

E4.2.1: Tutorial para la correcta interpretación de los mapas generados con el GB-SAR

Entregable incluido en GT4: Herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa

Fecha prevista: 30/07/2022
Fecha de entrega: 10/08/2022

Responsable: CTTC

Autores y colaboradores

Autores: Oriol Monserrat, Qi Gao, Anna Barra, Michele Crosetto

Colaboradores: Michele Crosetto



Indice

1	INTRODUCCIÓN	3
2	INTERFEROMETRIA GB-SAR.....	3
2.1	Radar and SAR working principles	4
2.2	Interferometria GB-SAR para la medida de deformaciones.....	6
3	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	9
	BIBLIOGRAFÍA ÚTIL	10

1 INTRODUCCIÓN

El radar terrestre de apertura sintética (GB-SAR) es una técnica relativamente nueva que, en los últimos años, ha ganado interés como herramienta para medir y monitorear deformaciones. La técnica GB-SAR está basada en un sistema radar con capacidad para proporcionar imágenes, que ofrece una alta sensibilidad a pequeños desplazamientos, de orden milimétrico o submilimétrico y que es capaz de medir a largas distancias (algunos km) proporcionando alta densidad de muestreo sobre la zona iluminada. Estas características dan a la técnica interesantes ventajas respecto a otras técnicas clásicas de medida de deformaciones, basadas en medidas puntuales.

Derivar medidas de deformación a partir de datos GB-SAR no es un proceso sencillo, ya que requiere unos procedimientos complejos de procesado y análisis de datos. El conocimiento de los aspectos claves del proceso que lleva a los mapas de movimiento es clave para una correcta interpretación de los resultados. El objetivo de este documento es proporcionar al lector el conocimiento básico de la técnica para poder interpretar los resultados. Este documento se complementa con el entregable “E4.1.2: Tutorial para la correcta interpretación de los mapas generados con el SAR satelital” ya que ambas técnicas tienen muchos puntos en común. En particular, este documento se centra en los aspectos diferentes de la técnica GBSAR con respecto a la del SAR satelital.

En este documento, se repasan las principales limitaciones y dificultades de la técnica y se dan toda una serie de recomendaciones de cara a comprender cuando puede ser una herramienta potente y cuando no, como interpretar sus resultados, como detectar posibles errores y como evaluar posibles mejoras en el procesado.

2 INTERFEROMETRIA GB-SAR

El GB-SAR es un sistema coherente, es decir, mide la fase de la señal radar, que puede ser explotada, mediante el uso de técnicas interferométricas, para obtener información sobre la deformación y la topografía del área medida. La alta sensibilidad a pequeñas deformaciones, el largo alcance de las mediciones (hasta algunos kilómetros) y la capacidad de obtener un muestreo 2D del terreno, son características interesantes que hacen que el sistema GB-SAR un instrumento único para el monitoreo de laderas inestables. En la última década, se han desarrollado y utilizado varios sistemas GB-SAR en diferentes tipos de aplicaciones, como deslizamientos de tierra, presas y monitoreo de glaciares. Aunque el GB-SAR tiene un gran potencial para el monitoreo de inestabilidades, obtener una estimación del movimiento no es un proceso sencillo. De hecho, para estimar adecuadamente las deformaciones, los datos SAR deben procesarse y analizarse mediante herramientas desarrolladas ad-hoc para las particularidades del sistema.

En esta sección se proporciona información general sobre la interferometría GB-SAR. En primer lugar, se introduce el principio de funcionamiento. En segundo lugar, se describen las principales características de las imágenes GB-SAR y el principio de interferometría GB-SAR.

2.1 Radar and SAR working principles

La palabra Radar es el acrónimo de RADio Detection And Ranging. El principio básico de funcionamiento del radar es la emisión de pulsos de energía y la recolección de la energía reflejada por los objetos iluminados, véase la Figura 1. El radar, situado en la parte izquierda del esquema, emite un pulso de duración τ en el tiempo t_0 . La energía emitida viaja a la velocidad de la luz, aproximadamente a 299792.458 km/s. El pulso interactúa con el objeto iluminado, el avión, y una parte de la señal emitida se refleja hacia el radar llegando en el momento $t_0 + T_0$.

donde c es la velocidad de la luz, T_0 es el tiempo de pulso de vuelo, y el factor dos es debido al doble camino radar-objetivo-radar, del pulso. Como se mencionó anteriormente, los sistemas de radar discriminan por distancia. Su capacidad de distinguir entre dos objetos ubicados a diferentes distancias del instrumento generalmente se expresa por la resolución en distancia ΔR , que viene dada por:

$$\Delta R = \frac{c * \tau}{2} \quad (1)$$

donde τ es la duración del pulso emitido. Vale la pena señalar que no se pueden distinguir diferentes objetos ubicados a la misma distancia del radar.

