

# Alternatives for connecting GPS observations to the conventional basic geodetic control in Venezuela

**Gustavo Acuña, Melvin Hoyer and Eugen Wildermann**

*Laboratorio de Geodesia Física y Satelital (LGFS), Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apartado 526, Maracaibo 4011-A, Venezuela. Fax: 00-58-61-512214. E-mail: mhoyer@luz.ve*

## Abstract

A study of alternatives for connecting GPS observations to the conventional basic geodetic control, regularly used in Venezuela, is performed. Each technique and its respective variants are considered for their application pertinence and quality analyzing and comparing results from a test network. Finally, an optimized method to the new Venezuelan GPS network referred to the geocentric reference system of South America is presented.

**Key words:** GPS, Venezuela, basic geodetic control.

# Modalidades para el apoyo de mediciones GPS en el control geodésico básico venezolano

## Resumen

El trabajo presenta el estudio de las alternativas aplicadas regularmente en Venezuela para materializar la vinculación de mediciones GPS con el control geodésico básico convencional del país. Se incluye la descripción del procedimiento que implica cada modalidad y sus respectivas variantes, consideraciones en cuanto a la pertinencia de su aplicación, el análisis sobre la calidad de los resultados obtenidos con cada alternativa en una red de prueba y su comparación con valores conocidos a fin de verificar la bondad de las mismas. Finalmente, se trata la optimización de la vinculación al disponer de la nueva red GPS venezolana apoyada en el sistema de referencia geocéntrico para América del Sur.

**Palabras clave:** GPS, Venezuela, control geodésico básico.

## Introducción

Las mediciones GPS (Global Positioning System) de utilidad profesional y científica deben apoyarse en puntos de coordenadas conocidas con la exactitud más alta disponible a fin de aprovechar la elevada calidad que en posicionamiento relativo ofrece el sistema [1].

En países y/o lugares con un control geodésico eficiente, no hay dificultad para conseguir puntos de apoyo a distancias relativamente cortas del área de trabajo, pero en países como Venezuela, donde la red de triangulación de primer

orden que materializa el control geodésico básico del país está constituida por cadenas no densificadas con un alto porcentaje de puntos destruidos e inaccesibles, debe buscarse una alternativa conveniente para vincular las mediciones GPS.

El usuario del sistema GPS en Venezuela, al igual que en muchos países con un control geodésico similar, consigue en la problemática planteada una gran limitante para la optimización del uso de esta moderna herramienta geodésica en su trabajo diario.

Al efecto se han utilizado en el país diferentes modalidades, tales como ajustar las medicio-

nes en el sistema WGS-84 (World Geodetic System 1984) [2] y luego transformar los resultados mediante parámetros previamente determinados. Otra posibilidad es utilizar un programa que permita el cálculo/ajuste de las mediciones GPS en el datum nacional. Una tercera alternativa es apoyar las mediciones GPS en puntos con coordenadas conocidas en el datum satelital.

La conveniencia de una u otra modalidad es objeto de análisis en este trabajo, donde se describe el procedimiento que implica la utilización de cada una de ellas, complementándose con la presentación de ejemplos numéricos aplicados a una red de prueba. Además se comparan los resultados obtenidos en cada caso con las coordenadas oficiales conocidas para los puntos de la red.

Los resultados de cada una de las modalidades aquí estudiadas se refieren a la materialización de los sistemas geodésicos La Canoa-Hayford (convencional, venezolano) y WGS-84 (satelital, global) mediante coordenadas de puntos de control derivadas de mediciones GPS. Consideraciones teóricas sobre la definición de ambos sistemas no son incluidas debido a que ellas han sido ampliamente tratadas en las publicaciones [2, 3, 12].

Posteriormente se estudia la posibilidad de optimizar este apoyo considerando la disponibilidad actual de la nueva RED Gps VENEZOLANA (REGVEN) [3] vinculada al Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS) [4].

### Antecedentes

Aun cuando el uso del GPS en Venezuela se remonta a los inicios de los años 80, es a mitad de esta década cuando puede decirse que comienza a convertirse en la herramienta obligada de trabajo que es hoy para todos los técnicos y profesionales de las ciencias terrestres y afines.

Proporcionalmente con la diversidad de usuarios y de aplicaciones del GPS, han aumentado en el país las exigencias de exactitud tanto a nivel científico (geodinámica, sistemas de referencia, etc.) como a nivel de trabajos de producción (topografía, catastro, mediciones de ingeniería, etc.).

Por otro lado, el estado actual del control geodésico básico convencional en Venezuela,

equivalente al de otros países subdesarrollados, caracterizado por: ausencia de un control geodésico tridimensional, desigual distribución geográfica que comprende amplias zonas desprovistas de control, heterogeneidad de mediciones y cálculos, gran porcentaje de puntos destruidos y/o inaccesibles, e inexistencia de un ajuste completo de la red, son factores que deben ser considerados detenidamente al momento de planificar un proyecto GPS en el país que requiera ser apoyado en las redes geodésicas oficiales.

La gran cantidad y diferente naturaleza de usuarios del GPS, las diferentes alternativas para apoyar estas mediciones en el control geodésico básico y la arbitrariedad e improvisación en los criterios utilizados, hacen imperativa la unificación de los mismos para la vinculación de mediciones y/o proyectos entre el sistema geodésico convencional y el sistema satelital, que permita la organización y optimización de los trabajos geodésicos en el país.

Esta necesidad de unificar criterios obliga a evaluar las alternativas existentes para apoyar las mediciones GPS en el control geodésico básico venezolano, lo cual requiere tomar en consideración los siguientes factores:

- Las características, antes descritas, del control geodésico básico del país: ya que de su naturaleza y calidad dependerán las mayores o menores posibilidades y/o facilidades para ejecutar las mediciones y cálculos.
- La distancia desde el nuevo punto a ser medido hasta la estación con coordenadas conocidas con respecto a la cual se vincularán las mediciones: dado el carácter relativo de la medición GPS, el incremento de esta distancia hará disminuir la calidad del resultado.
- La naturaleza y calidad de las coordenadas del punto de apoyo y su efecto en el cálculo del vector GPS: se refiere al tipo de estación, es decir, si es punto del control básico o de un orden de calidad superior o inferior, siendo importante el carácter bi o tridimensional del mismo. Estos factores inciden directamente en la determinación de las componentes de la(s) línea(s) base(s) medida(s).
- La disponibilidad y características de los Parámetros de Transformación (PT) del datum: en el caso de utilizar parámetros para

efectuar el apoyo, es importante conocer y considerar el origen y las propiedades de los mismos.

- El procedimiento utilizado para materializar este apoyo: se refiere a la forma o modalidad de ejecutar la vinculación entre las mediciones nuevas y el control geodésico existente, dado que las variantes utilizadas tendrán ventajas y desventajas de acuerdo al caso. Tres alternativas de vinculación se presentan en la siguiente sección.

### **Modalidades del apoyo de mediciones GPS**

#### **Modalidad 1: Uso de parámetros de transformación del datum**

Se refiere al caso en el cual se dispone de uno o varios puntos de la red básica del país, cercanos al área del proyecto, en los cuales se apoyarán las mediciones GPS a efectuarse. Las coordenadas de estos puntos están expresadas en el datum nacional y se utilizan parámetros para transformarlas al datum satelital WGS-84 (transformación directa). Posteriormente se calculan las mediciones efectuadas en este sistema de referencia, lo cual puede conducir o no a un ajuste de las observaciones.

Como generalmente se requieren las coordenadas de los nuevos puntos en el sistema nacional, se transforman otra vez utilizando los mismos parámetros (transformación inversa).

Obviamente, el resultado de la modalidad estará sujeto a la calidad de los PT utilizados, que a su vez depende de aspectos específicos relacionados con la determinación de los mismos, a saber, cantidad y calidad de los puntos comunes, modelo matemático, problemática de las alturas, representatividad geográfica, número apropiado de parámetros, correlación entre PT, etc. La influencia de tales aspectos sobre la determinación de los PT y sus efectos en las transformaciones de coordenadas se presenta en una publicación anterior [12].

Un esquema de los pasos que comprende esta modalidad se presenta en la Tabla 1. Los valores numéricos que se presentan en la tabla se refieren a los resultados de la modalidad en una red de prueba (ver capítulo *Cálculos y análisis de resultados*).

Las ventajas de este procedimiento son las siguientes:

- Fácil aplicación si se dispone de los PT adecuados.
- No se requiere un mínimo de tres puntos con cota conocida como en otras modalidades para obtener resultados confiables en las alturas.

Desventajas o limitaciones:

- Las propias de la naturaleza y calidad de la red básica (generalmente se utilizan solo puntos de la red de triangulación, los cuales disponen de alturas trigonométricas).
- El uso indiscriminado de diferentes grupos de PT.
- PT inapropiados para el área de trabajo.
- La baja calidad de los PT existentes.

#### **Modalidad 2: Uso de coordenadas en el datum del satélite**

Si para efectuar las mediciones GPS se dispone de puntos de apoyo con coordenadas conocidas en el datum WGS-84 o ITRF [5] se puede efectuar el cálculo y ajuste de las observaciones en este sistema. Los resultados deberán transformarse posteriormente al datum nacional mediante el uso de PT.

Las coordenadas de los puntos de apoyo en el sistema WGS-84 pueden provenir de cálculos de seudorrango o de un proyecto anterior. En este último caso el proyecto en referencia puede tratarse de un trabajo normal de ingeniería o de un proyecto de carácter científico (p.ej.: CASA, Central And South America GPS project [6], SIRGAS, etc.).

Los PT a utilizar deben ser compatibles con las coordenadas conocidas de los puntos de apoyo, es decir, debe haber una correspondencia en la naturaleza y calidad de los mismos.

En el caso que el o los puntos de apoyo pertenezcan simultáneamente a la red básica del país y a un proyecto de carácter científico, es decir, si para ellos hay disponibilidad tanto de coordenadas en el datum nacional como en el satelital, se podrá efectuar el cálculo en WGS-84 y el ajuste en el sistema nacional según la modalidad que se explica posteriormente (*Uso de un soft-*

Tabla 1  
Ejemplo de la Modalidad 1: *Uso de parámetros de transformación*

<b>Punto de apoyo:</b> Zamural		
<b>1. Coordenadas DCN del punto de apoyo en el datum nacional La Canoa-Hayford:</b>		
$\varphi = 10^{\circ} 25' 37''.117$ N	$\lambda = 66^{\circ} 57' 00''.010$ W	H = 1295.650 m.
<b>2. Transformación al datum satelital WGS-84 utilizando PT existentes<sup>(*)</sup>:</b>		
DX = -277.355 m.	DY = 106.774 m.	DZ = -362.089 m.
EX = -5''.420	EY = -2''.330	EZ = -0''.053
DM = -3.993 ppm.		
<b>3. Coordenadas del punto de apoyo en el datum WGS-84:</b>		
$\varphi = 10^{\circ} 25' 25''.665$ N	$\lambda = 66^{\circ} 57' 07''.021$ W	h = 1277.828 m.
<b>4. Resultados del cálculo y ajuste de la red GPS en el datum satelital:</b>		
Bandera		
$\varphi = 10^{\circ} 29' 00''.789$ N	$\lambda = 66^{\circ} 59' 53''.864$ W	h = 1504.186 m.
Castillitos		
$\varphi = 10^{\circ} 31' 39''.275$ N	$\lambda = 66^{\circ} 55' 29''.472$ W	h = 1294.887 m.
India		
$\varphi = 10^{\circ} 24' 11''.617$ N	$\lambda = 66^{\circ} 49' 22''.599$ W	h = 1126.950 m.
Pabellón-2		
$\varphi = 10^{\circ} 26' 48''.103$ N	$\lambda = 66^{\circ} 47' 16''.668$ W	h = 1075.817 m.
<b>5. Transformación al datum nacional utilizando el mismo conjunto de PT:</b>		
Bandera		
$\varphi = 10^{\circ} 29' 12''.240$ N	$\lambda = 66^{\circ} 59' 46''.848$ W	H = 1522.016 m.
Castillitos		
$\varphi = 10^{\circ} 31' 50''.723$ N	$\lambda = 66^{\circ} 55' 22''.462$ W	H = 1313.119 m.
India		
$\varphi = 10^{\circ} 24' 23''.068$ N	$\lambda = 66^{\circ} 49' 15''.602$ W	H = 1145.186 m.
Pabellón-2		
$\varphi = 10^{\circ} 26' 59''.551$ N	$\lambda = 66^{\circ} 47' 09''.674$ W	H = 1094.311 m.

(\*) PT Nacionales de carácter relativo [12].

ware de ajuste en el datum nacional), sin requerir el conocimiento de PT.

Otra posibilidad sería calcular PT utilizando las coordenadas de el o los puntos de apoyo en ambos sistemas, o bien utilizar PT ya existentes en el país para transformar los resultados del cálculo de la red GPS al datum nacional. La Tabla 2 presenta un esquema del procedimiento.

Ventajas:

- No se introducen los aspectos negativos del control básico del país.
- De gran utilidad en lugares desprovistos de control básico, al utilizar coordenadas pro-

venientes de mediciones de seudorrangos GPS.

- La alta calidad de la vinculación al apoyarse en coordenadas WGS-84 ó ITRF de orden superior.

Desventajas:

- El uso de coordenadas seudorrango afecta considerablemente la calidad de la determinación de los vectores GPS observados.
- La naturaleza y calidad de los PT.

Los PT utilizados en las modalidades 1 y 2, ya sea existentes o derivados de las coordenadas del punto de apoyo, expresan las diferencias en

Tabla 2  
Ejemplo de la Modalidad 2: *Uso de coordenadas en el datum del satélite*

<b>Punto de apoyo:</b> Zamural		
<b>1. Coordenadas DMA del punto de apoyo en el datum satelital WGS-84:</b>		
$\varphi = 10^{\circ} 25' 25''.707$ N	$\lambda = 66^{\circ} 57' 06''.027$ W	$h = 1279.194$ m.
<b>2. Resultados del cálculo y ajuste de la red GPS en el datum satelital:</b>		
Bandera		
$\varphi = 10^{\circ} 29' 00''.831$ N	$\lambda = 66^{\circ} 59' 53''.571$ W	$h = 1505.546$ m.
Castillitos		
$\varphi = 10^{\circ} 31' 39''.318$ N	$\lambda = 66^{\circ} 55' 29''.178$ W	$h = 1296.260$ m.
India		
$\varphi = 10^{\circ} 24' 11''.659$ N	$\lambda = 66^{\circ} 49' 22''.306$ W	$h = 1128.354$ m.
Pabellón-2		
$\varphi = 10^{\circ} 26' 48''.145$ N	$\lambda = 66^{\circ} 47' 16''.375$ W	$h = 1077.219$ m.
<b>En caso que el punto de apoyo pertenezca a la red de control básico DCN</b>		
<b>3. Transformación al datum nacional utilizando PT derivados en el punto de apoyo:</b>		
DX = 267.319 m. DY = -106.350 m. DZ = 360.833 m.		
<b>4. Coordenadas en el datum nacional La Canoa-Hayford:</b>		
Bandera		
$\varphi = 10^{\circ} 29' 12''.238$ N	$\lambda = 66^{\circ} 59' 46''.847$ W	H = 1522.203 m.
Castillitos		
$\varphi = 10^{\circ} 31' 50''.721$ N	$\lambda = 66^{\circ} 55' 22''.462$ W	H = 1313.444 m.
India		
$\varphi = 10^{\circ} 24' 23''.068$ N	$\lambda = 66^{\circ} 49' 15''.604$ W	H = 1145.134 m.
Pabellón-2		
$\varphi = 10^{\circ} 26' 59''.551$ N	$\lambda = 66^{\circ} 47' 09''.676$ W	H = 1094.388 m.
<b>En caso que el punto de apoyo no pertenezca a la red de control básico DCN</b>		
<b>3. Transformación al datum nacional utilizando PT existentes<sup>(*)</sup>:</b>		
DX = 277.355 m. DY = -106.774 m. DZ = 362.089 m. EX = -5''.420 EY = -2''.330 EZ = -0''.053 DM = -3.993 ppm.		
<b>4. Coordenadas en el datum nacional La Canoa-Hayford:</b>		
Bandera		
$\varphi = 10^{\circ} 29' 12''.282$ N	$\lambda = 66^{\circ} 59' 46''.554$ W	H = 1523.376 m.
Castillitos		
$\varphi = 10^{\circ} 31' 50''.765$ N	$\lambda = 66^{\circ} 55' 22''.168$ W	H = 1314.492 m.
India		
$\varphi = 10^{\circ} 24' 23''.110$ N	$\lambda = 66^{\circ} 49' 15''.309$ W	H = 1146.590 m.
Pabellón-2		
$\varphi = 10^{\circ} 26' 59''.593$ N	$\lambda = 66^{\circ} 47' 09''.380$ W	H = 1095.713 m.

(\*) PT Nacionales de carácter relativo [12].

posición (aprox. 468 m), en orientación (varios segundos de arco) y en escala (aprox. 4 ppm) entre los sistemas La Canoa-Hayford y WGS-84. Su uso asegura la consideración de las diferencias en la situación relativa y tamaño del sistema convencional respecto al sistema satelital ubicado geocéntricamente.

**Modalidad 3: Uso de un software de ajuste en el datum nacional**

Consiste en efectuar un ajuste de los vectores GPS en el datum nacional La Canoa-Hayford, previamente determinados en el datum WGS-84 (p.ej.: caso de software comercial), o efectuar el cálculo y ajuste de los vectores GPS directamente en el datum nacional (p.ej.: caso de software científico). Con el software adecuado se fijan las coordenadas de los puntos de apoyo en el sistema nacional, obteniendo las coordenadas para los nuevos puntos medidos en este sistema. Los pasos correspondientes al procedimiento se presentan en la Tabla 3.

La calidad de los resultados dependerá del uso de una cantidad apropiada de puntos con coordenadas conocidas en el datum nacional, recomendándose un mínimo de dos estaciones de control horizontal y tres de control vertical.

En esta modalidad no se requiere el conocimiento de PT. Sin embargo, la calidad de las coordenadas del punto inicial en los cálculos afecta la bondad de los resultados finales.

Ventajas:

- No se requiere el uso de PT.

Desventajas:

- Las propias de la naturaleza y calidad de la red básica.
- Para obtener buenos resultados se requiere un mínimo de puntos de control horizontal y vertical.
- La estricta aplicación del método exige mediciones GPS redundantes.

**Cálculos efectuados y análisis de resultados**

Se ejecutaron una serie de cálculos y pruebas para evaluar numéricamente las modalidades antes descritas, utilizando para ello una sección de la red GPS medida en el área metropolitana de Caracas por la Dirección de Cartografía Nacional (DCN, organismo cartográfico oficial en Venezuela) [7].

La red utilizada está constituida por 5 estaciones coincidentes con vértices de la triangulación de primer orden DCN, presentando una extensión máxima de 23 km en dirección Este-Oeste y 12 km Norte-Sur. Las mediciones GPS fueron efectuadas con instrumental de doble frecuencia en sesiones triangulares de 2 horas de duración, observando un total de 10 líneas base cuya longitud varía entre 6 y 23 km (Figura 1).

Tabla 3  
Ejemplo de la Modalidad 3: *Uso de un software de ajuste*

<b>Punto de apoyo: Zamural</b>		
<b>1. Coordenadas DCN del punto de apoyo en el datum nacional La Canoa-Hayford:</b>		
$\varphi = 10^{\circ} 25' 37''.117$ N	$\lambda = 66^{\circ} 57' 00''.010$ W	H = 1295.650 m.
<b>2. Resultados del cálculo y ajuste de la red GPS en el datum nacional:</b>		
Bandera		
$\varphi = 10^{\circ} 29' 12''.237$ N	$\lambda = 66^{\circ} 59' 46''.846$ W	H = 1522.253 m.
Castillitos		
$\varphi = 10^{\circ} 31' 50''.719$ N	$\lambda = 66^{\circ} 55' 22''.463$ W	H = 1313.559 m.
India		
$\varphi = 10^{\circ} 24' 23''.069$ N	$\lambda = 66^{\circ} 49' 15''.607$ W	H = 1145.111 m.
Pabellón-2		
$\varphi = 10^{\circ} 26' 59''.550$ N	$\lambda = 66^{\circ} 47' 09''.681$ W	H = 1094.496 m.

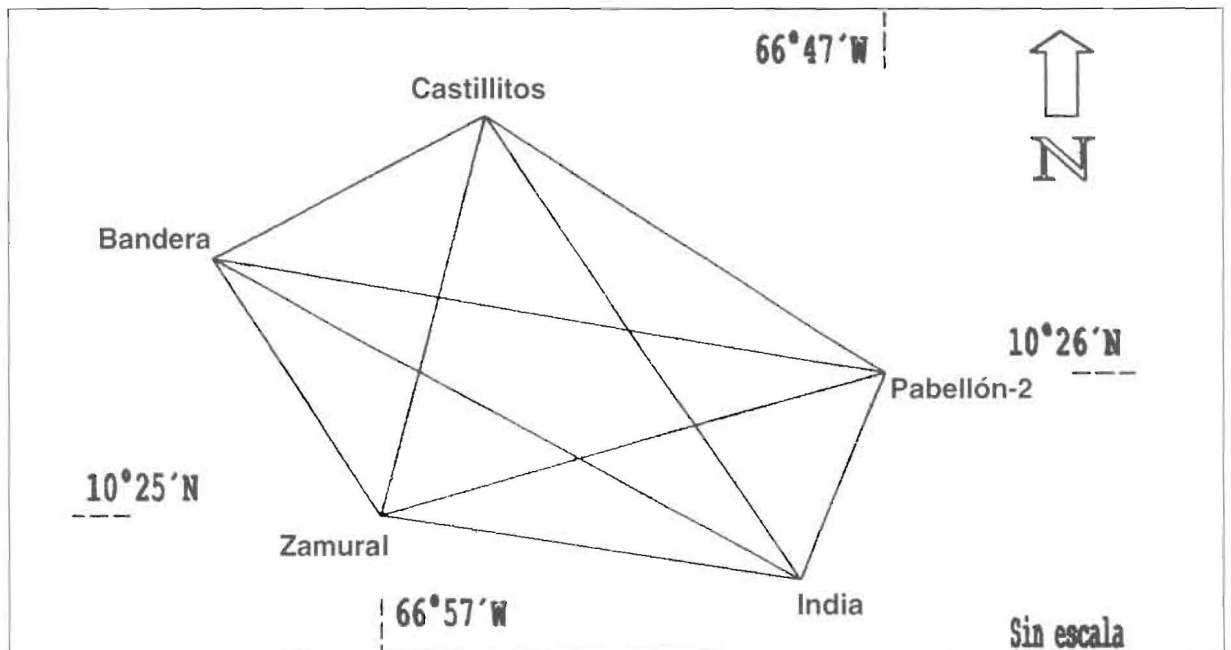


Figura 1. Red GPS.

Una de las estaciones de la red es el punto *Zamural* sobre el cual la DMA (Defence Mapping Agency, actualmente, NIMA, National Imaging and Mapping Agency) efectuó mediciones GPS absolutas [8], razón por la cual este vértice se utiliza como punto de apoyo para la vinculación con la red de triangulación convencional (datum La Canoa-Hayford) y con el sistema satelital (datum WGS-84).

El cálculo y ajuste de la red GPS se efectuó con el software *Bernese* [9] utilizando efemérides precisas del IGS (International GPS Geodynamics Service) [10], obteniendo desviaciones estándar en el orden de  $\pm 3$  mm y  $\pm 18$  mm para las coordenadas de posición y altura, respectivamente. Los cálculos relacionados con las transformaciones del datum utilizando PT en las modalidades 1 y 2 fueron realizados con el software *TransDat* [11].

Dado que para las 5 estaciones de la red se dispone de coordenadas WGS-84, provenientes de la medición GPS, y de coordenadas convencionales de la red de triangulación nacional (datum La Canoa-Hayford), se podrán efectuar comparaciones y análisis sobre la bondad de cada modalidad.

Las Tablas 1, 2 y 3, ya presentadas, muestran los valores numéricos obtenidos al aplicar

las respectivas modalidades de apoyo en la red en cuestión.

En relación a la Tabla 2 debe mencionarse la posibilidad de efectuar la transformación de los resultados al datum nacional de dos formas. En la primera, si el punto de apoyo tiene coordenadas DCN en el datum nacional, pueden derivarse PT a partir de las coordenadas de ese punto en ambos sistemas. En la segunda, si no se conocen las coordenadas del punto de apoyo en el datum nacional, se hace necesario utilizar PT existentes, lo cual significa introducir en los resultados la problemática ya descrita y analizada en [12] referida a la calidad de estos PT.

El efecto de la calidad de los PT se manifiesta en las altas diferencias, en el orden de varios metros, que pueden observarse en la Tabla 2 entre las coordenadas transformadas al datum nacional bajo las dos formas descritas. En consecuencia, de ser posible debe utilizarse la primera de ellas ya que ésta produce las menores discrepancias con respecto a las coordenadas oficiales de DCN.

A continuación se presentan varias comparaciones entre los resultados obtenidos utilizando las modalidades de apoyo descritas. En las tablas respectivas se emplean las siguientes identificaciones para cada caso:

- 1A:** primera modalidad utilizando PT de carácter nacional,
- 1B:** primera modalidad utilizando PT de carácter regional,
- 2A:** segunda modalidad utilizando coordenadas satelitales absolutas de alta calidad para el punto de apoyo,
- 2B:** segunda modalidad utilizando coordenadas satelitales absolutas de baja calidad (obtenidas por pseudorrangos GPS) para el punto de apoyo.
- 3:** tercera modalidad.

La Tabla 4 muestra las coordenadas WGS-84 utilizadas para el punto de apoyo *Zamural* en cada modalidad, donde 1A y 1B son resultado de transformaciones, mientras que 2A y 2B provienen de mediciones. Obviamente no se presentan valores para la tercera modalidad pues ésta no requiere de coordenadas en el datum del satélite para su aplicación.

En los casos 1A y 1B, a pesar que corresponden a la misma alternativa de vinculación, las coordenadas WGS-84 generadas para el punto de apoyo difieren significativamente (varios metros), producto de la utilización de dos grupos distintos de PT. Una situación similar ocurre con los casos 2A y 2B por el uso de coordenadas medidas de alta y baja calidad.

Comparando los casos 1B y 2A, las discrepancias están en el orden de pocos cm., siendo particularmente significantes las correspondientes a los casos 1A y 2B, donde se manifiestan diferencias de hasta 4 m. en latitud, 9 m. en longitud y 23 m. en altura con respecto a la modalidad que utiliza coordenadas satelitales de alta calidad (2A).

El alto nivel de coincidencia (pocos cm.) entre los resultados de los casos 1B y 2A, es indica-

tivo la ventaja de utilizar PT de carácter regional en comparación con PT nacionales o coordenadas absolutas de baja calidad para asignar las coordenadas WGS-84 del punto de apoyo (casos 1A y 2B, respectivamente). Tal situación se verifica en el análisis de la Tabla 5.

El efecto de las discrepancias entre las coordenadas WGS-84 generadas por cada modalidad para el punto de apoyo sobre la determinación de los vectores GPS de la red de prueba, se muestra en la Tabla 5, la cual presenta las componentes (dx, dy, dz) y distancia (dist.) de algunos vectores GPS seleccionados que vinculan la estación de apoyo con cada uno de los restantes puntos de la red.

Puede observarse que las variaciones entre las modalidades 1 y 2 están generalmente en el orden de pocos mm. a cm, notándose las discrepancias mayores en el caso 2B (seudorango) producto de la calidad inferior de las coordenadas utilizadas en el punto de apoyo. Los valores de la tercera modalidad, siempre inferiores al resto, se explican por la diferencia en el sistema de referencia utilizado en el cálculo de los vectores (La Canoa-Hayford) con respecto al de las otras alternativas (WGS-84).

Al igual que en la Tabla 4, los resultados que muestran la mayor coincidencia en la Tabla 5 son los correspondientes a los casos 1B y 2A, donde el efecto de la variación en la posición del punto de apoyo, en el orden de pocos cm, no altera la determinación de las líneas base. Sin embargo, para los casos 1A y 2B, donde la variación de la posición del punto de apoyo en el datum satelital es de varios metros con respecto a los casos antes indicados, los vectores calculados difieren en 0.1 a 0.2 ppm y 0.4 a 0.6 ppm, respectivamente.

De lo anterior puede inferirse que la utilización de PT de carácter nacional para generar las

Tabla 4  
Coordenadas WGS-84 de la estación *Zamural* utilizada como punto de apoyo para el cálculo de los vectores GPS

Modalidad	Latitud N [° ' " ]	Longitud W [° ' " ]	Altura Elip. [m]
1A	10 25 25.692	66 57 07.025	1274.721
1B	25.708	06.725	1279.180
2A	25.707	06.727	1279.194
2B	25.831	06.654	1301.889



Tabla 5  
Vectores GPS seleccionados

Vector GPS	Modalidad	dx [m]	dy [m]	dz [m]	dist. [m]
Zamural ↓ Bandera	1A	-5052.985	-1085.953	6542.533	8337.667
	1B	.985	.950	.532	.666
	2A	.985	.950	.532	.666
	2B	.981	.951	.529	.661
	3	.919	.985	.495	.602
Zamural ↓ Castillitos	1A	1918.775	3067.563	11293.350	11858.811
	1B	.773	.564	.348	.809
	2A	.773	.565	.348	.809
	2B	.773	.563	.343	.804
	3	.807	.440	.285	.723
Zamural ↓ India	1A	13097.722	5304.183	-2265.347	14311.411
	1B	.724	.176	.345	.409
	2A	.727	.168	.344	.409
	2B	.717	.174	.344	.402
	3	.637	.157	.331	.321
Zamural ↓ Pabellón-2	1A	16256.410	7659.028	2454.907	18137.203
	1B	.410	.019	.909	.200
	2A	.410	.019	.909	.200
	2B	.403	.012	.908	.191
	3	.321	8.862	.918	.055

coordenadas WGS-84 del punto de apoyo en una red GPS conformada por líneas de corta y mediana longitud, puede producir errores de hasta 0.2 ppm en la determinación de los vectores inter-estaciones, mientras que el uso de coordenadas absolutas obtenidas por pseudorrangos GPS genera errores de hasta 0.6 ppm en la estimación de las líneas base. Ahora bien, en este tipo de redes, la aplicación de PT regionales o la utilización de coordenadas conocidas de alta calidad para el punto de inicio de los cálculos parece no afectar la determinación de los vectores GPS, generando resultados prácticamente iguales.

Obviamente, los cambios en los vectores eran esperados. Sin embargo, se consideró de interés cuantificar su magnitud para establecer el impacto de las modalidades sobre la determinación de los vectores GPS.

Es importante señalar que las variaciones en el cálculo de los vectores GPS se refieren a resultados expresados en el sistema satelital GPS y no a su comparación con la red de triangulación nacional DCN.

La Tabla 6 muestra las diferencias entre las coordenadas oficiales DCN y las obtenidas por GPS transformadas al datum nacional, para cada punto de la red de prueba y referidas a cada modalidad. De forma general, puede notarse que las menores discrepancias con las coordenadas DCN, en el orden de 8 cm en posición y 20 cm en altura, se obtuvieron en el caso 3. En orden de calidad siguieron las alcanzadas en los casos 1B (6 y 30 cm), 1A (13 y 20 cm), 2A (9 y 1 m) y por último, las mayores diferencias correspondientes al caso 2B (12 y 23 m), respectivamente.

Tabla 6  
Diferencias entre las coordenadas oficiales DCN y las obtenidas por GPS transformadas al datum nacional para cada modalidad

Estación	Modalidad	Dif. Latitud N [m]	Dif. Longitud W [m]	Dif. Altura [m]
Bandera	1A	-0.111	0.032	0.254
	1B	-0.059	0.062	0.070
	2A	-1.384	8.843	-1.106
	2B	-5.065	11.042	-23.804
	3	-0.034	0.099	-0.017
Castillitos	1A	-0.087	0.071	0.231
	1B	-0.016	0.037	0.136
	2A	-1.357	8.882	-1.142
	2B	-5.002	11.099	-23.867
	3	0.042	0.042	-0.209
India	1A	-0.016	0.172	0.224
	1B	-0.050	0.079	0.522
	2A	-1.287	8.977	-1.180
	2B	-5.002	11.099	-23.867
	3	-0.046	0.030	0.299
Pabellón-2	1A	0.007	0.121	-0.021
	1B	-0.002	-0.005	0.285
	2A	-1.262	8.926	-1.423
	2B	-4.958	11.033	-24.127
	3	0.021	-0.093	-0.206

Lo anterior se verifica al observar la Tabla 7 donde se presenta el promedio de las diferencias mostradas en la Tabla 6 para los cuatro puntos en cuestión.

Los resultados mostrados en las Tablas 6 y 7 tienen explicación en los siguientes factores:

**Modalidad: 1. Casos: 1A y 1B.** Aun cuando los resultados de estos casos difieran pocos cm. entre sí y con respecto a la alternativa 3, la calidad de los PT utilizados por uno y otro parece ser la razón de tales discrepancias, a pesar que esta modalidad considere la aplicación de tales PT en dos direcciones (directa e inversa) buscando cancelar su efecto. Se observa además que la posible causa de la mejoría en los resultados del caso 1B con respecto al caso 1A se deba al uso de PT re-

gionales y PT nacionales en uno y otro caso, respectivamente.

**Modalidad: 2. Caso: 2A.** A pesar que los resultados WGS-84 en este caso son de alta calidad, asegurada por el tipo de medición, procesamiento y exactitud de las coordenadas del punto de apoyo, la transformación de éstos al sistema nacional utilizando PT existentes, introduce fuertes errores en los resultados los cuales se manifiestan en significativas diferencias con DCN en el orden de varios metros.

**Modalidad: 2. Caso: 2B.** El error de la posición absoluta obtenida por seudorangos GPS para el punto de apoyo y adicionalmente la calidad externa de los PT existentes utilizados para referir los resultados WGS-84 al datum nacional,

Tabla 7  
Diferencias medias cuadráticas entre las coordenadas oficiales DCN y las obtenidas por GPS transformadas al datum nacional para cada modalidad

Modalidad	Dif. Latitud N [m]	Dif. Longitud W [m]	Dif. Altura [m]
1A	0.071	0.112	0.205
1B	0.040	0.054	0.307
2A	1.323	8.907	1.219
2B	5.011	11.056	23.911
3	0.037	0.073	0.210

constituyen la causa de las grandes diferencias con DCN obtenidas en este caso (decenas de metros), sobre todo en la componente altura.

**Modalidad: 3.** Debido a que esta modalidad no contempla el uso de PT, la calidad de éstos no afectan los resultados obtenidos, sólo podría estar presente el posible error de la medición GPS y la diferencia en escala y orientación entre el sistema satelital y el nacional.

Cabe destacar que los resultados obtenidos en cada uno de los casos anteriores son producto de la aplicación práctica de las distintas modalidades de apoyo descritas en este trabajo, tal como son utilizadas regularmente en el ámbito geodésico venezolano.

Por otro lado, se ha podido establecer que no solo existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos en cada modalidad, sino que existen además fuertes discrepancias en los resultados de una misma modalidad bajo distintas variantes, como por ejemplo el uso de diferentes grupos de PT (modalidad 1) o bien el uso de coordenadas en el datum satelital de distinta calidad para el punto de apoyo (modalidad 2). Desde este punto de vista, sería entonces posible clasificar las modalidades de acuerdo a la calidad de los resultados que generan siguiendo el orden señalado en el análisis de resultados de la Tabla 6.

### Optimización de Resultados

Las discrepancias entre los resultados de las modalidades en cuestión pueden eliminarse casi por completo, a la vez que se obtienen los mejores resultados posibles. Es decir, los resultados de la aplicación de las modalidades pueden ser prácticamente iguales, además de asegurar que

éstos produzcan las menores diferencias entre las coordenadas obtenidas por GPS y las correspondientes DCN, tal como ocurre en el caso de la modalidad 3.

Para lograr lo anterior es necesario considerar las siguientes recomendaciones:

**Modalidad 1:** Los PT a utilizar, bien sean de carácter nacional o regional, solo deben considerar las translaciones (DX, DY, DZ). Al aplicar los PT de manera directa e inversa, el efecto negativo producido por la calidad de los PT se elimina casi por completo. Bajo esta condición, prácticamente el uso de cualquier grupo de PT arroja resultados similares.

**Modalidad 2:** Utilizar como punto de apoyo una estación de triangulación DCN de primer orden o bien una estación con coordenadas confiables en el datum nacional. Conociendo entonces las coordenadas de dicho punto en el datum satelital, tal como lo exige la modalidad, es posible calcular PT (sólo las translaciones) para el punto de apoyo lo cual hará posible transformar al sistema venezolano las coordenadas obtenidas por GPS para los restantes puntos de la red. De esta forma es posible utilizar coordenadas en el datum del satélite de buena o mala calidad para el punto de apoyo con resultados prácticamente iguales, además de evitar el uso de PT existentes.

La Tabla 8 presenta valores para las diferencias ya mostradas en la Tabla 7, sólo que en los casos 1A, 1B, 2A y 2B se siguieron las recomendaciones citadas anteriormente. Puede notarse en esta tabla la gran similitud entre los resultados de cada modalidad, en el orden de pocos mm, sólo se observa una pequeña discrepancia de aprox. 5 cm en la coordenada altura entre los cuatro primeros casos y el último.

Tabla 8  
Diferencias medias cuadráticas entre las coordenadas oficiales DCN y las obtenidas por GPS transformadas al datum nacional para cada modalidad. Caso optimizado

Modalidad	Dif. Latitud N [m]	Dif. Longitud W [m]	Dif. Altura [m]
1A	0.048	0.075	0.164
1B	0.047	0.074	0.161
2A	0.047	0.074	0.157
2B	0.045	0.071	0.162
3	0.037	0.073	0.210

Lo anterior indica que bajo ciertas consideraciones, ya expuestas, es posible obtener resultados equivalentes de la aplicación de las tres diferentes alternativas de vinculación estudiadas, lográndose adicionalmente un mejoramiento en la coordenada altura en las modalidades 1 y 2 con respecto a la modalidad 3.

### Disponibilidad de REGVEN

La situación del control geodésico básico en el país se modificó considerablemente con el establecimiento de la red GPS nacional REGVEN, medida en Junio de 1995 simultáneamente con la campaña SIRGAS. Esta nueva red nacional, así como el nuevo datum continental para Suramérica, fueron adoptados oficialmente en el país en Marzo de 1999 dando origen al nuevo sistema de control geodésico básico venezolano, conocido como SIRGAS-REGVEN.

REGVEN está constituida por 67 puntos con separaciones promedio de 100 km, conectados a las 5 estaciones SIRGAS medidas en Venezuela y aproximadamente un 20% de vértices coincidentes con la red de triangulación de primer orden de la DCN.

La coincidencia de estaciones con SIRGAS fija el sistema de referencia, la escala y la orientación de REGVEN a este proyecto continental. Al mismo tiempo, la coincidencia con vértices de la triangulación de primer orden permite la determinación de la relación espacial entre el control geodésico convencional y la nueva red, es decir, el cálculo de mejores y más confiables PT.

Desde el punto de vista práctico, la disponibilidad de estaciones de esta red GPS en gran parte del territorio nacional facilita el apoyo de mediciones locales en puntos de alta exactitud,

disminuyendo la problemática de vinculación aquí tratada.

La posibilidad de apoyar las mediciones GPS en puntos REGVEN se refiere a la segunda modalidad, es decir, cuando se dispone de coordenadas en el datum del satélite. En este caso el usuario dispone, en el territorio nacional cubierto por la red, de una posibilidad de apoyo confiable en vértices con coordenadas ITRF a distancias menores o iguales de 50 km.

En caso que el usuario desee expresar las mediciones GPS en el datum nacional convencional La Canoa-Hayford, será obligante trabajar con los nuevos parámetros de transformación obtenidos a partir de REGVEN.

Por otro lado, las ya mencionadas desventajas de esta modalidad de apoyo desaparecerán, es decir, la cantidad en el país de puntos WGS-84, el uso del seudorrango y la debilidad de los PT hasta ahora existentes.

La disponibilidad de esta red GPS nacional y de nuevos PT influirá todas las modalidades de apoyo antes explicadas, por lo tanto esta alternativa de vinculación puede considerarse la más conveniente para la generalidad de los usuarios.

Mención aparte merece la consideración del problema de las alturas en el control básico venezolano ante la disponibilidad de estaciones REGVEN, ya que esta red ofrece coordenadas tridimensionales de primer orden. Este hecho afecta en primer lugar, la determinación de los nuevos PT entre el datum satelital y el nacional [12], y por otro lado, el usuario que se vincule con puntos de la nueva red obtendrá alturas elipsoidales para sus mediciones cuya transformación a valores ortométricos se verá fuertemente limitada por la inexistencia de información geoidal en el país [13].

## Conclusiones

La aplicación práctica de las modalidades utilizadas regularmente en Venezuela para materializar la vinculación de mediciones GPS con el control geodésico básico del país, generó resultados que difieren entre sí significativamente, en el orden de centímetros a metros. Este comportamiento es producto de las características mismas de cada modalidad, de la calidad de los elementos utilizados en su aplicación (parámetros de transformación del datum, coordenadas del punto de apoyo) y del grado de aproximación de esos elementos al describir en el país la verdadera relación espacial (posición, orientación y escala) entre los sistemas La Canoa-Hayford y WGS-84.

Bajo ciertas consideraciones, los resultados de las modalidades analizadas pueden optimizarse logrando que las discrepancias entre ellos desaparezcan prácticamente, a la vez que se obtienen las menores diferencias entre los resultados de cada modalidad y las coordenadas oficiales de la red de control geodésico convencional del país.

Considerando la disponibilidad de la nueva red GPS nacional, la alternativa de vinculación mas conveniente sería apoyar las mediciones satelitales en una o varias estaciones REGVEN (datum ITRF94, época 1995.4), según sea el caso. Los resultados de las mediciones se podrán luego transformar, si se desea, al sistema geodésico convencional del país (datum La Canoa-Hayford) mediante PT obtenidos a partir de REGVEN.

La variación respecto al tiempo del nuevo marco de referencia geodésico nacional SIRGAS-REGVEN por efectos de deriva continental y eventos sísmicos; el estudio de su compatibilidad con los marcos de referencia utilizados por las efemérides GPS actuales (precisas y transmitidas); y el avance tecnológico, cada día mayor, en los procedimientos de observación y análisis de mediciones GPS, requieren la continuación de las investigaciones que sobre la vinculación de observaciones GPS con el control geodésico venezolano han sido descritas en este artículo.

## Agradecimiento

Los resultados presentados en este artículo forman parte de un proyecto de investigación fi-

nanciado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de La Universidad del Zulia (CONDES).

Las mediciones utilizadas han sido suministradas por el Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional al cual se le agradece su valiosa colaboración.

## Referencias Bibliográficas

1. Seeber G.: "Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications". Walter de Gruyter. Berlin-New York. 1993.
2. Slater J.A., Stephen M.: "WGS 84 - Past, Present and Future". Advances in positioning and Reference Frames: International Association of Geodesy Symposia, Volume 118. Edited by F.K. Brunner. IAG Scientific Assembly. Rio de Janeiro, Brazil, September 3-9, 1997, pp. 1-7.
3. Drewes H., Tremel H., Hernández J.N.: "Adjustment of the New Venezuelan National GPS Network within the SIRGAS Reference Frame". Advances in positioning and Reference Frames: International Association of Geodesy Symposia, Volume 118. Edited by F.K. Brunner. IAG Scientific Assembly. Rio de Janeiro, Brazil, September 3-9, 1997, pp. 193-198.
4. Hoyer M., Arciniegas S., Pereira K., Fagard H., Maturana R., Torchetti R., Drewes H., Kumar M., Seeber G.: "The Definition and Realization of the Reference System in the SIRGAS Project". Advances in positioning and Reference Frames: International Association of Geodesy Symposia, Volume 118. Edited by F.K. Brunner. IAG Scientific Assembly. Rio de Janeiro, Brazil, September 3-9, 1997, pp. 168-173.
5. Boucher C., Altamimi Z.: "International Terrestrial Reference Frame". GPS World, September 1996, pp. 71-74.
6. Drewes H., Kaniuth K., Stuber K., Tremel H., Kahle -G., Straub CH., Hernández N., Hoyer M., Wildermann E.: "The CASA'93 GPS campaign for crustal deformation research along the south Caribbean plate boundary". Journal of Geodynamics. Vol. 20, No. 2, 1995, pp. 129-144.

7. Hernández N., Balcazar F.: "Evaluación de la Red de Triangulación del Area Metropolitana de Caracas utilizando GPS". Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional. Reporte Técnico. Caracas, 1995.
8. Geodesy and Geophysics Department, DMA: "Absolute GPS Survey Station Zamural". GG Pub. 1463. Caracas, Noviembre 1992.
9. Rothacher M., Beutler G., Gurtner W., Brockmann E., Mervart L.: "The Bernese GPS Software version 3.4". Astronomical Institute. University of Berne. May 1993.
10. Zumberge J.F., Fulton D.E., Neilan R.E.: "International GPS Service for Geodynamics. 1996 Annual Report". IGS Central Bureau. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Pasadena, California USA. November 1997.
11. Acuña G.: "TransDat v4.0: Software para la determinación y aplicación de Parámetros de Transformación del Datum Geodésico". Reporte Técnico. Departamento de Geodesia Superior. Escuela de Ingeniería Geodésica. La Universidad del Zulia. 1997.
12. Hoyer M., Acuña G., Wildermann E., Royero G., Salazar V.: "Avances en la transformación del datum geodésico venezolano La Canoa al geocéntrico WGS-84". Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia. Vol. 20, No. 1, 1997, pp. 29-36.
13. Acuña G., Hoyer M., Wildermann E., Hernández N.: "Avances en el proyecto para la determinación del geoide en Venezuela". International Geoid Service (IGeS). Bulletin No. 9. Special Issue for South America. June 1999, pp. 21-29.

Recibido el 1º de Junio de 1999

En forma revisada el 13 de Diciembre de 1999