

Marco de referencia ITRF en México y su relación con WGS84 y NAD27



Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**Marco de referencia ITRF en México
y su relación con WGS84
y NAD27**



Catalogación en la fuente INEGI:

910.285 Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México).
Marco de referencia ITRF en México y su relación con WGS84 y NAD27 / Instituto
Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI, c2019.

vii, 11 p.

1. Sistema de información geográfica - México.

Conociendo México

01 800 111 4634

www.inegi.org.mx

atencion.usuarios@inegi.org.mx



INEGI Informa



@INEGI_INFORMA

DR © 2019, **Instituto Nacional de Estadística y Geografía**

Edificio Sede

Avenida Héroe de Nacozari Sur 2301

Fraccionamiento Jardines del Parque, 20276 Aguascalientes,

Aguascalientes, Aguascalientes, entre la calle INEGI,

Avenida del Lago y Avenida Paseo de las Garzas.

Presentación

De acuerdo a la **Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG)**, una de las atribuciones del **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)**, es realizar acciones para que la información del SNIEG sea comparable en el tiempo y en el espacio. Esta comparabilidad se logra mediante una correcta georreferenciación de la información que se genera, es por ello que el INEGI debe poner a disposición de los usuarios y generadores de información geográfica un marco de referencia para que todos los estudios geográficos estén vinculados a él. En este sentido el INEGI publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Técnica del Sistema Geodésico Nacional, que entró en vigor en diciembre de 2010 y que establece como marco de referencia geodésico oficial para México al Marco de Referencia Terrestre Internacional 2008 (**ITRF2008**) en la **época 2010.0** en sustitución del ITRF92 época 1988.0.

A continuación se describen algunas características y propiedades básicas de los Marcos de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), del antecedente en México, el Datum Norteamericano de 1927 (NAD27), y del Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84); se abordan también las diferencias en coordenadas y las relaciones entre ellos con el objetivo de que productores y usuarios de información geográfica conozcan las implicaciones de manejar datos en diferentes sistemas e identifiquen alternativas para la transformación de coordenadas cuando sea necesario.

Otras siglas de instituciones y/o conceptos

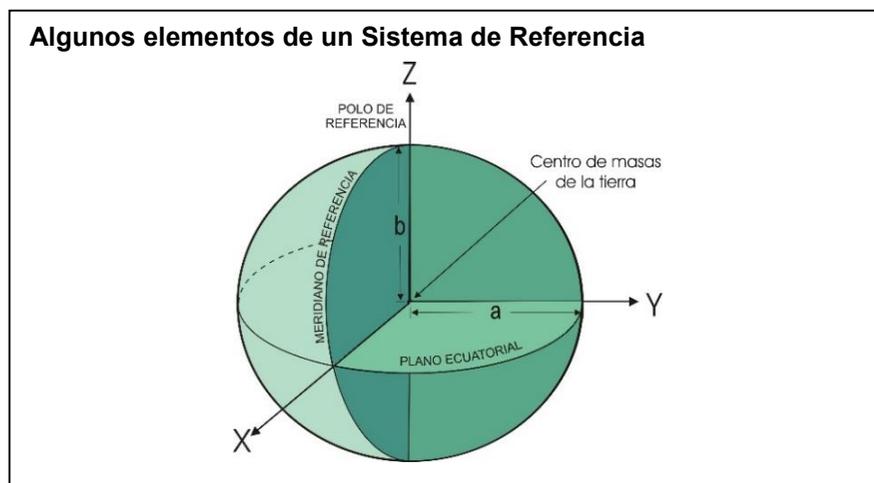
GPS	Global Positioning System
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
GNSS	Global Navigation Satellite System
RGNA	Red Geodésica Nacional Activa
WGS84	World Geodetic System 1984
NAD27	North American Datum of 1927
ITRS	International Terrestrial Reference System
GLONASS	Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
GRS80	Geodetic Reference System 1980
DMA	Defense Mapping Agency
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
OGP	International Association of Oil & Gas Producers (actualmente IOGP)
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency

Índice

Introducción	VII
1. ITRF y su relación con WGS84	1
1.1 Época de referencia	3
1.2 ITRF en México	3
1.3 Obtención de coordenadas ITRF	3
1.4 Transformación entre ITRF92 época 1988.0 e ITRF2008 época 2010.0	4
1.5 WGS84 y su relación con ITRF	4
1.6 WGS84 como marco de referencia	5
2. NAD27	9
1.2 NAD27 en México	9
2.2 Transformación de NAD27 a ITRF/WGS84	9
2.3 Transformación en el Golfo de México	10
Bibliografía	11

Introducción

Con el desarrollo de las técnicas geodésicas espaciales en las últimas décadas, los datum que se usaban anteriormente para posicionamientos geodésicos horizontales como NAD27 -definidos para regiones específicas-, fueron reemplazados con el desarrollo de los Sistemas de Referencia Terrestre y los Marcos de Referencia Terrestre, que son de cobertura global. Un Sistema de Referencia Terrestre se define como las prescripciones y convenciones, junto con un modelo matemático de la Tierra, que se utilizan para definir en cualquier momento un sistema de ejes coordenados para la ubicación de puntos en nuestro planeta. Una de las características de estos sistemas de referencia es que ubican su centro lo más cerca posible al centro de gravedad de la Tierra.



Los Marcos de Referencia son la materialización de los sistemas de referencia; esta se efectúa mediante **puntos establecidos sobre la superficie terrestre, que son directamente accesibles para su ocupación u observación**. Los ITRF (Marcos de Referencia Terrestre Internacional) son materializaciones del ITRS (Sistema de Referencia Terrestre Internacional) que se realizan mediante la estimación de las coordenadas y velocidades de un conjunto de estaciones de observación de diferentes técnicas geodésicas satelitales; distribuidas en toda la superficie terrestre.

La definición del ITRS y la realización de los ITRF están a cargo del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS). Para la realización de cada nuevo ITRF se utiliza una mayor cantidad de datos y se incorporan nuevas estaciones; por ejemplo, mientras que la realización ITRF92 constó de 288 estaciones, ITRF2008 (publicado por el IERS en la época 2005.0) está compuesto por 934 estaciones. A la fecha la última realización es ITRF2014 (http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/).

1. ITRF y su relación con WGS84

1. ITRF y su relación con WGS84

1.1 Época de referencia

La posición de cualquier punto o rasgo sobre la Tierra, con respecto a un sistema de referencia, cambia con el tiempo debido a los desplazamientos o deformaciones que ocurren en la superficie de la corteza terrestre, principalmente por tectónica de placas, es por ello que los marcos ITRF tienen asociada una época de referencia para las coordenadas de sus estaciones; esto implica que las coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de un punto o rasgo describen la posición que tenía el rasgo el día primero de enero del año 2010.

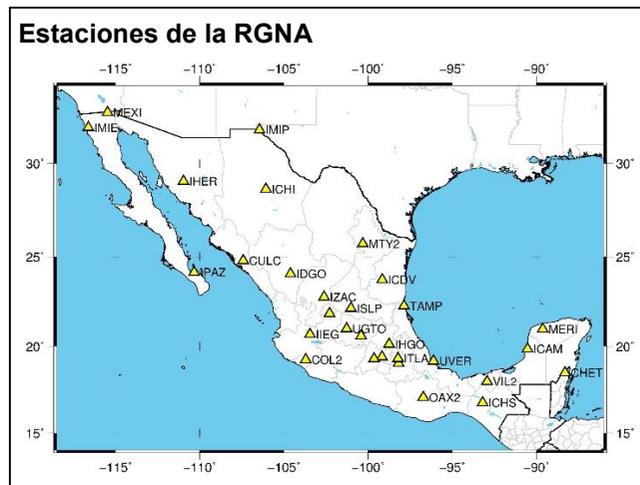


1.2 ITRF en México

La realización ITRF92 del IERS, definida para la época 1988.0, fue adoptada oficialmente por México en 1998 para la actualización y densificación de su red geodésica horizontal en sustitución de NAD27. Posteriormente, dadas las mejoras en ITRF2008 y las deformaciones acumuladas en la red ITRF92 debido a las deformaciones de la corteza terrestre, a partir de diciembre de 2010 se adoptó ITRF2008 en la época 2010.0 como marco de referencia oficial para la determinación de las coordenadas de su red geodésica horizontal.

