

Aplicación de herramientas de monitoreo DinSAR de deformaciones para el estudio de fallas en depósitos de relaves

Application of InSAR deformation monitoring tools to study tailings dam failures

Fecha de entrega: 11 de marzo 2022

Fecha de aceptación: 27 de abril 2022

Sebastián Olguín¹, Víctor Araya², Gonzalo Suazo¹ y Gabriel Villavicencio³

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile, sebastian.olguin.svd@gmail.com, gonzalo.suazo@usm.cl

²Ferrara - Proyectos Especiales, Av. Ossa 235, oficina 1150, La Reina, Región Metropolitana de Santiago 7870117, Chile, victor.araya@ferrara.cl

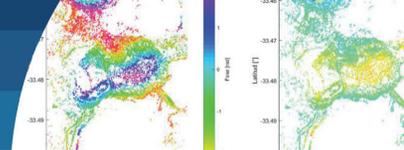
³Grupo de Geotecnia, Escuela de Ingeniería de Construcción y Transporte, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Avenida Brasil #2147, Valparaíso, Chile

En la última década han ocurrido fallas catastróficas en depósitos de relaves que han evidenciado la importancia del monitoreo continuo de los depósitos durante su operación y cierre. Lo anterior, de modo de gestionar adecuadamente el riesgo de inestabilidad física de la estructura. En muchos casos, las fallas de los depósitos están precedidas por una serie de anomalías como la deformación excesiva en superficie, aparición de grietas de tensión o cambios en tendencias de aceleración de puntos de control. Si estas alertas son identificadas a tiempo, pueden ser significativas para la activación de planes de emergencia y de control, lo que finalmente mitigue el riesgo de la falla física. Las técnicas de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) miden la deformación superficial procesando la diferencia de fase de radar de al menos dos imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes épocas sobre la misma área. Estas técnicas son de gran utilidad para medir deformaciones en depósitos de relaves ya que proveen información periódica de alta precisión sobre grandes áreas, pudiendo utilizarse incluso en condiciones climáticas adversas, a diferencia de la utilización de imágenes de satélites ópticos. Este artículo presenta los resultados de la aplicación del análisis interferométrico de deformaciones superficiales en tranques de relaves, las cuales permiten la detección de deformaciones sobresalientes, tendencias de aceleración y estimaciones del momento de falla en sus estructuras. Las herramientas de procesamiento son aplicadas a casos de falla relevantes a nivel internacional. Para el estudio se utilizan técnicas DInSAR avanzadas de dispersores persistentes (PS InSAR). Los resultados obtenidos se comparan con estudios geotécnicos post-falla realizados a los casos de estudio.

Palabras clave: relaves, deformaciones superficiales, predicción de falla, interferometría radar, DinSAR, PS InSAR

Currently, catastrophic failures have occurred in tailings deposits that have demonstrated the importance of continuous monitoring of the constructive and operational status of these structures to improve their understanding and reduce risk. In many cases, dam failures are preceded by a series of anomalies such as: excessive deformation on the surface, the appearance of stress cracks or acceleration trends. If these are captured in time, they can be of great support for early warning systems or for activating risk mitigation procedures, which can ultimately lead to avoiding failures. Synthetic aperture radar differential interferometry (DInSAR) techniques measure surface deformation by processing the radar phase difference of at least two complex SAR images acquired at different times over the same area. These techniques are very useful for measuring deformations in tailings deposits since they provide high-precision periodic information over large areas, and can even be used in adverse weather conditions, unlike optical satellites. This article shows the results of the application of interferometric analysis of surface deformations in tailings dams, which allow the detection of outstanding deformations, acceleration trends and estimates of the moment of failure in its structures. The processing tools are applied by studying some important international failure cases of tailings deposits that have occurred in recent years. Advanced DInSAR techniques of persistent scatterers (PS InSAR) are used for the study. The results obtained are compared with complementary geotechnical studies carried out on these case studies.

Keywords: tailings, surface deformations, failure prediction, radar interferometry, DinSAR, PS InSAR



Introducción

Depósitos de relaves y las implicancias de la falla de sus estructuras

El manejo y almacenamiento de relaves forman parte fundamental dentro de la operación minera tanto en Chile como en el resto del mundo. La gran envergadura que pueden alcanzar sus depósitos (algunos con alturas cercanas a los 300 m, extensiones de varios kilómetros y volúmenes enormes) los sitúa entre las estructuras artificiales más grandes del mundo. Lo anterior presenta, junto con la naturaleza física y química de los relaves, una serie de riesgos al medio ambiente, a las comunidades aguas abajo y a la economía de las mineras ante una eventual falla de sus estructuras. Por esto, los relaves requieren un tratamiento adecuado y ubicaciones de almacenamiento seguras y dedicadas.

A pesar de los avances realizados en el sector minero y el mayor conocimiento de la ingeniería geotécnica, todavía se producen fallas en los depósitos de relaves. La causa de la mayoría de las fallas corresponde a un compromiso inadecuado con el almacenamiento seguro combinado con una mala gestión (Roche *et al.*, 2017). También, pese a que durante las últimas tres décadas el número total de fallas anuales de depósitos de relaves ha disminuido, el número de fallas graves ha aumentado (Bowker y Chambers, 2015). Además, el problema del almacenamiento seguro de relaves puede volverse más desafiante a medida que aumenta el volumen de desechos de las minas debido a menores leyes de mineral (Mudd, 2007) y a medida que el cambio climático provoca eventos naturales más intensos y variables.

En la actualidad, han ocurrido fallas catastróficas que han evidenciado la importancia del monitoreo continuo de los depósitos para la comprensión de estas y sobre todo para evitarlas. Una de ellas fue la ruptura de la presa de Feijão en Brasil a principios de 2019 (ver Figura 1): el evento causó la liberación de varios millones de metros cúbicos de relaves, contaminando las aguas de río Paraopeba y costando la vida a cientos de personas. El reporte de Robertson *et al.* (2019) cuenta con un análisis de datos de monitoreo sobre la presa de Feijão, el cual ayudó a explicar su falla. Entre los datos analizados se encuentran: presencia de lagunas, humedad, deformaciones superficiales y videos de la presa en el instante del colapso.