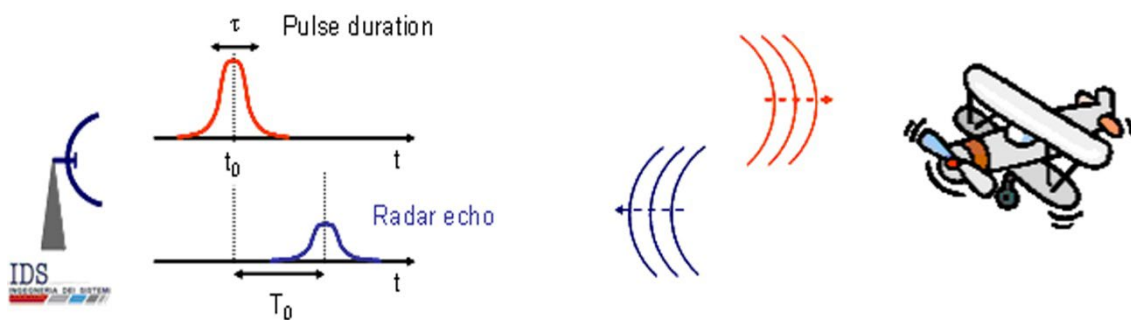


Figura 1: Muestreo de un radar (fuente Jensen (2000): Rem. sens. of the environment).

Es posible derivar la distancia R entre el sensor y el objetivo desde T_0 :

$$R = \frac{c * T_0}{2} \quad (2)$$

Una sola adquisición con un sistema radar solo proporciona información en una dimensión: el sistema solo resuelve objetivos en la dirección del rango. La capacidad de los sistemas de radar para discriminar objetivos a la misma distancia, llamada resolución en acimut, es función de la longitud de la antena radar: cuanto más larga sea la antena, mayor será la resolución en acimut. Una forma alternativa de obtener resoluciones altas sin utilizar una antena larga es la técnica de radar de apertura sintética (SAR). La técnica SAR combina múltiples imágenes del mismo objeto tomadas desde posiciones ligeramente diferentes. Esto da como resultado una imagen equivalente a una adquirida con una antena larga. Una descripción técnica de la técnica se puede encontrar en Curlander y McDonough (1991).

El GB-SAR obtiene la apertura sintética explotando el movimiento del sensor a lo largo de un rail: el sensor se mueve en modo "stop and go", adquiriendo datos en cada paso. Todas las imágenes adquiridas a lo largo del rail se procesan conjuntamente para obtener la imagen SAR. La resolución en acimut alcanzable viene dada por:

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{2L} \quad (3)$$

donde $\Delta\theta$ es la resolución angular, λ es la longitud de onda de la radiación y L es la longitud del rail. La resolución angular implica que el tamaño de la huella de un píxel aumenta con la distancia desde el sensor.

El resultado final de la adquisición es una imagen compleja bidimensional donde cada píxel contiene las componentes en fase (I) y cuadratura (Q) de la señal de radar, que se pueden transformar directamente en la amplitud (A) y la fase (φ) utilizando estas relaciones:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (4)$$

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (5)$$

La amplitud está directamente relacionada con la potencia de la señal dispersa y se utiliza típicamente para la interpretación de la escena. La componente de fase contiene la información geométrica relacionada con la distancia, y por tanto es la componente útil para la medida de movimientos. Esta es explotada mediante la técnica interferométrica.

