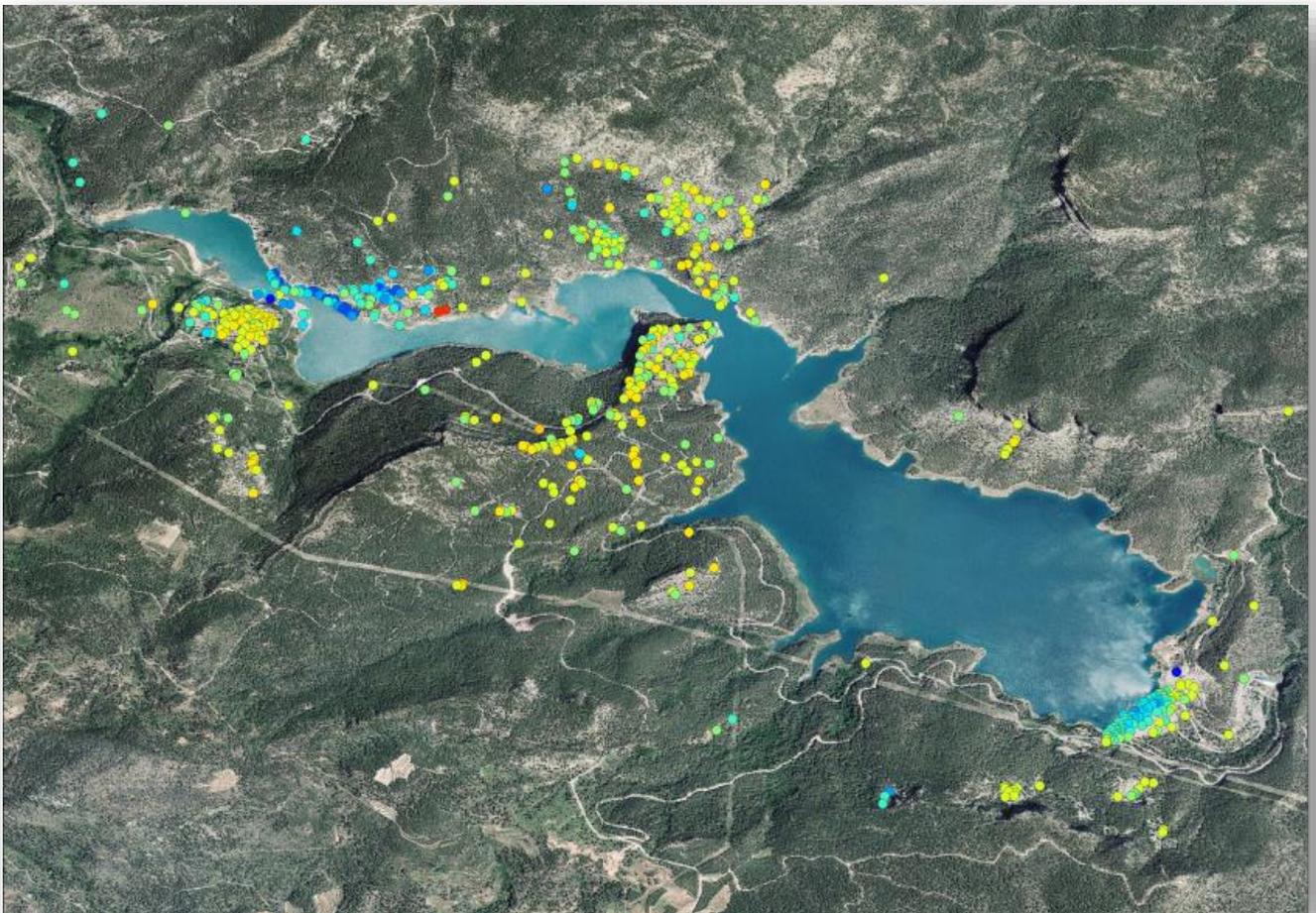


SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO



SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

METODOLOGÍA

A medida que las observaciones geodésicas de teledetección están cada vez más disponibles y la frecuencia de las adquisiciones de satélites continúa aumentando, las técnicas de monitorización desde el espacio han adquirido un papel relevante en una serie de sectores. La teledetección proporciona una forma no invasiva de mapear y monitorizar áreas pequeñas y grandes a un coste muy inferior en comparación con las técnicas de estudio convencionales mediante instrumentación in situ. Así, la información del movimiento del terreno y estructuras de las misiones espaciales se puede utilizar para optimizar los sistemas de medida convencionales al ayudar a priorizar y administrar la frecuencia y la densidad de las mediciones en campo.

El Radar de Apertura Sintética

El radar de apertura sintética (SAR) es un sistema de imágenes de microondas con capacidad de penetración en las nubes. Debido a la naturaleza activa de un radar, tiene capacidades operativas diurnas y nocturnas. SAR es una tecnología versátil, con su capacidad clave no solo para crear imágenes de características, sino también para proporcionar mediciones remotas en grandes áreas geográficas.

Un instrumento SAR transmite una señal electromagnética y registra la energía retrodispersada de la superficie terrestre. Los datos registrados se procesan en una imagen bidimensional en coordenadas de radar: una dimensión es el tiempo de viaje a lo largo de la órbita del satélite (tiempo de acimut) y la otra es la distancia de aproximación más cercana desde el satélite a cada píxel (rango inclinado).

La señal contenida en cada píxel es un valor complejo. El valor del píxel está relacionado con la suma de las señales retrodispersadas de todos los dispersores individuales dentro del píxel y nos proporciona:

- La amplitud: una medida de la intensidad de la dispersión del píxel
- La fase: una medida de la distancia desde el radar hasta el píxel

Ambas características juegan un papel importante en el contexto de la estimación del movimiento del suelo.

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

Interferometría SAR (InSAR)

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la señal de fase contiene la información necesaria sobre la distancia desde el satélite hasta el objetivo. Sin embargo, en la práctica solo es posible determinar la distancia absoluta entre el satélite y el objetivo con una precisión de una escala de decímetros y una exactitud comparable. Por lo tanto, las mediciones de alta precisión del movimiento absoluto del suelo no están disponibles directamente.

Sin embargo, mediante el uso de una técnica llamada Interferometría SAR (InSAR), podemos obtener información muy precisa sobre el movimiento relativo del suelo entre dos puntos en el suelo durante el período entre dos adquisiciones de imágenes. Esto se logra aprovechando el cambio de fase entre dos imágenes SAR adquiridas en la misma geometría satelital en diferentes momentos, lo que se conoce como interferograma. Mediante esta técnica, es posible derivar mapas de movimiento del suelo sobre grandes áreas con alta resolución espacial y precisión milimétrica.

Debido a la naturaleza periódica de la señal de fase, las distancias diferenciales que difieren en un múltiplo entero de la longitud de onda introducen exactamente el mismo cambio de fase. En otras palabras, la fase de la señal SAR es una medida de solo la última fracción de la distancia de viaje de ida y vuelta que es más pequeña que la longitud de onda transmitida. Esta ambigüedad de fase (es decir, envoltura de fase) es la fuente de uno de los desafíos más difíciles que enfrentan los sistemas de procesamiento interferométrico.

Detección de movimientos milimétricos con InSAR

Desde hace tiempo la interferometría de imágenes Radar aportadas por los sistemas satelitales SAR (Synthetic Aperture Radar) vienen siendo utilizados para la detección de cambios o desplazamientos tanto del terreno como de las estructuras.

Inicialmente, la aplicación de los métodos de Interferometría Diferencial (DinSAR) proporcionaban unos resultados que, en muchas ocasiones, no aportaban la precisión y fiabilidad suficiente para su utilización en el control de movimientos o subsidencias donde, las velocidades de desplazamiento se encuentran en el orden de milímetros/año.

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

A lo largo del tiempo, múltiples algoritmos interferométricos de tratamiento de las imágenes Radar han sido desarrollados con el fin de obtener cada vez unos resultados más precisos que permitieran el uso de esta valiosa información para el análisis y monitorización de movimientos.

Algoritmos Interferométricos:

La interferometría de imágenes radar de apertura sintética (InSAR), también conocida como interferometría SAR, es la medición del cambio de fase de señal o interferencia, a lo largo del tiempo. Cuando se mueve un punto en el suelo, la distancia entre el sensor y el punto en el suelo también cambia y, por lo tanto, el valor de fase registrado por un sensor SAR que vuela a lo largo de una órbita fija también se verá afectado.

El cambio en la fase de señal ($\Delta\varphi$) se puede expresar en la forma de la siguiente ecuación simple:

$$\Delta\varphi = 4\pi\Delta R / \lambda + \alpha$$

donde λ es la longitud de onda, ΔR es el desplazamiento y α es un cambio de fase debido a las diferentes condiciones atmosféricas en el momento de las dos adquisiciones de radar. Como consecuencia, cualquier desplazamiento de un objetivo de radar a lo largo de la línea de visión del satélite (LOS) crea un cambio de fase en la señal de radar que se puede detectar al comparar los valores de fase de dos imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos.

InSAR diferencial:

Cuando un par de imágenes se somete a un análisis interferométrico con el fin de identificar el movimiento y, luego, cuantificar ese movimiento, el proceso se denomina InSAR diferencial o DInSAR

Dado que el objetivo ahora es la detección de cambios, los efectos topográficos se compensan mediante el uso de un Modelo de elevación digital (DEM) del área de interés, creando lo que se conoce como interferograma diferencial

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

Una vez que se ha preparado el interferograma diferencial, se puede crear un mapa de deformación para todas las áreas que sean coherentes.

Técnicas basadas en Persistent Scatterers:

Las tecnologías de Persistente Scatterer Interferometry (PSI) son formas avanzadas de DInSAR. En otras palabras, el interferograma está en el núcleo de la PSI. La diferencia fundamental es que las tecnologías PSI desarrollan múltiples interferogramas a partir de una serie de imágenes de radar.

El principal impulsor para el desarrollo de PSI fue la necesidad de superar los errores introducidos en los valores de fase de señal por artefactos atmosféricos. Al examinar varias imágenes, generalmente un mínimo de 15 escenas, se generan muchos interferogramas (en este caso 14 interferogramas) seleccionando una de las escenas como maestra para la que las otras 14 escenas se convierten en esclavas.

El proceso mediante el cual se logra la eliminación de los efectos atmosféricos implica buscar en las imágenes y los interferogramas, píxeles que muestren una amplitud estable y una fase coherente en todas las imágenes del conjunto de datos. Se les conoce como Scatterers permanentes o persistentes. Por lo tanto, se identifica una cuadrícula escasa de objetivos puntuales caracterizados por altas relaciones señal / ruido (SNR) en un área de interés en la que se puede realizar el procedimiento de corrección atmosférica. Una vez que se eliminan estos errores, se puede crear un historial de movimiento para cada objetivo.

Un Scatterer permanente (PS) se define como un objetivo de radar, dentro de una celda de resolución, que muestra propiedades de amplitud estables y una fase de señal coherente, en todas las imágenes dentro de una pila de datos. A veces, un objetivo puede comportarse con una característica de amplitud estable, pero su fase es errática o no coherente. Además, algunos objetivos se comportan como si fueran PS pero solo dentro de una parte de las imágenes dentro de la pila de datos. Dichos objetivos no son PS.

Los objetos que hacen un buen PS son variados y pueden ser naturales o artificiales. Entre las formas naturales se encuentran: afloramientos rocosos, superficies de tierra duras sin vegetación y rocas. Entre los objetos hechos por el hombre se encuentran: edificios, farolas, torres de transmisión, parapetos de puentes, tuberías sobre el suelo, accesorios en presas y estructuras de techos, y cualquier estructura rectilínea que pueda crear una señal diédrica reflejada hacia el satélite.

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

Esta técnica PSI (Persistent Scatterers Interferometry) es de las más utilizadas hoy en día y es la que proporciona los mejores resultados para el mayor número de escenarios.

Cálculo del desplazamiento:

Todas las mediciones se realizan en el LOS (línea de visión) del haz de radar del satélite y son relativas a un punto que se preselecciona como estable y no se mueve (P0).

Una vez que los datos se han "limpiado", es posible desarrollar el historial de movimiento a través del AOI (Area of Interest). Esto se logra calculando secuencialmente el desplazamiento relativo entre un objetivo de radar individual y el punto de referencia, durante todo el periodo del análisis. Por lo tanto, la deformación es relativa en tiempo y espacio.

Los parámetros de calidad de la medición de un PS se calculan a medida que se desarrolla el patrón de deformación. Los factores más importantes que afectan la calidad de los datos son:

- Densidad espacial del PS (cuanto menor es la densidad, mayor es la barra de error).
- Calidad de los objetivos del radar (niveles de relación señal / ruido)

La fase de una señal SAR está influenciada por muchos más componentes además del movimiento del suelo. Para aislar el movimiento del suelo, los otros componentes de fase deben mitigarse, lo más importante:

- Variaciones atmosféricas (ionosfera y troposfera)
- Topografía
- Número de ciclos de fase

Algunos de estos componentes se pueden eliminar con información auxiliar, p. un modelo de elevación digital (DEM) que se puede usar para eliminar la influencia de la topografía, mientras que los datos del modelo meteorológico numérico se pueden usar para mitigar los efectos de las variaciones atmosféricas. Sin embargo, siempre nos quedarán algunos componentes que no se pueden modelar y, por lo tanto, deben estimarse a partir de los datos. Éstas incluyen:

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

- Contribución topográfica residual debido a la inexactitud del DEM, generalmente debido a que los edificios no están incluidos en el DEM. Esta contribución es necesaria para estimar la posición 3D correcta de cada píxel, que es una parte muy importante del producto final.
- Componentes atmosféricos turbulentos que no se pueden predecir con modelos meteorológicos.
- Componentes atmosféricos residuales de longitud de onda larga.
- Desenvolvimiento espacial y temporal de la señal de fase relacionada con el movimiento del suelo.

Usando ciertas suposiciones sobre las propiedades estadísticas de la contribución de la fase atmosférica, así como una suposición de suavidad sobre la señal de movimiento del suelo, es posible limitarse a un problema numérico solucionable. Un solo interferograma no es suficiente para esto. Por lo tanto, se requiere una serie temporal de imágenes SAR de la misma geometría satelital para:

- Capturar variaciones en la señal de movimiento del suelo a lo largo del tiempo.
- Utilizar de forma fiable las propiedades estadísticas de la atmósfera para la mitigación de errores.

Series temporales InSAR

Durante las últimas dos décadas, se han publicado una gran variedad de métodos de análisis de series temporales InSAR. En términos generales, estos se dividen en tres categorías principales, con diferentes características:

- Métodos para el análisis de dispersores puntuales (PS).
- Métodos para el análisis de dispersores distribuidos (DS).
- Métodos que explotan PS y DS

Estos métodos pueden emplear diferentes enfoques para el análisis de las series temporales, pero todos generan estimaciones del movimiento del suelo, que se pueden comparar. Sin

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

embargo, cada uno de los métodos posee inherentemente fortalezas y debilidades únicas, y ningún método puede proporcionar resultados óptimos para todos los casos de uso.

Se pueden identificar muchos mecanismos de dispersión diferentes en las imágenes SAR que pueden crear buenos objetivos de radar, adecuados para el análisis interferométrico. Los píxeles básicos que se originan a partir de la reflexión simple, doble o triédrica de materiales cuyas características electromagnéticas no varían con el tiempo (al menos en comparación con la duración del análisis InSAR) se denominan típicamente dispersores persistentes (persistent scatterers)

Así, los dispersores puntuales (PS) generalmente pertenecen a la familia de objetivos persistentes y corresponden a dispersores dominantes únicos dentro de sus celdas de resolución, que exhiben un valor muy estable de reflectividad. Muchos PS suelen estar disponibles en áreas urbanas y la mayoría de ellos corresponden a estructuras hechas por el hombre (postes, antenas, objetos metálicos, edificios, etc.).

Los dispersores distribuidos (DS), que exhiben una coherencia bastante buena en algunos interferogramas pero no en todos, se identifican en suelos homogéneos, afloramientos dispersos, flujos de escombros, tierras no cultivadas y áreas desérticas. Por lo general, corresponden a objetivos naturales y se originan en una multitud de centros de dispersión individuales distribuidos en un volumen o una superficie y solo pueden describirse en términos estadísticos. DS se caracteriza por valores de reflectividad más bajos en comparación con PS, pero su contenido de información se puede mejorar promediando espacialmente muestras vecinas con propiedades estadísticas similares.

