilidad solicita la época en que el usuario requiere las coordenadas, como salida el programa despliega el listado de coordenadas de las estaciones de la RGNA en el marco ITRF2008 y en la época requerida para el procesamiento.



Mensaje

ITRF 2008 época 2012.0

CHET 18° 29' 42.99644" N 88° 17' 57.21018"W 2.949m

CHI3 28° 39' 43.89285" N 106° 5' 12.26476"W 1413.186m

COL2 19° 14' 39.99464" N 103° 42' 6.78237"W 528.788m

CULC 24° 47' 42.30695" N 107° 24' 45.34846"W 36.134m

HER2 29° 5' 33.16794" N 110° 58' 1.97699"W 186.949m

ICAM 19° 51' 12.44691" N 90° 31' 38.90266"W 2.578m

ICEP 19° 1' 58.88459" N 98° 11' 15.35171"W 2150.311m

IDGO 24° 4' 2.8308" N 104° 36' 25.48345"W 1863.116m

IITJ 20° 41' 4.21919" N 103° 26' 45.74313"W 1656.981m

IMIE 31° 51' 42.6984" N 116° 36' 58.81616"W -22.223m

IMIP 31° 44' 41.75677" N 106° 26' 45.12679"W 1113.427m

INEG 21° 51' 22.15253" N 102° 17' 3.13293"W 1887.756m

IPAZ 24° 8' 42.98107" N 110° 19' 50.68293"W -14.839m

LPAZ 24° 8' 19.67652" N 110° 19' 9.6594"W -6.848m

MERI 20° 58' 48.16348" N 89° 37' 13.14384"W 7.862m

MEXI 32° 37' 58.76558" N 115° 28' 32.53049"W -22.416m

MTY2 25° 42' 55.82347" N 100° 18' 46.46351"W 521.739m

OAX2 17° 4' 42.02403" N 96° 43' 0.2625"W 1607.265m

TAMP 22° 16' 41.95521" N 97° 51' 50.49951"W 21.048m

TOL2 19° 17' 35.64334" N 99° 38' 36.50096"W 2651.727m

UGTO 21° 0' 9.75434" N 101° 16' 17.99307"W 2062.285m

UQRO 20° 35' 28.09749" N 100° 24' 45.69432"W 1817.971m

USLP 22° 8' 39.23868" N 101° 0' 56.4081"W 1892.853m

UVER 19° 9' 55.67994" N 96° 6' 51.6755"W 3.203m

VIL2 17° 59' 25.47841" N 92° 55' 51.95539"W 27.739m

Aceptar

ITRF08 Puntual. Esta herramienta utiliza modelos de velocidades de placas tectónicas para llevar las coordenadas de un punto en diferente época a la época 2010.0. Esta utilidad se usará para trasladar las coordenadas del resultado de procesamiento y ajuste en la época de medición a la época del marco oficial.

Además de ingresar las coordenadas de cada punto y la época de medición, se debe seleccionar en qué placa tectónica se encuentran ubicados:



ITRF08

Latitud N 20 58 36.76569

Longitud W 89 37 23.08179

Alt. geodésica 56.487

Época de referencia 2011.0877

Placa Tectónica Norteamericana ▼

Transformar

ITRF08 época 2010

Latitud N 20 58 36.76572

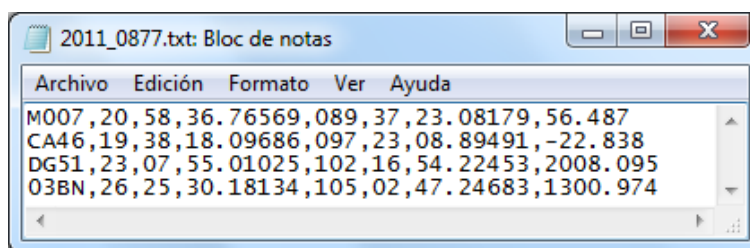
Longitud W 89 37 23.08145

Alt. geodésica 56.487

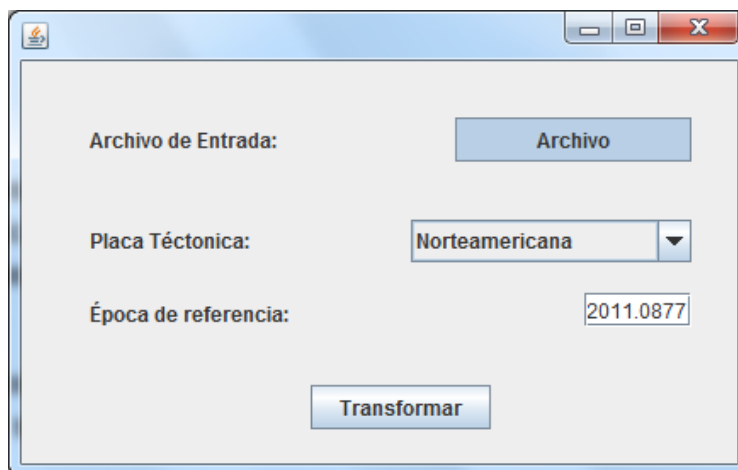
ITRF08PR incluye el modelo de velocidades para la zona de transición entre las placas Norteamericana y del Pacífico (Snay, 2008), modelo que aplica a los puntos ubicados al norte de la latitud 31°N y al oeste de la longitud 114°O (ver figura IV.3), siempre y cuando se haya seleccionado la placa del pacífico para la transformación.

ITRF08 Listado. Esta utilidad realiza la misma función que “ITRF08 Puntual”, es decir lleva las coordenadas de puntos en el marco ITRF2008 de diferentes épocas a la época 2010.0, pero la entrada es un listado de puntos.

El listado de puntos a ingresar debe ser en formato de texto con los datos de latitud Norte, longitud Oeste (en grados, minutos y segundos) y altura geodésica separados por comas.



En la herramienta se debe seleccionar el archivo de entrada, la placa tectónica donde están ubicados los puntos, sin mezclar puntos de diferentes placas, y la época de los puntos (época de medición)



Para visualizar correctamente el archivo de salida, que contiene las coordenadas en la época 2010.0 en formato de texto, debe abrirse con WordPad.

Para mayor información sobre la instalación, uso e insumos del programa ITRF08PR, consultar el manual de referencia incluido en la carpeta de instalación del programa.

VI. Consideraciones

La aplicación de este procedimiento es imprescindible para levantamientos de orden de exactitud de 5, 10 y 20 centímetros en los que en el procesamiento y ajuste de los datos se involucren estaciones de referencia en diferentes placas tectónicas, o bien que alguna de dichas estaciones presente desplazamientos por fenómenos locales o regionales, como en el caso de las estaciones INEG, MEXI, OAX2 y COL2 (ver mapa de la figura III.4).

Es importante notar que en los casos en que las estaciones de referencia, de coordenadas conocidas, y los puntos a incorporar a la red están en la misma placa tectónica y en ninguno de ellos se presenta otro tipo de deformaciones locales o regionales, el resultado de aplicar velocidades o no para el procesamiento y ajuste no mostrará diferencias significativas. Las ventajas de usar el nuevo esquema de procesamiento se irán haciendo más notables con el paso del tiempo, debido a los desplazamientos diferenciales con respecto a la posición ITRF2008 época 2010.0, que se irán incrementando entre algunas estaciones de la RGNA.

Dado que para algunas zonas del país donde se presentan deformaciones locales o regionales aún no se tienen modelos adecuados para obtener, a partir de las coordenadas en la época de medición, las coordenadas en ITRF2008 época 2010.0 con una exactitud suficiente; es necesario resguardar las coordenadas de todos los levantamientos GPS en la época de medición. Esto permitirá en un futuro aplicar los modelos regionales más adecuados que se desarrollen para mejorar la consistencia del marco ITRF2008 época 2010.0 en la República Mexicana.

Bibliografía:

- Altamimi, Z., Collileux, J., Legrand, J., Garayt B., Boucher, C. (2007); "ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., (1990). "Current plate motions". *Geophysical Journal Int.* 101, 425–478.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., Stein, S., (1994). "Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions". *Geophysical Research, Letter* 21, pp. 2191–2194.
- Drewes, H., (1998). "Combination of VLBI, SLR, and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models". *Geodynamics*, M. Feissel (Editor), IAG Symposia, Springer, 1998.
- Drewes, H., (2009). "The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as basis for a Non-Rotating ITRF". *Geodetic Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia 134*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 95-99.
- Fialko, Y., Sandwell, D., Agnew, D., Gonzalez, A., Gonzalez, J., Barbot, S. and Leprince S. (2010). "Static Rupture Model of the 2010 M7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake from ALOS, ENVISAT, SPOT and GPS Data". *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010*, San Francisco, CA. November 2010.
- Kostoglodov, V., Singh, S.K., Santiago, J.A., and Franco, S.I. (2003). "A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico". *Geophysical research letters*, vol. 30, no. 15, 1807, doi:10.1029/2003gl017219.
- Márquez-Azúa, B. and DeMets, Ch., (2003). "Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for the neotectonics of Mexico". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B9, 2450, doi:10.1029/2002JB002241
- McCaffrey, R., Qamar, A., King, R.W., Wells, R., Ning, Z., Williams, C.A., Stevens, C.W., Vollick, J.J., and Zwick, P.C. (2007). "Plate locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest", *Geophysical Journal International*, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03371.x
- Sánchez, L., M. Seitz (2011). "Recent activities of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS" (IGS RNAAC SIR). *DGFI Report No. 87*, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Munich, Germany.
- Seemüller, W, Sánchez, L., Seitz, M. and Drewes, H. (2010). "The Position and Velocity Solution SIR10P01 of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR)", *DGFI Report No. 86*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. Munich, Germany.
- Sella, G.F., T.H. Dixon, and A. Mao, (2002). "REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, B4, doi: 10.1029/2000JB000033, 2002.
- Snay, R.A., (2008). "HTDP USER'S GUIDE (Software Version 3.0)", *National Geodetic Survey, NOAA*.

Anexo 1. Coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de estaciones de la RGNA.

| Estación | Latitud Norte ° ' " | Longitud Oeste ° ' " | Altura Geodésica (m) | Altura* de Antena (m) | Modelo de Antena |
|----------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CHET | 18 29 42.99641 | 88 17 57.20961 | 2.955 | 0.143 | Zephyr Geodetic |
| CHI3 | 28 39 43.89326 | 106 05 12.26387 | 1413.187 | 0.234 | Zephyr Geodetic |
| COL2 | 19 14 39.99474 | 103 42 06.78208 | 528.784 | 0.160 | Zephyr Geodetic |
| CULC | 24 47 42.30742 | 107 24 45.34764 | 36.138 | 0.146 | Zephyr Geodetic |
| HER2 | 29 05 33.16844 | 110 58 01.97610 | 186.949 | 0.230 | Zephyr Geodetic |
| ICAM | 19 51 12.44688 | 90 31 38.90207 | 2.587 | 0.136 | Zephyr Geodetic |
| ICEP | 19 01 58.88475 | 98 11 15.35143 | 2150.327 | 0.214 | L1/L2 Geodetic |
| IMIE | 31 51 42.69707 | 116 36 58.81264 | -22.222 | 0.137 | Zephyr GNSS Geodetic II |
| IMIP | 31 44 41.75718 | 106 26 45.12587 | 1113.428 | 0.299 | Zephyr Geodetic |
| IDGO | 24 04 02.83116 | 104 36 25.48267 | 1863.116 | 0.199 | L1/L2 Geodetic |
| IITJ | 20 41 04.21961 | 103 26 45.74239 | 1656.986 | 0.102 | Permanent L1/L2 |
| INEG | 21 51 22.15280 | 102 17 03.13231 | 1887.823 | 0.180 | Choke Ring |
| IPAZ | 24 08 42.97974 | 110 19 50.67946 | -14.835 | 0.156 | Zephyr Geodetic |
| LPAZ | 24 08 19.67520 | 110 19 09.65597 | -6.845 | 0.135 | Zephyr Geodetic |
| MERI | 20 58 48.16346 | 89 37 13.14324 | 7.863 | 0.135 | Zephyr Geodetic |
| MEXI | 32 37 58.77103 | 115 28 32.53523 | -22.427 | 0.137 | Zephyr Geodetic |
| MTY2 | 25 42 55.82372 | 100 18 46.46275 | 521.741 | 0.139 | Zephyr Geodetic |
| OAX2 | 17 04 42.02383 | 96 43 00.26225 | 1607.262 | 0.185 | Zephyr Geodetic |
| TAMP | 22 16 41.95540 | 97 51 50.49882 | 21.050 | 0.148 | Zephyr Geodetic |
| TOL2 | 19 17 35.64347 | 99 38 36.50048 | 2651.730 | 0.148 | Zephyr Geodetic |
| UGTO | 21 00 09.75456 | 101 16 17.99246 | 2062.282 | 0.121 | Zephyr Geodetic |
| UQRO | 20 35 28.09773 | 100 24 45.69377 | 1817.973 | 0.177 | L1/L2 Geodetic |
| USLP | 22 08 39.23888 | 101 00 56.40743 | 1892.858 | 0.195 | L1/L2 Geodetic |
| UVER | 19 09 55.68003 | 96 06 51.67505 | 3.212 | 0.181 | L1/L2 Geodetic |
| VIL2 | 17 59 25.47838 | 92 55 51.95484 | 27.744 | 0.124 | Zephyr Geodetic |

