

Advances in Venezuelan geodetic datum transformations between La Canoa and the geocentric WGS-84 reference system

**Melvin Hoyer, Gustavo Acuña, Eugen Wildermann, Giovanni Royero
y Vianey Salazar**

*Departamento de Geodesia Superior, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia. Apartado 526, Maracaibo 4011-A, Venezuela.
E-mail: mhoyer@europa.ica.luz.ve*

Abstract

New calculations related to the determination of transformation parameters between the national geodetic (La Canoa-Hayford) and the geocentric satellite datum WGS-84, used as reference system for GPS coordinates, are analysed. Parameters of a national and regional nature obtained under different calculation conditions with corresponding quality tests are presented.

Key words: Transformation parameters, WGS-84, Venezuelan datum.

Avances en la transformación del datum geodésico venezolano La Canoa al geocéntrico WGS-84

Resumen

El trabajo presenta nuevos cálculos, análisis y conclusiones con respecto a la determinación de parámetros de transformación entre el datum geodésico nacional de Venezuela (La Canoa-Hayford) y el datum satelital con respecto al cual se expresan las coordenadas GPS, es decir, el WGS-84. Al respecto se publican parámetros de carácter nacional y regional, obtenidos bajo diferentes condiciones de cálculo, así como las pruebas correspondientes para la verificación de su calidad.

Palabras clave: Parámetros de transformación, WGS-84, datum venezolano.

Introducción

La combinación de mediciones geodésicas de diferente naturaleza requiere la transformación entre los respectivos sistemas de referencia utilizados. Este es el caso de las mediciones satelitales GPS, expresadas en el datum WGS-84, las cuales para servir de apoyo o utilizarse en combinación con triangulaciones, poligonales, etc., deben ser transformadas al datum geodésico nacional. Debido a que el datum geodésico oficial de Venezuela (La Canoa-Hayford, en adelante denominado solamente La Canoa) es referencia para otros países del continente, pues fue declarado datum provisional Suramericano en 1956 (Provisional South American Datum 1956, PSAD-56), los Parámetros

de Transformación (PT) calculados por organismos internacionales no deben ser utilizados para trabajos nacionales pues no son representativos de las características de la red de triangulación venezolana y por lo tanto, producen grandes errores en las transformaciones. Tal situación requiere tener a disposición valores específicos para el territorio nacional e incluso para subregiones del mismo, dada la falta de homogeneidad de la red de control básica.

El trabajo presenta nuevos PT, producto de los últimos cálculos, pruebas y análisis realizados con la mayor cantidad de información disponible y aplicando la experiencia ganada en trabajos anteriores. El problema de la vinculación de medicio-

nes GPS con el control geodésico básico del país mediante diferentes alternativas, se analizará en otra publicación.

Modernamente los programas de computación para procesar y ajustar mediciones GPS permiten la transformación del datum al utilizar las coordenadas de uno o varios puntos de apoyo, sin embargo muchos usuarios prefieren disponer de un grupo de PT para hacer la conversión del datum.

La vigencia de la necesidad de calcular PT puede ser objeto de una amplia discusión de acuerdo a la necesidad del trabajo y al usuario involucrado. Por ejemplo, en el caso de Venezuela donde el datum comúnmente utilizado es el oficial La Canoa, existe la necesidad de transformar las coordenadas de el(los) punto(s) de apoyo en el datum nacional al datum satelital en el cual se efectúan los cálculos, igualmente para comparar resultados de mediciones en WGS-84 con coordenadas convencionales.

La necesidad de parámetros en la dirección contraria, es decir del datum geocéntrico al nacional, es muy frecuente en Venezuela, por ejemplo para expresar en el datum nacional resultados de cálculos efectuados en el sistema WGS-84 y para obtener en el datum La Canoa posiciones en el campo, bien sea mediante instrumentos navegadores (ya que la magnitud de los parámetros en el orden de cientos de metros supera la inexactitud de la posición absoluta GPS) o mediante mediciones GPS diferenciales en tiempo real (para suplir a la estación maestra cuyas coordenadas están en el datum WGS-84, de los valores que le permitan transmitir las correcciones en el datum La Canoa).

