

Soluciones multi-GNSS en tiempo real para la monitorización de terremotos en la región Ibérica.

Real-time multi-GNSS solutions for earthquake monitoring in the Iberian region

PUENTE GARCÍA, Víctor ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geográfico Nacional. General Ibáñez de Ibero, 3 – 28003 Madrid, España, vpuente@mitma.es

SUMMARY

GNSS high-frequency measurements are becoming an important contribution for earthquake source determination. Although there is no area of large earthquakes, the seismic activity in Spain is relevant and there have been earthquakes below Mw 7 capable of causing serious damage. In this contribution, the focus is set on the work by Colosimo et al. (2011), who shown the feasibility of a GNSS-based real-time estimation of coseismic displacements, within a few centimeters. This methodology is used as starting point to develop a method based a Kalman Filter, which is applied to several earthquakes of moderate magnitude that took place in the Iberian region.

PALABRAS CLAVE

Geodesia, sismología, GNSS, filtro de Kalman

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las observaciones de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) se han venido utilizando de forma habitual para monitorizar la deformación en las fases intersísmica y postsísmica del ciclo sísmico. Gracias a la disponibilidad de mediciones en tiempo real de alta frecuencia, las observaciones GNSS también se están convirtiendo en una contribución importante para la determinación de la fuente de los terremotos, como un complemento a los métodos sísmicos tradicionales. Los registros GNSS presentan la ventaja de que el movimiento del suelo no se ve afectado por el problema de saturación que sí puede afectar a sismómetros próximos a la fuente.

Aunque no existe una zona de grandes terremotos, la actividad sísmica en la región Ibérica es importante y se han producido terremotos por debajo de Mw 7 capaces de causar graves daños, como en el caso del terremoto de Lorca de 2011. Con el objetivo de aprovechar la disponibilidad de datos de las más de 400 estaciones permanentes GNSS presentes en la región ibérica y de contribuir potencialmente al área de trabajo de GGOS relativa a la monitorización de desastres naturales, en esta contribución se plantea la utilización de observaciones GNSS para la determinación, potencialmente en tiempo real, de desplazamientos producidos por terremotos. El punto de partida será la aproximación variométrica, propuesta por Colosimo et al. (2011) que será ampliado por medio de la utilización de un filtro de Kalman.

APROXIMACIÓN VARIOMÉTRICA

La aproximación variométrica (*Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine*, Colosimo et al. 2011) se basa en la variación relativa entre las medidas de fase en dos épocas consecutivas. Dada una observación de fase L en un tiempo t , correspondiente a la frecuencia 1 del sistema de navegación utilizado; entre el receptor i y el satélite j ; tal y como se muestra en la ecuación (1), ésta será la suma de la distancia geométrica (r), la diferencia entre los errores de sincronización de receptor y satélite (δt) multiplicado por la velocidad de la luz (c); los retrasos troposférico (T) e ionosférico (I), la ambigüedad inicial de fase (N) y la diferencia entre los retrasos instrumentales de receptor y satélite (b) multiplicado por la velocidad de la luz.

$$L_{1i}^j(t) = r_i^j(t) + c \left[\delta t_i(t) - \delta t^j(t) \right] + T_i^j(t) - I_i^j(t) + N_1 + c \left(b_{1i} - b_1^j \right) \quad (1)$$

En la siguiente época $t+1$ (e.g. un segundo después), tal como se puede ver en la ecuación (2), la medida da fase variará como consecuencia del movimiento del satélite, la deriva de los relojes y la variación de los retrasos atmosféricos. En ausencia de saltos de ciclo, la ambigüedad permanecerá constante. Los retrasos instrumentales también se pueden considerar constantes para un periodo de 24 h (Sardón y Zarraoa, 1997).

$$L_{1i}^j(t+1) = r_i^j(t+1) + c \left[\delta t_i(t+1) - \delta t^j(t+1) \right] + T_i^j(t+1) - I_i^j(t+1) + N_1 + c \left(b_{1i} - b_1^j \right) \quad (2)$$

Si se restan las ecuaciones (1) y (2) y asumiendo que los retrasos atmosféricos en un segundo se pueden considerar constantes, se obtiene la ecuación (3), que depende únicamente del cambio en la distancia geométrica debida al movimiento del satélite y la deriva de los relojes de receptor y satélite.

$$L_{1i}^j(t+1) - L_{1i}^j(t) = \Delta r_i^j(t, t+1) + c \left[\Delta \delta t_i(t, t+1) - \Delta \delta t^j(t, t+1) \right] \quad (3)$$

