

APLICACIÓN DE LA INTERFEROMETRÍA PARA MEDICIÓN DE SUBSIDENCIA

# Tecnologías InSAR

## en El Teniente Rajo Sur

Por Alejandro Espinosa, División El Teniente; y Óscar Mora, Altamira Information.

**E**l proyecto Rajo Sur, consiste en explotar las reservas minerales ubicadas en el entorno al cráter de subsidencia que ha generado la explotación subterránea de la División El Teniente de Codelco Chile. Esta condición impone riesgos geomecánicos al proyecto que deben ser controlados a través del diseño minero y la implementación de planes para instrumentación y monitorización geomecánica.

Para generar una estrategia de control se requiere, por un lado, de un modelo conceptual del fenómeno de subsidencia, así como de los modos de falla que generan inestabilidades. Además, es preciso cuantificar los desplazamientos y su extensión para el cráter de sub-

sidencia y su entorno inmediato. El modelo fue construido a partir de observaciones en terreno y análisis sobre registros históricos, y la cuantificación de los desplazamientos se obtuvo por medio de la aplicación de las técnicas de análisis de datos a partir de registros InSAR. El resultado fue una zonificación para el descenso del fondo de cráter y una estimación para el borde "real" del borde de cráter, ambas en función de las deformaciones registradas.

**Las tecnologías InSAR** se componen de una serie de técnicas que utilizan **imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR)** para la creación de mapas topográficos del terreno y la **monitorización de movimientos** de la superficie.

### Tecnología

Las tecnologías InSAR se componen de una serie de técnicas que utilizan imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) para la creación de mapas topográficos del terreno y la monitorización de movimientos de la superficie. Teniendo en cuenta que el sistema radar a bordo del satélite realiza una medición de distancia, las monitorizaciones de movimiento se obtienen en la dirección de visualización, conocida como *Line Of Sight* (LOS) o Línea de

Vista. La Figura 1 muestra la componente de deformación LOS medida por el satélite utilizando una órbita determinada en caso de un movimiento vertical del terreno.

### Interferometría clásica y SPN

La interferometría clásica consiste en la combinación coherente de pares de imágenes SAR adquiridas en diferentes fechas, obteniendo un mapa de movimiento del terreno entre ambas

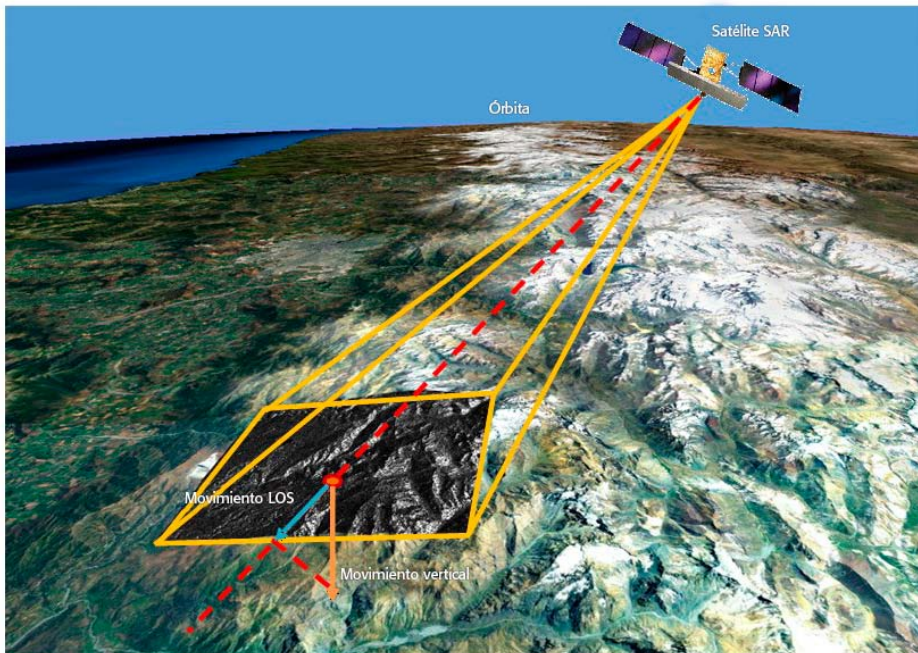


Figura 1: Geometría de adquisición de las imágenes SAR y componente LOS de movimiento medida por el satélite radar (imagen del globo terráqueo Copyright © 2009 I-cubed)

adquisiciones. Esta técnica se ve limitada por la influencia de la atmósfera y por el ruido de la señal radar debido a cambios en la naturaleza del terreno, por ejemplo por presencia de nieve. Por esta razón, su uso está restringido a fenómenos de deformaciones fuertes, donde la señal debida al movimiento es mucho mayor que la influencia atmosférica y otros factores de ruido.

