

Application of GPS satellite technique for studying Gral. Rafael Urdaneta bridge dynamic behavior

Víctor Cioce*, Dameli Camarillo, Melvin Hoyer, Eugen Wildermann, Giovanni Royero

*Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, Departamento de Geodesia Superior, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. *vcioce@fing.luz.edu.ve*

Abstract

Gral. Rafael Urdaneta Bridge over Maracaibo Lake is considered a very important engineering structure in the country, due to its structural features and influences in socioeconomic development for zulian region. Many multidisciplinary researches focus in the maintenance and preservation of the bridge had been made since opening and from Geodetic Engineering perspective studies had pointed to estimate geometrics deformations suffered by the structure due to dynamic and static loads using conventional methods. This paper describes first known experiences in Venezuela related to GPS satellite technique application to study bridges dynamic behavior. The designed measurements and processing methodologies offer highly accurate and representative results according to comparison with external references.

Key words: GPS, deformation, Gral. Rafael Urdaneta bridge, dynamic load.

Aplicación de la técnica satelital GPS para el estudio del comportamiento dinámico del puente Gral. Rafael Urdaneta

Resumen

El puente sobre el Lago de Maracaibo Gral. Rafael Urdaneta es considerado una de las obras de ingeniería más importantes del país, no solo por sus características estructurales sino también por el impacto que ha tenido en el desarrollo socio-económico de la región zuliana. Desde su inauguración se han realizado múltiples estudios interdisciplinarios enmarcados en el mantenimiento y conservación de la obra y desde el punto de vista de la Ingeniería Geodésica, se han orientado en la estimación de las deformaciones geométricas sufridas por la estructura debidas a la acción de cargas vivas y muertas, todos basados en metodologías convencionales. Este trabajo describe las primeras experiencias conocidas en Venezuela en cuanto a la aplicación de la técnica satelital GPS para el estudio del comportamiento dinámico de puentes. La metodología de medición y procesamiento diseñada ha ofrecido resultados altamente confiables y representativos de acuerdo a comparaciones realizadas con patrones externos.

Palabras clave: GPS, deformación, Puente Gral. Rafael Urdaneta, carga dinámica.

Introducción

El puente "Gral. Rafael Urdaneta" (PGRU), localizado al occidente venezolano, cruza el Lago de Maracaibo en sentido este-oeste, conectando la ciudad de Maracaibo con el resto del país. Fue

construido entre 1959 y 1962 con concreto reforzado y mide aproximadamente 8,6Km de longitud con una altura libre de 50m sobre el nivel del lago, este consta de 135 tramos con algunas secciones atirantadas. El PGRU ha sido objeto de múltiples investigaciones orientadas al estudio

de su comportamiento estructural ante las diversas fuentes de deformación que sobre él actúan [1]. Desde el punto de vista geodésico, mediciones convencionales han sido realizadas en varias oportunidades permitiendo la obtención de información relevante acerca del asentamiento de las pilas, retracción y fluencia plástica del concreto y desplazamientos de los tableros. Todos estos trabajos han estado dirigidos a la preservación y mantenimiento de esta gran obra de la ingeniería venezolana, importante por sus características estructurales y por el impacto que ha tenido en el desarrollo socioeconómico de la región zuliana.

Surge así la idea de incorporar técnicas geodésicas satelitales para la estimación de deformaciones estructurales en el PGRU, promoviendo y demostrando la versatilidad del GPS en cuanto a la detección de desplazamientos por carga dinámica se refiere y para la obtención de parámetros de interés en el análisis estructural como es el caso de la frecuencia natural de vibración de los tableros. En tal sentido, se planteó como objetivo definir una metodología para la caracterización y cuantificación de las deflexiones que sufre la estructura principalmente por efecto del tráfico vehicular, basada en el uso de la técnica espacial.

Este tipo de investigación no cuenta con precedente alguno en todo el país, los resultados fueron altamente satisfactorios y convalidados con fuentes externas, por tal razón, la metodología diseñada para su ejecución es recomendada ampliamente no solo para las labores de mantenimiento en el PGRU, sino también en otros puentes y viaductos que componen las vías de comunicación del territorio nacional.

Mediciones GPS: planificación, ejecución y procesamiento

Las mediciones satelitales GPS en el PGRU fueron diseñadas en función de varios aspectos relacionados directamente con su objetivo y las características estructurales del puente [2]. Un conocimiento a fondo sobre esta importante obra de ingeniería fue fundamental, apoyado por una inspección visual que permitió apreciar con mayor detalle los elementos que la integran, complementado por una revisión de la bibliografía exis-

tente y por las consultas realizadas a expertos en el área de la Ingeniería Estructural. Al combinar la información disponible fue posible la definición de dos variables de gran peso en lo que respecta al estudio de deformaciones geométricas mediante técnicas geodésicas: la cantidad y la ubicación de los puntos de observación.