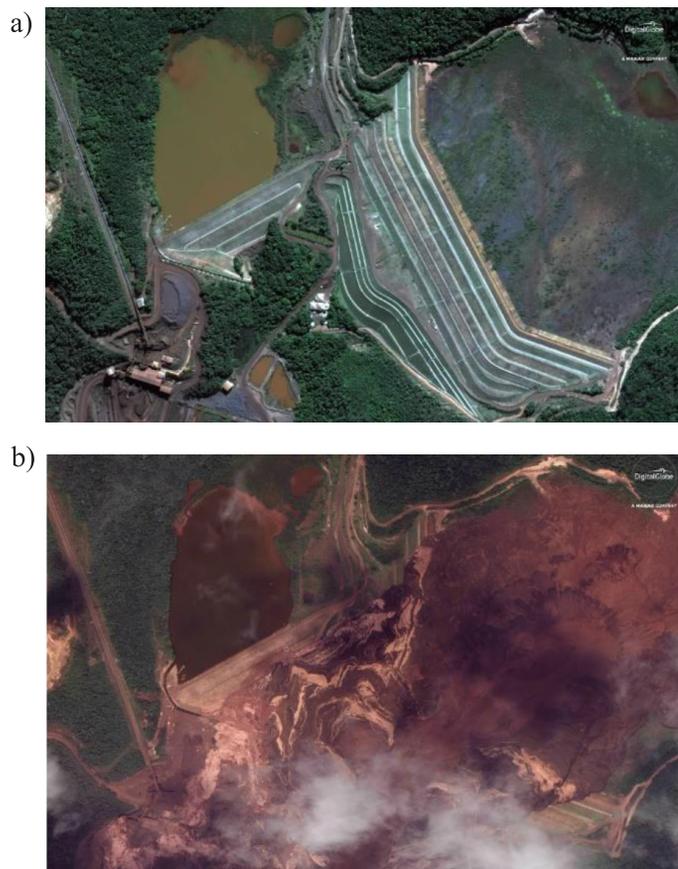
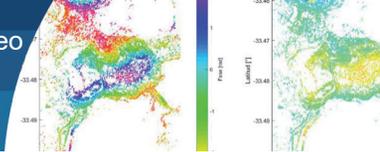


Figura 1: (a) Presa I de Feijão antes y (b) después del desastre (The Sydney Morning Herald).

El objetivo de monitorear los desplazamientos, particularmente, es seguir la reacción de los depósitos de relaves a la carga continua y supervisar la deformación en entornos mineros cerrados para preservar la integridad de la instalación y evitar fallas futuras. En muchos casos, las fallas de los depósitos están precedidas por una serie de anomalías en la deformación de la superficie, como grietas de tensión y tendencias de aceleración (Vanden Berghe *et al.*, 2011). Si se detectan en su fase inicial y se interpretan bien, estas anomalías pueden ser de gran apoyo para los sistemas de advertencia y alarma en la activación de los procedimientos de mitigación de riesgos. El monitoreo del desplazamiento de la superficie es fundamental en la fase de prevención, ya que destaca las áreas que necesitan investigaciones de alta prioridad (Sánchez *et al.*, 2019).

El monitoreo radar de deformaciones como recurso de advertencia y prevención

Los sensores radar montados en plataformas de órbita espacial entregan información superficial a gran escala,



con alta precisión e independientemente de la luminosidad y las condiciones climáticas; la deformación del terreno se puede obtener a partir de esta información con técnicas de procesamiento radar adecuadas. Los métodos satelitales resultan ser un buen complemento para los métodos in situ tradicionales e incluso una fuente directa y continua de información procesable. En este contexto, diversas misiones satelitales radar proporcionan material virtual periódicamente y, en algunos casos (como la misión Sentinel-1), de manera liberada a los usuarios de sus plataformas en línea.

En los últimos 30 años, las técnicas de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) han demostrado su potencial como herramientas de medición de la deformación del terreno. Desde inicios de la década del 2000, su capacidad se ha mejorado considerablemente mediante el uso de grandes pilas de imágenes SAR adquiridas en la misma área, en lugar del par de imágenes usadas en las configuraciones DInSAR clásicas. Con estos avances, las técnicas DInSAR se han convertido en herramientas geodésicas cada vez más cuantitativas para monitorear deformaciones, en lugar de solo herramientas cualitativas simples (Crosetto *et al.*, 2005).

Marco teórico

Generalidades DInSAR

Las técnicas DInSAR procesan la información contenida en la fase de radar de al menos dos imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes épocas sobre la misma área, y que forman un par interferométrico. La imagen SAR compleja contiene dos componentes por píxel, de los cuales se deriva la señal de amplitud y fase. La fase es la clave observable de todas las técnicas InSAR y a partir de la diferencia de fase entre imágenes SAR se pueden realizar mediciones de deformación del terreno. Los métodos DInSAR han sido ampliamente explotados durante las últimas tres décadas, produciendo resultados significativos en los campos de: sismología, vulcanología, glaciología, deslizamientos de tierra, subsidencia y elevación de suelo. La Figura 2 muestra la relación entre movimiento de terreno y cambio de fase de la señal SAR.