Los resultados de la nueva REd Gps VENEzolana (REGVEN) y del proyecto Sudamericano SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur), introducirán nuevos elementos en la discusión antes mencionada respecto a la vigencia de la necesidad de calcular PT. Ejemplo de esto es el uso del International Terrestrial Reference Frame (ITRF) como datum de estos proyectos, lo cual obliga a cada país a analizar la posibilidad y conveniencia de adoptar este datum geocéntrico como oficial, eliminando la necesidad de disponer de PT predeterminados. Especialmente en el caso de aplicaciones con requerimientos de alta exactitud, todos los proyectos GPS, nuevos y existentes, deberán ser vinculados a la red GPS

nacional para poder ser geodésicamente aceptados por las autoridades.

Sin embargo, para proyectos con bajos requerimientos de exactitud (por ejemplo para muchos trabajos de la industria petrolera) se mantendrá la necesidad actual de calcular y utilizar PT. Lo mismo se aplica a todo tipo de proyecto de no adoptarse un nuevo datum oficial.

Teoría y antecedentes

Considerando la limitación de espacio y el hecho que tanto la teoría como los antecedentes del cálculo de PT en Venezuela han sido ampliamente tratados y divulgados, se refiere al lector a las siguientes publicaciones:

La teoría de la relación entre los sistemas de referencia geodésicos y los modelos de similitud se trata en [1], [2], [3]. Cálculos anteriores de PT entre el datum satelital WGS-84 y el datum geodésico venezolano La Canoa se presentan en [4], [5], [6].

Mediciones GPS disponibles

Para efectuar los nuevos cálculos de PT presentados en este trabajo se utilizaron todas las mediciones GPS disponibles para los autores, producto de diferentes proyectos, efectuados por diversas instituciones públicas y privadas del país, sobre vértices de la triangulación de primer orden de la Dirección de Cartografía Nacional (DCN), organismo cartográfico oficial de Venezuela. Se trata de 15 proyectos, distribuidos por todo el país con un total de 86 puntos.

Las características de heterogeneidad de estos proyectos en cuanto a la calidad, instrumental y procesamiento, así como el hecho que algunos sean *relativos* y otros *absolutos* ya ha sido mencionado y analizado en anteriores trabajos. Como proyectos *relativos* se consideran aquellos que se "apoyan" o "fijan" en el procesamiento las coordenadas de uno o varios vértices de triangulación de la DCN transformadas a WGS-84. Los proyectos *absolutos* son aquellos que utilizan estaciones fiduciales IGS (International GPS Service for Geodynamics) y/o efemérides precisas [4], [5].

A pesar que parte de la información utilizada en este trabajo no es nueva, se han hecho cálculos

totalmente diferentes a los anteriormente publicados bajo distintas consideraciones y análisis.

Cálculos efectuados

El procesamiento efectuado se divide en dos partes. Primero se realizó la determinación de muchos grupos de parámetros, utilizando el programa *TransDat* [4] específicamente para cada proyecto disponible y para combinaciones de varios y de todos los proyectos.

En segundo lugar, se efectuó la transformación de coordenadas GPS en una muestra de varios puntos distribuidos por todo el país utilizando cada uno de los grupos de PT obtenidos, con la finalidad de comparar y probar la bondad de los PT.

En cada caso hay una gran cantidad de variantes. Por ejemplo, para la determinación de PT se utilizaron los modelos Bursa-Wolf y Badekas-Modolensky. Estos modelos de similitud se caracterizan por permitir la determinación de tres translaciones, tres rotaciones y un factor de escala. El modelo Bursa-Wolf ha sido ampliamente utilizado por su facilidad de aplicación, mientras que el modelo Badekas-Molodensky tiene la ventaja de calcular parámetros no correlacionados entre sí, pero requiere el uso de las coordenadas de un punto central o fundamental [7].

Se calculó en cada caso un número variable de parámetros (generalmente 3 ó 7) y se modificó el número de puntos a ser considerados. Se ensayó nuevamente la posibilidad de corregir las alturas por efecto de la ondulación geoidal según las fórmulas de Vening-Meinesz [8], [9]. Mientras que para las pruebas también se utilizaron diferentes muestras de puntos.

