

CONTROL DE MOVIMIENTOS EN PRESAS MEDIANTE DGPS. APLICACIÓN A LA PRESA DE LA ACEÑA, ESPAÑA

• David Galán-Martín •
Canal de Isabel II, España

• Rubén Martínez-Marín • Miguel Marchamalo-Sacristán •
• José Antonio Sánchez-Sobrino •
Universidad Politécnica de Madrid, España

Resumen

En este artículo se presenta la evolución de la técnica DGPS (GPS diferencial) en el control de movimientos y cómo se ha aplicado a distintos campos, con resultados de precisión, exactitud y sensibilidad satisfactorios. La tolerancia es mayor en los campos de la geología y la geotecnia (subsidiencias, volcanes, deslizamientos de ladera) y más exigente en el control de infraestructuras (puentes, torres, presas...), donde se requiere llegar a niveles milimétricos. Los resultados obtenidos en el estudio de caso que se llevó a cabo en la presa de La Aceña, Ávila, España, demuestran que la técnica utilizada es viable en el control de movimientos en infraestructuras de este tipo. El algoritmo utilizado en este estudio, basado en el "filtro de Kalman", permite alcanzar resultados cuya sensibilidad es de ± 1 mm. Entre las ventajas de la técnica DGPS destacamos su facilidad de configuración e instalación, la sencillez de operación, un coste bajo en comparación con otros sistemas de auscultación tradicionales y, sobre todo, la posibilidad de su telecontrol y monitorización. Se puede afirmar que el sistema es útil de cara a la gestión de la auscultación y de la seguridad de las presas, al ser un método alternativo en ambos campos.

Palabras clave: DGPS, monitoreo de presas, monitoreo geotécnico, tiempo real.

Introducción

Las presas

La seguridad de las presas está tomando un peso importante en los últimos años dentro de la gestión y explotación de infraestructuras. La presa como tal supone un riesgo para la sociedad, ya que su rotura, por muy improbable que sea, es posible. La gestión del riesgo debe ser una preferencia en los países desarrollados y, si cabe, más en países con un número elevado de presas antiguas (en España, la edad media es de 35 años) que continúan en servicio.

Las presas están "vivas", es decir, responden a las solicitaciones externas a las que están sometidas. La auscultación de presas es la espe-

cialidad de la ingeniería que se dedica al control de estas infraestructuras, analizando las variables externas y su efecto en la estructura. Esta auscultación puede ser hidráulica, piezométrica, deformacional y de control de movimientos.

Métodos de auscultación

Entre los métodos de control de movimientos en estructuras se pueden diferenciar los geotécnicos (péndulos directos e invertidos, inclinómetros, girómetros...) y los geodésico-topográficos (nivelación, trilateración, triangulación, poligonación de precisión, colimación angular, etcétera). Los sistemas clásicos son muy fiables y permiten alcanzar precisiones altas, de hasta la centésima de milímetro.

Con los nuevos avances tecnológicos se han ido añadiendo otro tipo de métodos al control deformacional y de movimientos, como los basados en fibra óptica, estaciones robotizadas de topografía o mediante GPS diferencial (DGPS).

Este último sistema, sobre el que versa el presente estudio, se ha aplicado en geología, principalmente en control de estabilidad de laderas y terraplenes, donde la precisión requerida es centimétrica.

El avance de la tecnología y las comunicaciones de los últimos años ha permitido desarrollar métodos que proporcionan posiciones con exactitud milimétrica mediante filtros matemáticos, perfectamente asumibles en el control de movimientos de presas de hormigón. En este tipo de presas, la amplitud de movimientos de ciclo anual es del orden de 20 a 40 mm, y depende de otros parámetros, como la altura de presa, la geometría estructural, el tipo de hormigón, la carga hidrostática y la onda de temperatura exterior.

Objeto

En este artículo se presenta la evolución de la técnica DGPS en el control de movimientos en diferentes infraestructuras y estructuras de tierra, y cómo se ha aplicado a distintos campos con resultados de precisión, exactitud y sensibilidad satisfactorios.

Este trabajo analiza la viabilidad del sistema DGPS en el control de movimientos de presas de hormigón, y compara dos sistemas de auscultación y su correlación con las variables físicas y las vinculadas con el propio sistema GPS diferencial, de cara al control estructural y a la seguridad de las presas.

Se exponen los primeros datos del estudio de caso de la presa de La Aceña, en Ávila, España (figura 1). Esta presa es de tipo arco-gravedad de 68 m de altura sobre cimientos, con gran esbeltez y gran amplitud de movimientos en coronación, analizados y conocidos desde el año 1995, y se está controlando con DGPS, dentro de la línea de investigación sobre DGPS

aplicado a la ingeniería civil, realizada en el Laboratorio de Topografía y Geomática de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETSI) de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

Antecedentes

En las “Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses”, celebradas en Zaragoza, en junio de 2007, se presentaron varios artículos en los que se exponían los principales avances y experiencias recogidas hasta la fecha en España y que hacían referencia a los diferentes campos de aplicación del GPS en el mundo (control de laderas y subsidencias, volcanes, movimientos de infraestructuras: puentes, rascacielos, presas...). Como principales artículos se pueden destacar “Auscultación de las laderas” (Olalla, 2007), “Análisis de la estabilidad de la ladera de la margen izquierda del embalse de Arenós (Castellón)” (Estaire *et al.*, 2007), “Control de movimientos superficiales de laderas inestables mediante sistema GPS” (Moreno y Fernández, 2007) y “Laderas del embalse de Itoiz” (Lafuente *et al.*, 2007). Concretamente, en estos cuatro artículos se comentan ventajas e inconvenientes del sistema y sus precisiones,



Figura 1. Presa de La Aceña, Ávila, España.
Autor: David Galán Martín.

y se menciona la presa de Pacoima en Estados Unidos (figura 2), donde ya se había instalado esta técnica.

Ante la necesidad de validar e incorporar esta tecnología a la ingeniería civil en España, se está llevando a cabo un estudio de caso en tiempo real en la presa de La Aceña, Ávila. Dicha presa actualmente es la única en España que se controla con esta tecnología y de forma simultánea con los sistemas clásicos de auscultación.

La tecnología GPS y GPS diferencial (DGPS)

El sistema DGPS involucra la operación simultánea de al menos dos receptores, uno de los cuales se debe encontrar en un sitio de coordenadas conocidas o consideradas fijas, y el otro u otros en puntos cuyas coordenadas se requiere conocer. La combinación matemática de los observables de una y otra estación durante muchas épocas permite conocer las incógnitas requeridas en el sistema de ecuaciones que se forma (errores de reloj, retardos y adelantos de la señal debidos a la troposfera e ionosfera, errores orbitales, etcétera).

Las técnicas GNSS para el control de deformaciones

Los receptores GPS realizan dos clases de medidas: pseudodistancias de código (C/A en L1 y L2C, y P en L1 y L2) y medidas de fase de la portadora (en L1 y L2).

La pseudodistancia es la medida de la distancia entre satélite y receptor, obtenida a partir del tiempo de transmisión de la señal, multiplicado por la velocidad de la luz. Se denomina así porque la medida que se registra en el receptor, que es la distancia satélite-receptor (ya sea derivada de código o bien de fase), está afectada por los errores de ionosfera, troposfera, errores en la posición del satélite, errores de reloj, etcétera, y por tanto no es exactamente la distancia real.

El tiempo se obtiene mediante la correlación o alineamiento del código PRN (*pseudo range noise*) generado por el receptor y el idéntico emitido por el satélite. Prescindiendo de los errores propios en GPS (estados de reloj, órbitas, troposfera, ionosfera, multipath, etcétera), con los códigos se obtienen precisiones nominales en las pseudodistancias del 1% de la longitud del chip (cada cuánto se repite el

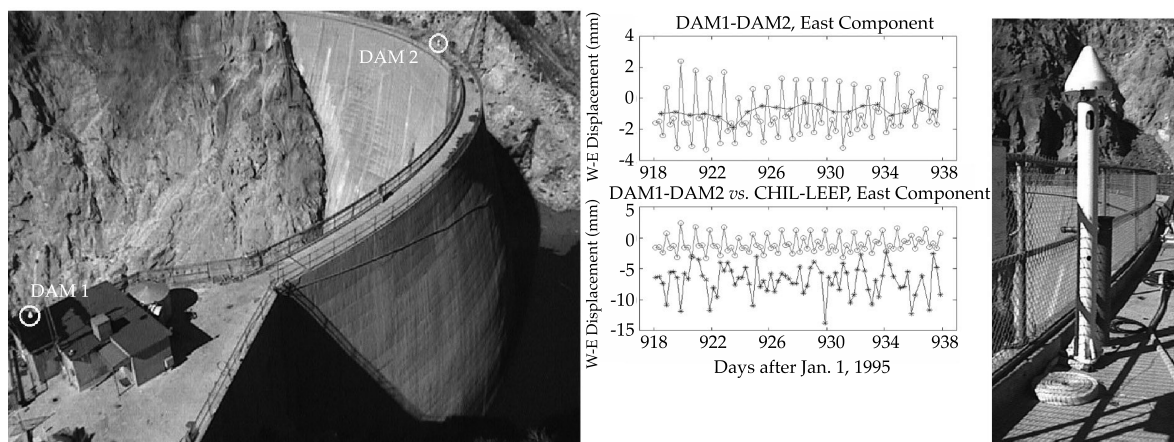


Figura 2. Instrumentación DGPS de la presa de Pacoima, Estados Unidos (Behr *et al.*, 2000).

código), resultando 3 m para el código C/A y 0.3 m para el código P.

El observable de fase es la diferencia entre la fase de la portadora recibida del satélite y la fase generada internamente por el oscilador del receptor. Estas medidas de fase se registran en intervalos iguales de tiempos del receptor y no tienen en cuenta el número de ondas enteras que hay entre el receptor y el satélite. El seguimiento de la señal de fase por parte del receptor se realiza generando olas internas en el oscilador del receptor a medida que la distancia entre satélite y receptor va aumentando o disminuyendo debido al movimiento orbital del satélite. Esas ondas generadas para el seguimiento del satélite constituyen la medida de fase.

La pseudodistancia que se obtiene se deriva de una medida de la fase de la portadora en vez de derivarse a partir de una medida del tiempo. La distancia satélite-receptor en el instante inicial $t_0 = 0$ está relacionada con el número entero (N) de longitudes de onda (λ) y su fase (parte fraccional de longitud de onda $\Delta\phi$), siendo f la frecuencia de la onda portadora:

$$D = \frac{c \cdot \Delta\phi}{f} + \lambda \cdot N \quad (1)$$

A medida que el satélite se aleja o acerca del receptor, éste va generando ciclos enteros de onda para seguir la señal del satélite, de tal forma que el receptor mide una parte fraccional de la fase (ϕ_R^s) y el número entero de longitudes de onda que se acerca/aleja del satélite (n_R^s). El número entero de longitudes de onda inicial entre satélite y receptor (N_R^s) no se puede medir, es la principal incógnita a determinar en un cálculo GPS y es lo que se conoce como ambigüedad de ciclo inicial, de tal forma que la medida de la pseudodistancia (ρ_R^s) con medidas de fase (expresada en ciclos) será:

$$\rho_R^s \left(\frac{1}{\lambda} \right) = \phi_R^s + n_R^s + N_R^s \quad (2)$$

Nominalmente, la precisión con que se puede medir la fase en un receptor es de 0.01 ciclos, lo cual implica que para las longitudes de onda en las portadoras GPS (unos 19 cm para L1 y 24 cm para L2), la medida de pseudodistancias de fase sin tener en cuenta los errores propios del sistema anteriormente citados, puede tener una precisión del orden de 2 mm.

El método relativo o diferencial GPS de observación simultánea de la misma constelación de satélites entre dos puntos (denominado referencia o base, y el otro rover o móvil) elimina la mayor parte de los errores que afectan al GPS, siendo éste, evidentemente, el que se utiliza en posicionamiento de precisión.

La precisión del método relativo o diferencial GPS con medidas de fase ha demostrado que se pueden alcanzar precisiones del orden milimétrico, dependiendo sobre todo de la distancia de línea base y de la combinación de observables que se utilice. En función de la distancia de línea base también es importante el método que se utilice de resolución de ambigüedades, pero generalmente, con distancias tan cortas como las del caso que nos ocupa, incluso con receptores GPS mono-frecuencia L1 es factible alcanzar una precisión por debajo de los 5 mm.

Si se denomina Φ a la parte que mide el receptor ($\phi + N$), dt al estado del reloj de satélite, dT al estado del reloj de receptor, f frecuencia, y d_{trop} y d_{ion} los efectos troposférico e ionosférico, respectivamente, de distinto signo, se puede generalizar la ecuación de fase observada por el receptor i del satélite k en el instante t como:

$$\begin{aligned} \Phi_i^k(t) = & \frac{1}{\lambda} \rho_i^k(t) + f^k [dt^k(t) - dT_i(t)] \\ & + N_i^k + \frac{1}{\lambda} [d_{trop}(t) - d_{ion}(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

Las simples diferencias entre receptores se establecen a partir de la diferencia de fase obtenida mediante la observación simultánea de un satélite k en dos estaciones i y j , de tal forma que, restando las ecuaciones de fase en ambas estaciones, resultará:

$$\Phi_{i,j}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^k(t) - f^k dT_{i,j}(t) + N_{i,j}^k - \frac{1}{\lambda} d_{ioni,j}^k(t) + \frac{1}{\lambda} d_{tropi,j}^k(t) \quad (4)$$

con lo cual, como se puede ver, se elimina el error en el oscilador del satélite con respecto al tiempo GPS, y si las estaciones están próximas, lo mismo ocurrirá con los dos últimos términos de correcciones ionosféricas y troposféricas, que como es sabido son las más importantes en cualquier observación GPS.

En el modelo de dobles diferencias de fase es necesario considerar dos estaciones (i, j), observando simultáneamente dos satélites (k, l), de tal forma que restando las ecuaciones de simples diferencias de fase anteriores en el mismo instante t se obtendrá:

$$\Phi_{i,j}^{k,l}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t) + N_{i,j}^{k,l} - \frac{1}{\lambda} d_{ioni,j}^{k,l}(t) + \frac{1}{\lambda} d_{tropi,j}^{k,l}(t) \quad (5)$$

De esta forma se eliminan los errores de reloj de los receptores, aunque sigue persistiendo la incógnita de ambigüedad de ciclo inicial entre ambas estaciones. Análogamente, las correcciones atmosféricas pueden ser eliminadas si se consideran iguales efectos en ambas estaciones debido a su proximidad.

El modelo de posicionamiento que utiliza *3D-Tracker* es el de triples diferencias, el cual se basa en la diferencia de dobles diferencias entre dos estaciones y dos satélites, y entre una época de observación y la siguiente, en dos instantes t_1 y t_2 :

$$\begin{aligned} \Phi_{i,j}^{k,l}(t_2) - \Phi_{i,j}^{k,l}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} [\rho_{i,j}^{k,l}(t_2) - \rho_{i,j}^{k,l}(t_1)] \\ &- \frac{1}{\lambda} [d_{ioni,j}^{k,l}(t_2) - d_{ioni,j}^{k,l}(t_1)] \\ &+ \frac{1}{\lambda} [d_{tropi,j}^{k,l}(t_2) - d_{tropi,j}^{k,l}(t_1)] \end{aligned} \quad (6)$$

Como se puede observar en este modelo, considerando que las ambigüedades se mantienen entre dos épocas consecutivas t_1 y t_2 , la gran ventaja en las triples diferencias es que se eliminan las ambigüedades de ciclo inicial y además no está afectado por la pérdida de ciclos que se puede producir en cualquier receptor GPS debido a una baja relación señal-ruido.

Igualmente, si los puntos están próximos y las épocas consecutivas muy próximas, los errores ionosférico y troposférico prácticamente pueden eliminarse. La refracción troposférica normalmente no cambia rápidamente con el tiempo y por tanto es considerablemente reducida en las triples diferencias. No sucede lo mismo, sin embargo, para la refracción ionosférica, la cual puede variar rápidamente con el tiempo, sobre todo en zonas de latitud muy al norte o muy al sur.

La combinación libre ionosfera con observables de fase L1 y L2 se usa para eliminar el efecto ionosférico. En el caso del control de deformaciones en estructuras, las estaciones referencia y móviles suelen estar situadas a distancias no superiores al kilómetro, con lo cual no es imprescindible disponer de receptores de doble frecuencia, con el consiguiente ahorro económico en el equipamiento.

La resolución de las línea base con *3D-Tracker* con triples diferencias se hace en tiempo real con la transmisión de observables desde los tres receptores al centro de control y el *software* utiliza el filtro Kalman (descrito abajo, con parámetros configurables según el tipo de movimiento esperable) para el suavizado de los resultados, permitiendo de esta forma precisiones en torno a un milímetro.

Filtrado de datos

El filtrado de datos tiene por objeto mejorar la exactitud de la solución de posición, estableciendo un algoritmo de tendencia con base en los datos observados. El filtro más empleado para este tipo de datos es el propuesto por Kalman (1960). El filtro

Kalman está constituido por un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporcionan una estimación recursiva (por iteración) del estado de un sistema (en este caso una posición), minimizando el error cometido. El filtro permite predecir el estado de un sistema en el pasado, presente y futuro, aun cuando la naturaleza precisa del mismo sea desconocida (Welch y Bishop, 2002).

A continuación se presenta un ejemplo de filtrado de una serie temporal de datos de posición, en la que el dato filtrado se ajusta con precisión al dato real (línea discontinua) (figura 3).

De forma análoga, el sistema de control de movimientos basado en la tecnología DGPS puede combinar medidas de alta sensibilidad en tiempo real con estabilidad a largo plazo implementando un filtro Kalman, pudiéndose alcanzar sensibilidades en el sistema de hasta ± 1 mm. Esta exactitud es la que le puede hacer muy útil y competitivo en el control de movimientos de infraestructuras como las presas, en las que los ciclos de movimientos radiales y tangenciales siguen velocidades y pendientes de deformación conocidas. Esto

favorece el mejor ajuste del filtro y reduce el error de la posición filtrada con respecto a la posición real.

El filtro es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección. En esencia, este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa, añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente (figura 4).

Desde este punto de vista, las ecuaciones que se utilizan para derivar el filtro de Kalman se pueden dividir en dos grupos:

1. Las que actualizan el tiempo o ecuaciones de predicción.
2. Las que actualizan los datos observados o ecuaciones de actualización.

Las del primer grupo son responsables de la proyección del estado al momento t , tomando como referencia el estado en el momento $t-1$, y de la actualización intermedia de la matriz de covarianza del estado. El segundo grupo de ecuaciones es responsable de

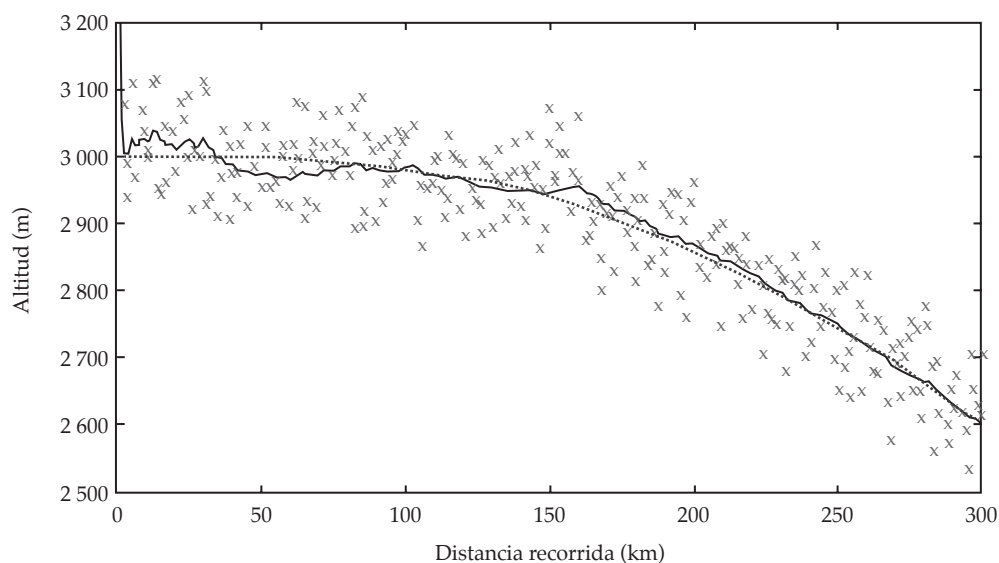


Figura 3. Filtrado de datos en el aterrizaje de un avión (Facultad de Ingeniería Civil - Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. El filtro de Kalman).

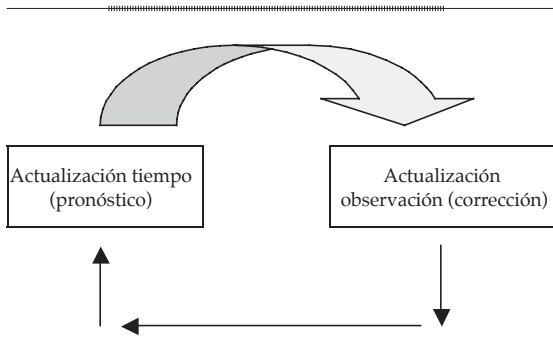


Figura 4. El ciclo del filtro de Kalman (adaptado por Solera, 2003, a partir de Welch y Bishop, 2002).

la retroalimentación, es decir, incorpora nueva información dentro de la estimación anterior, con lo cual se llega a una estimación mejorada del estado.

Las ecuaciones específicas para el pronóstico y la corrección del estado son (Solera, 2003, a partir de Welch y Bishop, 2002):

$$\hat{X}_t^* = A \cdot \hat{X}_{t-1} \quad (7)$$

$$P_t^* = A \cdot P_{t-1} \cdot A^T + Q \quad (8)$$

$\hat{X}_t^*$ = estimación del estado del sistema.

$\hat{X}_{t-1}$ = estado del sistema en un cierto tiempo.

A = matriz de cambio entre estados.

P_{t-1} = covarianza del residuo en un cierto tiempo.

P_t^* = estimación de la covarianza.

Q = covarianza de la perturbación aleatoria del proceso que trata de estimar el estado:

$$K_t = P_t^* \cdot H^T \cdot (H \cdot P_t^* \cdot H^T + R)^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{X}_t = \hat{X}_t^* + K_t \cdot (Z_t - H \cdot \hat{X}_t^*) \quad (10)$$

$$P_t = (I - K_t \cdot H) \cdot P_t^* \quad (11)$$

Donde:

Z_t = medida obtenida del estado del sistema.

H = matriz que relaciona el estado del sistema con la medida obtenida del mismo.

K_t = matriz de ganancia o factor de ganancia Kalman, que minimiza la covarianza del residuo calculada o a posteriori (P_t^*). $(Z_t - H \cdot \hat{X}_t^*)$ es el residuo o discrepancia entre la medida predicha y la medición real.

La primera tarea durante la corrección de la proyección del estado es el cálculo de la ganancia de Kalman, K_t (9). Este factor de ponderación o ganancia es seleccionado de tal forma que minimice la covarianza del residuo de la nueva estimación del estado. El siguiente paso es medir realmente el proceso para obtener Z_t y entonces generar una nueva estimación del estado que incorpora la nueva observación como en la ecuación (10). El paso final es obtener una nueva estimación de la covarianza del error mediante la ecuación (11). Después de cada par de actualizaciones, tanto del tiempo como de la medida, el proceso es repetido tomando como punto de partida las nuevas estimaciones del estado y de la covarianza del residuo (Solera, 2003). Esta naturaleza recursiva es una de las características llamativas del filtro de Kalman, que permiten o facilitan su programación.

Hofmann-Wellenhof et al. (2001), en su libro *GPS Theory and Practice*, en relación con la aplicación del filtrado Kalman, asemeja cualquier sistema dinámico de control de movimientos mediante DGPS a un vehículo en movimiento, donde las coordenadas y velocidad forman parte del vector de estado que se puede predecir en cualquier tiempo t , con base en el sistema de ecuaciones aquí descrito.

Revisión de la técnica DGPS aplicada al control de movimientos en infraestructuras y deformaciones en el terreno

De acuerdo con la bibliografía consultada, en este apartado se presentan gráficos-resumen de las aplicaciones de la técnica DGPS en diferentes campos y en distintos países, aplicados al control de movimientos en infraestructuras y fenómenos naturales.

La figura 5 muestra los años de publicación de los artículos consultados sobre la aplicación práctica de la técnica DGPS. Tal y como se puede observar, en la última década ha tenido un fuerte incremento, sobre todo a partir del año 2004, aunque en los años 2008 y 2009 hay una notable disminución de las publicaciones sobre el tema.

Aplicaciones DGPS

Las principales aplicaciones del DPGS al control de movimientos son:

- Puentes, presas y diques de control; torres y rascacielos; plataformas petroleras; tuberías...
- Deslizamientos de laderas y subsidencias del terreno; campos petroleros; volcanes...
- Análisis de datos y movimientos debidos a terremotos.

En el gráfico de la figura 6 se muestran los porcentajes que representan los distintos campos de aplicación de la técnica DGPS. Se observa que, en la última década, la investigación de la aplicación de la técnica DGPS se ha concentrado principalmente en

cuatro campos: control de movimientos en presas; puentes, torres; estructuras de tierra, y laderas.

Del análisis realizado, hay que señalar que China y Estados Unidos son los países donde más se ha desarrollado la investigación de la aplicación de esta técnica. China ocupa el primer lugar, ya que lleva un gran trabajo de investigación en tal campo, no sólo en el control de movimientos de puentes, rascacielos e infraestructuras, sino también en diversas áreas, como el control de subsidencias en el terreno.

La presencia de publicaciones norteamericanas también es relevante. Cabe destacar los artículos relativos a la implantación de los sistemas DGPS telecontrolados en tiempo real en las presas de Pacoima (Behr *et al.*, 2000) y Libby (Rutledge y Meyerholtz, 2005), situadas en California y Montana, cuya configuración ha servido de base para el estudio de caso de la presa de La Aceña.

Otra experiencia europea sobre auscultación mediante DGPS es la presa de Kops, en Austria. Esta presa cuenta con una antena de referencia y otras dos colocadas en coronación (GPS-Based Online Control and Alarm System, GOCA, 2002).

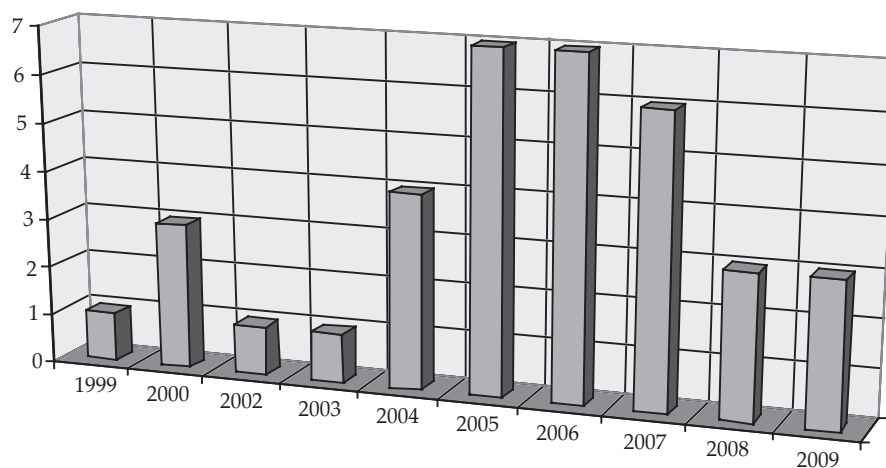


Figura 5. Número de artículos con respecto al año de publicación.

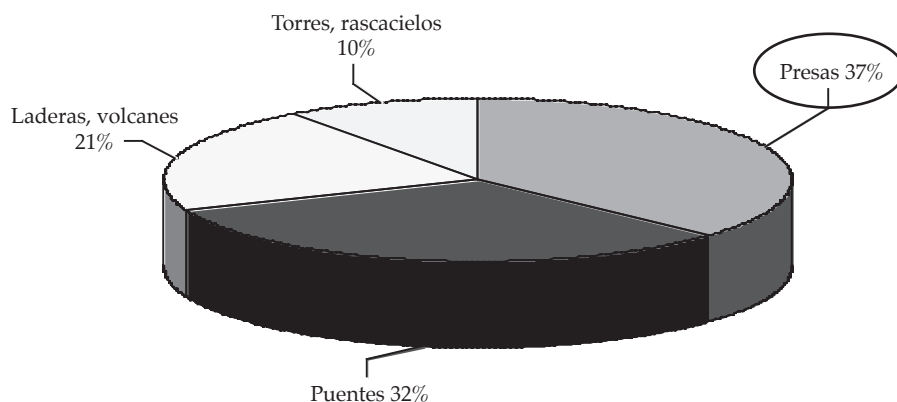


Figura 6. Porcentaje de experiencias clasificadas por campo de aplicación.

En cuanto al control de deformaciones y movimientos de puentes, podemos indicar que en la mayor parte de los casos, los artículos presentan aplicaciones sobre la puesta en carga y el control de las flechas ante eventos instantáneos, como los terremotos.

El control de movimientos en torres y rascacielos es semejante al de las presas, destacando los artículos “Large structure health dynamic monitoring using GPS technology” (Cheng *et al.*, 2002) y “GPS in dynamic monitoring of long-period structures” (Çelebi, 2000), en los que se presentan diferentes casos monitorizados de desplazamientos instantáneos y a largo plazo, bajo el efecto de algún sismo.

Hay que señalar la importancia de la seguridad de cualquier infraestructura ante un sismo y el conocimiento de las consecuencias estructurales debidas a dicha sollicitación, especialmente en las presas situadas en zonas geográficas con dicho riesgo (Marengo, 1996; Comité sobre Sismos y Comité Norteamericano de Grandes Presas, 1986).

La conclusión más clara —obtenida en este análisis— es que se alcanzan las precisiones requeridas siendo más tolerantes en los campos de la geología y estructuras de tierra, y menos en el control de infraestructuras de hormigón, donde se requiere llegar a niveles milimétricos.

Estudio de caso. Presa de La Aceña, Ávila, España

La presa de La Aceña está situada en la cuenca del río Aceña (perteneciente a la cuenca del Tajo), en el término municipal de Peguerinos, provincia de Ávila (Comunidad Autónoma de Castilla-León) (figura 7).

La presa es de hormigón, del tipo arco gravedad y planta curva con 68 m de altura sobre cimientos, con una gran esbeltez, que genera una amplitud de movimientos radiales de ciclo anual debida a las sollicitaciones externas de carga de agua y temperatura del orden de 35 a 40 mm.

El paramento de aguas arriba tiene talud vertical y el de aguas abajo 0.4. La coronación está situada a la cota de 1 319 m; tiene una

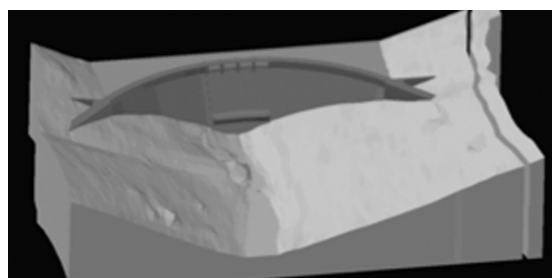


Figura 7. Vista 3D, presa de La Aceña, Ávila, España.

longitud de 340 m y un ancho de 6 m, con una calzada de 4.5 m y dos aceras de 0.75 m.

La presa dispone de cuatro péndulos, todos ellos directos, que dan información de los desplazamientos en coronación respecto de los puntos de la galería perimetral en que están ubicadas las bases de lectura inferiores (figura 8).

Existen bases de lectura en la intersección de cada péndulo con cada una de las galerías. En todas las bases de la galería perimetral y en la base del péndulo 2 de la galería horizontal están instalados sendos lectores automáticos de desplazamientos, además del dispositivo de lectura manual (figura 9).

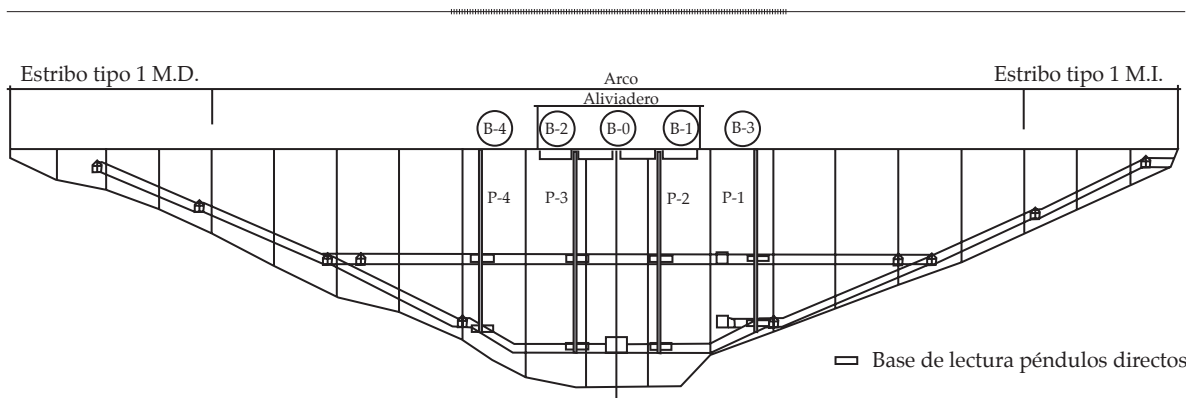


Figura 8. Localización de los péndulos en alzado.

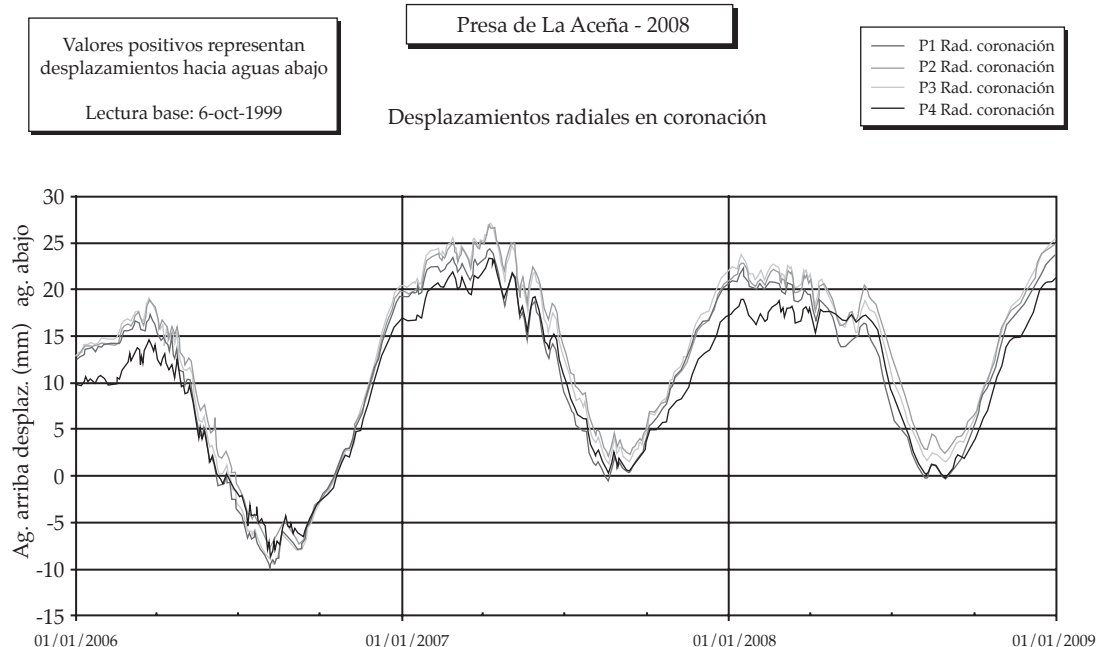


Figura 9. Movimientos radiales, presa de La Aceña. Informe anual de auscultación 2008 (Blázquez y Galán, 2009).

(es decir, control diario de las deformaciones en un ciclo superior de tiempo), o más rápidamente con menor exactitud, pero de forma instantánea (para registrar, por ejemplo, un evento como un asiento o un terremoto mientras se está produciendo).

Configuración espacial

Se decidió realizar una instalación que permitiese conocer los desplazamientos de dos

puntos de la coronación suficientemente próximos a los péndulos directos de la presa para correlacionar ambas medidas y comprobar la precisión del sistema. Las antenas y los receptores se instalaron en la coronación de la presa, manteniendo la simetría respecto al eje de la misma (figuras 12 y 13).

La estación fija se ubicó aguas abajo de la presa en su margen izquierda, alejada de la misma para asegurar su estabilidad e inmovilidad (figura 14).



Figura 12. Casetas de coronación solidarias al cuerpo de presa de ubicación de antenas y receptores GPS.

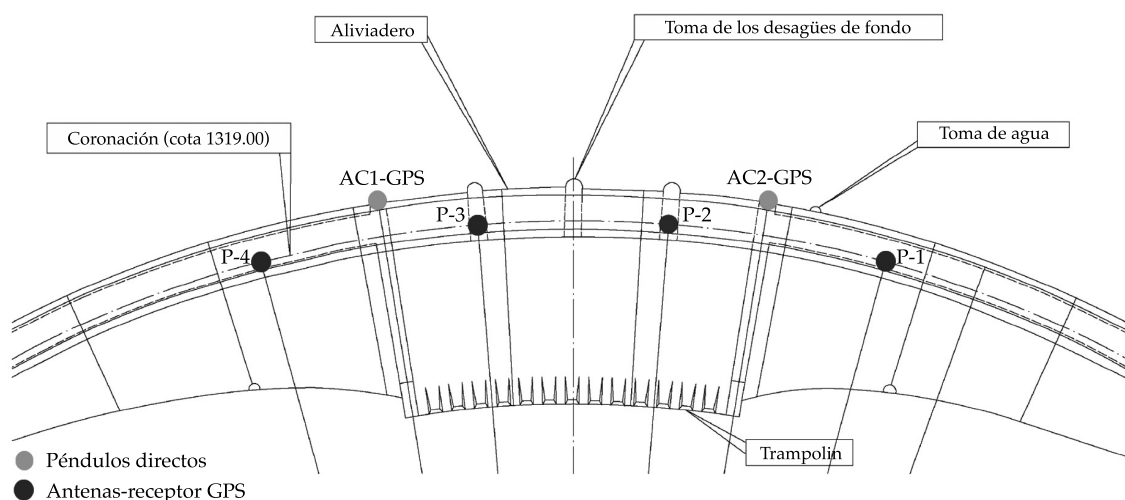


Figura 13. Localización de los péndulos y antenas-receptores GPS en planta.

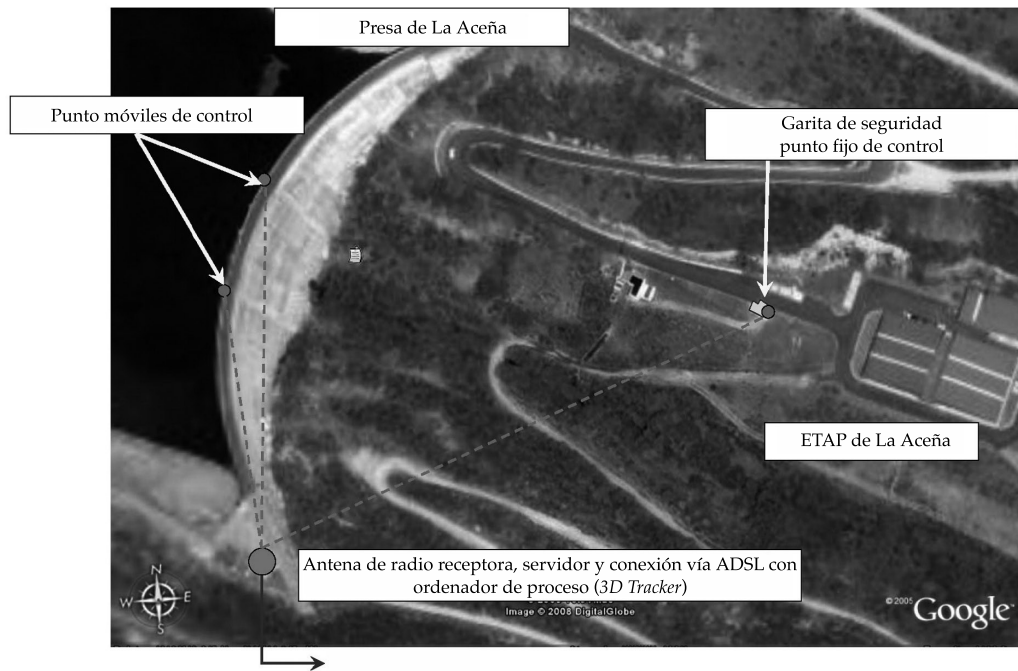


Figura 14. Configuración en planta del sistema. Ubicación de antenas y receptores GPS.

Instalación y primeros resultados obtenidos

En primer lugar es necesario exponer algunos aspectos técnicos que han influido en la configuración del sistema:

- En relación con la comparativa de desplazamientos radiales en coronación, medidos por los péndulos directos y los desplazamientos obtenidos por el DGPS, hay que comentar que existen algunos factores y diferencias entre los dos tipos de medidas, que por su poca trascendencia no se han tenido en cuenta en esta primera fase del estudio.
- La instalación de la línea ADSL mejoró la conexión.
- Al estar la presa ubicada en una zona de montaña, las tormentas afectaron en varias ocasiones los sistemas de alimentación eléctrica del sistema.

En las figuras 15 y 16 se muestran los resultados comparativos entre las dos técnicas de auscultación.

A la vista de los resultados puede señalarse que:

- La comparación de los resultados obtenidos con los de los péndulos directos (medida considerada de referencia) es buena, con precisiones del orden de ± 3 mm (figura 15).
- La discontinuidad de datos ocasionada por los cortes de las comunicaciones (sector-1, figura 16) afectan la precisión del sistema, puesto que el algoritmo de cálculo tarda en estabilizarse.
- Las constantes de configuración del filtro Kalman varían fundamentalmente con la velocidad de deformación o movimiento de la infraestructura a controlar. Estas constantes se han modificado durante el estudio, con efectos significativos (sector 2,

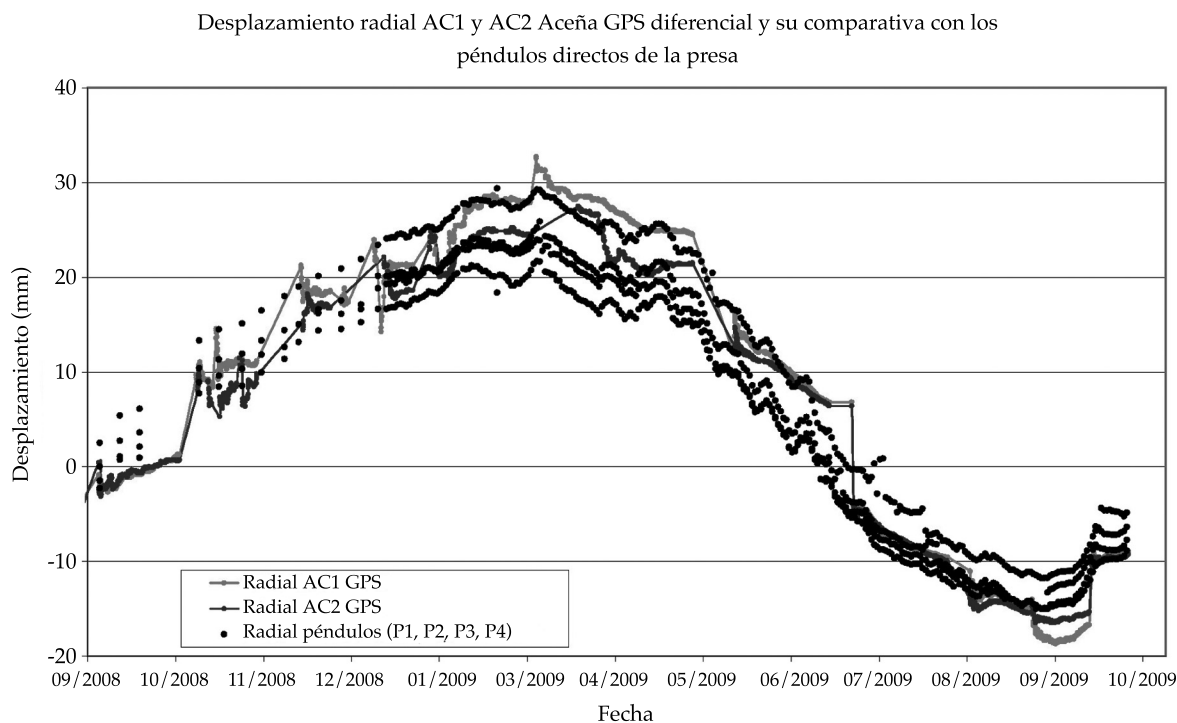


Figura 15. Comparación de movimientos radiales registrados por las antenas y receptores GPS, y los movimientos radiales obtenidos por los péndulos directos de la presa en el periodo de estudio.

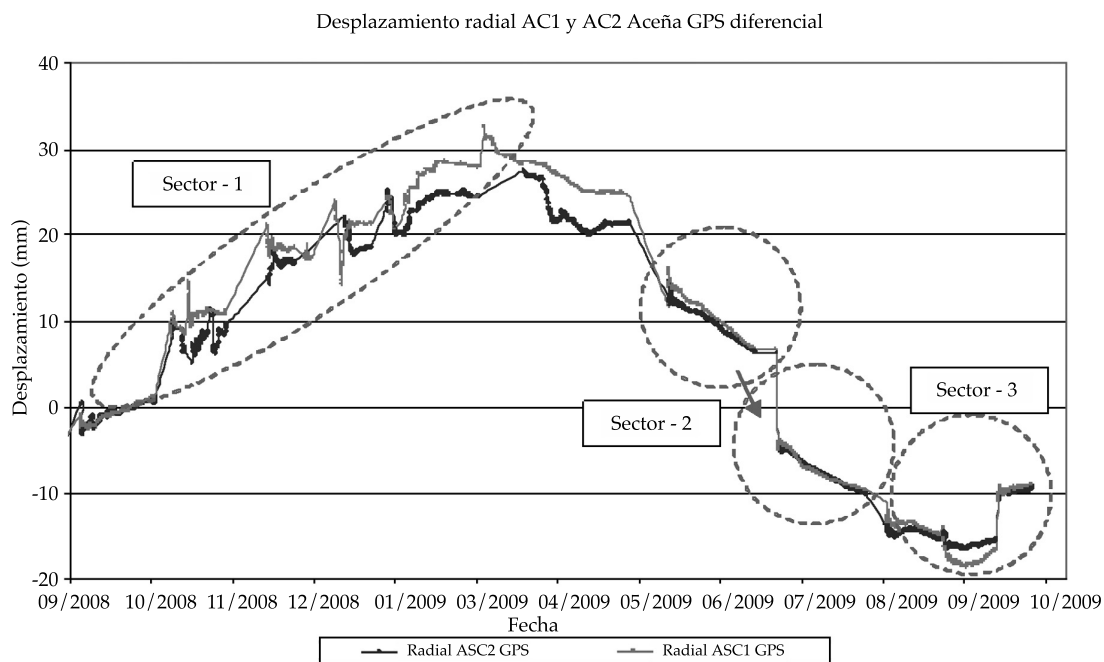


Figura 16. Movimientos radiales registrados por las antenas y receptores GPS, una vez realizado el proceso de datos en el periodo de estudio.

figura 16). Además, al ser unas constantes calibradas con base en la velocidad de deformación de la estructura, cuando esta última es superior a lo estimado, la solución filtrada tarda en converger a la medida real (sector 3, figura 16). Analizando en detalle el fenómeno denominado "Sector-3", se llega a la conclusión de que el rápido descenso de la temperatura ambiente provocó un punto de inflexión en el desplazamiento radial de los péndulos, mientras que el DGPS mostró una discontinuidad debido a la inercia introducida por el filtro. A continuación se produjo un periodo de temperaturas más estables y elevadas, en el que de nuevo, al estabilizarse las velocidades de deformación, el sistema con su modalidad de filtrado volvió a proporcionar posiciones muy similares a las radiales pendulares. Éste será uno de los aspectos más importantes a investigar en el futuro.

Conclusiones: viabilidad y fiabilidad

Se comentan finalmente algunos aspectos importantes que confirman la viabilidad y fiabilidad de la técnica DGPS en el control de movimientos en presas de hormigón, teniendo en cuenta tanto los artículos previamente publicados como los primeros resultados del estudio de caso en la presa de La Aceña.

Hasta la fecha los resultados son satisfactorios, como puede verse en la figura 17, alcanzándose exactitudes en tiempo real cercanas a los $\pm 2-3$ mm. Además, la amplitud anual de los movimientos dada por los péndulos es muy similar a la obtenida por el sistema DGPS.

Al ser los movimientos obtenidos por el DGPS de carácter absoluto, se podría implantar esta tecnología en aquellas presas en las que exista cierta incertidumbre en su cimentación, como posibles deslizamientos y deformaciones que no se pueden controlar por otros sistemas de auscultación como péndulos directos.

Una de las ventajas más notables de la técnica DGPS que la hace técnicamente viable en la aplicación para el control de movimientos en infraestructuras es la facilidad de montaje y la sencillez de operación del sistema. Por otro lado, es perfectamente compatible con cualquier otro dispositivo de control de movimientos preexistente y el coste asociado es bajo en comparación con otros sistemas de auscultación tradicionales.

Los resultados obtenidos se pueden gestionar en tiempo real con telecontrol y monitorización, lo que influye positivamente en la capacidad de reacción en la gestión de la seguridad de las presas o de cualquier otra infraestructura.

Los parámetros de calibración del filtro Kalman influyen, como se ha podido comprobar, en la sensibilidad de la solución del sistema.

El post-proceso de los ficheros Rinex permitirá depurar los datos obtenidos e identificar el efecto de variables asociadas con el sistema.

Como conclusión general, se puede afirmar que el sistema es útil de cara a la gestión de la auscultación y la seguridad de la presa, al reflejar adecuadamente su movimiento y deformación, siendo un método alternativo a los existentes.

Agradecimientos

A Ricardo Cifres Giménez, por ser el primero en acercarnos las posibilidades de la técnica DGPS en el control de desplazamientos del terreno y grandes estructuras.

A Juan Pablo de Francisco (Jefe del Departamento de Presas del CYII), por su total disponibilidad al desarrollo y conocimiento de esta técnica en la presa de La Aceña.

Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto *Sistema integrado de auscultación de infraestructuras hidráulicas en tiempo real con técnicas GPS: modelización e interpretación de resultados en un caso real* del Plan Nacional de I+D, 2008.

Recibido: 30/11/09
Aprobado: 01/10/10

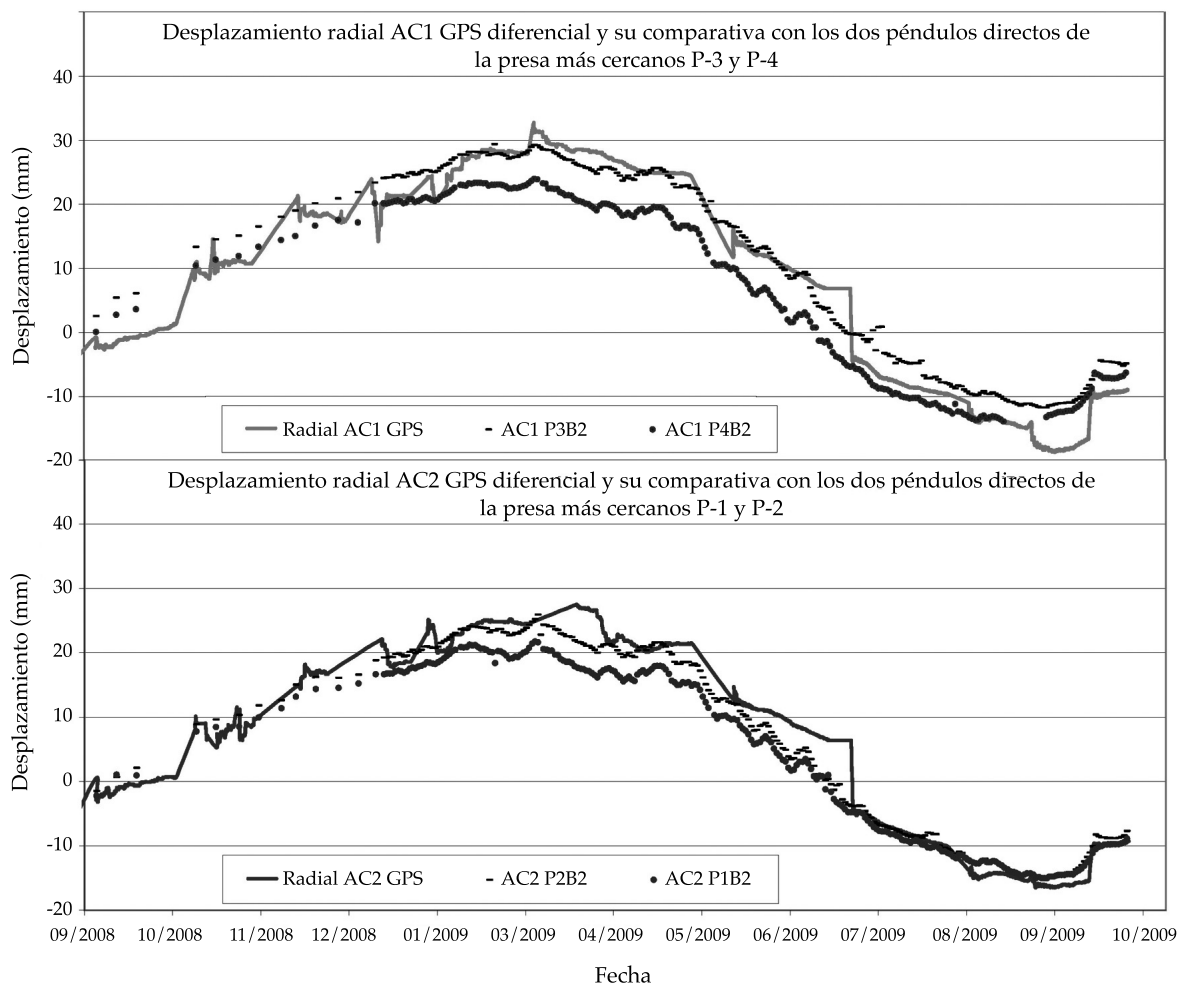


Figura 17. Comparación de movimientos radiales registrados por cada antena y receptor GPS con los movimientos radiales obtenidos por los péndulos directos más cercanos a cada ubicación en el periodo de estudio.

Referencias

- BEHR, J., HUDNUT, K. and KING, N. *Monitoring Structural Deformation at Pacoima Dam, California Using Continuous GPS*. United States Geological Survey, Southern California Earthquake Center, Los Ángeles, USA, SCIGN-USGS, 2000.
- BLÁZQUEZ, F. y GALÁN, D. *Informe anual de auscultación Presa de La Aceña-Año 2008*. Madrid: Div. Seguridad de Presas, CYII, 2009.
- ÇELEBI, M. *GPS in dynamic monitoring of long-period structures*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 20, 2000, doi:10.1016/S0267-7261(00)00094-4, pp. 477-483.

CHENG, P., WENZHONG, J., SHI, H., ZHENG, W. *Large Structure Health Dynamic Monitoring Using GPS Technology*. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2002.

COMITÉ SOBRE SISMOS y COMITÉ NORTEAMERICANO DE GRANDES PRESAS. *Guía general para la inspección de presas después de ocurrido un sismo. Ingeniería hidráulica en México*. Vol. II, enero-abril, 1986, pp. 31-43.

ESTAIRE, J., DÍEZ, J.A. y OLALLA, C. *Análisis de la estabilidad de la ladera de la margen izquierda del embalse de Arenós (Castellón)*. Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses, Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, España, junio de 2007.

- FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL. *El filtro de Kalman*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. <http://fic.uni.edu.pe/>.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., and COLLINS, J. *GPS Theory and Practice*. New York: Springer-Verlag Wien, 2001.
- LAFUENTE, D., TORCAL, R., GÓMEZ, R. y LARROY, D. *Laderas del embalse de Itoiz*. Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses, Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, España, junio de 2007.
- MARENGO, H. Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 2, mayo-agosto de 1996, pp. 65-77.
- MORENO, C. y FERNÁNDEZ, P. *Control de movimientos superficiales de laderas inestables mediante sistema GPS*. Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses, Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, España, junio de 2007.
- OLALLA, C. *Auscultación de laderas*. Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses, Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, España, junio de 2007.
- RUTLEDGE, D. and MEYERHOLTZ, S. *Performance monitoring of Libby dam with a differential global positioning system*, 25th united states society of dams (USSD) Annual Meeting. Salt Lake City, Utah, USA, Junio 6-10, 2005.
- SOLERA, A. *El filtro de Kalman*. Banco Central de Costa Rica, Departamento de Investigaciones Económicas, San José, Costa Rica, 2003.
- WELCH, G. and BISHOP, G. *An Introduction to the Kalman Filter*. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27599-3175, USA, 2002.

Abstract

GALÁN-MARTÍN, D., MARTÍNEZ-MARÍN, R., MARCHAMALO-SACRISTÁN, M. & SÁNCHEZ-SOBRINO, J.A. Control of movement for concrete-reinforced dams using DGPS and comparison with auscultation methods. Application at the La Aceña (Spain) dam. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 159-176.

This paper presents the evolution of the DGPS (Differential GPS) technique in the control of movement and its application to various fields with satisfactory results in terms of precision, accuracy and sensitivity. The tolerance is greater in the fields of geology and geotechnics (subsidence, volcanoes, landslides) and more demanding in infrastructure control (bridges, towers, dams, among others), which requires the millimeter level of accuracy. The results obtained in the case study at the "La Aceña" dam (Avila, Spain) show that the technique is viable for the control of movement for this kind of infrastructures. The algorithm used in this study, based on the "Kalman filter," allow for achieving results with a sensitivity of around ± 1 mm. Among the advantages of the DGPS technique to be highlighted are easy configuration and installation, simple operation, low cost compared to other traditional auscultation systems, and especially the possibility of remote control and monitoring. We can say that the system is useful to the management of auscultation and the safety of dams, as an alternative method in both fields.

Keywords: DGPS, dam monitoring, geotechnical monitoring, real time.

Dirección institucional de los autores

Ing. David Galán-Martín

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
División Seguridad de Presas
Canal de Isabel II, ESPAÑA
C. Santa Engracia 125
28080 Madrid, ESPAÑA
Teléfonos: +34 (65) 7655 688 y (91) 5452 687
dgalanmartin@cyii.es

Dr. Rubén Martínez-Marín

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
ETSI Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
Ciudad Universitaria
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfonos: +34 (91) 3366 670 y 3366 671
Fax: +34 (91) 3366 671
ruben.martinez@upm.es

Dr. Miguel Marchamalo-Sacristán

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETSI) de Caminos,
Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
Ciudad Universitaria
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfonos: +34 (91) 3366 670 y 3366 671
Fax: +34 (91) 3366 671
miguel.marchamalo@upm.es

Ing. José Antonio Sánchez-Sobrinó

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETSI) de Caminos,
Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
Ciudad Universitaria
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfonos: +34 (91) 3366 670
Fax: +34 (91) 3366 671
jassobrinó@fomento.es