La presencia de diferentes tipos de elementos estructurales conllevó a la ubicación de puntos de observación sobre tramos simplemente apoyados, tramos apoyados sobre fustes en X y en V y en los tramos mayores del PGRU. En el caso de las vigas simplemente apoyadas, que integran casi la totalidad del puente, se situaron puntos de observación en el centro del tablero por considerar que la deflexión por carga vehicular alcanza sus máximos valores en esta zona [3]. De manera similar se procedió en los tableros de las pilas en forma de X y V, por cuanto su zona central queda suspendida a pesar de la robustez de este tipo de elemento estructural. Los puntos GPS materializados en los tramos mayores, fueron dispuestos a ambos extremos de los segmentos de viga volada comprendidos entre los anclajes de los cables de suspensión y las juntas de expansión, teóricamente dichas secciones están sujetas a un mayor movimiento. Las Figuras 1 y 2 ilustran la disposición de los puntos de observación considerados para la investigación.

Todos los puntos fueron distribuidos de manera uniforme los primeros 400m desde el anclaje occidental, en este intervalo se encuentran los principales elementos estructurales de la obra, y fueron monumentados con pilares de concreto a modo de centración forzada. Las estaciones subsiguientes se distribuyeron con separaciones variables hasta al extremo oriental, dada la presencia de un mismo tipo de estructura (vigas simplemente apoyadas). La red GPS mostrada en la Figura 3, quedó conformada por un total de 17 estaciones pero por razones de fuerza mayor solo pudieron ser ocupadas 12.

Por otra parte, es sabido que desde el punto de vista geodésico el estudio de deformaciones implica en cierto modo una comparación con objetos estables, al utilizar la técnica GPS dichos objetos corresponden a las estaciones base de la red, las cuales deben ofrecer una elevada estabilidad y permanencia en el tiempo. Por tal razón, previamente se seleccionaron y ocuparon dos



Figura 1. Ubicación de puntos GPS en tramos simplemente apoyados (izq.) y vigas V (der.).

vértices de la antigua red de control convencional del PGRU (Figura 3) para la estimación de coordenadas actualizadas y de alta precisión, dichas estaciones fueron *Punta de Piedras Norte (PNOR)* y *Punta Iguana Sur (PSUR)*, ambas muy cercanas a la estructura lo que implicó la generación de líneas base cortas (menores a 10Km), favoreciendo así las mediciones destinadas a este tipo de aplicaciones [4].

Para la planificación y ejecución de las observaciones, se garantizó una óptima adquisición de datos que permitiera la interpretación adecuada del fenómeno. Las mediciones enmarcadas en la investigación se realizaron siguiendo especificaciones formuladas especialmente en función del análisis de la información disponible



Figura 2. Ubicación de puntos GPS en tramos mayores.

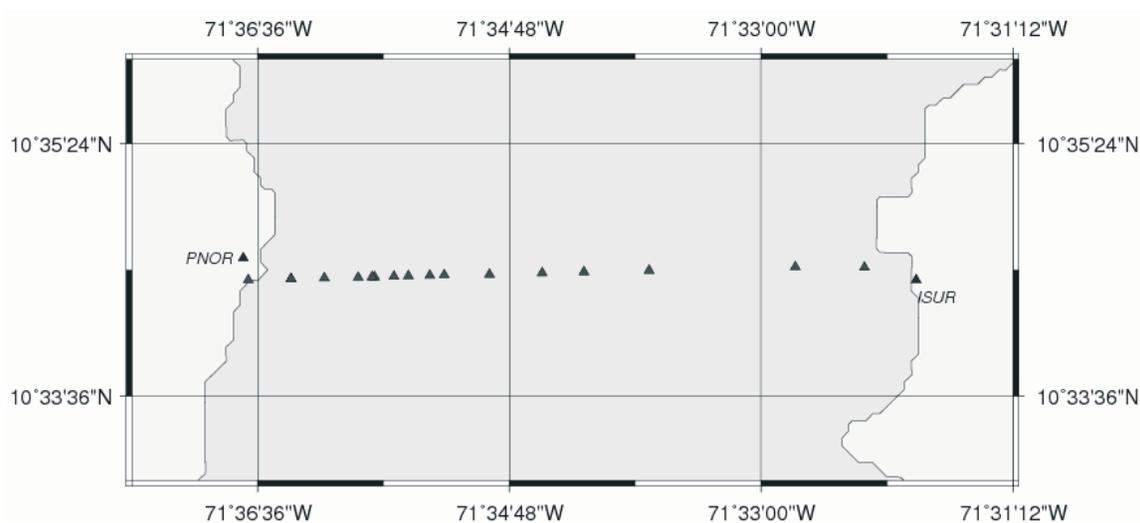


Figura 3. Red geodésica materializada sobre el PGRU.

acerca del puente: características estructurales, composición, dimensiones, cantidad de usuarios que lo transitan, otros agentes deformantes, reconocimiento de la obra *in situ* y de aquella proveniente de los fundamentos teóricos que rigen la monitorización de puentes con GPS.

Las mediciones GPS fueron ejecutadas durante los días 349 a 355 de 2005 utilizando receptores de doble frecuencia con antenas geodésicas tipo *ground-plane*, tomando en cuenta la adecuada adquisición de datos bajo todas las condiciones de carga vehicular experimentadas por el puente (tráfico reducido, medio y elevado), y a su vez el adecuado tratamiento durante la fase de postprocesamiento; la Tabla 1 resume los parámetros de observación considerados.