Debe mencionarse que para los análisis y resultados de este trabajo se realizó un número considerablemente grande de cálculos de nuevos parámetros y sus pruebas correspondientes.

Estudio de los resultados obtenidos

Se han obtenido parámetros de transformación directos entre WGS-84 y La Canoa de carácter nacional y regional, es decir, a partir de mediciones en todo el país y de proyectos regionales solamente.

Algunos de estos grupos de PT presentaron valores estocásticos altos o con diferencias notables en las pruebas realizadas, por esta razón, deberían ser eliminados. Una selección de los PT que cumplen los criterios de calidad se presenta en la Tabla 1. Los dos grupos iniciales de PT son de carácter nacional, mientras que el resto corresponden a regiones específicas. Cabe señalar que el primer grupo es producto de proyectos de carácter absoluto, mientras que el segundo proviene de proyectos relativos (apoyados).

De la tabla puede observarse que entre los PT hay diferencias en el orden de varios metros, las cuales se acentúan para los PT regionales entre sí y entre los PT de naturaleza absoluta y relativa, puede observarse la presencia de fuertes rotaciones especialmente en los ejes X e Y, que en Venezuela se reflejan como variaciones en las coordenadas longitud geográfica y altura, respectivamente.

La razón de las diferencias entre los valores de un grupo de PT y otro, y las fuertes rotaciones en X e Y, pueden tener explicación en las diferentes modalidades de vinculación de los proyectos GPS utilizados con el sistema geocéntrico (materialización del datum WGS-84 mediante observaciones), la inexactitud en la definición del datum satelital, estimada en el orden $\pm 1 - 2$ m. [10], la heterogeneidad de la red de triangulación, así como su debilidad en la coordenada longitud dada la desuniforme propagación de errores en dirección Este-Oeste, y el ya conocido y ampliamente tratado problema de las alturas [9].

La Tabla 2 presenta a manera de ejemplo para el punto La Canoa (estación fundamental del datum nacional) las diferencias entre sus coordenadas GPS transformadas con los PT indicados y las coordenadas oficiales del punto. Los valores de las diferencias se presentan en segundos de arco y en metros para las alturas, respectivamente. Se desea ilustrar con esta tabla la variación de los resultados que se obtendrían para cualquier punto medido con GPS al utilizar uno u otro grupo de PT para efectuar la transformación. Estas diferencias están en el orden de varios metros entre un grupo de PT y otro.

La Tabla 3 presenta el valor medio de las diferencias obtenidas al utilizar diferentes grupos de PT para transformar las coordenadas de una muestra de 18 puntos distribuidos en todo el país cuando se comparan con las coordenadas conoci-

Tabla 1
Selección de parámetros de transformación calculados (La Canoa -> WGS-84)

Identificación de los PT	No. de puntos	DX [m]	DY [m]	DZ [m]	EX ["]	EY ["]	EZ ["]	DM [ppm]	m_0 [m]
Nacionales de carácter absoluto	21	-271.60 ±0.57	112.19 ±0.57	-359.93 ±0.57	-7.55 ±1.11	-1.87 ±0.55	1.46 ±0.31	-5.6 ±1.5	2.61
Nacionales de carácter relativo	86	-277.36 ±0.85	106.77 ±0.85	-362.09 ±0.85	-5.42 ±1.64	-2.33 ±0.79	-0.05 ±0.46	-4.0 ±2.1	7.84
Oriente	10	-273.47 ±0.67	110.59 ±0.67	-357.91 ±0.67	-2.64 ±1.48	-1.86 ±1.39	0.86 ±2.18	-2.4 ±6.0	2.11
Zulia	11	-271.31 ±1.14	110.62 ±1.14	-365.07 ±1.14	-8.85 ±3.25	0.68 ±2.80	6.20 ±4.90	1.8 ±11.7	3.79
Barinas-Portuguesa	6	-279.98 ±0.87	103.21 ±0.87	-364.29 ±0.87	-9.15 ±8.24	1.40 ±4.49	1.27 ±6.04	-31.1 ±10.6	2.14
Guárico	9	-231.80 ±0.35	105.49 ±0.35	-364.32 ±0.35	-5.23 ±1.63	-1.45 ±0.98	-0.99 ±0.76	-11.4 ±3.4	1.05
Falcón	4	-259.18 ±1.30	98.61 ±1.30	-355.39 ±1.30	-	-	-	-	2.61
Caracas	5	-267.26 ±0.05	106.40 ±0.05	-360.81 ±0.05	-3.03 ±2.21	-0.80 ±1.26	3.94 ±1.31	2.7 ±4.9	0.11