La base del marco de referencia ITRF2008 en nuestro país es el conjunto de estaciones GNSS

permanentes que conforman la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), en las que se captan los datos de las constelaciones GNSS las 24 horas de los 365 días del año, y a partir de las cuales se densifica el marco geodésico horizontal a las miles de marcas o monumentos distribuidos en toda la República que conforman la red geodésica pasiva. La RGNA está conformada a la fecha por 31 estaciones que registran los datos de los satélites de las constelaciones GPS, GLONASS y Galileo, datos que están a disposición de los usuarios junto con las coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de cada estación.



1.3 Obtención de coordenadas ITRF

Las técnicas aplicadas para la definición de ITRF2008 y la cantidad de estaciones disponibles en todo el mundo, permitieron obtener altos órdenes de exactitud en la determinación de las coordenadas de las estaciones de la RGNA y de la densificación de la red pasiva. A partir de las estaciones de estas redes, disponibles para ocupación directa, y con sus coordenadas en ITRF, cualquier usuario puede propagar también coordenadas en ITRF mediante posicionamiento diferencial con equipo GPS o GNSS, u con otro tipo de equipos de medición, como la estación total. La exactitud de las coordenadas obtenidas depende de la técnica de medición empleada y en

el caso de posicionamiento GPS, del tipo de receptor que se utilice.

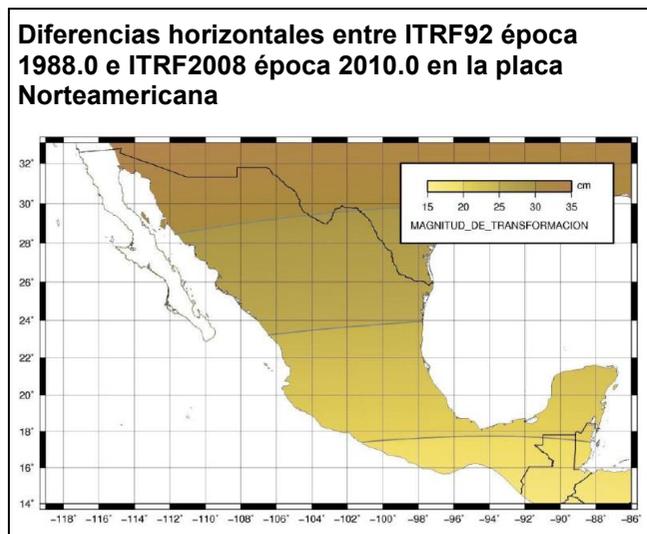
En México se tienen dos regiones, al noroeste y al sur del país, en las que se presentan deformaciones diferenciales significativas de la corteza terrestre con respecto al resto del territorio. Para levantamientos GNSS en estas zonas, en los que se requiera obtener órdenes de exactitud de 10 centímetros o mejores, se recomienda considerar el efecto de estas deformaciones en el procesamiento diferencial de los datos, como se describe en:

(<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825295561>)

1.4 Transformación entre ITRF92 época 1988.0 e ITRF2008 época 2010.0

La adopción de ITRF2008 ofrece varias ventajas, una de ellas es que se cuenta con parámetros y velocidades para trasladar las coordenadas entre diferentes realizaciones del ITRF y se pueden establecer también parámetros de transformación con otros sistemas de referencia geocéntricos, lo que lo hace un marco de referencia dinámico.

La diferencia entre coordenadas en diferentes ITRF se debe principalmente a la época en que están referidas. La diferencia entre coordenadas en ITRF92 época 1988.0 y coordenadas en ITRF2008 época 2010.0 ronda en unos 30 centímetros en el territorio situado en la placa Norteamericana y es de alrededor de 1 metro en la península de Baja California, que está situada en la placa del Pacífico.



La transformación de coordenadas entre los marcos ITRF92 época 1988.0 e ITRF2008 época 2010.0 se puede realizar a través de la aplicación TRANITRF.