Las técnicas de interferograma múltiple más recientes pueden identificar ambas familias de puntos de medición, PS y DS. Nos referimos a estas como técnicas híbridas de PS/DS. Las ventajas de agregar DS a los resultados de un análisis típico de PS

dependen del área de interés y del tipo de cobertura terrestre. La mejora es bastante modesta en áreas urbanas, donde la mayoría de los objetivos de radar adecuados para el análisis InSAR son deterministas y, por lo tanto, corresponden a PS, pero puede ser significativa en áreas no urbanas.

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

El servicio de movimientos del terreno

El resultado básico de los productos del servicio de detección de movimientos del terreno mediante técnicas InSAR es una base de datos de puntos de medición, cada uno con una serie temporal de mediciones del movimiento del suelo en la línea de visión en relación con un punto de referencia local y un tiempo de referencia determinado. Además, cada punto tiene metadatos asociados, incluida una posición 3D y otras anotaciones (vector de línea de visión, medidas de calidad, etc.).

ESPECIFICACIONES:

- Resolución espacial: Píxeles de 5 x 20 metros.
- Resolución temporal: Tiempo en que se actualiza la imagen SAR.
 - o Periodo de revisita máximo: 6 días.
 - o Periodo de revisita actual 12 días debido al fallo de Sentinel-1B.
- Precisión en la medida de desplazamientos: \approx 5 mm.
- Distancia máxima al punto de referencia: 10 km.
- Catálogo de imágenes Sentinel-1: desde 2015 hasta la actualidad.

LIMITACIONES:

Como cualquier otra técnica geodésica, InSAR tiene sus limitaciones. En esta sección se describen los más cruciales que deberán tenerse en cuenta en el contexto nuestros informes.

Geolocalización

Los puntos de medición en InSAR dependen de una gran cantidad de factores (por ejemplo, materiales, forma geométrica, orientación, etc.). La localización precisa de los puntos de medición es una parte necesaria de cualquier flujo de trabajo de procesamiento InSAR. Uno de los enigmas del análisis de series temporales de InSAR es que el movimiento del suelo está disponible con precisión milimétrica en condiciones favorables, mientras que no siempre se sabe bien qué objeto en el suelo se mide o dónde se encuentra exactamente. La

SERVICIOS DE TELEDETECCIÓN PARA LA EMISIÓN DE INFORMES DE MOVIMIENTO DEL TERRENO

incertidumbre de ubicación típica está en el intervalo de 1 a 15 metros, según la configuración del satélite.

Naturaleza relativa de la técnica

InSAR mide el movimiento relativo entre puntos en el suelo con una precisión muy alta, pero no puede medir directamente un movimiento absoluto. Esto implica que se necesitan datos externos para referenciar las estimaciones del movimiento del suelo a un marco de referencia absoluto. Por lo general, las redes GNSS se aprovechan para resolver este problema.

Limitación en la detección de movimientos

Un píxel se puede utilizar para la estimación del movimiento del suelo si los dispersores contribuyentes dentro de un solo píxel no cambian su posición relativa durante largos períodos con más de una fracción de la longitud de onda del radar (5,6 cm en el caso de Copernicus Sentinel-1 constelación), que se denomina dispersión coherente. Dichos objetivos suelen encontrarse en entornos urbanos, suelos desnudos y terreno rocoso. Por otro lado, los cuerpos de agua y la vegetación densa no serán posibles de medir.

Limitación en la estimación de la dirección del movimiento

Un radar solo mide la distancia desde la antena hasta el objetivo, no la dirección de donde proviene la señal. El movimiento en una dirección que no cambia la distancia desde el radar no es observable con precisión milimétrica. Esto significa que a partir de un solo análisis InSAR, solo podemos medir el cambio en la distancia, es decir, la componente de movimiento a lo largo de la dirección desde la antena hasta el objetivo, la llamada Línea de visión (LOS). Las estimaciones del movimiento del suelo son, por lo tanto, medidas en una componente unidimensional (1D) del verdadero movimiento tridimensional (3D). Sin embargo, dado que hay múltiples componentes 1D para cada ubicación, es posible derivar el movimiento en dos direcciones: vertical y este/oeste. Lamentablemente, los sensores SAR en órbitas polares son en gran medida insensibles al movimiento en dirección norte/sur.