2.2 Interferometria GB-SAR para la medida de deformaciones

Como se mencionó anteriormente, la fase de una imagen SAR contiene información relacionada con la distancia entre el radar y los diferentes objetos de la escena. Esta información puede ser explotada mediante el uso de la interferometría que se basa en la explotación de la diferencia de fase entre al menos dos imágenes GB-SAR del mismo objeto, adquiridas en diferentes momentos en el tiempo desde exactamente la misma posición. Consideremos la fase φ_1 y φ_2 de dos píxeles homólogos (es decir, píxeles que corresponden al mismo objeto físico) de dos imágenes adquiridas en diferentes momentos o desde diferentes posiciones:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \varphi_{geom-1} + \varphi_{scatt-1} = \frac{4\pi \cdot R_1}{\lambda} + \varphi_{scatt-1} \\ \varphi_2 &= \varphi_{geom-2} + \varphi_{scatt-2} = \frac{4\pi \cdot R_2}{\lambda} + \varphi_{scatt-2}\end{aligned}\quad (6)$$

donde R_1 y R_2 es la distancia al sensor en cada adquisición, φ_{scatt} es la componente de fase debida a la interacción entre la señal y el objeto medido, λ es la longitud de onda de la señal emitida, y el factor 4π está relacionado con la trayectoria bidireccional, radar-objeto-radar.

La fase interferométrica $\Delta\varphi_{21}$, es decir, la diferencia de fase entre ambas adquisiciones viene dada por:

$$\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi \cdot (R_2 - R_1)}{\lambda} + (\varphi_{scatt-2} - \varphi_{scatt-1}) \quad (7)$$

Asumiendo que la φ_{scatt} permanezca constante entre las dos adquisiciones (es decir, su variación a lo largo del tiempo es insignificante) podemos simplificar la ecuación (7) para:

$$\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi \cdot (R_2 - R_1)}{\lambda} \quad (8)$$

Esta ecuación muestra que la fase interferométrica $\Delta\varphi_{21}$, está directamente relacionada con la diferencia en distancia, R_1 y R_2 , entre el sensor y el objeto. Esta relación se mantiene para cada par de píxeles de las dos imágenes. La imagen que contiene, para cada píxel, la fase interferométrica se denomina interferograma. La Figura 2 muestra un ejemplo de interferograma y amplitud sobre el área de Cerro Gordo, Granada. El interferograma está codificado por colores entre $-\pi$ y π y los colores representan los cambios de fase. Aunque la ecuación anterior es válida en un caso ideal, en la práctica, se deben considerar otras componentes importantes de la fase interferométrica:

$$\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi \cdot (R_2 - R_1)}{\lambda} + (\varphi_{atmo2} - \varphi_{atmo1}) + \varphi_{noise} \quad (7)$$