Para el cálculo de la distancia geométrica, será necesario conocer la posición del receptor y del satélite en los momentos de observación. Dado que este método se plantea para su aplicación en datos registrados por estaciones permanentes, será habitual que las coordenadas de la estación sean conocidas con precisión. Estas coordenadas se verán afectadas por fenómenos de carácter geofísico, siendo los desplazamientos por marea sólida los de mayor magnitud. Analizando las variaciones por marea que se producen en un segundo a lo largo de un día para un punto de latitud media, se puede comprobar que éstas se encuentran por debajo de la centésima de milímetro en un segundo, por lo que no será necesario introducir variaciones subdiurnas a las coordenadas.

En cuanto a la posición y la deriva del reloj del satélite, esta información deberá ser proporcionada por fuentes externas. Teniendo en cuenta que el objetivo de esta metodología es su aplicación en tiempo real, se podría utilizar la información transmitida en el mensaje de navegación de los GNSS. Si bien esta información tiene una precisión limitada (aproximadamente 1 metro), al diferenciar las medidas en dos épocas consecutivas, este error debería cancelarse igualmente que otros efectos que se han mencionado previamente, asumiendo que en un segundo no va a presentar variaciones significativas.

En base a lo expuesto anteriormente, es posible plantear un cálculo mínimo-cuadrático que tendrá como incógnitas los desplazamientos del receptor en las 3 componentes (Δx , Δy , Δz) y la deriva de su reloj ($\Delta \delta t$), de acuerdo con el sistema de ecuaciones (4), que tendrá tantas filas como satélites comunes en las dos épocas de observación diferenciadas. Este método se puede aplicar de forma secuencial a lo largo de una ventana de observaciones.

$$\begin{bmatrix} \frac{x^1-x_i}{r_i^1} & \frac{y^1-y_i}{r_i^1} & \frac{z^1-z_i}{r_i^1} & 1 \\ \frac{x^2-x_i}{r_i^2} & \frac{y^2-y_i}{r_i^2} & \frac{z^2-z_i}{r_i^2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x^j-x_i}{r_i^j} & \frac{y^j-y_i}{r_i^j} & \frac{z^j-z_i}{r_i^j} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ \Delta \delta t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_i^1(t+1) - L_i^1(t) - \Delta r_i^1(t, t+1) + c \Delta \delta t^1(t, t+1) \\ L_i^2(t+1) - L_i^2(t) - \Delta r_i^2(t, t+1) + c \Delta \delta t^2(t, t+1) \\ \dots \\ L_i^j(t+1) - L_i^j(t) - \Delta r_i^j(t, t+1) + c \Delta \delta t^j(t, t+1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

FILTRO DE KALMAN

El método anterior se puede refinar por medio de un filtro de Kalman (Kalman, 1960) que permita reducir el ruido de las observaciones. Este tipo de filtros funciona mediante un proceso recursivo de dos fases:

- 1) Fase de predicción, en la que el vector de estado se propaga en base a un modelo.
- 2) Fase de innovación, en la que el valor predicho en el paso anterior se corrige mediante observaciones.

La formulación matemática de este método se muestra en la Figura 1, donde el vector x es el vector de estado de las incógnitas, la matriz F es la matriz de transición de la fase de predicción y Q es su matriz de covarianza asociada. En la fase de innovación se tiene el vector z de observaciones, la matriz H de diseño (igual a la matriz de diseño de la aproximación variométrica), y R es la matriz de covarianza de las observaciones.

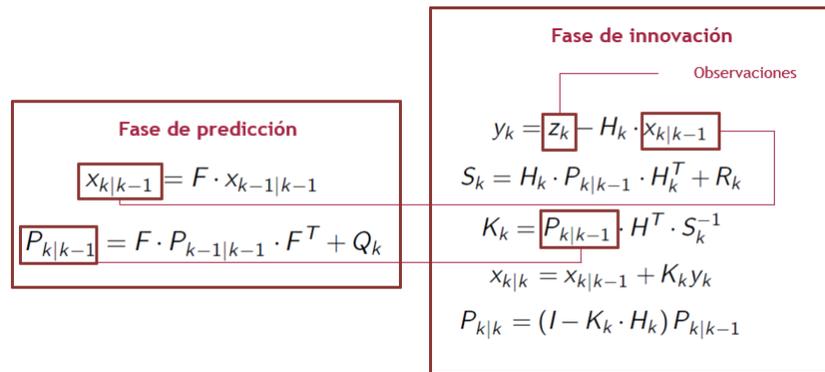


Figura 1: Formulación del filtro de Kalman.

En este caso, se ha utilizado como vector de estado inicial un vector nulo de 4 dimensiones y como matriz de transición del sistema la matriz identidad, asumiendo que no deberían producirse desplazamientos entre dos épocas consecutivas. Las matrices de covarianza se han configurado en base al ruido de las observaciones procesadas.

RESULTADOS

Los dos métodos previamente expuestos se han aplicado a cinco terremotos, cuyas características principales se muestran en la Tabla 1. En dicha tabla se indica el código de 4 caracteres de la estación GNSS más próxima y su distancia al epicentro del terremoto.

Tabla 1: Terremotos analizados

Terremoto	Fecha y hora	Mw	Profundidad (km)	Estación GNSS	Distancia GNSS-epicentro (km)
Alborán Sur	25/01/2016 04:22:01	6.3	12.0	MELI	85
Lorca	11/05/2011 16:47:26	5.1	4.0	LORC	7
Ossa de Montiel	23/02/2015 16:16:31	4.7	17.0	ALBA	67
Navarra	30/09/2020 22:02:31	4.5	1.0	UPNA	14
Granada	23/01/2021 11:15:24	4.4	0.0	GRA1	11

Para los terremotos de menor magnitud (Ossa de Montiel, Navarra y Granada), los resultados obtenidos no muestran desplazamientos apreciables mediante las técnicas descritas. En las siguientes figuras, se muestran los desplazamientos en las componentes Up (dU), Este (dE) y Norte (dN), así como el RMS (*Root Mean Square*) del ajuste, obtenidos para los terremotos de Alborán Sur y Lorca mediante la aproximación variométrica y filtro de Kalman. Las líneas verticales muestran el tiempo de ocurrencia del terremoto (EQ) y la llegada de las ondas P y S.

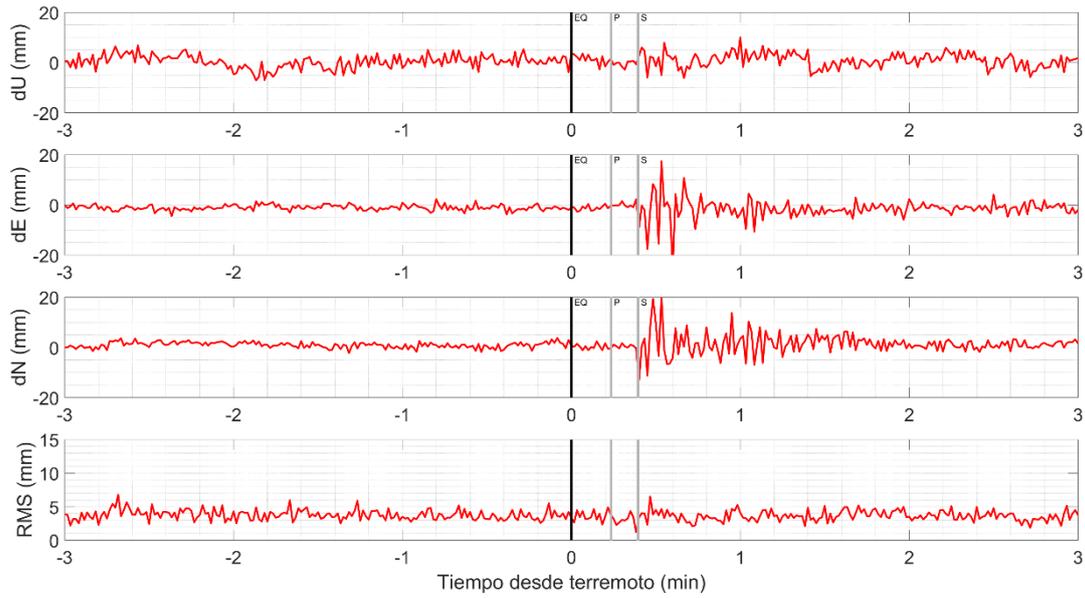


Figura 2: Desplazamientos terremoto Alborán Sur – aproximación variométrica.

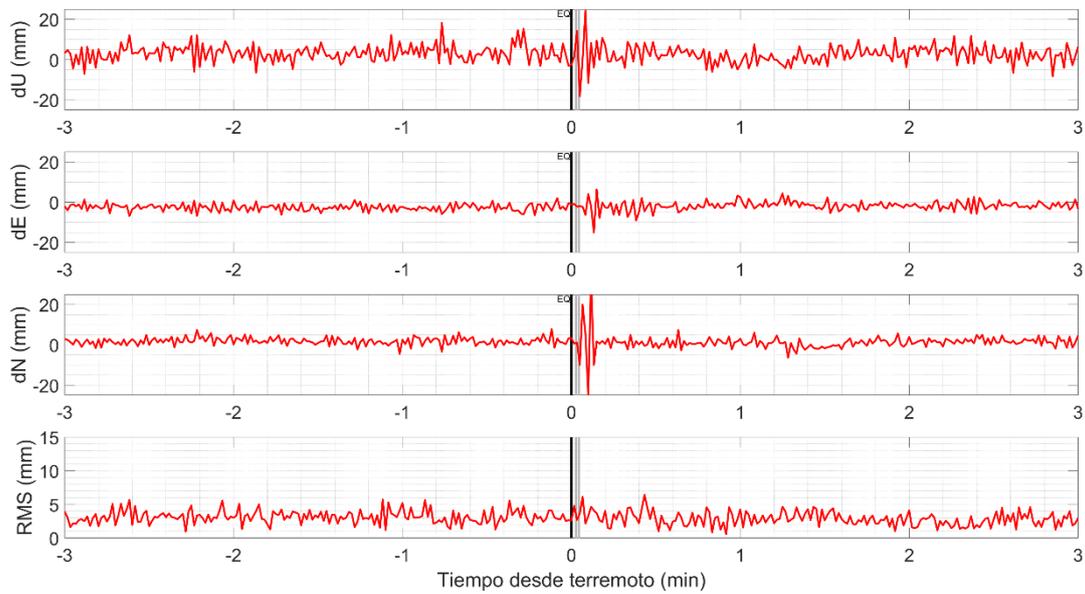


Figura 3: Desplazamientos terremoto Alborán Sur – filtro de Kalman.

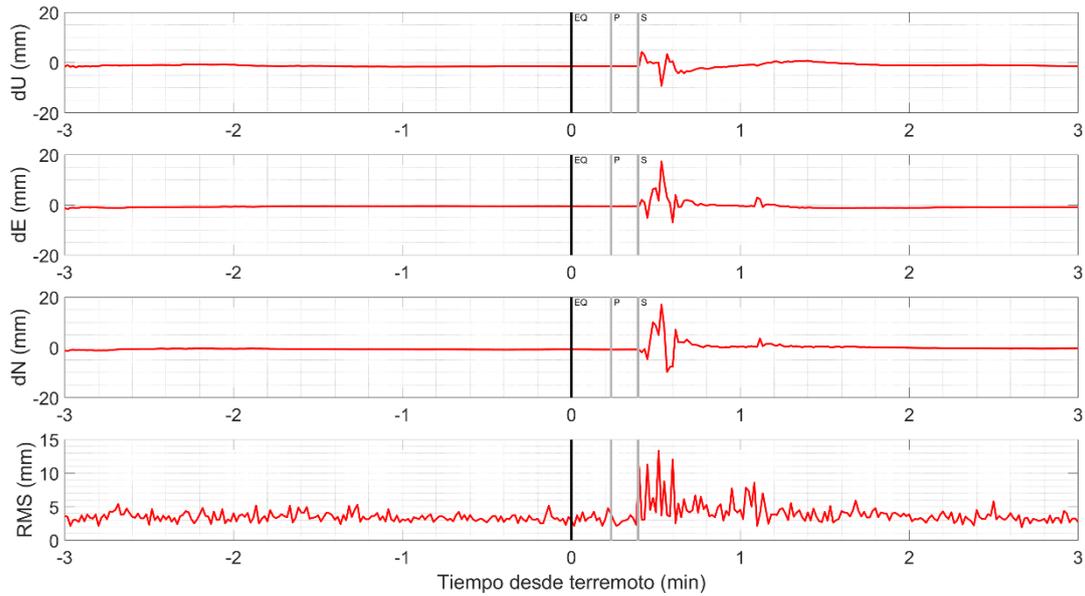


Figura 4: Desplazamientos terremoto Lorca – aproximación variométrica.

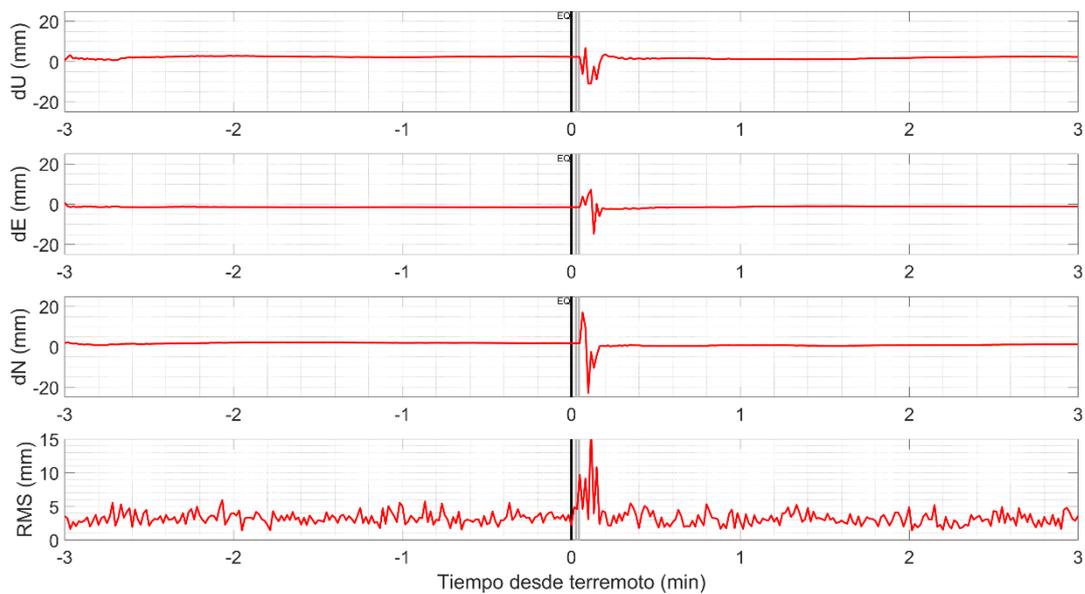


Figura 5: Desplazamientos terremoto Lorca – filtro de Kalman.

Como se puede apreciar, ambos métodos permiten detectar desplazamientos asociados al movimiento del terreno producido por el terremoto. Al comparar las Figuras 3 y 5 frente a 2 y 4, se puede advertir que el filtro de Kalman permite reducir significativamente el ruido de las observaciones antes y después del evento sísmico. El RMS de la aproximación variométrica muestra un comportamiento similar durante el periodo analizado, mientras que en el caso del filtro de Kalman se puede apreciar de forma clara el periodo en el que se producen desplazamientos.

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En esta contribución se han planteado dos métodos (aproximación variométrica y filtro de Kalman) para la potencial obtención de desplazamientos producidos por terremotos por medio de observaciones GNSS en tiempo real. Estos métodos se han aplicado a los terremotos mas relevantes que han ocurrido en el área Ibérica en los últimos años.

A la vista de los resultados obtenidos, los desplazamientos provocados por terremotos de magnitud moderada ($M_w > 5$) capaces de producir desplazamientos significativos en el terreno, se han podido detectar con éxito mediante la utilización de observaciones GNSS. La formulación del filtro de Kalman propuesta en este trabajo reduce significativamente el ruido de medición antes y después del evento. La aplicación de estos métodos implicaría procesar los datos proporcionados en tiempo real por los *caster* de las redes nacionales y regionales de la Península Ibérica y convertirlos en formato RINEX a través de software específico como BNC (Weber et al. 2016).

Como líneas de trabajo futuro, se plantea la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante estas técnicas con los obtenidos mediante sismómetros; la utilización de estos métodos para la detección de perturbaciones locales que puedan afectar a la estabilidad de las estaciones de la red IGN y el uso del ruido obtenido en la estimación variométrica para la caracterización del ruido de observación de diferentes emplazamientos y modelos de antena/receptor.

REFERENCIAS

- [1] Colosimo, G., Crespi, M., Mazzoni, A. (2016): "Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration." *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2011;116 doi: 10.1029/2010JB007941.
- [2] Sardón E. y Zarraoa N. (1997): "Estimation of Total Electron Content Using GPS Data: How Stable are the Differential Satellite and Receiver Instrumental Biases?" *Radio Sci.*, Volume: 32, Issue: 5, Sept.-Oct. 1997. DOI: 10.1029/97RS01457.
- [3] Kalman, R. (1960): "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". *ASME Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3662552>
- [4] Weber, G., L. Mervart, Stürze, A., Rülke, A. & Stöcker, D. (2016): "BKG Ntrip Client, Version 2.12." *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, 49, Frankfurt am Main, 2016.