(<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/tranitrf/inicio.jsp>)

TRANITRF utiliza transformación de semejanza euclidiana mediante 7 parámetros y sus velocidades para el cambio de marco ITRF92-ITRF2008. Además de los parámetros, es necesario aplicar un modelo de tectónica de placas para manejar adecuadamente la diferencia entre las épocas 1998.0 y 2010.0. El modelo de transformación de TRANITRF involucra un error asociado que es de mayor magnitud en la región sur del país, donde existe un efecto local no considerado por el modelo global de tectónica de placas que se utiliza. Para mayor información sobre la transformación se recomienda consultar:

(https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/geodesia_activa/doc/el_cambio_de_itrf.pdf)

Dadas las diferencias entre ITRF92 e ITRF-2008, para aplicaciones cartográficas o levantamientos con exactitud de 1 metro o mayor, no se considera necesario realizar esta transformación.

1.5 WGS84 y su relación con ITRF

El WGS84 (World Geodetic System 1984), creado por el gobierno de los Estados Unidos de América desde 1987, es también un sistema de referencia global desarrollado a partir de observaciones satelitales. En su definición teórica como sistema de referencia WGS84 es muy similar al ITRS, como se puede observar en los parámetros de su elipsoide asociado.

Parámetros de los elipsoides GRS80 y WGS84

ELIPSOIDE:	ITRF (GRS80)	WGS84 (WGS84)
Semieje mayor (a)	6 378 137 m	6 378 137 m
Semieje menor (b)	6 356 752.31414 m	6 356 752.31424 m
Factor de achata- miento	1/298.257222101	1/298.257223563
Velocidad angular (w)	7 292 115x10 ⁻¹¹ rad/seg	7 292 115 x 10 ⁻¹¹ rad/seg
Constante gravitacio- nal (GM)	3 986 005x10 ⁸ m ³ /seg ²	3 986 005 x 10 ⁸ m ³ /seg ²

1.6 WGS84 como marco de referencia

A pesar de las similitudes de ambos sistemas, las coordenadas materializadas de la primera realización de WGS84 (WGS84 Doppler) diferían en alrededor de 1 metro con respecto a las de las primeras realizaciones ITRF (ITRF88-ITRF90). En posteriores realizaciones de WGS84, identificadas con la semana GPS asociada (G730, G873, G1150, etc.), se utilizaron estaciones con coordenadas ITRF para refinar el WGS84 y para alinearlo y ajustarlo con ITRF, por lo que las diferencias entre ambos marcos se han venido minimizando.

Consistencia entre realizaciones WGS84 e ITRF

Realización WGS84	Equivalente a:	Diferencia Aproximada
WGS84 (G730)	ITRF92 (época 1988.0)	10 cm
WGS84 (G873)	ITRF94 (época 1993.0)	2 cm
WGS84 (G1150)	ITRF2000 (época 1997.0)	1-2 cm
WGS84 (G1674)	ITRF2008 (época 2005.0)	1-2 cm
WGS84 (G1762)	ITRF2008 (época 2005.0)	<1 cm

Conforme a las diferencias mostradas en la tabla 2, casi para todas las aplicaciones podría asumirse una equivalencia entre coordenadas ITRF y WGS84, sin embargo, hay tres aspectos que deben tomarse en cuenta:

1) El WGS84, como marco de referencia, está conformado por estaciones permanentes de la fuerza aérea estadounidense y de la DMA (Defense Mapping Agency), con una limitada distribución global, por lo que WGS84 no ofrece la disponibilidad de estaciones necesarias para la propagación de coordenadas mediante posicionamiento.

En los posicionamientos diferenciales con receptores GPS o GNSS, ya sea con post-procesamiento o en tiempo real, las coordenadas que se obtienen están ligadas al marco de referencia asociado a las coordenadas de las estaciones que se utilizan como base o referencia, por lo que la obtención de coordenadas precisas en WGS84 mediante procesamiento

diferencial en nuestro país no se puede realizar de la misma manera que en ITRF al no existir una red de estaciones WGS84 a la cual ligar nuevas mediciones.

2) En el posicionamiento GPS en modo absoluto, con receptores tipo navegador o con otro tipo de receptor usado de manera autónoma, no se obtienen posiciones ligadas a un marco de referencia materializado y la referencia son las órbitas o posiciones predichas de los satélites en WGS84 (que son las efemérides transmitidas por los satélites a los receptores de los usuarios GPS), por lo tanto las posiciones obtenidas están ligadas también al WGS84. No obstante, debido a que la trayectoria real de los satélites se ve afectada por distintas perturbaciones, las efemérides transmitidas contienen errores por tratarse de estimaciones pre-calculadas, es así que las posiciones obtenidas con GPS de manera autónoma, en WGS84, tienen una incertidumbre de varios metros.

3) En la tabla 2, la semana GPS asociada a cada realización WGS84 indica, al igual que en los ITRF, que las coordenadas están asociadas a una época específica. Por lo que, si de alguna manera se pudiera contar con coordenadas WGS84 (G730) y WGS84 (G1762) obtenidas de manera precisa en un punto, entre ambas coordenadas se observarían diferencias similares a las que existen entre ITRF92 e ITRF2008 época 2005.0 (del IERS); y de magnitud ligeramente menor a las de la figura 4, que se calcularon para la época 2010.0 del ITRF2008.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, en teoría WGS84 e ITRF son idénticos al menos a nivel de 1 metro, por lo que, de manera general, para aplicaciones cartográficas y para cualquier aplicación que requiera órdenes de exactitud menores a un metro, las coordenadas WGS84 pueden asumirse equivalentes a ITRF2008. Sin embargo, para determinar su compatibilidad con ITRF2008 y si son viables para las necesidades de un proyecto específico, se debe considerar también el origen de las coordenadas en WGS84, ya que de tratarse de posiciones obtenidas con GPS de manera autónoma pueden tener una exactitud o error asociado de varios metros.

2. NAD27

2. NAD27

2.1 NAD27 en México

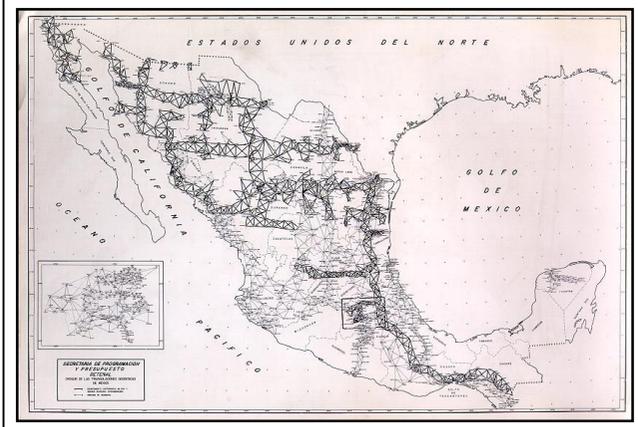
Hasta 1998, el Datum Norteamericano de 1927 (NAD27) se utilizó oficialmente en México como referencia para los levantamientos horizontales. El NAD27 es un sistema de referencia geodésico o datum de aplicación regional, ya que en su definición el centro del elipsoide que emplea, el de Clarke 1866, no se ubica en el centro de masas de la Tierra o geocentro, sino que se orientó de tal manera que se ajustara al área de Norteamérica.

Elipsoide de Clarke 1866

Parámetros	Clarke 1866
Semieje mayor (a)	6 378 206.4 m
Semieje menor (b)	6 356 583.8 m

Lo anterior, aunado a los errores en la red NAD27 debido a las limitaciones de los métodos geodésicos tradicionales con los que fue propagada, lo hacen incompatible con los sistemas de referencia modernos.

Triangulaciones geodésicas principales de NAD27 en México

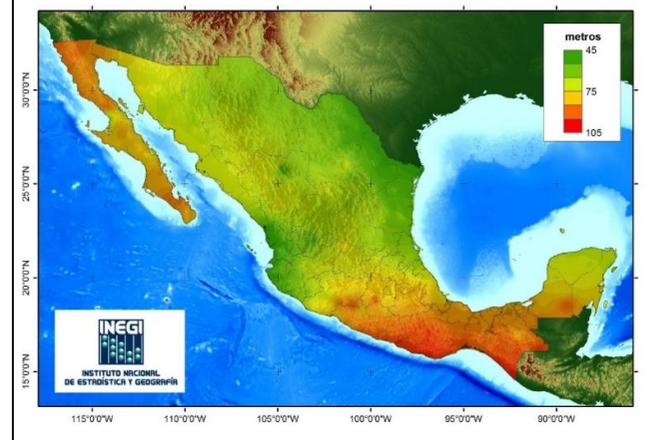


2.2 Transformación de NAD27 a ITRF/WGS84

La forma en que fue definido NAD27 y la metodología con que fue propagado implican en México

diferencias que van desde decenas de metros y hasta más de cien metros al compararlas con coordenadas en ITRF.

Diferencias horizontales entre coordenadas NAD27 e ITRF



En el INEGI se desarrolló el programa TRANINV para transformar coordenadas de NAD27 a ITRF92 y viceversa, esta herramienta es la oficial para la transformación de coordenadas NAD27-ITRF92 en territorio continental mexicano.

(<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/traninv/>)

El error medio cuadrático (RMS) de la transformación con TRANINV a nivel nacional es de alrededor de 3 metros (INEGI, 1996), por lo tanto, no se recomienda el uso de las coordenadas derivadas de la transformación en aplicaciones geodésicas, sino únicamente cartográficas.

Tomando en cuenta tanto el error propio de las coordenadas NAD27 como el error asociado a la transformación, así como las diferencias entre ITRF92 e ITRF2008, y de éstos con WGS84 (diferencias descritas en el capítulo anterior); las coordenadas ITRF92 obtenidas con TRANINV pueden considerarse también equivalentes a ITRF2008 y a WGS84, siempre que antes de utilizarlas se considere que tendrán un error asociado de varios metros.

2.3 Transformación en el Golfo de México

Debido a que TRANINV no está diseñado para la transformación de coordenadas en territorio marítimo, para la transformación en estas zonas es necesario utilizar parámetros de transformación. Sin embargo, se debe considerar que dada su incompatibilidad con los marcos de referencia modernos, no hay parámetros de transformación de NAD27 a ITRF (o WGS84) que apliquen de manera general para Norteamérica como los hay para transformar coordenadas entre Marcos de Referencia Globales, por lo que existen diversos parámetros regionales [NIMA¹ (2000) y OGP² (2010), por ejemplo] para transformar coordenadas entre NAD27 y WGS84 en zonas específicas.

También es necesario tomar en cuenta que la exactitud de la transformación con los parámetros aplicables a territorio continental mexicano es inferior a la que se obtiene con TRANINV. De los

diversos parámetros disponibles, para el territorio marítimo mexicano se recomienda usar los publicados por NIMA (NGA, 2014) para México:

$$T_x = -12 \pm 8 \text{ metros}$$

$$T_y = 130 \pm 6 \text{ metros}$$

$$T_z = 190 \pm 6 \text{ metros}$$

Los 3 parámetros de traslación anteriores, que incluyen el error asociado estimado, sirven para la transformación de coordenadas NAD27 a WGS84/ ITRF; para la transformación inversa se debe cambiar el signo de los parámetros.

La transformación mediante 3 parámetros se aplica a coordenadas cartesianas geocéntricas X,Y,Z; no confundir con coordenadas norte, este (en alguna proyección cartográfica) y altura.

¹ NIMA: National Imagery and Mapping Agency del U.S. Geological Survey.

² OGP: International Association of Oil and Gas Producers, actualmente IOGP.

Bibliografía

- C. Boucher, Z. Altamimi, L. Duhem (1993), *ITRF 92 and its associated velocity field*. (IERS Technical Note; 15) Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 1993. iv, 164 p.
- Gérard Petit and Brian Luzum (eds.), (2010), *IERS Conventions* (IERS Technical Note; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6.
- INEGI (1996), *TRANINV Programa de Transformación de Coordenadas ITRF92 a NAD27*, 1996.
- INEGI (2010), *Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional*, Diciembre 2010.
- INEGI (2011), *El cambio de Marco de Referencia Terrestre (ITRF) en México*, Abril 2011.
- NGA Standardization Document NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84 (2014), *Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, 2014-07-08 Version 1.0.0.
- NIMA Technical Report TR8350.2 (2000), *Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, Third Edition, Amendment 1, 3 January 2000.
- OGP (2010). *Coordinate transformation in the Gulf of Mexico*. OGP publication 373-17. (Geomatics Guidance note 17). Initial publication by the Americas Petroleum Survey Group (APSG): March 2006.
- Z. Altamimi, X. Collilieux, and L. Métivier (2012), *Analysis and results of ITRF2008*. (IERS Technical Note; 37) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012. 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5.