Tabla 2
Diferencias entre las coordenadas GPS transformadas y las conocidas (DCN) para la estación fundamental La Canoa utilizando diferentes grupos de PT

Identificación de los PT	Dif. Latitud N ["]	Dif. Longitud W ["]	Dif. Altura [m]
Nacionales de carácter absoluto	-0.012	-0.026	3.30
Nacionales de carácter relativo	-0.023	0.205	5.53
Oriente	-0.123	-0.029	2.93
Zulia	0.147	-0.083	-16.56
Barinas-Portuguesa	-0.109	0.952	1.78
Guárico	-0.223	0.367	3.10
Falcón	-0.052	-0.256	18.32
Caracas	-0.051	-0.166	4.46

Tabla 3
Valor medio de las diferencias obtenidas en la muestra de 18 puntos
al utilizar distintos grupos de PT

Identificación de los PT	Dif. med. Latitud N ["]	Dif. med. Longitud W ["]	Dif. med. Altura [m]
Nacionales de carácter absoluto	0.286 ± 0.112	0.464 ± 0.208	12.56 ± 4.48
Nacionales de carácter relativo	0.247 ± 0.096	0.347 ± 0.128	11.94 ± 4.01
Oriente	0.183 ± 0.076	0.429 ± 0.185	11.28 ± 3.87
Zulia	0.257 ± 0.058	0.427 ± 0.188	19.22 ± 8.08
Barinas-Portuguesa	0.227 ± 0.063	0.470 ± 0.113	12.26 ± 4.17
Guárico	0.255 ± 0.113	0.343 ± 0.120	12.58 ± 4.75
Falcón	0.201 ± 0.027	0.592 ± 0.274	18.72 ± 2.69
Caracas	0.147 ± 0.051	0.483 ± 0.215	15.76 ± 3.66

das en el sistema La Canoa derivadas de la triangulación de primer orden. Esta tabla puede servir para ilustrar algunos de los análisis que se hacen a continuación a partir de todos los cálculos y pruebas analizadas.

Ubicación y número de puntos utilizados para el cálculo de los PT

La ubicación y el número de puntos está limitada por la cantidad, por la naturaleza y por la extensión de los proyectos GPS en todo el país sobre vértices de triangulación de primer orden. Al calcular los PT se hace un análisis de los residuales obtenidos en la compensación para los diferentes puntos, los cuales pueden ser excluidos del cálculo si se considera que están afectados por fuertes influencias locales. Pruebas posteriores a las transformaciones realizadas a veces no ratifican la necesidad de esta exclusión.

La ubicación de los puntos utilizados para el cálculo de los PT debe ser considerada al momento de aplicar los resultados en una u otra parte del país. La razón de este hecho es la heterogeneidad de la red de triangulación de primer orden. De igual forma, la cantidad mayor o menor de puntos considerados en el cálculo de los PT será un indicativo de la mayor o menor confiabilidad de los mismos.

Modelo matemático

Se ha concluido en la conveniencia de usar los modelos de Bursa-Wolf y Badekas-Molodensky

y no otras variantes más sofisticadas, principalmente por el número limitado de puntos disponibles. Dada la ausencia de la correlación entre los parámetros obtenidos y la posibilidad de usar indistintamente 3 ó 7 parámetros sin efectuar una nueva determinación, se recomienda el modelo Badekas-Molodensky. Las diferencias entre los citados modelos de similaridad deben ser tomadas en cuenta al utilizar uno u otro grupo de parámetros.

Número de parámetros

Generalmente se ha hecho la determinación de 7 PT, sin embargo, se hicieron pruebas para comprobar la conveniencia de usar 3 ó 7 PT. En general puede decirse que el uso de sólo las translaciones arrojó resultados similares al uso del grupo completo de PT. En el caso de parámetros de carácter nacional se apreció que era suficiente el uso de 3 parámetros, lo cual puede explicarse por el hecho de que el cálculo de rotaciones conduce a la obtención de valores no representativos de las heterogeneidades de la red de una región a otra. Cuando se trata de los grupos de parámetros regionales puede apreciarse una ligera mejoría en la transformación al usar adicionalmente las rotaciones y el factor de escala, siempre y cuando se limite el uso de estos parámetros al área para la cual fueron determinados, es decir, fuera de ésta se nota el efecto contrario. Esto puede explicarse por la representatividad de los PT obtenidos para ciertas regiones venezolanas dada la uniformidad de los datos utilizados para su determinación.

Tabla 4
Diferencias entre coordenadas GPS transformadas y DCN utilizando los PT Oriente, sin considerar y **considerando** la corrección por ondulación del geoide

Estación	Dif. Latitud N ["]	Dif. Longitud W ["]	Dif. Altura [m]
Mamón	-0.278	0.113	6.51
	-0.164	0.091	3.12
Por Fin	-0.306	0.032	17.81
	-0.160	0.012	9.35
Barinas	-0.293	0.075	13.20
	-0.173	0.064	10.56
La Canoa	-0.101	0.029	5.64
	-0.080	0.028	7.04
Dalia	-0.301	-0.001	19.56
	-0.154	-0.017	12.59
B Calabozo EN	-0.167	0.126	3.35
	-0.096	0.120	8.65

Problema de las alturas

Se hicieron nuevos cálculos y análisis para corroborar las posibles mejoras en la determinación de los PT al usar las fórmulas de Vening-Meinesz para corregir las alturas cuasi-ortométricas de los vértices de triangulación de la DCN por efecto de la ondulación geoidal [9]. Al efecto debe decirse que en la gran cantidad de pruebas realizadas considerando este procedimiento, no siempre pudo observarse una mejoría en la coincidencia entre los valores obtenidos con la transformación y los ya conocidos para los respectivos puntos. Esto parece ilógico, es decir, el hecho de que al corregir las alturas por efecto de la ondulación no se observe una mejoría notable con respecto a los cálculos efectuados sin corregir. Especialmente en el caso de proyectos absolutos la mejoría es considerable. Sin embargo, no siempre sucede así. Posibles razones para esta circunstancia pueden ser el hecho que la corrección se apoya en un modelo global del geopotencial, el cual es más confiable en algunos lugares del país que en otros, además la baja calidad de las alturas trigonométricas de los vértices de triangulación, un caso especial de la red venezolana, comentado y analizado en [11], [12]. Por tal razón la corrección de las alturas por efecto de la ondulación del geoide utilizando las fórmulas de Vening-Meinesz se pre-

senta como una opción que en algunos casos resulta beneficiosa y en otras no (ver Tabla 4).

Parámetros obtenidos a partir de proyectos absolutos y relativos

Definitivamente debe considerarse que la naturaleza del proyecto GPS utilizado -absoluto o relativo- para el cálculo de los PT, refleja una condición diferente de la relación espacial entre ambos sistemas. Al efecto, los parámetros de transformación obtenidos difieren en varios metros en uno u otro caso. Aún cuando los valores estocásticos de los PT absolutos son más aceptables que en el caso de los PT relativos (ver Tabla 1), las pruebas de ambos grupos en diferentes puntos del país no permiten concluir que uno sea mejor que el otro (ver Tabla 3).

Calidad de los PT y de la transformación

El estudio de la información estocástica derivada del cálculo de los PT permite concluir que para la mayoría de los grupos de parámetros determinados la desviación estándar de cada traslación está en el orden de ± 1 m, las rotaciones entre $\pm 0".5$ y varios arco segundos, mientras que el error medio cuadrático de la transformación (m_0) está, por lo general, en el rango de ± 1 a ± 5 m. Cabe

resaltar que las rotaciones muestran errores mas elevados, especialmente para los PT regionales; es probable que éste sea un efecto causado por la extensión limitada de las zonas en cuestión.

Sin embargo, al utilizar los parámetros obtenidos para transformar las coordenadas de varios puntos y compararlas con valores conocidos, puede notarse que en general las diferencias estarán en el orden de 3 a 6 m para la coordenada latitud, de 9 a 12 m para la longitud geográfica y de 12 a 15 m para la altura (ver Tabla 3), por lo cual puede decirse que la calidad externa de la transformación estará en el orden de ± 10 m. Este valor parece alto pero puede aceptarse al considerar los factores ya señalados al analizar las diferencias entre los valores de un grupo de PT y otro.

Conclusiones

El cálculo de los PT publicados en éste artículo proviene de la mayor cantidad de puntos GPS disponibles en el país y de serios análisis y pruebas con respecto a los modelos matemáticos, problemas de las alturas y el carácter absoluto o relativo de la vinculación, su uso por lo tanto debe ser altamente considerado por los usuarios del GPS en Venezuela para transformaciones del datum La Canoa al WGS-84 y también en el caso contrario.

Para trabajos locales no sujetos a vinculación o combinación posterior deben utilizarse parámetros de transformación regionales, en caso contrario se recomienda el uso de los PT de carácter nacional, obtenidos con el modelo de Badekas-Molodensky. Para la mayoría de los usuarios el uso de 3 parámetros solamente (traslaciones) será suficiente.

Agradecimiento

Los resultados presentados en este artículo forman parte de un proyecto de investigación financiado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de La Universidad del Zulia (CONDES).

Parte de las mediciones utilizadas han sido gentilmente suministradas por diferentes organismos públicos y privados a los cuales se les agradece su valiosa colaboración.

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias aportadas por los árbitros durante el proceso de revisión de este artículo.

Referencias bibliográficas

1. Hoyer M.: "Satelliten -Dopplermessungen als unterstützende Beobachtungen bei der Kontrolle and Verbesserung eines geodätischen Netzes in Venezuela". Tesis doctoral. Universidad de Hannover. Alemania. 1982.
2. Hoyer M.: "La transformación entre el datum venezolano La Canoa y el datum satelital WGS-72". Trabajo de Ascenso. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. 1986.
3. Vanicek P., Krakiwsky E.J.: "Geodesy: The Concepts". Second Edition, North-Holland, Amsterdam-New York. 1986.
4. Hoyer M., Acuña G., Wildermann E., Rincón G.: "Vinculación de mediciones GPS con el control geodésico de Venezuela". Memorias de la Conferencia Internacional de Cartografía y Geodesia. Volumen I. Maracaibo, 1992.
5. Hoyer M., Acuña G., Wildermann E., Royero G.: "La transformación del datum satelital WGS-84 al datum PSAD-56 en Venezuela". Memorias de las 9nas. Jornadas Científico-Técnicas. Volumen III. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. 1995.
6. The Defense Mapping Agency: "Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic System". DMA Technical Report 8350.2. Second Edition. September, 1991.
7. Krakiwsky E.J., Thomson D.B.: "Mathematical models for the combinations of terrestrial and satellite networks". The Canadian Surveyor, Vol. 28, No. 5, 1974.
8. Heiskanen W.A., Moritz H.: "Physical Geodesy". Freeman and Company, San Francisco 1967.
9. Acuña G., Wildermann E., Hoyer M., Royero G.: "Aplicación de las ecuaciones de Vening-Meinesz en la transformación del datum geodésico". Memorias de las 9nas. Jornadas Científico-Técnicas. Volumen III. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. 1995.

10. Seeber G.: "Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications". Walter de Gruyter. Berlin-New York. 1993.
11. Hoyer M.: "Análisis de los aspectos a considerar en la utilización del GPS en Venezuela". Trabajo de Ascenso. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. 1990.
12. Hoyer M.: "Sistema de Posicionamiento Global GPS en Venezuela: Aplicaciones, Ejemplos, Problemas a considerar y Alternativas de solución". Revista Técnica de Ingeniería. Universidad del Zulia. Vol. 16, No. 2. Maracaibo, 1993.

Recibido el 11 de Junio de 1996

En forma revisada el 31 de Enero de 1997