El objetivo de cualquier técnica DInSAR es derivar la fase de desplazamientos de la fase interferométrica. Esto implica separar la fase de desplazamientos de los

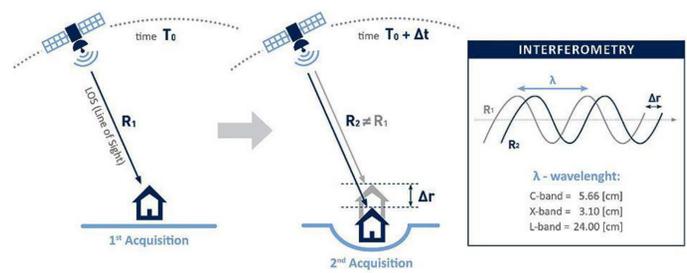


Figura 2: Representación gráfica de la relación entre el desplazamiento de la superficie del terreno y el cambio de fase de la señal SAR (TRE Altamira, site.tre-altamira.com)

otros componentes de fase (asociados esencialmente a la topografía del terreno, a la órbita del sensor, a la atmósfera y al ruido). Una condición fundamental para lograrlo es analizar píxeles con pequeños niveles de ruido, que generalmente se relacionan con dos tipos de reflectores: aquellos en que la respuesta al radar está dominada por un objeto reflector fuerte y es constante en el tiempo (dispersor persistente PS) y aquellos en que la respuesta es constante en el tiempo, pero se debe a diferentes objetos de dispersión pequeños (dispersores distribuidos DS). Físicamente, los PS pueden ser, por ejemplo, troncos de árbol, rocas grandes o edificaciones. La Figura 3 muestra la señal radar reflejada desde un píxel PS y desde un píxel DS.

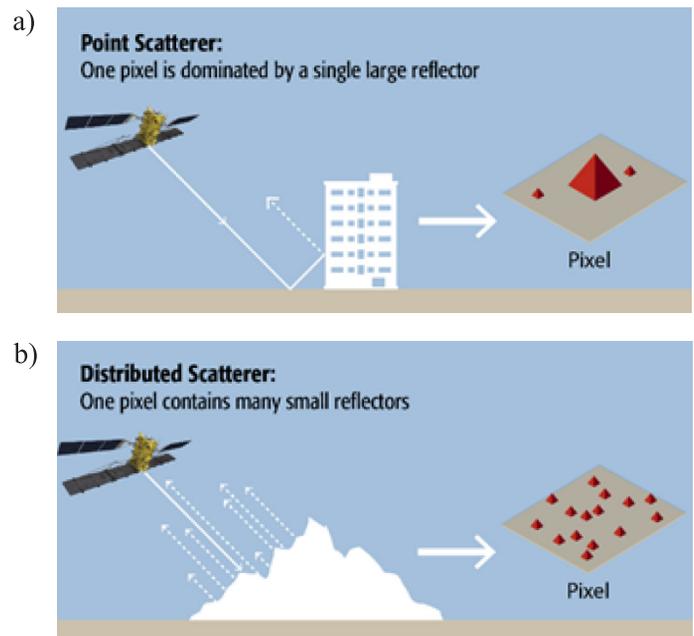
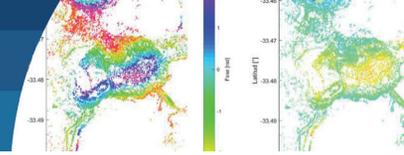


Figura 3: (a) Captura de señal radar reflejada desde un píxel con un dispersor puntual dominante o PS y (b) desde un píxel con dispersores distribuidos o DS. Fuente: Editado de MDA.

Hasta finales de los años 90, las aplicaciones DInSAR



usaban la configuración clásica, es decir, por medio del análisis de un único interferograma diferencial derivado de un par de imágenes SAR. Esta configuración sufre limitaciones importantes en términos de capacidades de modelado de deformación y de calidad de las estimaciones de deformación. Dichas limitaciones fueron posteriormente abordadas con el desarrollo de técnicas DInSAR avanzadas que trabajaban con grandes cantidades de imágenes SAR.

Técnicas de teledetección PSI

La Interferometría de Dispersores Persistentes (PSI) representa una clase específica de técnicas DInSAR, que explota múltiples imágenes SAR adquiridas en la misma área, y algoritmos apropiados de procesamiento y análisis de datos para separar la fase de desplazamientos de los otros componentes de fase. La primera técnica PSI propuesta fue el enfoque Permanent Scatterers de Ferretti *et al.* (2001), la cual fue seguida por una serie de diferentes técnicas PSI: algunas también basadas en PS, otras basadas en DS y otras de clase híbrida.

Interferometría PSI con StaMPS

El grado de decorrelación de las señales de radar depende de la distribución de los centros de dispersión dentro de un píxel. Si la fase de un píxel fuera determinada por un solo dispersor de punto estable, la decorrelación se reduciría a cero. Aunque este nunca es el caso de las superficies reales, hay píxeles que se comportan de manera similar a los dispersores de puntos, y cuya decorrelación se reduce considerablemente. Por lo tanto, en un interferograma, algunos píxeles exhibirán menos decorrelación que otros. Es posible evitar varias limitaciones del InSAR convencional analizando solo píxeles que retienen cierto grado de correlación, que se definen como dispersores persistentes o “Persistent Scatterers PS” (Hooper *et al.*, 2004). Si un píxel está dominado por un dispersor persistente, que es más brillante y estable que los dispersores de fondo, la variación en la fase del eco debido al movimiento relativo de los dispersores de fondo se reducirá, llegando a ser lo suficientemente pequeña como para permitir la extracción de la subyacente señal de deformación.

El enfoque del Método de Stanford para PS o “StaMPS” (Hooper *et al.*, 2004) es formar interferogramas y eliminar la mayor parte del rastro de la fase topográfica utilizando un DEM (*digital elevation model*). La fase residual,

ϕ_D , del píxel x en el i -ésimo interferograma corregido topográficamente se puede escribir como la suma de cinco términos:

$$\phi_{D,x,i} = \phi_{def,x,i} + \phi_{\alpha,x,i} + \phi_{orb,x,i} + \phi_{\epsilon,x,i} + n_{x,i} \quad (1)$$

donde ϕ_{def} es el cambio de fase debido al movimiento del píxel en la dirección de línea de visión (LOS) del sensor, ϕ_{α} es el equivalente de fase de la diferencia en el retardo atmosférico entre pasadas, ϕ_{orb} es la fase debido a imprecisiones de la órbita, ϕ_{ϵ} es la fase topográfica residual debido al error en el DEM y es el término de ruido debido a la variabilidad en la dispersión de los píxeles, el ruido térmico, la línea de base perpendicular y el ángulo de estrabismo. Definimos PS como los píxeles donde es lo suficientemente pequeño como para no oscurecer completamente la señal.