* Las alturas de antena están referidas su centro de fase nominal.

Anexo 2. Velocidades asociadas a las estaciones de la RGNA.

| Estación de la RGNA | V_x (m/año) | V_y (m/año) | V_z (m/año) | Calculado por:* |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| CHET | -0.0080 | 0.0022 | -0.0004 | DGFI |
| CHI3 | -0.0120 | 0.0011 | -0.0061 | DGFI |
| COL2 | -0.0047 | -0.0015 | -0.0013 | DGFI |
| CULC | -0.0123 | 0.0011 | -0.0072 | DGFI |
| HER2 | -0.0126 | 0.0009 | -0.0067 | DGFI |
| ICAM | -0.0080 | 0.0018 | -0.0013 | INEGI |
| ICEP | -0.0067 | 0.0021 | -0.0020 | INEGI |
| IDGO | -0.0112 | 0.0014 | -0.0058 | INEGI |
| IITJ | -0.0104 | 0.0024 | -0.0068 | INEGI |
| IMIE | -0.0316 | 0.0284 | 0.0171 | INEGI |
| IMIP | -0.0125 | 0.0005 | -0.0055 | INEGI |
| INEG | -0.0018 | 0.0321 | -0.0172 | DGFI |
| IPAZ | -0.0420 | 0.0259 | 0.0179 | DGFI |
| LPAZ | -0.0420 | 0.0259 | 0.0179 | DGFI |
| MERI | -0.0085 | 0.0008 | -0.0002 | DGFI |
| MEXI | -0.0208 | 0.0129 | 0.0154 | DGFI/INEGI |
| MTY2 | -0.0106 | 0.0010 | -0.0040 | DGFI |
| OAX2 | -0.0038 | -0.0004 | 0.0027 | DGFI |
| TAMP | -0.0095 | 0.0009 | -0.0032 | DGFI |
| TOL2 | -0.0063 | 0.0018 | -0.0024 | DGFI |
| UGTO | -0.0090 | -0.0002 | -0.0027 | DGFI |
| UQRO | -0.0079 | 0.0010 | -0.0038 | INEGI |
| USLP | -0.0090 | 0.0019 | -0.0024 | DGFI |
| UVER | -0.0061 | 0.0046 | -0.0029 | INEGI |
| VIL2 | -0.0079 | 0.0021 | -0.0003 | DGFI |

Velocidades con respecto a ITRF2008 de las estaciones de rastreo GPS continuo de la RGNA.

Anexo 3. Fórmulas para la conversión de coordenadas geodésicas latitud (ϕ), longitud (λ) y altura geodésica (h) a coordenadas cartesianas tridimensionales (X , Y , Z) y viceversa.

Los parámetros del elipsoide a emplear son los del GRS80.

❖ *Geodésicas a Cartesianas:*

$$X = (v + h) \cos \phi \cos \lambda$$

$$Y = (v + h) \cos \phi \sin \lambda$$

$$Z = ((1 - e^2)v + h) \sin \phi$$

En donde:
$$v = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}}$$

a es el semieje mayor del elipsoide (6 378 137 m)

e^2 es la primera excentricidad al cuadrado (0.006 694 380 022 90), y

❖ *Cartesianas a Geodésicas:*

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(Z + e^2 a \sin^3 u / (1 - f))}{(p - e^2 a \cos^3 u)}$$

$$h = p \cos \phi + Z \sin \phi - a(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$$

En donde:

$$p = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

$$u = \tan^{-1} \frac{Z(1-f)}{p} \left[1 + \frac{e^2 a}{r(1-f)} \right]$$

$$r = (p^2 + Z^2)^{1/2}$$

f es el achatamiento del elipsoide (0.003 352 810 681 18)