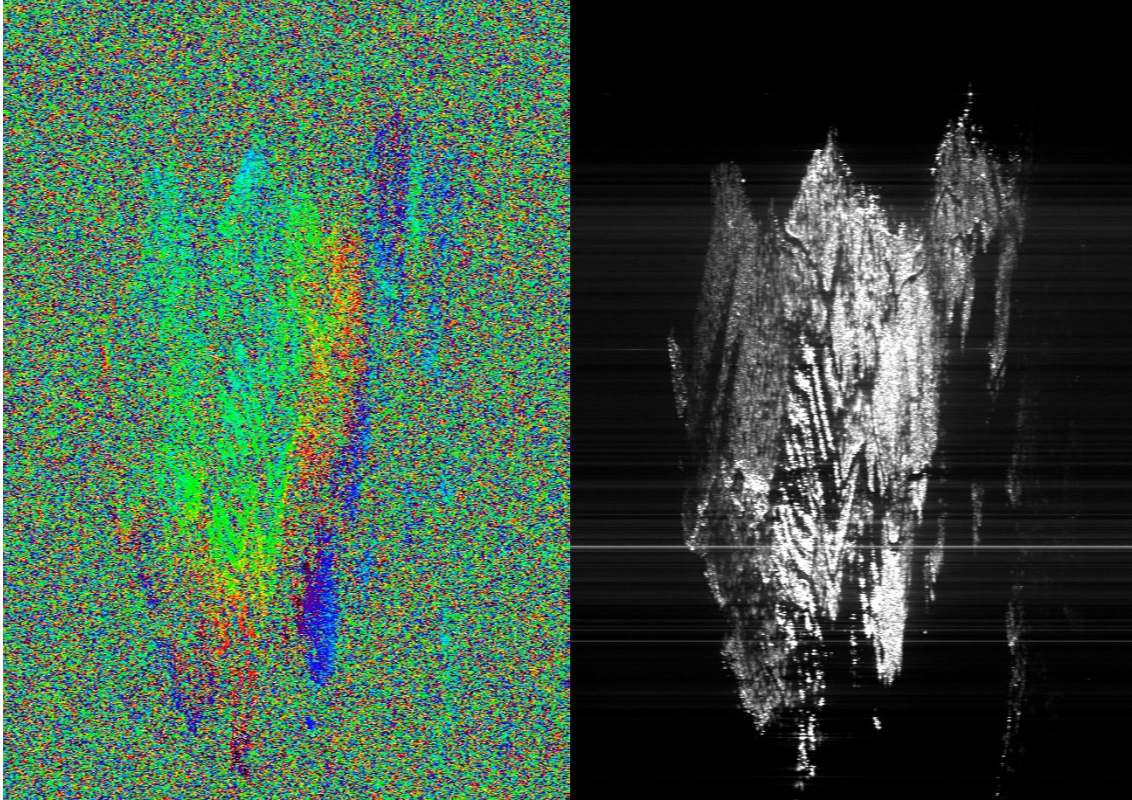


Figure 2: Interferograma (izquierda) y amplitud (derecha) GB-SAR. Los colores del interferograma representan valores de fase entre $[-\pi, \pi]$.

donde $\varphi_{atmo2} - \varphi_{atmo1}$ es la componente de fase debida al cambio en las condiciones atmosféricas entre la imagen 1 y la imagen 2, φ_{ruido} . En el interferograma de la figura 2 se pueden distinguir áreas en las que se aprecia señal coherente (colores uniformes) y áreas de ruido donde el valor de fase cambia aleatoriamente entre pixeles vecinos.

La figura 3 ilustra el concepto de medida de desplazamientos con GB-SAR. Supongamos que queremos medir el desplazamiento del punto P . Instalamos el sistema GB-SAR frente a él y obtenemos la primera fase φ_M . Supongamos que el punto sufre un desplazamiento d , y que se realiza una segunda medición, obteniendo una segunda observación φ_S en el momento t_1 . La fase interferométrica se puede calcular a partir de las dos fases medidas:

$$\Delta\varphi_{MS} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{4\pi * (SP - MP)}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} * d \quad (8)$$

Y entonces, el desplazamiento d de P se puede obtener aislando d en la Ecuación 8:

$$d = \Delta\varphi_{10} * \frac{\lambda}{4\pi} \quad (9)$$

donde λ es la longitud de onda de la señal utilizada.

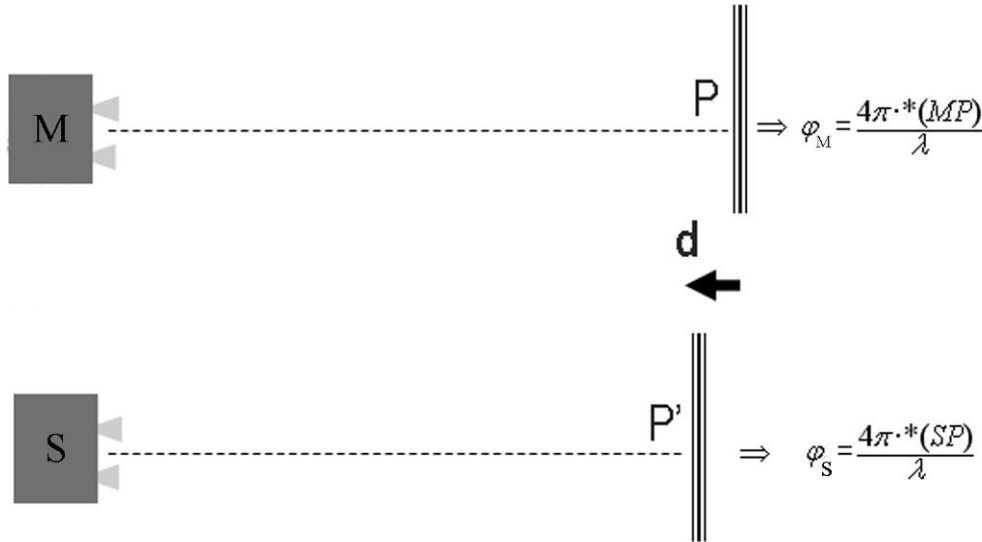


Figura 3: Principio de funcionamiento de la interferometría GB-SAR para la medición de la deformación. Un punto P dado, que sufre un desplazamiento d , se mide por GB-SAR dos veces, antes y después del desplazamiento.