Para conseguir medir con precisión milimétrica los movimientos del suelo Altamira Information, responsable del análisis InSAR del fenómeno de subsidencia en El Te-

de un mínimo de imágenes para seleccionar los puntos electromagnéticamente estables a lo largo del tiempo de estudio. El proceso de selección de estos puntos es determinante ya que son los que permiten calcular las deformaciones del suelo. El resultado principal es un mapa de deformación del terreno que indica para cada punto de medición el movimiento medio anual durante el periodo de análisis. Además, se obtienen las series temporales para cualquier punto de medición que indican la evolución de la deformación en función del tiempo.

**La aplicación de InSAR** permitió obtener registros de desplazamientos en un **horizonte de tiempo** de aproximadamente cinco meses, lo que permitió hacer estimaciones para la **velocidad de descenso y evolución** del borde de cráter.

niente utiliza la técnica denominada interferometría por red de puntos estables (*Stable Point Network*) o SPN. Esta técnica, desarrollada por la misma empresa, requiere

Mediante las técnicas de interferometría clásica y SPN se puede realizar una monitorización de los movimientos milimétricos y centimétricos. De todas formas,

entornos como la mina El Teniente están afectados por desplazamientos de intensidades mucho mayores, superando el metro de movimiento. Frente a esto Altamira desarrolló una técnica que, utilizando las imágenes radar, es capaz de capturar deformaciones métricas del terreno. La sensibilidad a la detección es inferior (del orden del metro para imágenes en banda X) a la Interferometría Clásica y SPN, pero permite medir movimientos sin límite de intensidad.

### Aplicación

La metodología adoptada para abordar la interacción entre la extracción de la mina subterránea y el proceso de subsidencia en superficie, está basado en los aspectos cualitativo, cuantitativo y funcional, como se esquematiza en la Error! Reference source not found..

Las mediciones InSAR son el aspecto cuantitativo que se hace cargo de la métrica para enlazar los aspectos conceptuales de subsidencia con aquellos que se hacen cargo de los aspectos funcionales y de operación. Con esta estructura, las mediciones InSAR permiten la evaluación en el mediano y largo plazo (mes/año) tanto del conocimiento que está disponible para los mecanismos de subsidencia, como para la efectividad de las medidas del control de riesgos.

Las mediciones fueron realizadas entre noviembre de 2010 y mayo de 2011, obteniéndose un total de 18 imágenes en 158 días de observación satelital sobre un área de 22 km<sup>2</sup>, que cubre el cráter de subsidencia y su entorno. El propósito del proyecto InSAR fue cuantificar las tasas de descenso y determinar la extensión del área en subsidencia.

Los resultados fueron una zonificación que identificó distintos valores para el descenso del fondo de cráter, los que pueden ser directamente correlacionados con

la extracción desde la mina subterránea y así obtener parámetros de planificación. El otro resultado relevante se obtiene en base a la medición de pequeñas deformaciones en la zona del borde de cráter que permiten anticipar cuales serán las zonas más propensas a evidenciar fallas de talud. Ambos resultados son de utilidad para la planificación minera de ambos métodos, así como para los sistemas de control de riesgos por inestabilidades geomecánicas. Las aplicaciones de técnicas de interferometría satelital están orientadas hacia medidas de control para el mediano-largo plazo a través de la identificación de zonas sometidas a distintos regímenes de desplazamientos. Con los registros y retro-análisis que se obtengan después de seis meses de mediciones, se harán las estimaciones de la expectativa de subsidencia para el período siguiente, en donde se anticipan tasas de descenso (ubicadas en función de los sectores con minería subterránea) y crecimiento del borde de cráter.