La variación en los primeros cuatro términos en (1) puede dominar al término de ruido haciendo que sea difícil identificar a los PS. Suponemos que ϕ_{def} , ϕ_{α} y ϕ_{orb} están correlacionados espacialmente en distancias de una escala de longitud especificada, L , y que ϕ_{ϵ} y n no están correlacionados en la misma distancia, con una media de cero. Si ya se conocen las posiciones de otros PS, promediar la fase de todos aquellos dentro de la región circular centrada en el píxel x con radio L implica:

$$\bar{\phi}_{D,x,i} = \bar{\phi}_{def,x,i} + \bar{\phi}_{\alpha,x,i} + \bar{\phi}_{orb,x,i} + \bar{n}_{x,i} \quad (2)$$

donde la barra denota la media muestral de la región y \bar{n} es la suma de las medias muestrales de n y ϕ_{ϵ} y se supone pequeña. Restando (2) de (1) queda:

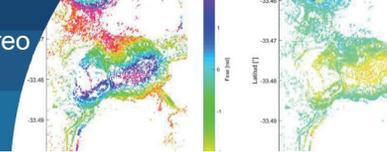
$$\phi_{D,x,i} - \bar{\phi}_{D,x,i} = \phi_{\epsilon,x,i} + n_{x,i} - \bar{n}'_{x,i} \quad (3)$$

donde $\bar{n}' = \bar{n} + (\bar{\phi}_{def} - \phi_{def}) + (\bar{\phi}_{\alpha} - \phi_{\alpha}) + (\bar{\phi}_{orb} - \phi_{orb})$

Definimos γ_x , una medida de la variación de ϕ_D basada en la coherencia temporal del píxel x , como:

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp\{\sqrt{-1}(\phi_{D,x,i} - \bar{\phi}_{D,x,i} - \hat{\phi}_{\epsilon,x,i})\} \right| \quad (4)$$

donde N es el número de interferogramas disponibles y $\hat{\phi}_{\epsilon,x,i}$ es nuestra estimación de $\phi_{\epsilon,x,i}$. Suponiendo que los valores de $\bar{n}'_{x,i}$ son pequeños, γ_x es una medida de la



estabilidad de fase del píxel y, por lo tanto, un indicador de si el píxel es un PS. Las Figuras 4(a)-(c) muestran una aplicación del método DinSAR de StaMPS.

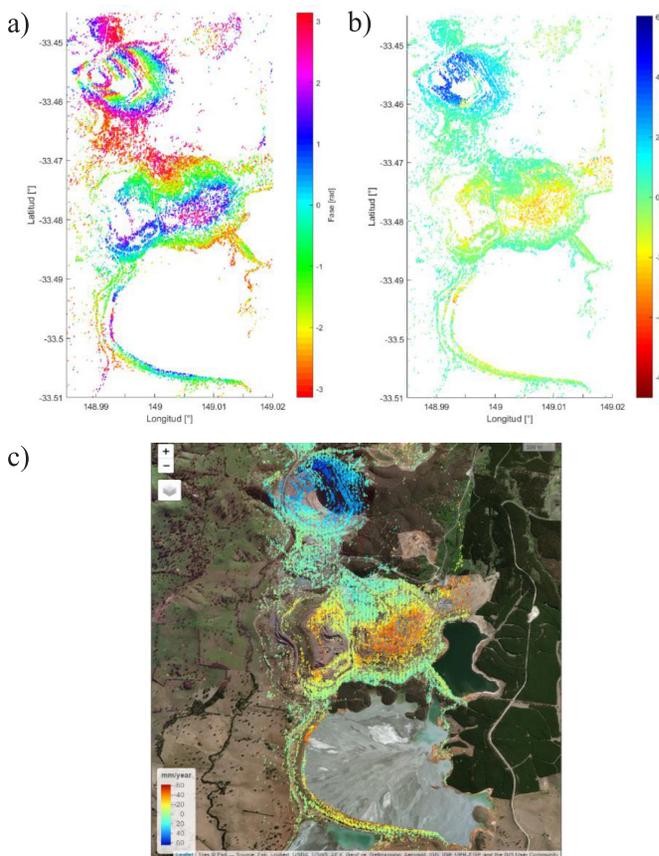


Figura 4: (a) Interferograma original, (b) interferograma corregido (Centro) y (c) mapa de velocidad media de deformaciones superficiales en la zona estudiada para el caso de falla de Cadia. Valores negativos indican asentamiento.

Método de Velocidad Inversa para predicción de falla

La interpretación de los datos de monitoreo de taludes es uno de los principales puntos de énfasis cuando se trata de predecir el tiempo de falla geomecánica (t_f) o evaluar la probabilidad de un colapso inminente de una pendiente rocosa. Aunque no existe una ley universal que cumpla con éxito este objetivo para todos los tipos de mecanismos de falla y litología, en las últimas décadas se han producido un buen número de métodos y ecuaciones derivadas empíricamente. Estos generalmente se basan en la observación recurrente antes de la falla de ciertas relaciones en los datos de deformación o desplazamiento, eventualmente vinculados a algunas propiedades

intrínsecas de la masa rocosa.

Algunos de los enfoques para la predicción de t_f son aquellos basados en la teoría de la aceleración de la fluencia, de donde se deriva que el tiempo de falla del talud puede predecirse extrapolando la tendencia hacia cero de la gráfica de velocidad inversa-tiempo. La descripción más notoria del tema fue hecha por Voight (1989), quien extendió la teoría al comportamiento de los materiales en etapas terminales de falla y propuso una relación entre la tasa de desplazamiento ($\dot{\Omega}$) y la aceleración ($\ddot{\Omega}$), influenciada por dos parámetros adimensionales (A y α):

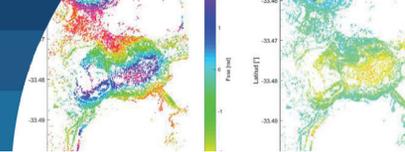
$$\dot{\Omega}^{-\alpha} \ddot{\Omega} - A = 0 \quad (5)$$

donde Ω es el desplazamiento observado. Integrando la expresión (5) con respecto al tiempo t , para $\alpha > 1$ y asumiendo que $\dot{\Omega}$ en t_f tiende a infinito, se obtiene la curva de velocidad inversa:

$$\frac{1}{\dot{\Omega}} = [A(\alpha - 1)(t_f - t)]^{1/(\alpha-1)} \quad (6)$$

De cualquier modo, la experiencia sugirió (Fukuzono, 1985; Voight, 1989) que es con frecuencia casi igual a 2, lo que hizo que el ajuste lineal de datos de velocidad inversa-tiempo sea una herramienta simple y muy preferida para predecir t_f de pendientes que muestran fuertes fases de aceleración. Petley *et al.* (2002) observaron que la forma de la gráfica de velocidad inversa es de hecho predominantemente lineal para deslizamientos de tierra donde la generación de una nueva superficie de corte y la propagación de grietas son los procesos dominantes. Sobre la búsqueda de tendencias lineales, Dick *et al.* (2014) sugirieron que el procedimiento de ajuste lineal solo debe incluir datos después de la identificación de los puntos de inicio de aceleración (OOA).

Para obtener resultados confiables es de crucial importancia procesar correctamente las series temporales de velocidad y así eliminar tanto como sea posible los efectos perturbadores, catalogados como “ruido” por simplicidad. El filtrado de datos es esencial para ubicar puntos OOA y aumentar el grado de ajuste de la recta de regresión lineal en la gráfica de velocidad inversa (Carlà *et al.*, 2017). En consecuencia, la media móvil resulta ser uno de los algoritmos de suavizado más comunes y fáciles de usar.



Específicamente, se considera una media móvil simple a corto plazo (SMA) y de orden n_{MA} , donde la velocidad suavizada en el tiempo t es:

$$\bar{v}_t = \frac{v_t + v_{t-1} + \dots + v_{t-(n_{MA}-1)}}{n_{MA}} \quad (7)$$

El filtro SMA es típicamente el más básico para suavizar un valor atípico hipotético en una serie temporal lineal; este promedio móvil responde rápidamente a los cambios de tendencia y es sensible a ligeras fluctuaciones en los datos (Carlà *et al.*, 2017). La Figura 5 muestra un ejemplo de velocidad inversa para una serie temporal sin filtrar y con filtro SMA.

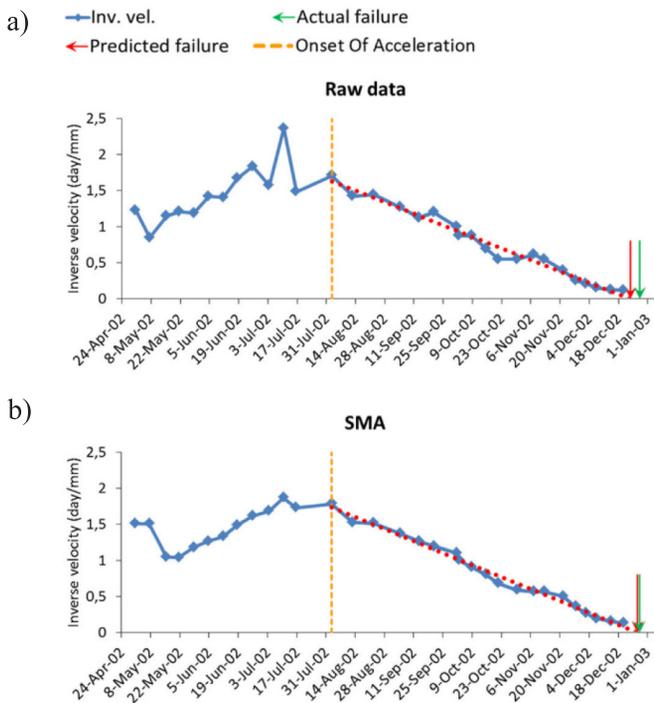


Figura 5: Velocidad inversa con recta de ajuste para (a) una serie temporal de datos en bruto y para (b) la serie de datos de (a) con filtro SMA (Editado de Carlà *et al.*, 2017)

Procedimiento

Se estudiaron las fallas en los depósitos de relaves de Samarco (2015), Cadia (2018) y Feijão (2019) con el método PS InSAR, utilizando los programas SNAP y StaMPS en conjunto. Para esto se usaron 14 imágenes Sentinel-1 IW SLC en el caso de Samarco y 20 imágenes Sentinel-1 IW SLC en los casos de Cadia y Feijão. Las fechas de registro de las imágenes corresponden a las últimas capturas antes de cada falla.

Resultados Presa Fundão de Minería Samarco (Brasil)

El colapso de la presa de relaves Fundão de Samarco es uno de los más grandes desastres ambientales y mineros que se han producido en Brasil y el mundo. El evento ocurrió el 5 de noviembre de 2015 y provocó la liberación de alrededor de 39.2 Mm³ de relave, hecho que causó inundaciones y contaminación en la cuenca del Río Doce, e incluso en el Océano Atlántico.

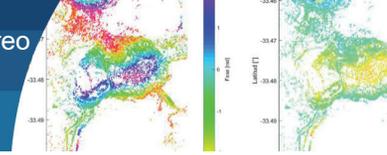
Las causas de falla han sido motivo de una amplia cantidad de estudios, destacando el reporte de Morgenstern *et al.* (2016). El reporte concluye que no hubo una causa aislada que generara la falla de la presa. El colapso fue la consecuencia de una cadena de eventos y condiciones que culminó con la licuefacción de flujo de los relaves.

Las Figuras 6(a)-(c) muestran los resultados del análisis PS InSAR con predicción de falla para el caso de la presa Fundão.

La zona crítica o de mayores velocidades de deformación se ve con claridad en el mapa PS InSAR mostrado en la Figura 6(a). Por otra parte, el método no entregó resultados en el contrafuerte izquierdo, donde comenzó la falla del tranque (Morgenstern *et al.*, 2016).

El gráfico de deformación media acumulada (Figura 6(b)) muestra un incremento mayormente progresivo y con poca dispersión de los asentamientos PS InSAR en la zona crítica; además, presenta una fase de aceleración entre mayo y finales de junio, y otra fase desde mediados de septiembre en adelante. De las dos tendencias de aceleración presentes se consideró como significativa en el evento de falla solamente la segunda, puesto que no se posee información previa a la primera tendencia y, por lo tanto, no se puede establecer su duración real ni su relación con los datos posteriores.

La fecha obtenida en la predicción de falla excedió en 7 días la fecha real de falla de la presa (Figura 6(c)), con un coeficiente R^2 de 0.86, valor medianamente bueno. La imprecisión de estos resultados no fue grande y probablemente se debió a la baja cantidad de interferogramas utilizados en el análisis (14 imágenes por disponibilidad, con un mínimo recomendado de 20).



Presas Norte de Cadia Valley Operations (Australia)

El 9 de marzo de 2018, se produjo un desplome en el muro sur de la instalación Norte de almacenamiento de relaves de Cadia, lo que provocó la pérdida de contención de los residuos acumulados. Los relaves fueron capturados dentro de la cuenca de la instalación Sur, y no hubo lesionados ni pérdida de vidas.

El reporte de la investigación técnica realizada por Morgenstern *et al.* (2019) concluye que el evento de falla ocurrió debido a la deformación en los cimientos de la presa durante los últimos meses de construcción de la Etapa 10, consistente en el levantamiento y refuerzo del muro perimetral. La deformación en los cimientos llevó a la pérdida de soporte de los relaves, la cual provocó la licuefacción de los relaves saturados sueltos.

Las Figuras 7(a)-(c) muestran los resultados del análisis PS InSAR con predicción de falla para el caso de la presa Norte.

La ubicación del área con mayor tasa de subsidencia resultó coincidente con la zona de falla del depósito como se muestra en la Figura 7(a). El mapa PS InSAR presenta una alta densidad de puntos PS en las cercanías del sector de falla; las mayores tasas de asentamiento se sitúan en las cercanías del coronamiento del muro, disminuyendo gradualmente en magnitud hacia la base.

El gráfico de deformación media acumulada (Figura 7(b)) exhibe una curva de desplazamientos PS InSAR con poca dispersión de puntos y con un aumento prácticamente continuo del asentamiento en la zona crítica: los incrementos de deformaciones permanecen leves hasta la aparición de un punto OOA a fines de diciembre de 2017; luego, la tendencia de aceleración se mantiene hasta el final de la curva.

La fecha obtenida en la predicción de falla quedó solo 1 día por debajo de la fecha real de falla de la presa (Figura 7(c)), con un coeficiente R^2 de 0.93, valor bastante bueno. El alto

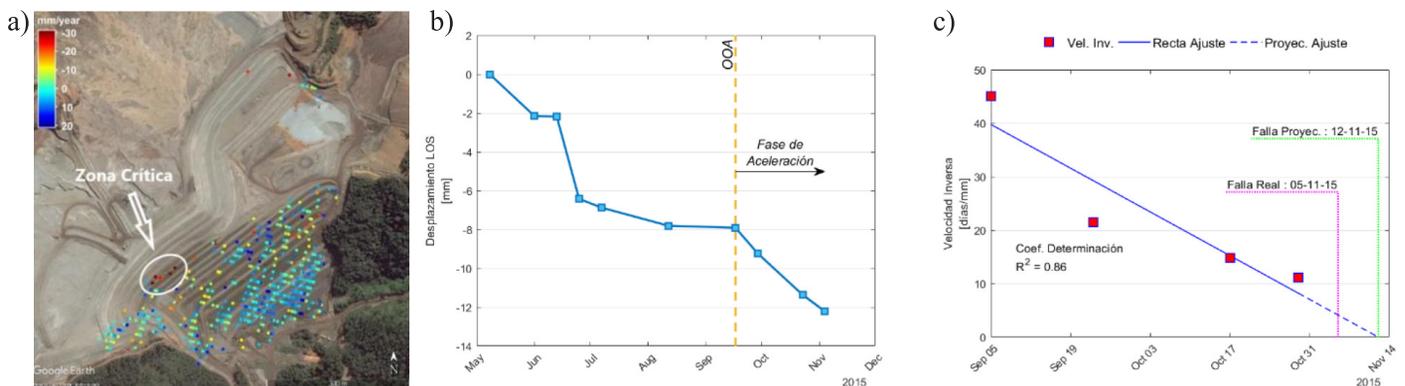


Figura 6: (a) Mapa PS InSAR de velocidad media de deformación, (b) deformación media acumulada y (c) velocidad inversa con proyección de falla en la zona crítica de la presa Fundão