El estudio del comportamiento dinámico del PGRU mediante GPS no sólo requirió de mediciones de alta precisión sino también de un riguroso procesamiento de las mismas, en tal sentido fue necesario diseñar una estrategia de cálculo que permitiera la obtención de resultados confiables y que a su vez pudieran interpretarse como el fiel movimiento de la estructura ante la acción del tráfico vehicular, por tal razón se utilizó el software científico *Bernese GPS Software V 5.0* [5] como plataforma de procesamiento. Debido al hecho de que los continuos movimientos horizontales y verticales de la antena GPS se deben a la ocurrencia del paso vehicular y a la acción de otros agentes, la estrategia se fundamentó en la estimación de parámetros por época para la determinación de los desplazamientos, es decir, se obtuvo la posición tridimensional de las doce estaciones ocupadas durante la campaña por cada época de muestreo.

Las determinaciones se hicieron en forma simultánea desde ambas bases, la reducción de

la influencia de las ambigüedades se hizo aplicando los modelos de un posicionamiento estático para luego implementar la estimación por época. Al formarse líneas base menores a 10Km, los efectos de otras fuentes de error como las orbitales y relojes fueron despreciados. Además, para garantizar la reproducción precisa del movimiento de los tableros del puente, las mediciones fueron muestreadas para el procesamiento a 6s, siendo este el doble de la frecuencia de vibración teórica media del PGRU aun y cuando se midió a sólo 1s; esta selección obedeció a la aplicación del Teorema de Nyquist [6].

La determinación previa de coordenadas actualizadas y de alta precisión para las estaciones base utilizadas, permitió efectuar el cálculo por épocas, refinando en cada una de sus etapas las posiciones *a priori* de los puntos rover. Gracias a la estrategia utilizada se obtuvieron sus coordenadas en modo estático y simultáneamente en modo cinemático a partir de estas últimas, las cuales darían paso a la cuantificación de los desplazamientos de los tableros del puente. Los ensayos y pruebas de calidad sobre el ajuste por cuadrados mínimos permitió definir precisiones en las coordenadas en el orden de $\pm 2\text{mm}$ en posición y $\pm 3\text{mm}$ en altura, quedando referidas al ITRF2000:2005.9.

El procesamiento por época resultó ser altamente efectivo en lo que respecta a esta aplicación de la técnica GPS; con una cantidad aproximada de 13742 posiciones para el total de las doce estaciones observadas, se logró apreciar y evaluar el comportamiento descrito por los tableros durante los periodos de ocupación. No obstante, se pudo evidenciar la sensibilidad de este tipo de estimaciones ante condiciones de medición adversas, caracterizadas por la presencia de

Tabla 1
Parámetros de medición de la campaña GPS

Modo de medición	Estático diferencial.
Magnitud observable	Fase y diferencia de fase de las portadoras L1 y L2.
Cantidad y duración de las sesiones de observación	Una (1) sesión de nueve (9) horas.
Hora de inicio y culminación	04:00-13:00 HLV (08:00-17:00 UTC)
Intervalo de grabación	01 segundo.
Ángulo de elevación	20° sobre el horizonte.

obstrucciones (componentes de la superestructura del puente y vehículos en circulación) y que posiblemente hayan ampliado el efecto de multitrayectoria, no evaluado en esta investigación por estar fuera de su alcance, el elevado número de parámetros implícitos remanentes en las soluciones o ambigüedades así lo sugieren. El RMS de las soluciones por época se ubicó en $\pm 2\text{mm}$ para las tres componentes.

Resultados y análisis

El impacto de la carga dinámica y el tipo de elemento estructural, constituyen los factores que dan origen a las variaciones en la posición cuasi-inerte de los tableros del PGRU en función del tiempo y por ende de los puntos de observación materializados sobre ellos, tal que es posible reproducir el movimiento vía GPS [2]. Para determinar la magnitud de las deflexiones en los diferentes elementos estructurales, se llevó a cabo un análisis de las series de tiempo generadas a partir de los resultados GPS, considerando para

ello cuatro aspectos básicos: (a) la amplitud del desplazamiento de la estación de observación de acuerdo a la hora del día, (b) el tipo de estructura observada, (c) el comportamiento de los puntos en una misma sesión de medición y (d) el comportamiento del tráfico automotor registrado durante el trabajo de campo. La comparación de la información derivada de cada evaluación, permitió demostrar la capacidad de la técnica de medición empleada ante la causalidad del fenómeno estudiado. Se presenta como ejemplo en la Figura 4 la serie de tiempo que describe el movimiento de la estación PG07 y en la Figura 5 el tráfico vehicular registrado para la fecha.

El movimiento sufrido por cada elemento estructural estudiado, a saber vigas simplemente apoyadas, vigas mesas y tramos mayores, pudo ser caracterizado y cuantificado en términos de su origen y magnitud durante el período de observación. La influencia de las características propias de la estructura junto con la variabilidad del tráfico sobre estos resultó evidente.