### Resultados de las mediciones

Los primeros resultados de mediciones InSAR para el proyecto, permitieron avanzar en dos grandes líneas de desarrollo:

La primera es que el crecimiento del borde de cráter estaría controlado por mecanismos de callamiento en taludes y no por la acción del fracturamiento inducido por la extracción subterránea. Lo segundo es que el fondo del cráter desciende a una tasa constante que puede llegar a valores medios del orden de 25 cm/día. Por lo tanto, la factibilidad técnica de utilizar esta superficie para el depósito de lastres quedaría sujeta a la relación que exista entre la velocidad de extracción desde la mina subterránea, la extensión del efecto en superficie, la constructibilidad de los botaderos y las medidas

#### Enfoque metodológico

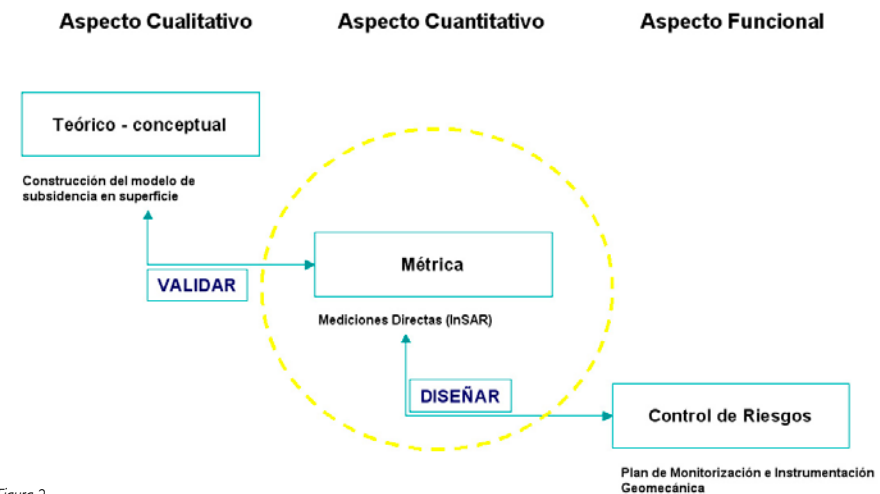


Figura 2

de control de riesgos que deben ser implementadas.

### Integración de datos InSAR y minería subterránea

Se espera que esta aplicación haga aportes fundamentales para la seguridad y planificación de la extracción integrada entre la mina Rajo Sur y la extracción subterránea. El producto que sería generado consiste en la superposición de los datos de extracción con la medición de deformaciones en superficie y de esta forma obtener parámetros que describan la subsidencia atribuible al proceso de extracción, todo esto considerando horizontes de tiempo comparables. La subsidencia sería descrita en términos de extensión (área en donde se miden desplazamientos) y magnitud (gradiente con la posición de los valores máximo y mínimo de los registros de desplazamiento en perfiles que representan la extensión de la subsidencia).

También es posible integrar los registros del InSAR con registros de actividad sísmica.

La continuidad extendida en el tiempo, para la adquisición de registros de desplazamientos en la zona de cráter, entregará datos numéricos que pueden ser utilizados

en la construcción/calibración y validación, de modelos numéricos que reproducen el fenómeno de subsidencia utilizando parámetros geológicos, geotécnicos y geomecánicos.

### Conclusiones

La aplicación de InSAR permitió obtener registros de desplazamientos en un horizonte de tiempo de aproximadamente cinco meses, lo que permitió hacer estimaciones para la velocidad de descenso y evolución del borde de cráter. Además, la aplicación de este sistema a un programa típico de instrumentación y monitorización geomecánica permite incorporar una visión global del campo de deformaciones que generalmente no está incorporada a escala de mediciones locales. Finalmente, el potencial que se vislumbra para esta aplicación en el desarrollo del proyecto Rajo Sur de la División El Teniente podría hacer factible el uso del cráter de subsidencia como superficie para la deposición de material de descarte. **mch**

**Alejandro Espinosa es ingeniero de la Gerencia de Desarrollo de Recursos Mineros División El Teniente; y Óscar Mora es director de Desarrollo de Nuevos Productos, de Altamira Information.**