La formulación anterior se basa en la 8, que no considera efectos atmosféricos o ruido de fase. Una aproximación más precisa viene dada en la ecuación 10 donde se incluyen estos efectos. Además, si nos planteamos la posibilidad de retirar y reinstalar el instrumento tenemos que añadir un nuevo término a la ecuación que incluya el cambio de fase debido al reposicionamiento del sensor. Finalmente, se debe considerar el término debido a la ambigüedad de fase, $2k\pi$.

$$\Delta\varphi_{Int} = \varphi_{Geom} + \varphi_{Defo} + \varphi_{Atmo} + \varphi_{Noise} + 2k\pi \quad (10)$$

Para poder medir deformaciones con GB-SAR se debe resolver la ecuación 10. Esto es, discriminar las componentes φ_{defo} del resto y resolver la ambigüedad de fase. En el entregable 4.2.3 se muestran dos aproximaciones diferentes al problema para dos aplicaciones diversas.

Desde el punto de vista de los aspectos generales de la técnica, todo lo explicado en el entregable 4.1.2 es aplicable. El GB-SAR sufre de las mismas limitaciones geométricas que el SAR satelital. Es un sensor que mide en línea de vista y sufre de ambigüedad de fase. La diferencia principal recae en 3 aspectos clave: (i) la LOS es definible, ya que depende del punto de instalación del sensor; (ii) la frecuencia temporal es configurable y por tanto nos permite ajustarla a la velocidad del movimiento, esto se traduce en minimizar errores en la resolución de la ambigüedad de fase y; (3) la componente geométrica es nula siempre y cuando no exista reposicionamiento del sensor. Esto simplifica bastante la ecuación 10.

3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Esta sección contiene una serie de consejos prácticos para la correcta interpretación de los resultados GB-SAR. La sección se refiere a los aspectos particulares de esta técnica. Para aspectos más generales de la técnica DInSAR véase entregable 4.1.2 de este mismo proyecto.

Desde el punto de vista del GB-SAR es clave conocer la posición del sensor con respecto a la zona de interés pues es esta la que determinará la LOS y por tanto las distorsiones geométricas, la sensibilidad a los desplazamientos y la interpretación del signo de estos. Conocida su posición, los aspectos claves de la interpretación pasan por:

1. La densidad espacial viene gobernada por dos aspectos: la geometría de la adquisición (posición del sensor) y el tipo de superficie que medimos. Esta última es clave para interpretar los resultados. Trabajar sobre superficies naturales puede presentar cierta complejidad debido a cambios como la humedad del suelo, cambios en la vegetación etc. Además, la pérdida de puntos por este motivo puede convertirse en una fuente de error importante en la resolución de la ambigüedad de fase.
2. Una limitación crítica de la técnica está relacionada con la naturaleza ambigua de las fases interferométricas, que pueden causar estimaciones sesgadas del movimiento observado, especialmente en aquellas áreas que sufren los mayores desplazamientos. Desde el punto de vista del análisis, estos errores se pueden detectar en una de sus formas como saltos entre imágenes consecutivas de la mitad de la longitud de onda en las series temporales. Sin embargo, a veces, la ambigüedad de fase puede suponer la pérdida de movimientos rápidos con respecto a la velocidad de muestreo del sensor. En este contexto es muy importante tener la mayor información posible de la zona de estudio con el fin de poder detectar este tipo de errores.
3. La correcta estimación de φ_{atmo} requiere la disponibilidad de áreas estables en el entorno del área de deformación. La calidad de esta estimación dependerá entonces de la distribución de las áreas estables a lo largo del área cubierta. El peor de los casos es cuando no existe zona estable en la imagen. En este contexto, cuando se espera movimiento en la zona medida o bien se ha medido movimiento con otros sensores, pero los resultados GB-SAR no muestran nada, esto puede ser debido a que para la eliminación de la componente atmosférica no se han seleccionado áreas estables. Otro efecto típico del GB-SAR son las turbulencias atmosféricas muy locales. Sin embargo una forma de descartar este tipo de fenómenos es su evolución en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA ÚTIL

Alba, M., Bernardini, G., Giussani, A., Ricci, P.P., Roncoronia, F., Scaioni, M., Valgoic, P., Zhangd, K., 2008. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008.