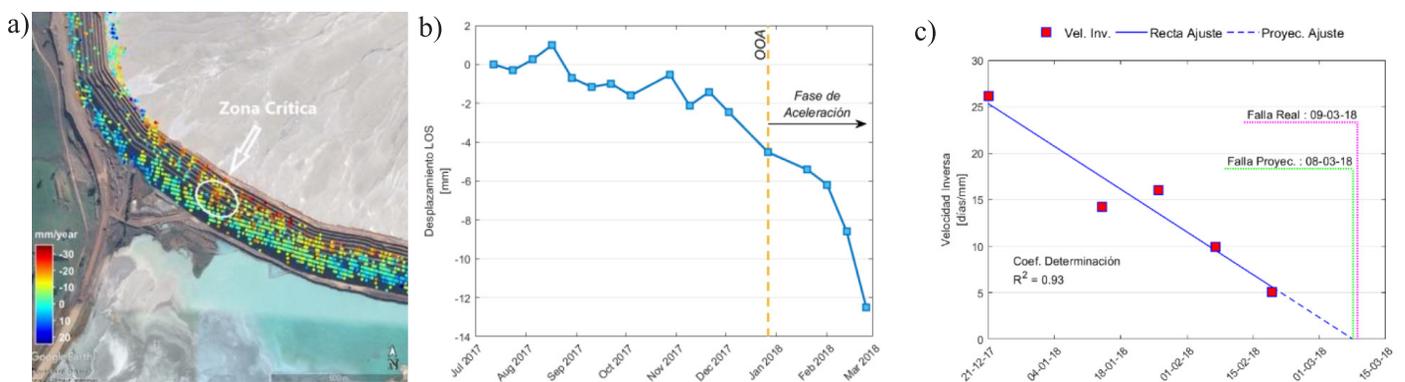
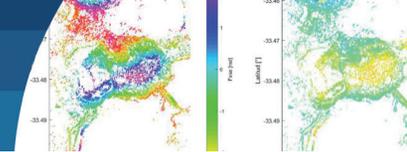


Figura 7: (a) Mapa PS InSAR de velocidad media de deformación, (b) deformación media acumulada y (c) Velocidad Inversa con proyección de falla en la zona crítica de la presa Norte.



grado de ajuste que posee la recta es un buen indicador de que se produjo una fase de aceleración en el talud del muro del tranque. La precisión de los resultados se debió en gran parte a la cantidad adecuada de imágenes utilizadas y a la alta densidad de PS conseguida en el sector analizado.

Presas I de Mina Córrego do Feijão (Brasil)

El colapso de la presa de relaves I de Feijão es otro de los grandes desastres ambientales y mineros producidos en Brasil y el mundo. El evento ocurrió el 25 de enero de 2019 y provocó la liberación de unos 9.7 Mm³ de relave (cerca del 75% del total de la presa), el cual fluyó destruyendo varias instalaciones de la mina, un puente ferroviario y poblados del distrito de Córrego do Feijão (Robertson *et al.*, 2019).

El reporte de la investigación técnica realizada por Robertson *et al.* (2019) concluye que el evento de falla ocurrió por una serie de causas que crearon en conjunto las condiciones de inestabilidad de la presa, inactiva desde julio de 2016, que finalmente sufrió la licuefacción de flujo de sus relaves.

Las Figuras 8(a)-(c) muestran los resultados del análisis PS InSAR con predicción de falla para el caso de la presa I.

Pese a la escasa cantidad de información recolectada con el método PS InSAR en el muro de la presa, en los resultados de este se detectó una diminuta zona con grandes tasas de asentamientos, situada en la parte superior del contrafuerte izquierdo (Figura 8(a)). Esta ubicación corresponde a la zona donde comenzó la falla del tranque (Robertson *et al.*, 2019). También se obtuvieron datos de deformaciones en

la superficie de la cubeta (gracias al prolongado periodo de inactividad en la instalación); en particular, se detectó una zona con altas tasas de descenso, correspondiente a la Zona N°2.

El gráfico de deformación media acumulada en la Zona N°2 mostrado en la Figura 8(b) presenta una tendencia de asentamientos generalizada, pero con cambios bruscos de pendiente entre agosto y octubre. Desde comienzos de diciembre se aprecia una posible fase de aceleración que continúa hasta el final de la curva. La Zona N°1, dados los altos niveles de ruido y la ausencia de aceleraciones, no se graficó.

La fecha obtenida en la predicción quedó 3 días por debajo de la fecha real de falla de la presa como se indica en la Figura 8(c), con un coeficiente R^2 de 0.71, valor insuficiente para asegurar la ocurrencia de una fase de aceleraciones previa a la falla. La gran dispersión presente en el gráfico de velocidad inversa probablemente se debió a la existencia de cobertura vegetal en la cubeta. Además, la estimación no se realizó en el muro de la presa, por lo que el análisis no sería concluyente aun con un buen ajuste de recta.

Conclusiones

El monitoreo de deformaciones superficiales busca supervisar la reacción de los depósitos de relave a la carga continua y detectar signos que preceden a las fallas de sus estructuras (deformaciones excesivas, tendencias de aceleración, etc.). Las técnicas DInSAR en ese aspecto son de gran utilidad para medir deformaciones ya que proveen información periódica de gran precisión, sobre grandes áreas, bajo diversas condiciones climáticas y sin necesidad de fuentes luminosas externas. En las últimas dos décadas,

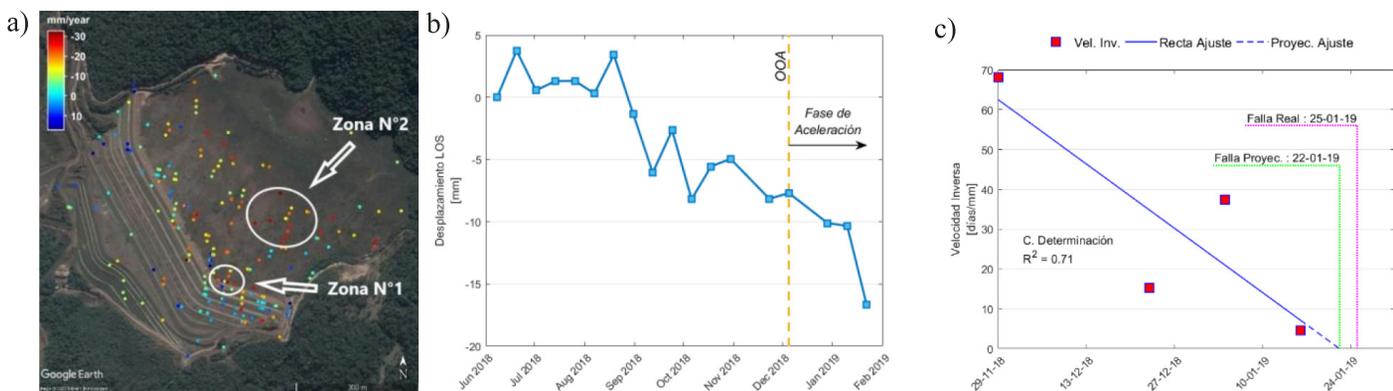
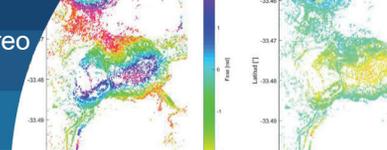


Figura 8: (a) Mapas PS InSAR de velocidad media de deformación, (b) deformación media acumulada y (c) Velocidad Inversa con proyección de falla en la zona N°2 de la presa I.



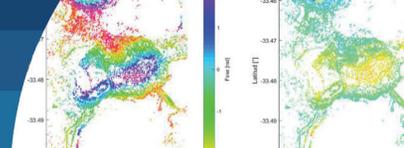
las técnicas DInSAR han experimentado grandes avances mediante el uso de grandes pilas de imágenes SAR capturadas sobre la misma área, originándose las técnicas avanzadas PSI que son actualmente las más utilizadas para la teledetección.

Las técnicas de teledetección satelital PSI (si se dispone de imágenes suficientes), demostraron ser bastante útiles y efectivas para el monitoreo de deformaciones superficiales en tranques de relaves: el uso de imágenes SAR Sentinel-1 y de los programas SNAP y StaMPS permitieron la obtención de resultados comparables con importantes estudios externos de entidades asociadas a la minería y la geotecnia. La gran variedad de misiones satelitales y su cobertura global, el acceso liberado a productos SAR y programas de procesamiento SAR, y los avances conseguidos en las técnicas DInSAR, permiten la realización de estudios detallados de desplazamientos superficiales en depósitos de relaves desde computadores convencionales. Aun así, cabe señalar que los métodos interferométricos de mapeo de desplazamientos requieren de la comprensión de sus fundamentos para la obtención de buenos resultados. Además, una interpretación completa de estos resultados requiere información y análisis de otros parámetros de caracterización de los depósitos (como humedad, ancho de playa, estado de construcción y deformaciones in-situ) y de la ocurrencia de fenómenos naturales (como lluvias y sismos).

La obtención de mejores resultados con las técnicas InSAR requerirán, a futuro, mejoras en los métodos de desenvolvimiento de fase, mejoras en la caracterización de la incertidumbre asociada con los componentes de procesamiento de datos, y un aumento de la capacidad de procesamiento de los algoritmos actuales. Por otro lado, la calidad de los resultados se verá siempre limitada por las propiedades de dispersión de las superficies. Actualmente, existen dispositivos llamados reflectores de esquina (*corner reflectors*), los cuales reflejan las señales radar directamente a la fuente emisora. Estos sencillos reflectores, que actúan como PS, se pueden instalar sobre los depósitos de relaves para asegurar un buen retorno de la señal y, por lo tanto, una buena medición de desplazamientos.

Referencias

- Bowker, L.N. and Chambers, D. (2015). The risk, public liability and economics of tailings storage facility failures. <http://www.csp2.org/files/reports/Bowker>
- Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F., Nolesini, T. Gigli, G. and Casagli, N. (2017). Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses. *Landslides* **14**(2), 517-534
- Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O. and Agudo, M. (2005). State-of-the-art of land deformation monitoring using differential SAR Interferometry. *ISPRS Workshop 2005: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. Hannover, Germany
- Dick, G.J., Eberhardt, E., Cabrejo-Liévano, A.G., Stead, D. and Rose, N.D. (2014). Development of an early-warning time-of-failure analysis methodology for open-pit mine slopes utilizing ground-based slope stability radar monitoring data. *Canadian Geotechnical Journal* **52**(4), 515-529
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39**(1), 8-20
- Fukuzono, T. (1985). A new method for predicting the failure time of a slope. *4th International Conference and Field Workshop on Landslides*, Tokyo, Japan, 145-150
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on Volcanoes and other natural terrains using InSAR Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters* **31**, 1-5
- Morgenstern, N., Jefferies, M., Van Zyl, D. and Wates, J. (2019). Report on NTSF Embankment Failure. Ashurst Australia, Independent Technical Review Board.
- Morgenstern, N., Vick, S., Viotti, C. and Watts, B. (2016). Report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam. Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP, Fundão Tailings Dam Review Panel.
- Mudd, G. (2007). Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability? *Resources Policy* **32**(1-2), 42-56
- Petley, D.N., Bulmer, M.H. and Murphy, W. (2002). Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology* **30**(8), 719-722



Robertson, P., de Melo, L., Williams, D. and Wilson, W. (2019). Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I. Vale, Expert Panel.

Roche, C., Thygesen, K. and Baker, E. (2017). Mine tailings storage: Safety is no accident. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi and Arendal: United Nations Environment Programme and GRID-Arendal.

Sánchez, C., Del Conte, S. and Verdugo, M.Á. (2019). Operational InSAR monitoring for tailings dams. *Tailings 2019: 6th International Seminar on Tailings Management*. Santiago, Chile

Vanden Berghe, J.-F., Ballard, J.-C., Wintgens, J.-F. and List, B. (2011). Geotechnical risks related to tailings dam operations. *Tailings and Mine Waste Conference*. University of British Columbia Library, Vancouver, Canada

Voight, B. (1989). A relation to describe rate-dependent material failure. *Science* **243**, 200-203