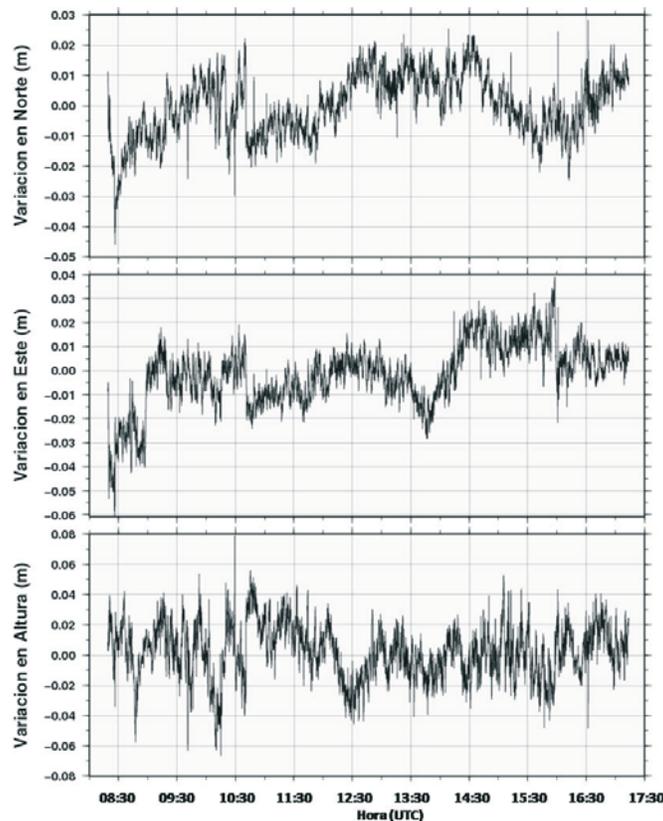


Figura 4. Desplazamientos de la estación PG07 derivados a partir de resultados GPS.

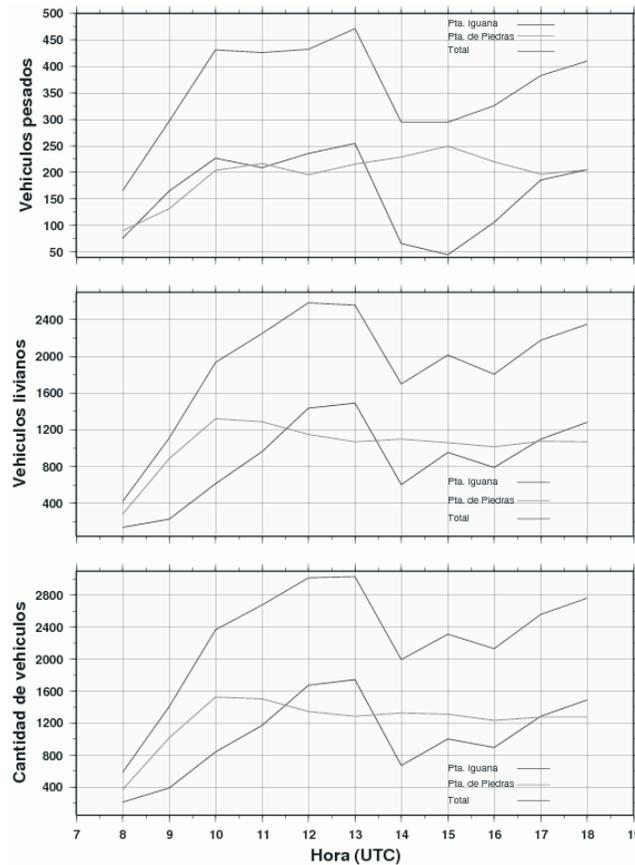


Figura 5. Tráfico vehicular registrado durante la sesión de observación.

Se presume que los desplazamientos observados en la componente norte estén influenciados por la acción del viento. Es sabido que en el área del PGRU el mismo proviene del N-NE, en oposición a la dirección de su eje y que además su intensidad se incrementa junto con la altura del elemento estructural, siendo capaz de mover vigas y cables de suspensión [7]. Al no disponer de registros relacionados con la magnitud y dirección del viento en la zona de interés, dado que no existe una estación meteorológica en el sitio, toda suposición realizada para las estaciones observadas con la técnica satelital no puede ser validada con hechos. Las variaciones en sentido E-W ocasionadas por la presencia de los rodillos ubicados entre los extremos de las vigas y los fustes, fueron medidas. El efecto de la carga rodante cuando esta experimenta cambios de velocidad, aceleración, frenado entre otros, se manifiesta sobre el tablero activando estos componentes de los denominados apoyos móviles [7]. En el caso de los tramos mayores donde no existen estos

dispositivos, los desplazamientos son causados por el efecto de cargas vivas y muertas.

Por otra parte, al analizar y combinar los resultados obtenidos con la información de campo, se logró apreciar la relación directa entre el paso vehicular y el movimiento en sentido vertical. Las series de tiempo GPS revelaron fielmente el comportamiento de los tableros y vigas ante la acción de dicha fuente de carga dinámica. En la Tabla 2 se presentan la media de los desplazamientos máximos y mínimos estimados para cada estación de acuerdo al tipo de estructura.

En la Figura 6 se presentan las deflexiones verticales para la estación PG12, ubicada sobre vigas simplemente apoyadas entre las pilas 29 y 30, correspondientes al cuarto día de medición. Los desplazamientos en esta dirección oscilan entre los 2 y 4cm durante toda la sesión, sin embargo, se logra apreciar que al inicio y al final de la misma, el movimiento se torna irregular, lo cual puede atribuirse al aumento del tráfico vehi-

Tabla 2
Desplazamientos máximos y mínimos para cada estación GPS del PGRU

Estructura	Est.	Mínimos			Máximos		
		N (cm)	E (cm)	U (cm)	N (cm)	E (cm)	U (cm)
Viga Apoyada	PG01	1	2	4	2	3	10
	PG07	2	1	4	3	2	8
	PG12	2	2	2	4	3	4
	PG13	1	2	4	2	4	6
	PG14	2	2	2	5	3	4
	PG15	1	2	4	2	4	6
	PG16	2	2	4	3	3	6
Viga Mesa	PG02	1	2	4	3	8	6
	PG04	2	3	4	3	4	8
Tramos Centrales	PG05	2	2	4	3	4	6
	PG08	2	2	4	6	4	6
	PG09	2	2	2	6	4	7

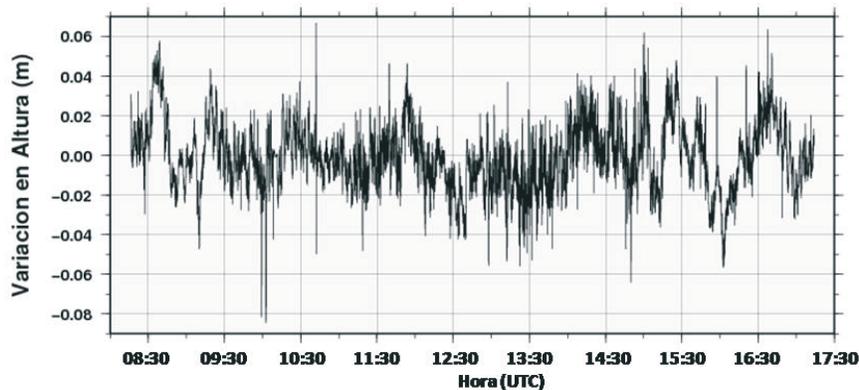


Figura 6. Movimiento vertical de la estación PG12.

cular en estos instantes. Entre las 11^h00^m y 14^h00^m UTC se observó la mayor influencia en esta componente debido al congestionamiento del tráfico que se registró en este periodo.

Un caso muy significativo para la validación de los resultados, se observó en las estaciones PG08 y PG09, situadas en los extremos de las vigas voladas de la pila 22, las características estructurales de esta última, obligan a que ambos lados se mantengan en equilibrio estático y ante una misma carga su comportamiento debe ser similar [8]. La tendencia de los desplazamientos

descritos por dichas estaciones resultó altamente coincidente para un mismo intervalo de medición tal y como se refleja en la Figura 7.

Al momento de evaluar el comportamiento de las estaciones observadas en una misma sesión, se detectó que el movimiento sufrido no seguía una misma tendencia, al menos no en las tres componentes. Los parámetros de diseño del puente en cuanto a la independencia entre sus tramos, hacen que los desplazamientos no se manifiesten de igual forma y además, la separación entre los puntos de observación y las condi-

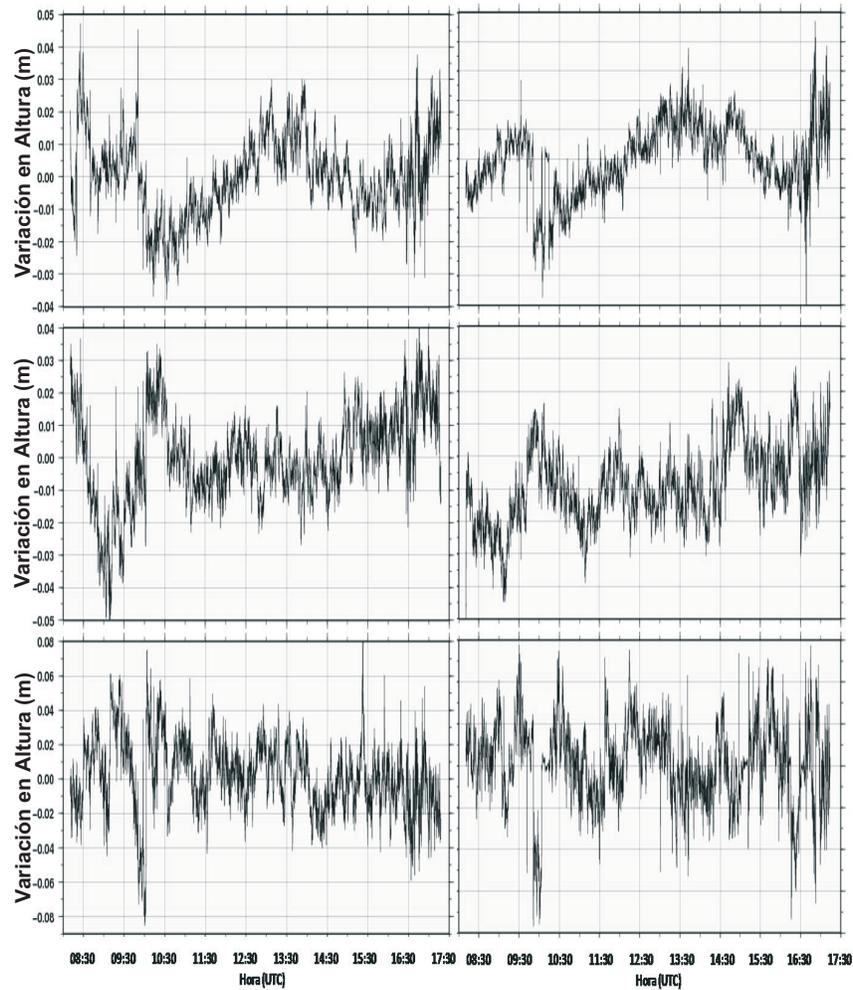


Figura 7. Movimiento de las estaciones PG08 (izq) y PG09 (der.).

ciones de tráfico no controlado conllevan a la ocurrencia de cambios en la cantidad y configuración de vehículos circulantes y en consecuencia en la carga ejercida sobre las vigas [2].

En otro orden de ideas, las series de tiempo GPS y las anotaciones de campo revelaron por sí mismas situaciones particulares propias de la circulación vehicular en vías de comunicación. Una de ellas fue el congestionamiento del tráfico automotor en un mismo tablero, lo cual implicó un efecto de carga constante sobre la viga en un periodo de tiempo relativamente corto. Naturalmente, el impacto se observó sobre la componente vertical, notándose una concentración de los puntos que indican la relación desplazamiento-época entre el intervalo (1, -1)cm, la amplitud del desplazamiento de la estación para el instan-

te en el cual se registró el congestionamiento vehicular, se ubica en 2cm tal como se logra apreciar en la Figura 8.

De forma contraria, también se apreció la ausencia total de circulación vehicular en determinados instantes, así por ejemplo, en la Figura 9 los movimientos en sentido vertical fueron casi nulos en tres ocasiones al no estar influenciados por la principal fuente de carga viva.

Los desplazamientos estimados corresponden a los días de medición, pero al estudiar las estadísticas sobre la circulación diaria en el PGRU se logra inferir que estos bien pudieran ser una representación del movimiento natural de la estructura ante las cargas dinámicas a las cuales está sometida, reforzando de esta manera estudios y modelos ya existentes.

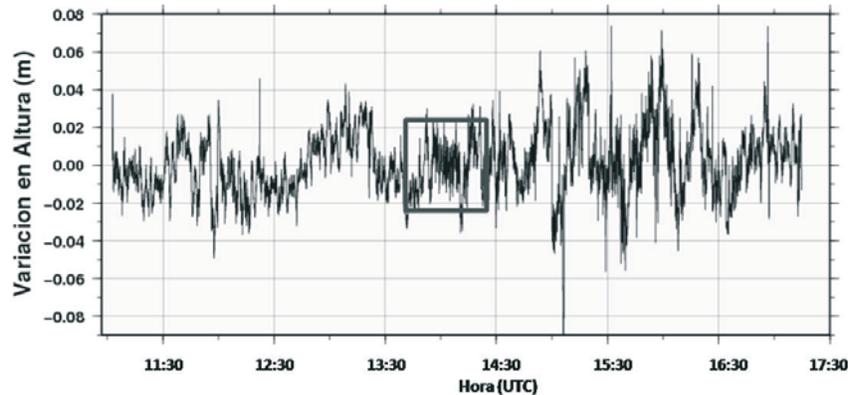


Figura 8. Efecto de carga constante manifestado en la estación PG01.

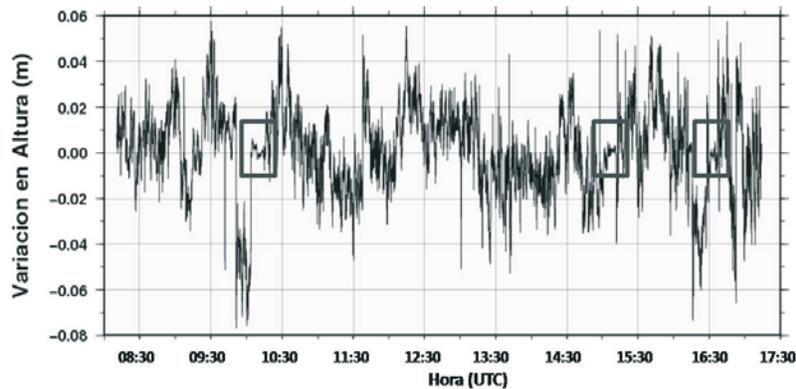


Figura 9. Ausencia de tráfico automotor en la estación PG09.

GPS y FFT para la estimación de las frecuencias de vibración del PGRU

Los análisis estructurales sobre obras de ingeniería se basan en la obtención y evaluación de parámetros que permiten inferir acerca del estado de la obra o de uno de sus componentes. A través de mediciones GPS, al registrarse las variaciones en la posición de la antena receptora por cada unidad de tiempo vinculadas al efecto de la carga ejercida, se establece una relación causa-efecto que puede ser representada mediante series de tiempo, abriendo la posibilidad de obtener el periodo o la frecuencia de vibración de la estructura. De esta manera, dicha técnica geodésica satelital no solamente ofrece una cuantificación de las deformaciones geométricas que pueda sufrir la obra, sino también productos de interés para estudios de índole físico. Por tal razón resultó indispensable el uso de un intervalo de muestreo alto para las mediciones.

Al considerar las bondades de la FFT (*Fast Fourier Transform*) en cuanto al uso del GPS en este tipo de aplicaciones [9], se empleó este algoritmo para la obtención de la frecuencia de vibración de los tableros del PGRU a partir de las 12 series de tiempo correspondientes a las estaciones observadas. Los espectros de potencia derivados mediante la FFT revelaron componentes de alta frecuencia atribuidas a la multitrayectoria y tráfico aleatorio. En la Figura 10 pueden apreciarse dichas componentes en forma de picos considerablemente elevados, y seguidamente se logra observar una disminución en la potencia que repentinamente se ve incrementada para los 0,32Hz (~3s). Este pico coincidió con la frecuencia de vibración de las vigas observadas, de manera que no se trata de un hecho fortuito.

Se sabe que las vigas de mayor longitud presentan periodos de vibración más elevados [10], de acuerdo a los resultados obtenidos las vigas simplemente apoyadas (46,6m) mantienen un periodo medio de 3,49s, para las vigas mesas de 39m es de 2,24s y para los tramos mayores

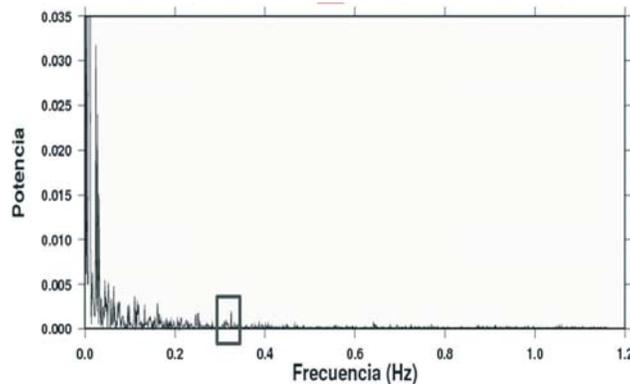


Figura 10. Espectro de potencia obtenido vía FFT para la estación PG12.

(235m) resultó igual a 4,23s siendo el valor más alto. Las señales o series de tiempo conformadas a partir de las mediciones GPS, fueron reconstruidas considerando una vibración *a priori* de 3s.

Estos resultados fueron convalidados con fuentes externas provenientes, en primer lugar, de estudios fundamentados en el análisis estructural, según los cuales la vibración natural de los tableros del PGRU se encuentra en el orden de los 2s [8]. A partir de mediciones de oscilación con sismógrafo [11] se determinaron valores mínimos de 2s y máximos de 3,5s asociados con el paso de vehículos pesados y livianos. Ambas investigaciones fueron realizadas sobre los tramos mayores del PGRU.

Las diferencias resultantes luego de comparar estos resultados externos con los provenientes de las mediciones GPS se consideran aceptables dada su significativa aproximación con los períodos de vibración determinados con métodos físicos, demostrando así la confiabilidad de la técnica de medición para estos fines. Sin embargo, la metodología utilizada puede ser mejorada al incorporar estrategias que permitan un tratamiento más robusto de las diversas fuentes de error implícitas, especialmente la multitrayectoria de la señal GPS, y a su vez una reproducción más fiel del movimiento descrito por el puente.

Conclusiones

Esta investigación y sus resultados demuestran lo eficaz y confiable que pueden ser las observaciones satelitales GPS aplicadas a la determinación y posible control de deformaciones en una estructura de gran envergadura como el

PGRU. A partir de las mediciones realizadas sobre sitios adecuadamente seleccionados de la superestructura del puente y desarrollando una estrategia de procesamiento por épocas, se logró la generación de un conjunto de series de tiempo que reflejaron el movimiento de los tableros y a su vez permitieron la estimación de sus frecuencias o períodos de vibración asociados con el flujo vehicular.

Se logró caracterizar y cuantificar el movimiento descrito por los principales elementos estructurales del PGRU haciendo uso del GPS en función de los objetivos de la investigación; se evaluó principalmente el desplazamiento en la componente vertical alcanzando valores medios de $\pm 4,8\text{cm}$ en vigas apoyadas, $\pm 5,5\text{cm}$ en vigas mesas y $\pm 9,7\text{cm}$ en los tramos mayores. Las magnitudes de las deflexiones estimadas fueron convalidadas con aquellas provenientes de estudios estructurales ya existentes, la veracidad de los análisis e interpretaciones realizadas se logró con la asesoría de expertos en el área.

Aunque también se registraron movimientos horizontales en sentido N-S con valores medios de $\pm 2,3\text{cm}$ en vigas apoyadas, $\pm 2,2\text{cm}$ en vigas mesas y $\pm 7,0\text{cm}$ en los tramos mayores, ocasionados principalmente por la acción del viento, estos no pudieron ser correlacionados con los respectivos patrones de velocidad y dirección debido a la carencia de los mismos en el lugar. Por su parte, los desplazamientos en sentido E-W se atribuyen al funcionamiento de los apoyos móviles y características propias del tipo de estructura, los mismos se ubicaron en $\pm 2,5\text{cm}$ en los tramos apoyados, $\pm 4,2\text{cm}$ en las vigas mesas y $\pm 6,0\text{cm}$ en las pilas mayores.

Los periodos de vibración de los tableros ocupados se obtuvieron al interpretar los espectros de potencia correspondientes a cada serie de tiempo GPS, derivados al aplicar la FFT como algoritmo de cálculo, se detectaron componentes de alta y baja frecuencia asociados con el ruido de la medición y el movimiento de la estructura respectivamente. Los valores obtenidos vía GPS fueron comparados con los conocidos a partir de metodologías netamente físicas y las discrepancias existentes entre ambos se consideran aceptables demostrando así la confiabilidad de la técnica satelital para este tipo de estudios. Los periodos de vibración medios fueron de 3,49s para las vigas apoyadas, 2,24s para las vigas mesas y 4,23s para los tramos mayores.

Esta investigación contribuye con el fortalecimiento de los estudios de deformación relacionados directamente con el PGRU, con la particularidad de que se ha introducido por primera vez en Venezuela la técnica satelital GPS con estos fines, incorporando así procedimientos que pueden ser de gran utilidad en los planes de mantenimiento y conservación de esta obra y similares, y abriendo el camino para el desarrollo de trabajos científico-técnicos de mayor profundidad y alcance.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración prestada por parte del Servicio Autónomo para la Recaudación y Manejo de los Ingresos del PGRU (SARMIPGRU), especialmente al Econ. Leonardo Ocando y a los Ings. Tirsio Moreno, Graciano Paz, María Gouveia y Francisco González. De igual forma agradecemos la asesoría y orientación brindada por el Departamento de Estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil en la persona del Prof. Antonio Sarcos. Finalmente dejamos constancia de la valiosa colaboración prestada por parte del personal técnico y estudiantil del Laboratorio de Geodesia Física y Satelital durante la fase de mediciones contemplada en esta investigación.

Referencias bibliográficas

1. Rincón O., Sánchez M., Contreras D., Fernández R., Zambrano W., Vezga C., Sarcos A., Henneberg H., González A.: "Contribución técnico-científica de la Facultad de Inge-

nería al puente sobre el Lago de Maracaibo". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 14, No. 1, (1991) 63-111.

2. Cioce V. y Camarillo D.: "Mediciones satelitales GPS para la estimación de deformaciones en el puente sobre el Lago de Maracaibo Gral. Rafael Urdaneta". Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geodesta. Escuela de Ingeniería Geodésica de la Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2007.
3. Sarcos A.: Comunicación personal, 2005.
4. C. Larocca A.: "Using high-rate GPS data to monitor the dynamic behavior of a cable stayed-bridge". Proceedings ION GNSS 2004. Long Beach, EUA, 2004.
5. Beutler G., Bock H., Brockmann E., Dach R., Fridez P., Gurtner W., Habrich H., Hugentobler U., Ineichen D., Jaeggi A., Meindl M., Mervart L., Rothacher M., Schaer S., Schmid R., Springer T., Steigenberger P., Svehla D., Thaller D., Urschl C., Weber R.: "The Bernese GPS Software V 5.0 Draft". Printing Office of the University of Bern. Berna, Suiza, 2006.
6. Caicedo M. y Aldana M.: "Aplicaciones geofísicas de los filtros digitales". Universidad Simón Bolívar, Caracas D.C., Venezuela, 2002.
7. Sarcos A.: Comunicación personal, 2006.
8. Sarcos A. y García H.: "Análisis estructural de la pila 24 del puente Rafael Urdaneta bajo el efecto de choque de un carguero". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 26, No. 1 (2003) 3-8.
9. Roberts G., Meng X., Dodson A.: "Multipath mitigation for bridge deformation monitoring". Journal of Global Positioning System. Vol. 1, No. 1 (2002) 25-33.
10. Bauverlag GmbH: "El puente sobre el Lago de Maracaibo en Venezuela". Wiesbaden. Berlin, Alemania, 1963.
11. Badell C.: "Estudio de oscilaciones de corto periodo en estructuras de importancia social: caso Represa Burro Negro y Puente Rafael Urdaneta". Informe Técnico. CONDES LUZ. Maracaibo, Venezuela, 1984.

Recibido el 3 de Abril de 2009
En forma revisada el 3 de Mayo de 2010