Bozzano, F., Cipriani, I., Mazzanti, P., Prestininzi, A., 2011. Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring. *Natural Hazards*, 59 (3), pp. 1377-1396.

Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Nico, G., Tarchi, D. 2003. Ground-based SAR interferometry as a tool for landslide monitoring during emergencies. *Proc. IGARSS 2003*, vol. 4, pp. 2924-2926.

Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C., Luzi, G., 2010. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides* 7 (3), pp. 291–301.

Crosetto, M., Monserrat, O., Luzi, G., Cuevas-Gonzalez, M., Devanthery, N., 2013. A Noninterferometric Procedure for Deformation Measurement Using GB-SAR Imagery. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* , 99, pp. 1

Farina, P., Leoni, L., Babboni, F., Coppi, F., Mayer, L., Ricci, P., 2011. IBIS-M, an Innovative Radar for Monitoring Slopes in Open-Pit Mines. *Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, September 18-21, 2011 Vancouver, Canada.

Herrera, G., Fernandez-Merodo, J.A., Mulas, J., Pastor, M., Luzi, G., Monserrat, O., 2009. A landslide forecasting model using ground based SAR data: the Portalet case study. *Engineering Geology* 105 (3-4), pp. 220-230.

Leva, D., Rivolta, C., Binda Rossetti, I., Kuzuoka, S., Mizuno, T., 2005. Using a ground based interferometric synthetic aperture radar (GBinSAR) sensor to monitor a landslide in Japan. *Proc. of IGARSS 2005*, pp. 4096-4099.

Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Guidi, G., Moia, F., Atzeni, C., 2004. Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. *IEEE TGRS*, 42 (11), pp. 2454–2466.

Luzi, G., M. Pieraccini, D. Mecatti, L. Noferini, G. Macaluso, A. Galgaro, Atzeni, C., 2006. Advances in ground based microwave interferometry for landslide survey: a case study. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), pp. 2331 – 2350.

Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Macaluso, G., Tamburini, A., Atzeni, C., 2007. Monitoring of an Alpine Glacier by Means of Ground-Based SAR Interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 4 (3), pp. 495-499.

Luzi, G., Noferini, L., Mecatti, D., Macaluso, G., Pieraccini, M., Atzeni, C., Schaffhauser, A., Fromm, R., Nagler, T., 2009. Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: Results from an experimental data collection in Tyrol (Austria). *IEEE TGRS*, 47, pp. 382–394.

Luzi, G., Crosetto, M., Monserrat, O., 2010c. Advanced Techniques for Dam Monitoring. II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation, 23-25 November, Zaragoza, Spain.

Martínez-Vázquez, A., Fortuny-Guasch, J. 2008. A GB-SAR processor for snow avalanche identification. *IEEE TGRS* 46(11), pp. 3948-3956.

Monserrat, O., 2012. Deformation measurement and monitoring with Ground-Based SAR. PhD thesis, Technical University of Catalonia, available on-line at www.ideg.cat.

Monserrat, O., Moya, J., Luzi, G., Crosetto, M., Gili, J. A., Corominas, J., 2013. Non-interferometric GB-SAR measurement: application to the Vallcebre landslide (eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(7), pp. 1873-1887.

Monserrat, O., Crosetto, M., & Luzi, G. (2014). A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, 40-48.

Nico, G., Leva, D., Antonello, G., Tarchi, D., 2004. Ground-based SAR interferometry for terrain mapping: theory and sensitivity analysis. *IEEE TGRS*, 42 (6), pp. 1344- 1350.

Nico, G., Leva, D., Fortuny-Guasch, J., Antonello, G., Tarchi D., 2005. Generation of Digital Terrain Models with a Ground-Based SAR System. *IEEE TGRS*, 43 (1), pp. 45-49.

Noferini, L., 2004. Processing techniques of microwave data acquired by Continuous Wave Stepped Frequency Radar. PhD thesis, Università degli Studi di Firenze, Florence, Italy.

Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Luzi, G., Tamburini, A., Broccolato, M., Atzeni, C., 2005b. Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in ground-based SAR interferometry. *IEEE TGRS* 43 (7), pp. 1459–1471.

Rödelsperger, S., 2011. Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt.