



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura



**COAMSS
OPAMSS**
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCIA
PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL

Mapa de Dinámica Superficial en un área de al menos 25 km², priorizando sectores vulnerables

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Civil

Milan Lazecký
Jiří Šebesta
José Alexander Chavez H.



Proyecto financiado con fondos de la AACID y ejecutado por COAMSS/OPAMSS



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura



**COAMSS
OPAMSS**
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCIA
PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL



Índice

Introducción	3
Antecedentes	6
Metodología	12
Descripción de mapa y sus unidades	22
Conclusiones y Recomendaciones	32
Referencias	35

Introducción

El presente documento forma parte del proyecto denominado “Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el Área Metropolitana de San Salvador” fase II, financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID) y ejecutado por el COAMSS/OPAMSS, dentro del proyecto se desarrollará, mediante un convenio específico entre la Universidad de El Salvador a través de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, el estudio e investigación denominado “ACTIVIDADES DE MAPEO Y CAPACITACIÓN DE ESTUDIOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA GEOLÓGICA Y DINÁMICA SUPERFICIAL EN SECTORES DEL AMSS”.

La Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID), está comprometida con proyectos que se enmarquen dentro del ámbito de Cambio climático, sostenibilidad ambiental y hábitat, asimismo el ámbito de acción de la AACID es acorde a los objetivos del proyecto que busca promover ordenamiento territorial y apoyar la planificación y desarrollo urbanístico desde una perspectiva de sostenibilidad y de contribuir a la generación de procesos de desarrollo en las áreas geográficas prioritarias.

Asimismo con la ejecución del proyecto se busca contribuir a la implementación de los lineamientos establecidos en la Política Metropolitana de Desarrollo Urbano y Territorial (COAMSS/OPAMSS), cuyo objetivo es buscar una ciudad ambientalmente sustentable, siendo temas prioritarios la gestión del riesgo, específicamente en lo relativo a: Investigación, mitigación, conocimiento y reglamentación, profundizando temas como vulcanismo, microzonificación sísmica, estabilidad de laderas y taludes, lahares y modelos hidráulicos de los drenajes primarios.

Las geo-ciencias también aportan en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Nueva Agenda Urbana que buscan ciudades sostenibles y resilientes.

Los estudios y cartografía geológica, geomorfológica, así como de ingeniería geológica son un instrumento para comprender cómo y dónde los riesgos geológicos pueden afectar a los habitantes de determinada zona, siendo importante saber dónde están las mejores condiciones para el desarrollo de la ciudad. Este tipo de información proporciona datos importantes para la toma de decisiones de instituciones gubernamentales y para la planificación regional permitiendo encontrar un equilibrio entre el uso de los recursos naturales (aguas subterráneas, por ejemplo) para desarrollar las áreas no perturbadas por las amenazas geológicas, que en esta región es particularmente importante para el desarrollo integral de la capital, y de todo el país. El conocimiento de las condiciones geológicas es también importante para el uso de tecnologías de construcción adecuadas, para evitar pérdidas humanas y económicas cada vez que un evento natural afecta el país.

El AMSS está expuesto a procesos geológicos endógenos y exógenos que tienen un impacto importante en la pérdida de vidas y bienes materiales, así como en pérdidas económicas, ocurriendo problemas de este tipo en esta ciudad de manera recurrente.

Se presenta trabajos de dinámica superficial por medio de interferometría dando seguimiento a levantamiento realizado en la fase I, siendo zonas críticas el sector cercano a caldera de Ilopango, cuenca de las Cañas y Chagüite.

Entre los problemas que se observa frecuentemente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se pueden mencionar fenómenos como movimientos de ladera, inundaciones, terremotos, erosión intensa, intervención antrópica sin control, subsidencia o colapso y presencia de dos volcanes activos. Fenómenos como terremotos o huracanes hacen que el país retroceda en su desarrollo ya que se requieren elevadas sumas de dinero para la reconstrucción y dejan en la pobreza a las personas afectadas, siendo difícil que vuelvan a su nivel económico anterior.

Toda esta problemática podría ser reducida drásticamente si se conociera las características del territorio y se realizaran los estudios correspondientes cuando se proyecta una intervención antrópica; de manera que se pueda conocer de antemano la tecnología adecuada y las áreas en donde hay que tomar consideraciones puntuales.

En la actualidad en El Salvador hay escasez de profesionales preparados en las diferentes disciplinas de las ciencias de la tierra, se usa información de otros países o antigua. Esto produce poco conocimiento de temas como geotecnia, aguas subterráneas, sismicidad, geología, geomorfología, hidrología, riesgos etc. además de que no se trabaja a una escala adecuada. Esta situación se ve reflejada en la problemática que se vive actualmente en el AMSS ya que al no conocer el entorno natural o al tratar de bajar los costos evitando invertir en investigación, se puede llegar a tomar decisiones erradas que con el tiempo afectaran a un proyecto haciendo que la reparación sea más cara que si se hubiera hecho una investigación adecuada.

Actualmente son muchos los organismos que a nivel internacional apuestan a un desarrollo inclusivo y/o sostenible en el cual se priorice al ser humano como principio y fin del accionar. Estos enfoques que están siendo adoptados en El Salvador destacan por considerar la importancia de la interacción entre las diversas dimensiones del desarrollo: ambiental, sociocultural, económica, política e institucional.

Diferentes planteamientos coinciden en esta apuesta, entre ellos destacan el modelo de desarrollo inclusivo que ha venido implementando Japón en Centroamérica, los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y la Nueva Agenda Urbana promovida por ONU Hábitat.

Por su parte, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 hace alusión a la de trabajar por conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles; así como el objetivo 13 que promueve la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

La Nueva Agenda Urbana centra también su interés en la Ecología Urbana y Medio Ambiente por la necesidad de una mayor participación de todos los actores urbanos en la planificación del medio ambiente, acción por el clima, y la reducción del riesgo de desastres.

Sin embargo, aunque estos modelos resulten innovadores y visionarios cabe traer a cuenta la importancia de contar con información pormenorizada y de fácil comprensión que dé cuenta de datos concretos en un primer momento para conocer la situación actual de las

ciudades, la elaboración de propuestas, posterior toma de decisiones de parte de las autoridades y ejecución de acciones específicas que puedan realizarse en los territorios.

Como ejemplo, es clave conocer de manera preliminar el tipo de investigaciones que se requiere para abordar temas vinculados a las amenazas geológicas e hidrometeorológicas, pues esto permitiría tener claridad sobre el diseño, obras de mitigación o uso del suelo más recomendado. Un elemento a considerar es que la investigación de ingeniería geológica pueda ser comprensible, ya sea a través de mapas fáciles de interpretar para planificadores urbanos, constructores y agencias gubernamentales. El objetivo de los trabajos de ingeniería geológica es que información geológica, dinámica superficial, peligrosidad geológica y recomendaciones geotécnicas puedan representarse y agruparse en un área determinada, dependiendo de las características intrínsecas de cada zona. El grado de simplificación dependerá del propósito y escala del mapa, la precisión de la información y las técnicas de representación.

Muy importante conocer sectores de subsidencia o levantamiento ya que esto puede ayudar a identificar relación con problemas de denudación intensa, especialmente en la zona de Badlands (erosión intensa) y cerca de los bordes expresivos de laderas erosionales con procesos dinámicos. La erosión superficial afecta por toda el AMSS en mayor o menor medida. Otras formas y unidades geomorfológicas problemáticas son los movimientos de ladera, especialmente los flujos escombros.

Por lo tanto, para conocer los procesos geodinámicos es muy bueno conocer el desarrollo de relieve de AMSS en general.

Antecedentes

Los Sensores Remotos son sistemas de detección y medida a distancia, generalmente empleados desde aeronaves o satélites, con los que se obtiene información meteorológica, oceanográfica, sobre la cubierta vegetal, etc. Para tales medidas se utilizan sistemas de detección activos y pasivos

Las imágenes de satélite o Sensores Remotos se utilizan para observar lugares que son difíciles y costosos de alcanzar (como el centro de la Amazonía para monitorear la deforestación), o para áreas que son tan grandes que es imposible enviar un equipo de personas. Pero también se puede usar para retroceder en el tiempo y visualizar los cambios ocurridos hasta la fecha.

Radar es un acrónimo de Radio Detection And Ranging. En el contexto actual, sin embargo, el término radar se usa y abarca todos los sensores de microondas activos aplicados para detectar los atributos físicos de los objetos ubicados remotamente.

Básicamente, el radar opera según el principio de que microondas artificialmente generadas transmitidas en una dirección particular chocan con los objetos y se dispersan. La energía que rebota se recibe, amplifica y analiza para determinar ubicación, propiedades eléctricas y configuración de superficie de los objetos (Gupta, 2017). La interferometría es una de los métodos, que puede registrar los cambios dinámicos de la superficie, usando imágenes satelitales de origen diferente.

En la fase I de proyecto “Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social del AMSS” se obtuvieron imágenes de radar (InSAR) que indicaban el movimiento de la superficie del AMSS haciendo uso de interferometría, con imágenes de radar del periodo de 2006 al 2011 de ALOS (Advanced Land Observing Satellite), así como Sentinel 1 (C band synthetic aperture radar) de 2015-2018. Mostrando resultados preliminares que indican movimientos de la superficie en cuenca alta del río las Cañas y baja del Chagüite que podrían estar relacionados a tectónica o a disminución del nivel de acuífero por extracción de agua en pozos, esto podría ser una causa más de problemática de erosión intensa en el sector (erosión retrograda y cambios en intensidad).

Existen zonas dentro del AMSS que muestran un supuesto movimiento que hay que darle seguimiento, por ejemplo, hay sectores que muestra subsidencia (Changallo, Ilopango-parte oriental de aeropuerto) y otros que muestran elevación o surgencia (sectores de Santa Tecla, Apopa). Algunos sectores puntuales pueden estar reflejando cambios antrópicos por cortes, rellenos y construcciones nuevas. En sector de caldera de Ilopango, se recomienda seguimiento multidisciplinario a movimientos de subsidencia y tratar de relacionarlo con comportamiento normal del volcán/acuíferos o movimientos tectónicos de bloques diastrosicos. La problemática que ha estado ocurriendo en la cuenca de las Cañas de erosión y movimientos de ladera puede estar relacionada a movimientos de subsidencia del sector y

que también ha sido recogido por estación de GPS fija SSIA instalada en aeropuerto de Ilopango (Fig. 1).

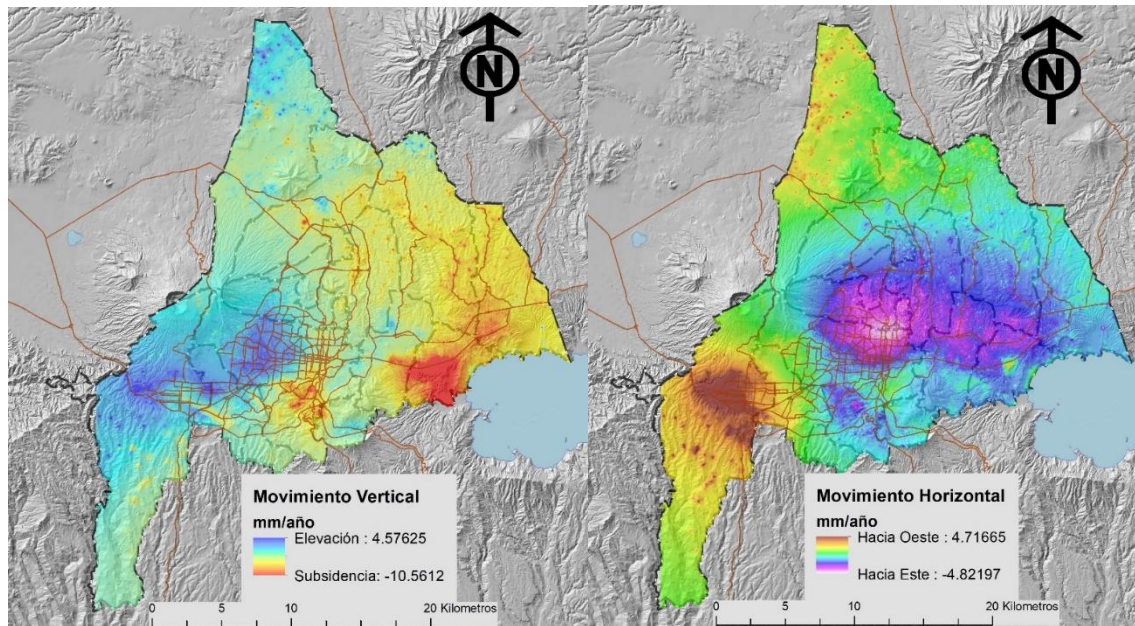


Fig. 1 Izquierda Mapa de Movimiento Vertical y a la derecha Mapa de Movimiento Horizontal de velocidades (mm/año) del AMSS diferencia de track 63 y 128, obtenido con InSAR periodo (2015-2018).

Los cambios importantes en los drenajes, que se dan en periodos muy cortos (incluso cada año) hace urgente la investigación de las causas y en base a eso qué medidas se pueden tomar; siendo importante tratar de comprender los procesos naturales, para la toma de mejores decisiones cuando se proyecten intervenciones antrópicas o medidas de mitigación estructurales o no. Es importante investigar sobre la influencia de la tectónica, clima, cambios en el nivel base y actividades antrópicas que podrían estar intensificando los procesos de denudación.

La influencia de la tectónica en el fenómeno erosivo de la cuenca no se ha cuantificado, pero Baxter (1995) y Chavez et al. (2014), reportan fallamiento a lo largo de las secciones de los cauces; incluso después del terremoto de 1986, habitantes de la zona narran que el río las Cañas cambio su curso (J. Chavez, com. pers., 2006). Esto se puede observar cuando se hacen recorrido en las quebradas del sector, donde es posible observar fracturas y fallamiento que hasta cierto punto controlan estructuralmente los ríos y quebradas.



Fig. 2 Situación de Río Chagüite (Ilopango) observándose fallamiento y cambios debido a intervención antrópica en sector

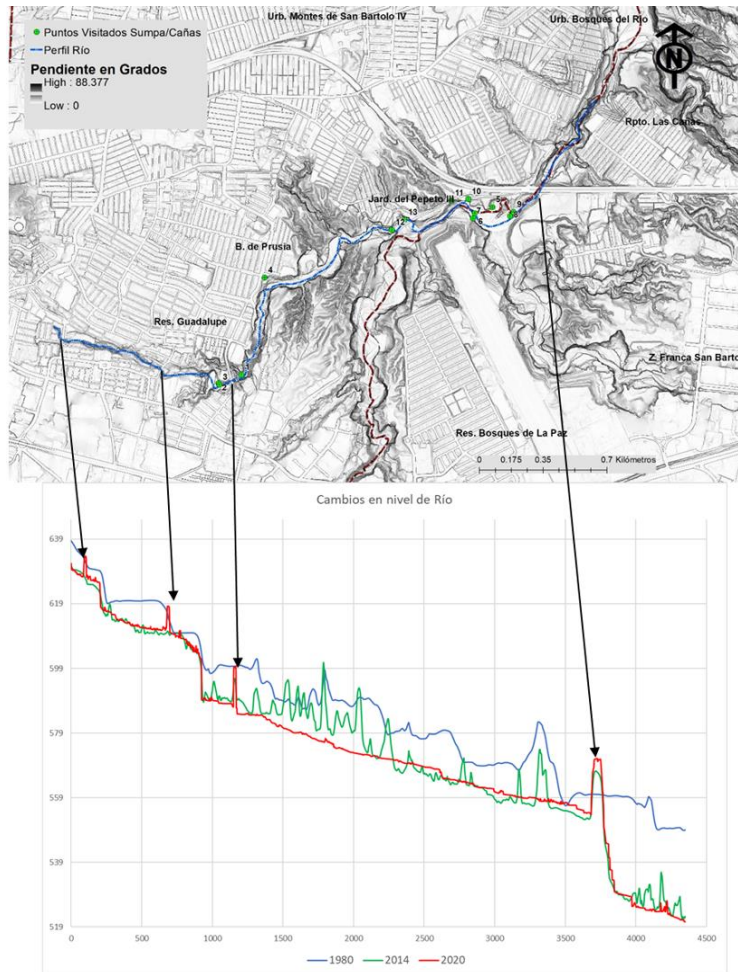


Fig. 3 Situación y cambios en perfil de río Sumpa



Fig. 4 Situación de Arenal Seco (Ilopango) observándose fallamiento y cambios debido a intervención antrópica en sector

La cuenca del río las Cañas y Chagüite han mostrado en las últimas décadas, procesos erosivos intensos tales como ensanchamiento y profundización del cauce; lo que se evidencia aún más en las visitas de campo y en el análisis de imágenes satelitales. Se puede interpretar que las obras hidráulicas como puentes, canalizaciones o bóvedas, repercuten en cambios drásticos en el perfil de equilibrio del río y quebradas, ya que subdividen el drenaje natural en diferentes porciones modificándose el nivel base; así mismo el drenaje luego de una intervención puntual busca alcanzar su perfil de equilibrio, manifestándose en ciclos constantes de erosión o sedimentación (Chávez et al. 2014). Muchos de los drenajes han pasado de transportar caudal solamente durante el periodo de invierno a transportar caudal en sus canales todos los días del año, debido a descargas de agua lluvia, grises y negras de las ciudades, teniendo su caudal máximo durante el invierno. A eso hay que agregar lluvias extremas y extracción de arena en el sector.



Fig. 5 Cambios en posición de drenaje y en humedad de sector oriente del AMSS (Sentinel 2)

Metodología

La Interferometría de Radar Satelital (InSAR) es una técnica que usa el efecto interferométrico de adquisiciones de radar satelital (SAR) tomadas en diferentes momentos para lograr una imagen (interferograma) sensible al movimiento del terreno que ocurre entre los tiempos de adquisición. Hay varios factores que afectan la señal SAR, incluyendo diferencias en el vapor atmosférico, sensibilidad estereoscópica a diferencias de altura, perturbación ionosférica de la señal, etc.

Debido a que la fuente de iluminación del radar es la energía de microondas, las señales de radar no se ven afectadas por oscuridad o nubes, en términos de visibilidad de la superficie terrestre. Las nubes impactan la precisión de InSAR pero no obstruyen el paso de la señal a través del medio. Por lo tanto, SAR puede funcionar las 24 horas del día, los 365 días del año.

Los sensores emiten señales con una frecuencia central específica. Además, los sistemas de radar son asociados con bandas específicas del espectro electromagnético. Los que se utilizan comúnmente en las aplicaciones InSAR son banda L (1-2 GHz, ~ 24 cm de longitud de onda), banda C (5-6 GHz, ~ 6 cm longitud de onda) y banda X (8-12 GHz, ~ 3 cm de longitud de onda).

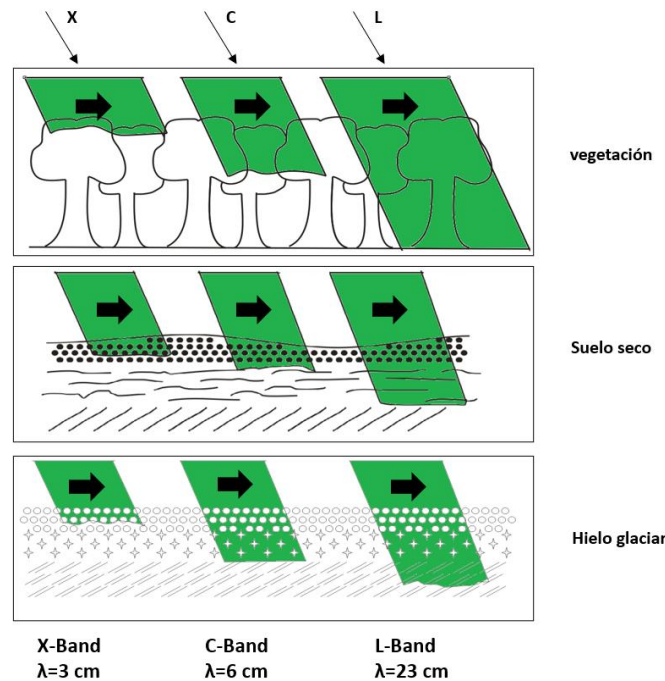


Fig. 6 Efecto de la Frecuencia

Las señales de radar se caracterizan por dos propiedades fundamentales: amplitud y fase.

La amplitud está relacionada con la energía de la señal retrodispersada. Cuando una señal sale del sensor de transmisión, se emite a un nivel de energía específico. Al alcanzar un objeto en la superficie del suelo, ese nivel de energía cambia dependiendo de una serie de circunstancias que se relacionan principalmente con la calidad reflectante del objeto. Objetos metálicos y duros (naturales y artificial) tienen una alta calidad reflectante y, por lo tanto, la amplitud de la señal reflejada será mucho más alta que el ruido de fondo del sistema. Materiales más blandos, como madera, los cultivos, el asfalto, tienen una menor capacidad para reflejar la energía incidente del radar y, por lo tanto, la amplitud de la señal reflejada es fuertemente disminuida. Las características de amplitud de las señales se pueden visualizar y una imagen de amplitud individual y aparece moteado (speckle). Esto se debe a que cada celda de resolución comprende muchos elementos de dispersión, todos reflejan las señales entrantes de vuelta al satélite con diferentes intensidades de señal y retrasos (fases) ligeramente diferentes, creando una apariencia irregular. De una imagen a la siguiente, el moteado (speckle) en las celdas de resolución correspondientes puede ser constante y puede variar. Niveles constantes de reflectividad, a menudo puntos brillantes, son indicadores de reflejos estables de señales de radar. Cuando el moteado (speckle) es variado, de una imagen a otra, los píxeles están descorrelacionados en el conjunto de datos y el moteado (speckle) se puede minimizar promediando la amplitud de todas las imágenes dentro de la pila.

Medir los verdaderos componentes verticales y horizontales del movimiento es difícil con una sola geometría de adquisición, a menos que se disponga de información a priori sobre el verdadero vector de movimiento (no una situación común!). Sin embargo, al usar datos ascendentes y descendentes juntos, es posible combinar la información de movimiento medida para obtener una estimación precisa del movimiento vertical y del componente Este-Oeste del movimiento (Fig. 7).

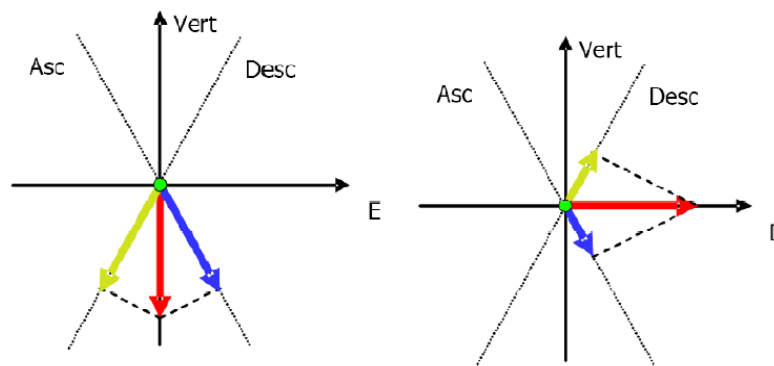


Fig. 7 Ilustración del método para obtener el movimiento real combinando información de órbita ascendente y descendente. En el caso de los desplazamientos verticales del suelo (imagen de la izquierda), el movimiento en las direcciones ascendente y descendente son ambos negativos (alejándose del sensor) mientras que en el caso de un movimiento horizontal (E-W) (imagen derecha) un vector es positivo (movimiento hacia el sensor) mientras que el otro es negativo.

La familia de satélites que llevan, o llevarán, sensores SAR para aplicaciones comerciales se ilustra en la Figura 8. Existen otros satélites portadores de SAR, pero se utilizan exclusivamente para aplicaciones militares.

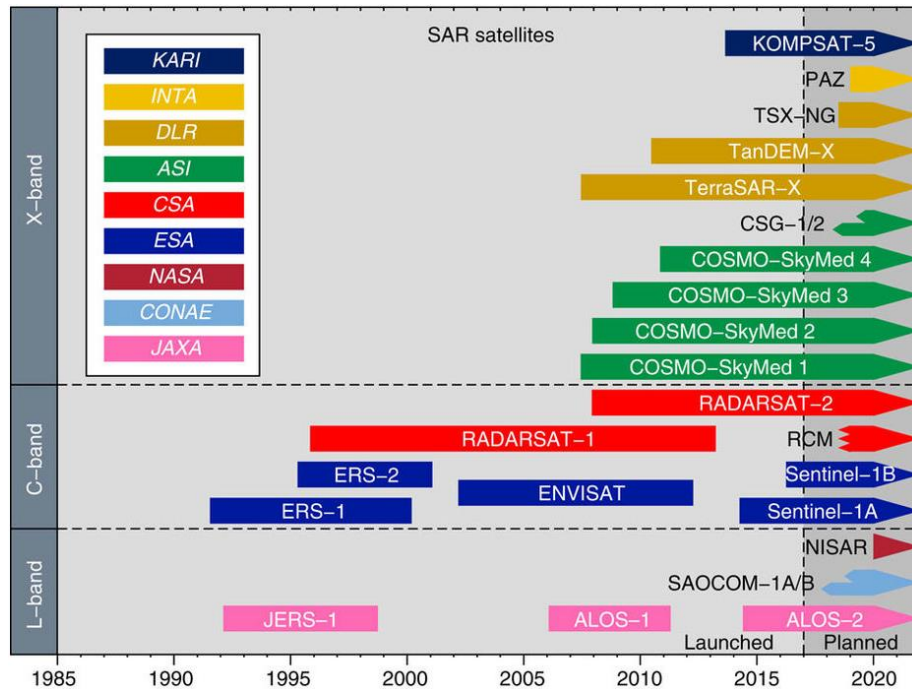


Fig. 8 Sistemas de radar satelital disponibles ahora

La técnica InSAR es ampliamente utilizada para investigación académica sobre deformación volcánica y tectónica ya que la sensibilidad de la señal SAR está el orden de milímetros. El uso de InSAR como una técnica de monitoreo operacional para observatorios de volcanes (por ejemplo, el sistema COMET LiCS) ha estado limitado por cuestiones tales como los tiempos de repetición orbital, la falta de datos archivados, la coherencia y los errores atmosféricos.

La Interferometría diferencial de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una poderosa técnica utilizada para detectar cambios relativos, del orden de unos pocos centímetros o incluso menos, que ocurre en la dirección vertical en la Tierra superficie (Gabriel et al. 1989). La técnica utiliza dos o más imágenes de SAR. El concepto básico se ilustra en Fig. 9. Los pases de satélite se procesan para producir dos interferogramas Luego, los dos interferogramas se diferencian para generar un interferograma diferencial. Esto representa cambios superficiales y movimientos que han tenido lugar en el período intermedio; por ejemplo, los que resultan debido a terremotos (Fig. 10), hundimiento del suelo, actividad volcánica, movimientos de ladera, etc. Si no se ha producido un cambio de superficie en el período intermedio, el interferograma diferencial muestra valores cercanos a cero en todo sector.

Hay que tomar en cuenta que las pendientes orientadas al Radar de Apertura Sintética aparecen comprimidas, las pendientes empinadas orientadas al Radar de Apertura Sintética conducen a imágenes fantasmas, las pendientes empinadas orientadas lejos del Radar de Apertura Sintética no reciben señal, también hay efectos de frecuencia y polarización. Esto hace necesario hacer correcciones y que en algunos sectores los resultados de imágenes de Radar no puedan mostrar información de cambios en superficie.

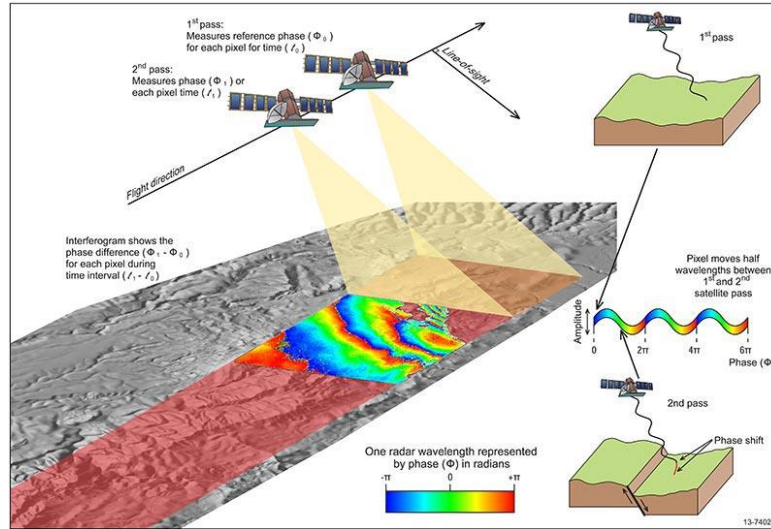


Fig. 9 Principio de interferometría diferencial SAR

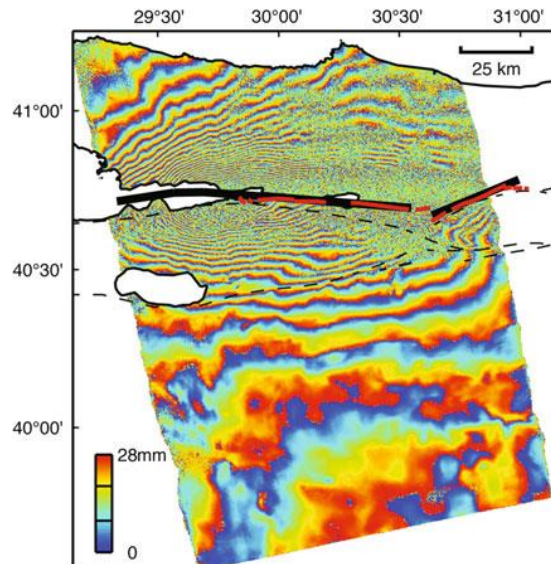


Fig. 10 Interferograma para el terremoto de Izmit, Turquía, 17 de agosto 1999 (generado a partir de imágenes de 13 de agosto de 1999 y el 17 de septiembre de 1999 par de imágenes ERS-2, con una línea base normal de 65 m). El evento ocurrió a lo largo la falla norte de Anatolia con desplazamiento lateral derecho; varias zonas de movimiento lateral pueden ser identificados fácilmente Cada color del interferograma representa 28 mm de movimiento vertical hacia el satélite (Gupta, 2017).

- El tiempo entre adquisiciones de imágenes (los intervalos de tiempo más largos conducen a una menor coherencia)
- La distancia entre las pistas de satélite durante la primera y segunda adquisición, también referido como la línea de base (las líneas de base más grandes conducen a una menor coherencia)

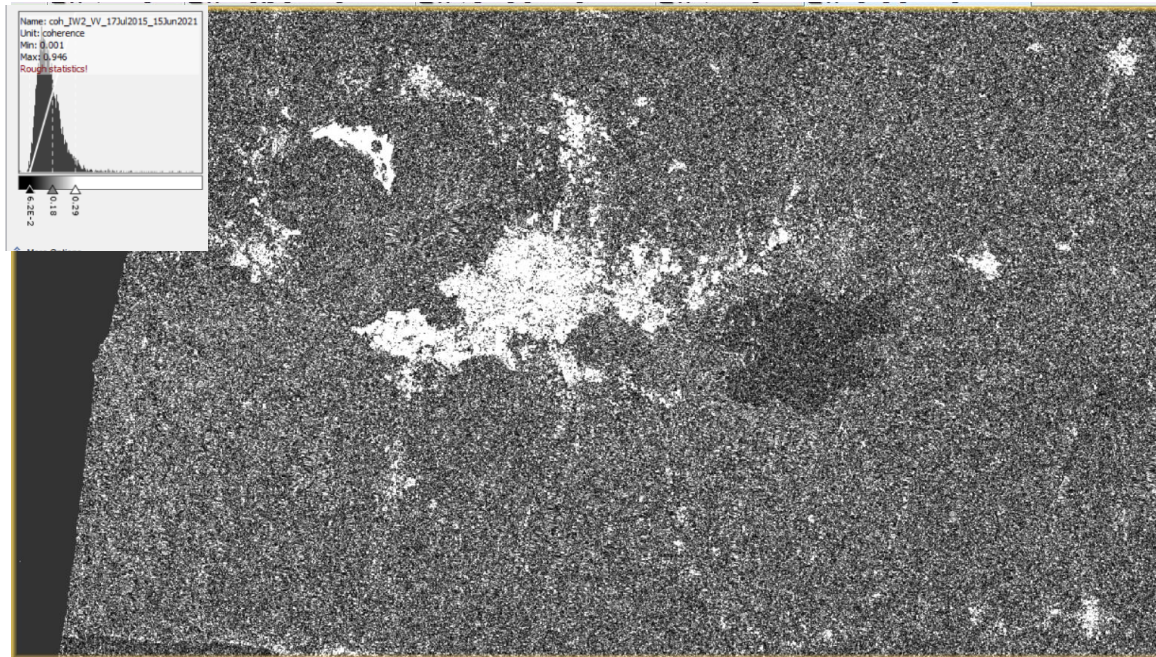


Fig. 12 valores de coherencia para AMSS (track 128, 2015-2021)

Tras la constatación de que los efectos atmosféricos sobre los valores de fase de la señal eran significativos, un método surgió a fines de la década de los 90 que buscaba mitigar este efecto "promediando" los datos dentro de múltiples interferogramas. Este proceso se denominó Apilamiento de interferogramas.

Al promediar los datos en una pila de interferogramas, los valores de la relación señal / ruido (SNR) son mejorados y, teóricamente, es más fácil extraer información sobre el desplazamiento durante períodos de mayor tiempo que son más realistas para el interferograma único DInSAR.

Existen varios enfoques para usar una gran cantidad de datos de imágenes de Radar (SAR) para lograr series de objetos corregidos en tiempo, tanto en entornos urbanos como naturales. Entre ellas se pueden mencionar el Persistent Scatterers (PS) que dan alta precisión de la estimación (<1 mm/año) (Ferretti et al. 2001) y Small Baselines (SB) que usa filtro espacial y usa más puntos (Berardino et al. 2002). Estas aplicaciones están basadas en una solución conocida como STAMPS MTI (Hooper et al. 2008) originalmente desarrollada para monitoreo de volcanes.

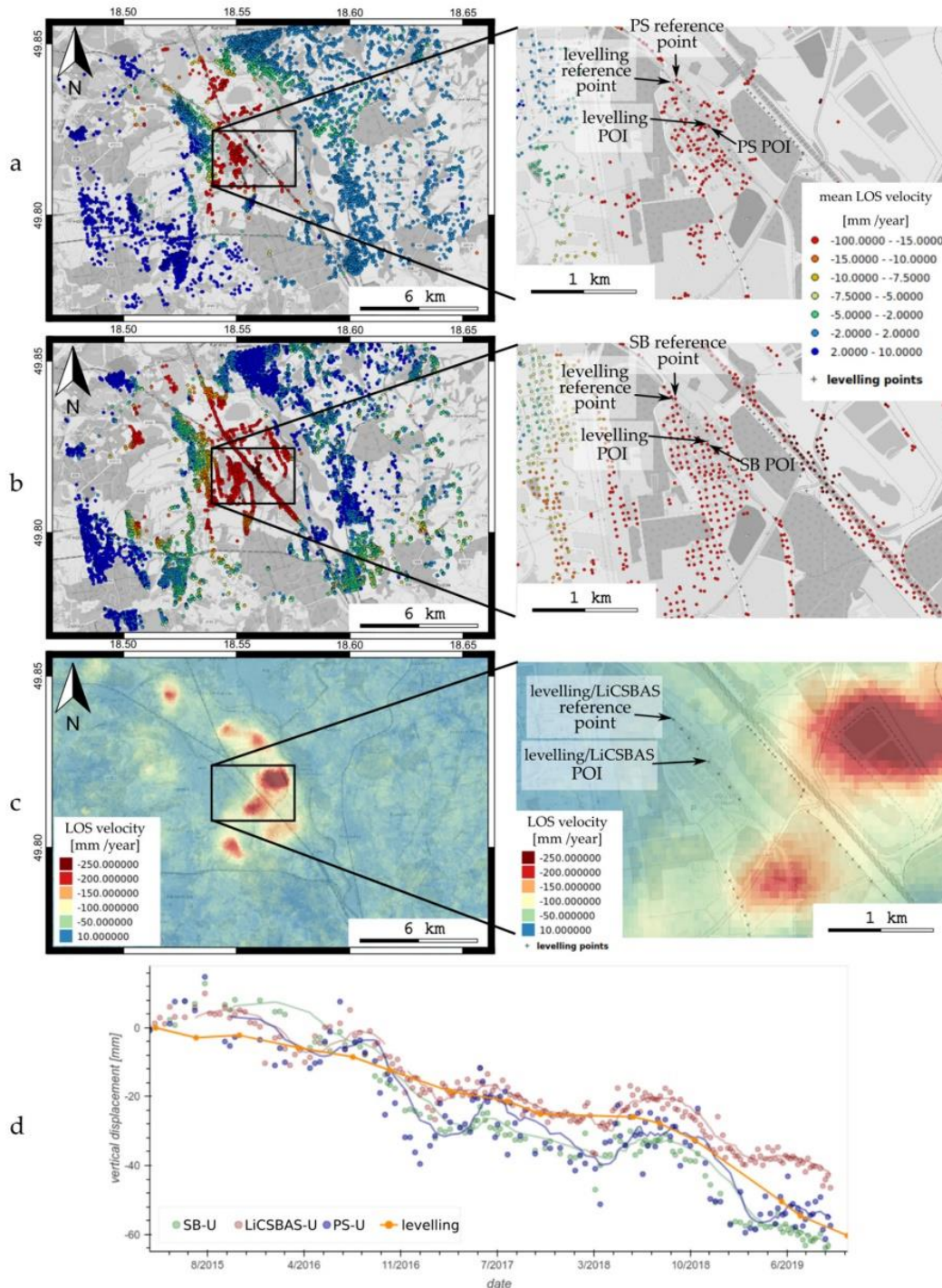


Fig. 13 Velocidad media estimada a partir de 220 imágenes (2015- 2019) utilizando (a) STAMPS PS, (b) STAMPS SB, (c) LiCSBAS NSBAS; (d) comparación de las mediciones de puntos de interés (POI) desde (a - c) recalculadas a la dirección vertical (U) y medidas de nivelación (Lazecký et al. 2020a)

Los objetivos principales del trabajo de interferometría, basados en la experiencia previa son el monitoreo de subsidencia, la identificación de deslizamientos (Lazecky et al. 2016), el monitoreo de desplazamientos de puentes (Lazecky et al. 2017b) y presas (Lazecky et al. 2017c). También puede servir para para medir la deformación inducida por diversos fenómenos geofísicos, incluido fases cosísmicas, postsísmicas e interseísmicas del ciclo de deformación sísmicas, movimientos volcánicos, deformación del terreno debido a actividades geotérmicas (Lazecký et al. 2020d).

Durante los últimos siete años, la constelación de dos satélites Sentinel-1 ha proporcionado datos abundantes y útiles de radar de apertura sintética (SAR), que tienen el potencial de revelar la deformación global de la superficie del suelo a altas resoluciones espaciales y temporales. La constelación de dos satélites Sentinel-1, operada por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del Programa Copernicus de la Comisión Europea, ha cambiado drásticamente la situación y las perspectivas de la explotación sistemática de los datos SAR. Sentinel-1 de forma rutinaria y frecuente (cada 6 o 12 días, dependiendo del área) adquiere datos sobre todas las áreas terrestres de la Tierra, con información ascendente y descendente adquirida en las regiones tectónicamente activas. Los datos se distribuyen libre y abiertamente en el marco de la Iniciativa Copérnico de la ESA para la observación de la Tierra.

Para este entregable se ha usado una cadena de procesamiento InSAR de última generación totalmente automatizada para datos Sentinel-1 desarrollada en el proyecto Looking Inside the Continents from Space (LiCS) del Centro de Observación y Modelización de Terremotos, Volcanes y Tectónica (COMET). El proyecto LiCS apunta principalmente a comprender cómo los continentes se deforman en todas las escalas espaciales y temporales, con un enfoque en el uso observaciones del ciclo de deformación del terremoto para comprender cómo se distribuye el peligro sísmico en espacio y tiempo. Para ello, se ha desarrollado un sistema automatizado de procesamiento InSAR, LiCSAR.

LiCSAR es capaz de procesar datos Sentinel-1 adquiridos globalmente, y que son productos de libre acceso y descargable a través de un portal en línea obteniendo interferogramas tanto envuelto (wrapped) como sin envolver (unwrapped), estimaciones de coherencia, series de tiempo y otros productos. Siendo un procesamiento algorítmico innovador y da soluciones de almacenamiento y que ha permitido reducir el tiempo de cómputo y el espacio en disco requerido (para más detalles de funcionamiento consultar Lazecký et al. 2020d).

Para aprovechar al máximo la gran cantidad de datos asociados en áreas amplias se ha desarrollado LiCSBAS, un paquete de análisis de series de tiempo de interferometría SAR (InSAR) de código abierto que se integra con el procesador automático Sentinel-1 InSAR (LiCSAR). LiCSBAS utiliza productos LiCSAR disponibles gratuitamente, y los usuarios pueden ahorrar tiempo de procesamiento y espacio en disco mientras obtienen los resultados del análisis de series de tiempo de InSAR. En el esquema de procesamiento

LiCSBAS, los interferogramas con muchos errores de desenvolvimiento se identifican automáticamente mediante el cierre del bucle y se eliminan. Se obtienen series de tiempo y velocidades fiables con la ayuda del enmascaramiento utilizando varios índices de ruido. La fácil implementación de correcciones atmosféricas para reducir el ruido se logra con el Servicio en línea de corrección atmosférica genérica para InSAR (GACOS).

LiCSBAS comienza con la descarga de los productos LiCSAR que cubren el área de interés (paso 0-1) y le sigue la conversión del formato de datos (paso 0-2). Corrección de ruido troposférico utilizando el servicio en línea de corrección atmosférica genérica externa para datos InSAR (GACOS) (paso 0-3) y enmascaramiento (paso 0-4) / recorte (paso 0-5) los datos no desenvueltos son pasos opcionales que pueden llevarse a cabo para mejorar la precisión y hacer que el procesamiento sea más eficiente. En el análisis de series de tiempo, los datos sin empaquetar correctamente, que degradan los resultados, se identifican y descartan basándose en la coherencia y cobertura de los datos sin empaquetar (Paso 1-1) y verificando el cierre del bucle (Paso 1-2). La pila refinada de datos no envueltos se invierte para obtener la serie de tiempo de desplazamiento y la velocidad (Paso 1-3), seguido de la estimación de la desviación estándar de velocidad (STD) (Paso 1-4) y el enmascaramiento de píxeles ruidosos en función de varios índices de ruido. (Paso 1-5). Finalmente, se aplica un filtro espacio-temporal a la serie de tiempo para mitigar el ruido residual y derivar la serie de tiempo filtrada y la velocidad (Paso 1-6). Todos los pasos se pueden ejecutar desde la línea de comandos o mediante un script por lotes con parámetros definidos. LiCSBAS está escrito en Python3 y Bourne Again Shell (bash) y funciona sin depender de ningún software comercial (Morishita et al. 2020) (Fig. 14)

Utilizando estudios de caso en el sur de Tohoku y la llanura de Echigo, Japón, se demuestra que LiCSBAS aplicado a los productos LiCSAR puede detectar desplazamientos relativos tanto a gran escala (> 100 km) como localizados (~ km) con una precisión de <1 cm / época y ~ 2 mm/año detectando desplazamientos con diferentes características temporales, incluyendo lineales, periódicos y episódicos, en Niigata, Ojiya y Sanjo City, respectivamente. Los productos LiCSBAS y LiCSAR facilitan una mayor explotación de los abundantes conjuntos de datos SAR disponibles a nivel mundial y mejoran sus aplicaciones para la investigación científica y el beneficio social. Los datos para el AMSS fueron procesados por LiCSBAS que es una implementación avanzada de la técnica NSBAS, que es nuevamente una modificación avanzada de la técnica SB / SBAS. El paquete New Small Baseline Subset (NSBAS) es una cadena de procesamiento completamente automática que produce un cronograma del movimiento de la superficie de la línea de visión sobre un área. Eso ha sido especialmente optimizado para el seguimiento de movimientos transitorios del suelo de pequeña amplitud, que tiene lugar sobre grandes áreas y en entornos naturales.

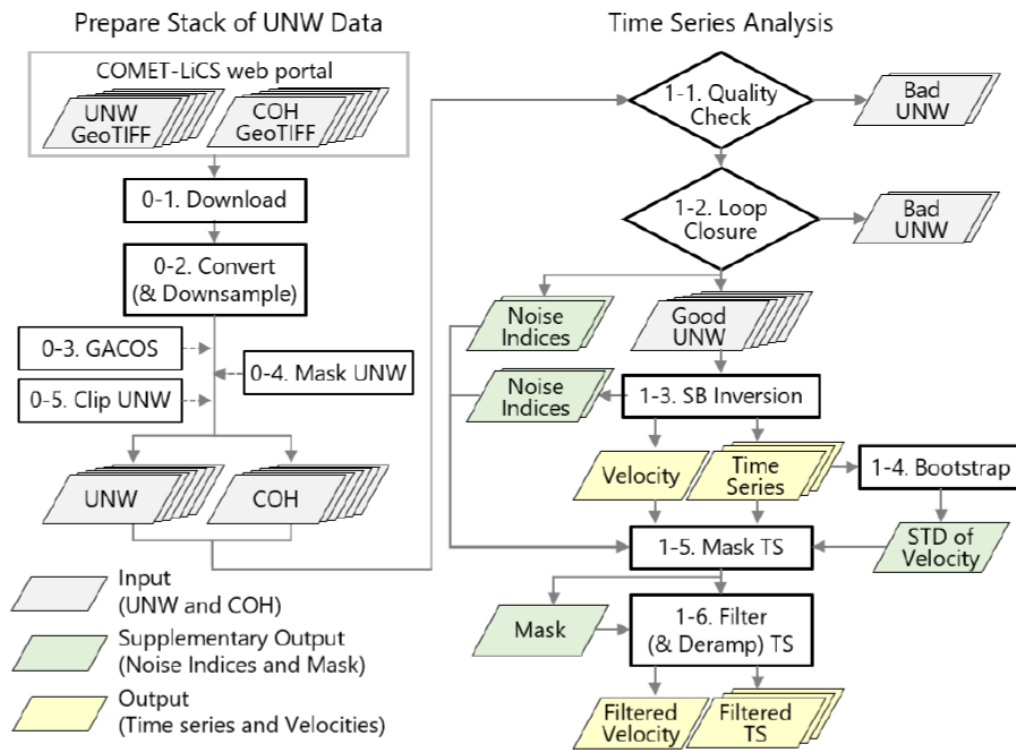


Fig. 14 Flujo de trabajo de LiCSBAS que comprende la preparación de fases interferométricas sin envolver (UNW) y datos de coherencia (COH) (Pasos 0-1 a 0-5) antes del análisis de series de tiempo (Pasos 1-1 a 1-6). Pasos opcionales para incorporar correcciones atmosféricas (Servicio en línea de corrección atmosférica genérica, GACOS); enmascaramiento y el recorte se indican mediante líneas discontinuas. Se realizan comprobaciones para interferogramas mal envueltos antes de la inversión de línea de base pequeña (SB) para generar velocidades y series de tiempo. Se calcula un rango de índices de ruido para enmascarar los puntos de datos con restricciones deficientes. Se producen más enmascaramiento y filtrado para generar los productos finales (Lazecký et al. 2020a).

En el pasado hubo muchos debates y comparaciones entre PS y SB. Se ha estado estudiando ambos, usando STAMPS. PS es realmente muy preciso y no es propenso a errores de desenvolvimiento espacial, especialmente cuando se usa un enfoque como SARPROZ pero se ha demostrado que no hay una gran diferencia entre STAMPS PS y SARPROZ PS. Y, al tener un conjunto de datos adecuado, no hay una gran diferencia entre STAMPS PS y STAMPS SB. LiCSBAS es avanzado y en la fase I del presente proyecto, se probó LiCSBAS en El Salvador para compararlo con resultados de PS y el resultado es muy similar. Se comparó LiCSBAS con PS también en un área minera en República Checa. Nuevamente similar, pero LiCSBAS puede extraer más puntos con una mayor tasa de deformación.

Descripción de mapa y sus unidades

Se va a enmascarar el resultado de LiCSBAS, para dar solo puntos altos de coherencia, es decir, área urbana, evitando píxeles con vegetación que puedan estar sesgados. Se hizo un análisis preliminar con una resolución de 1 km usando otro enfoque experimental para obtener datos también en áreas con más vegetación, aunque esto podría estar más sesgado (Fig. 15-17), pero la resolución de 100 m de los track 63 (ascendente) y 128 (descendente) de 2015 a 2021 dará mejor resultados como se muestra a continuación. Se compararán con datos obtenidos en fase 1 del proyecto para ver cambios u otros sectores de interés.

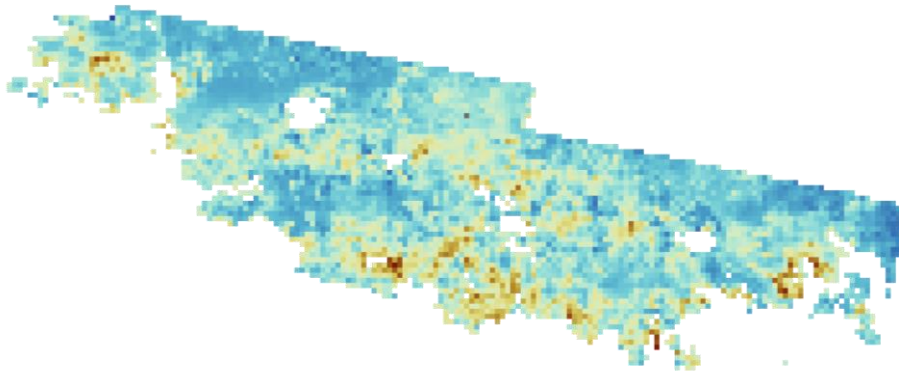


Fig. 15 Mapa de dinámica superficial con resolución de 1 km

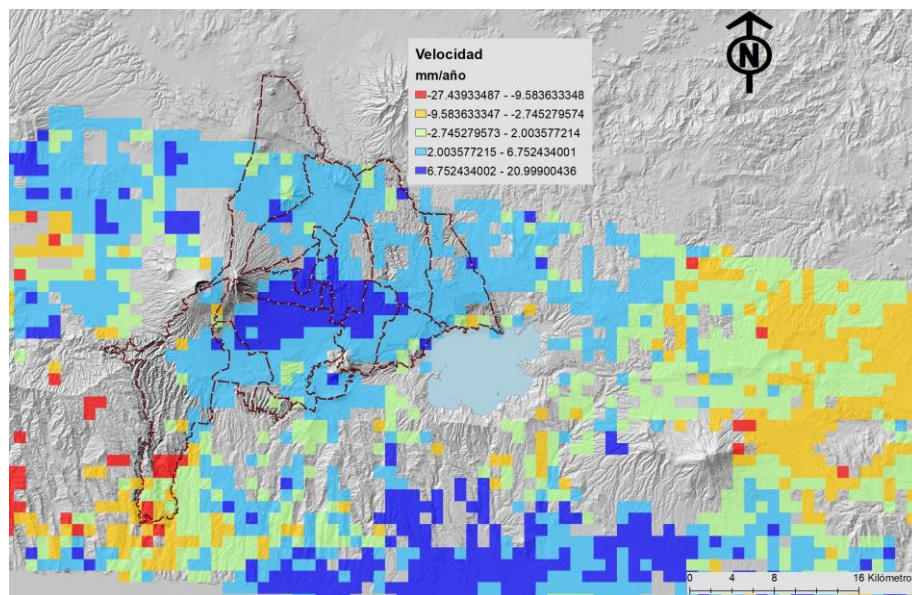


Fig. 16 Mapa de dinámica superficial con resolución de 1 km, la escala es de -30 mm / año. (rojo) a +20 (azul) mm / año.

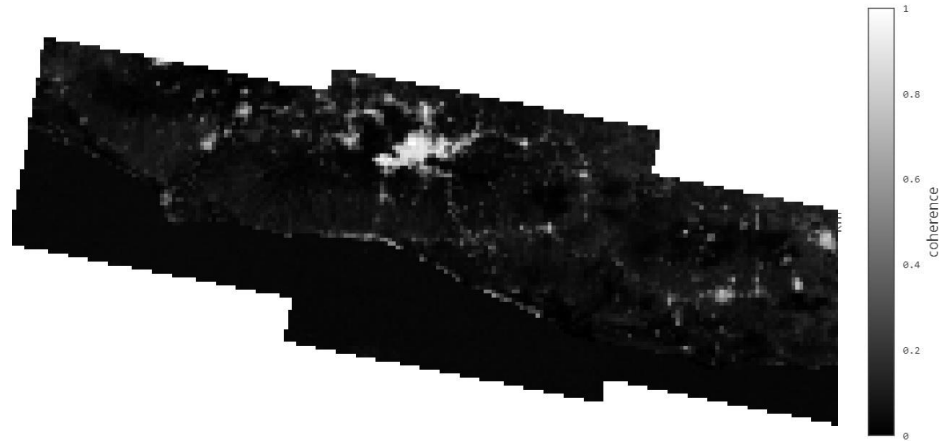


Fig. 17 Mapa de coherencia de resultados

Cuando un par de imágenes se somete a un análisis interferométrico con miras a identificar movimiento y, posteriormente, cuantificando ese movimiento, el proceso se conoce como InSAR Diferencial. Dado que la detección de cambios es el objetivo, los efectos topográficos se compensan utilizando un modelo de elevación digital (DEM) del área de interés, creando lo que se conoce como un interferograma diferencial (la palabra "diferencial" aquí se refiere a la resta de la contribución de la fase topográfica del interferograma SAR). Una vez preparado el interferograma diferencial, se puede crear un mapa de deformaciones para todas las áreas que son coherentes. A continuación se muestran resultados de DInSAR para el AMSS en tracks 128 y 63 para 2015-2021 (Fig. 18).

En la cadena de procesamiento LiCSAR, los interferogramas se producen automáticamente sobre una base de marco LiCSAR predefinida (que generalmente consta de 13 ráfagas en cada una de las tres sub-hileras para el modo IWS correspondientes a un área de $250 \text{ km} \times 250 \text{ km}$). Los datos recién adquiridos se registran conjuntamente en una única imagen primaria con el apoyo de una imagen secundaria auxiliar (más cercana en el tiempo a la imagen más reciente para preservar la coherencia) que ya se ha registrado conjuntamente (si está disponible) utilizando el método de diversidad espectral mejorada. Cada adquisición se utiliza luego para producir interferogramas, por defecto, con tres adquisiciones anteriores y tres posteriores, aunque este número podría incrementarse en el futuro. Los interferogramas son de múltiples enlaces, con un factor de 20×4 en el rango \times acimut (espaciado de $46 \times 56 \text{ m}$), respectivamente, y se filtran espacialmente para reducir el ruido utilizando un filtro de espectro de potencia adaptativo GAMMA con un valor alfa de 1. LiCSAR desenvuelve la fase en dos dimensiones utilizando un enfoque de costo estadístico con el software SNAPHU. Durante el desenvolvimiento de fase, las áreas descorrelacionadas en los interferogramas se enmascaran donde la estimación de coherencia de ruido de fase del interferograma filtrado es <0.5 . Los interferogramas envueltos y desenvueltos y las imágenes de coherencia se geocodifican con un espaciado de píxeles de 0.001 grados ($\sim 100 \text{ m}$) y se convierten al formato GeoTIFF. Los archivos GeoTIFF y las imágenes de vista rápida se publican en la web del portal COMET-LiCS

Sentinel-1 InSAR y están disponibles para su descarga gratuita. Otros metadatos (por ejemplo, vectores de línea de visión (LOS) y líneas de base perpendiculares) también están disponibles en el portal web COMET-LiCS (Fig. 19).

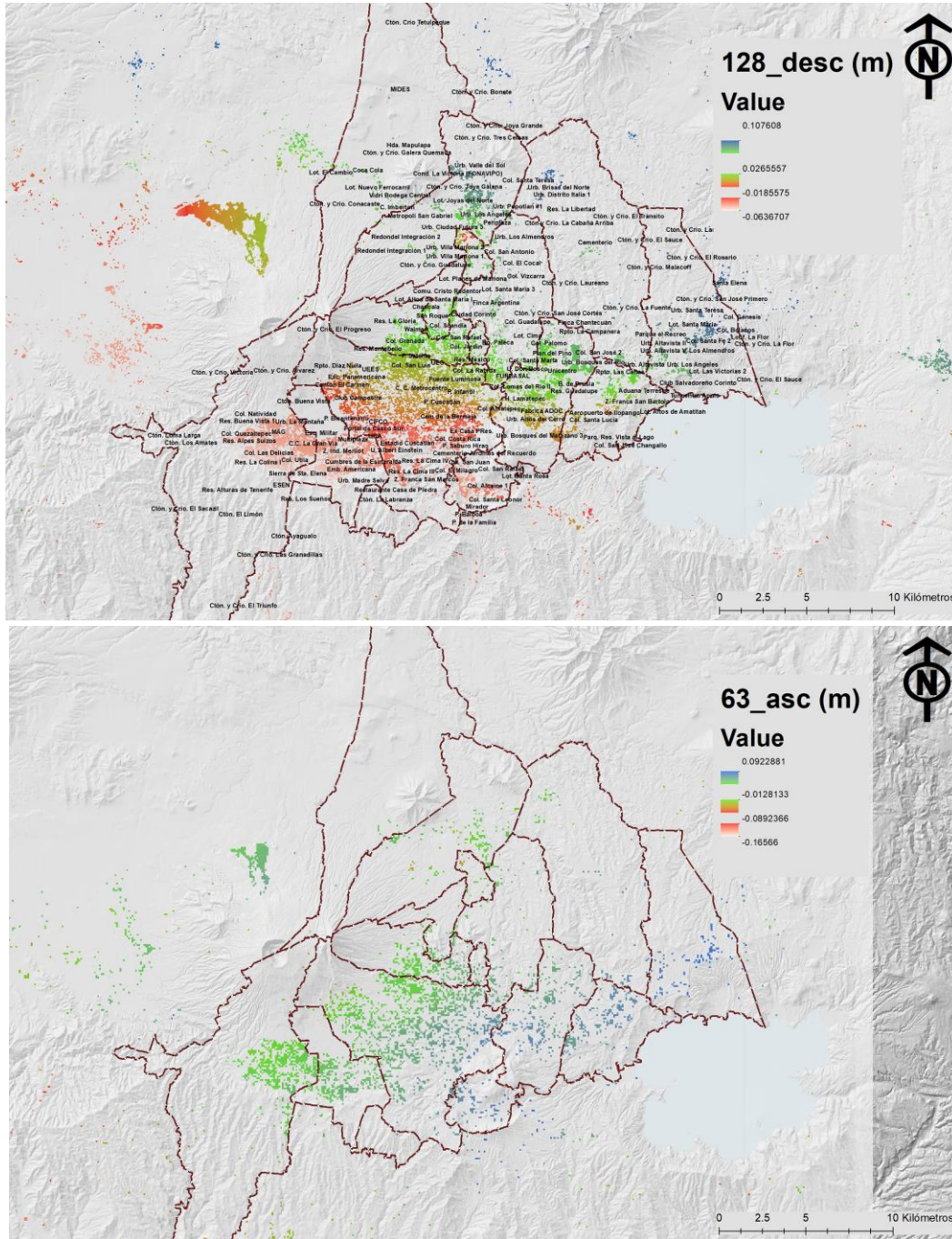


Fig. 18 DInSAR de AMSS tracks 128 y 63 para 2015-2021

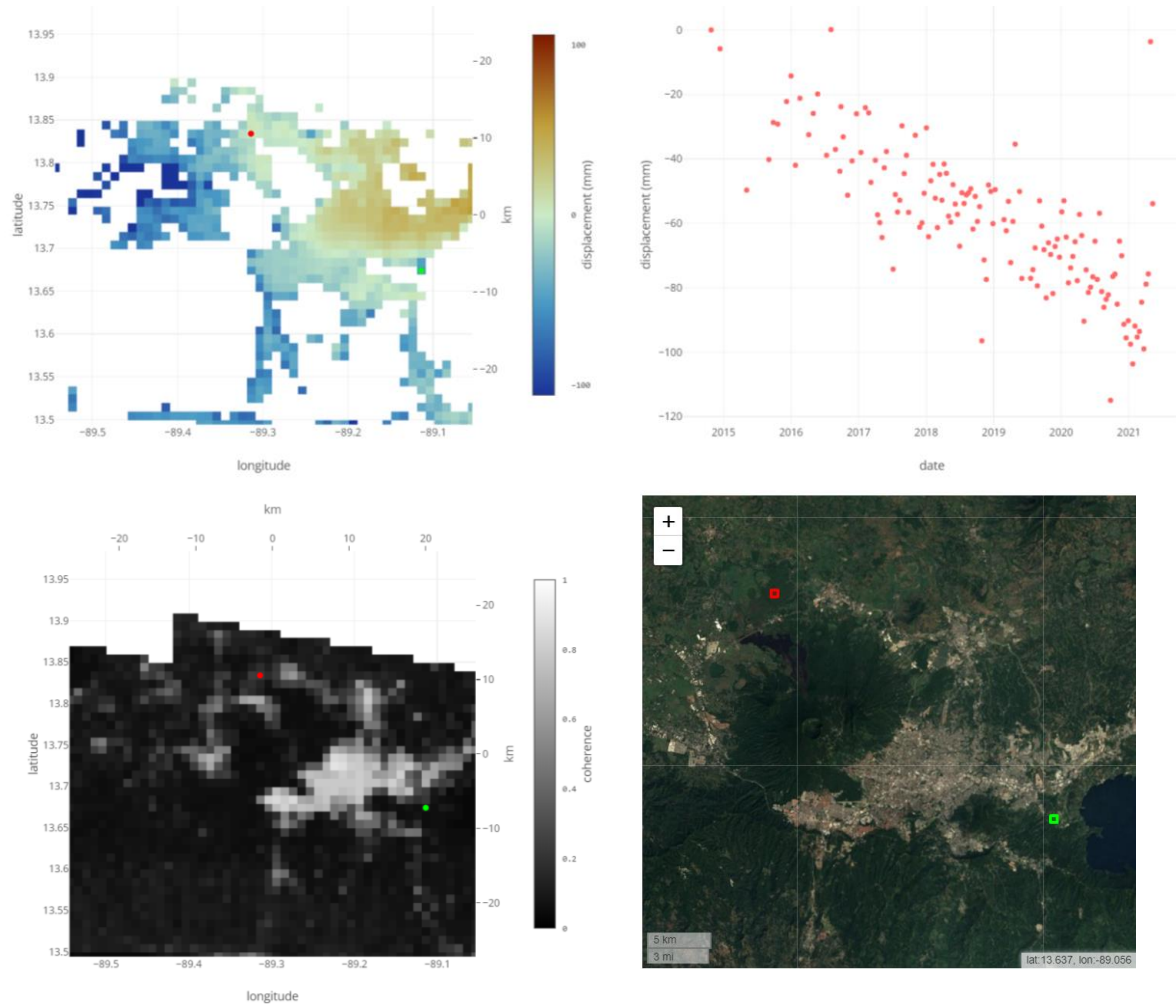


Fig. 19 Resultados de deformación con Sentinel 1 de pagina COMET Volcano Deformation Catalogue (1 km de resolución). Las series temporales se construyen utilizando LiCSBAS (Morishita et al. 2019), un paquete de series temporales de código abierto integrado con el procesador LiCSAR Sentinel-1 InSAR.

https://comet.nerc.ac.uk/comet-volcano-portal/volcano-index/M%C3%A9xico%20and%20Central%20America/El%20Salvador/San%20Salvador/S1_analysis

A continuación ya se muestran los resultados de resolución de 100 m (Fig, 20-23) con LICSBAS. Haciendo uso del conjunto de datos COMET LiCSAR (Lazecký et al. 2020d) disponible en El Salvador para realizar el análisis. Utilizando datos para los tracks o pistas Sentinel-1 ascendente (A) y descendente (D), 128D y 63A respectivamente. La principal diferencia en ambos tracks es la orientación de la línea de visión (LOS), mientras que en la pista A los satélites miran a la escena desde aproximadamente el Oeste (O), la pista D son observaciones desde aproximadamente el Este (E). En ambos casos, el ángulo de incidencia (un ángulo de visión desde los satélites a la escena, w.r.t. nadir) es de aproximadamente 39 grados, lo que implica una sensibilidad para los componentes de movimiento tanto vertical como horizontal. Ambos conjuntos de datos cubren el período entre 2015-2021. Se ha

utilizado toda la red disponible de 722 interferogramas para 128D y 472 interferogramas para 63A. También se ha importado correcciones de retardo troposférico utilizando el conjunto de datos GACOS (Yu et al. 2018). El conjunto de datos final permite una inversión InSAR basada en Small Baselines en 137 épocas temporales Sentinel-1 (fechas de imagen) de la pista 63A y 146 épocas temporales de la pista 128D. Utilizando el método LiCSBAS (Morishita et al. 2020) para esta operación. La red de interferogramas formados se muestra en la Fig. 20. Las estimaciones de velocidad de LOS resultantes se muestran en la Fig. 21 y 22 para ambas pistas por separado.

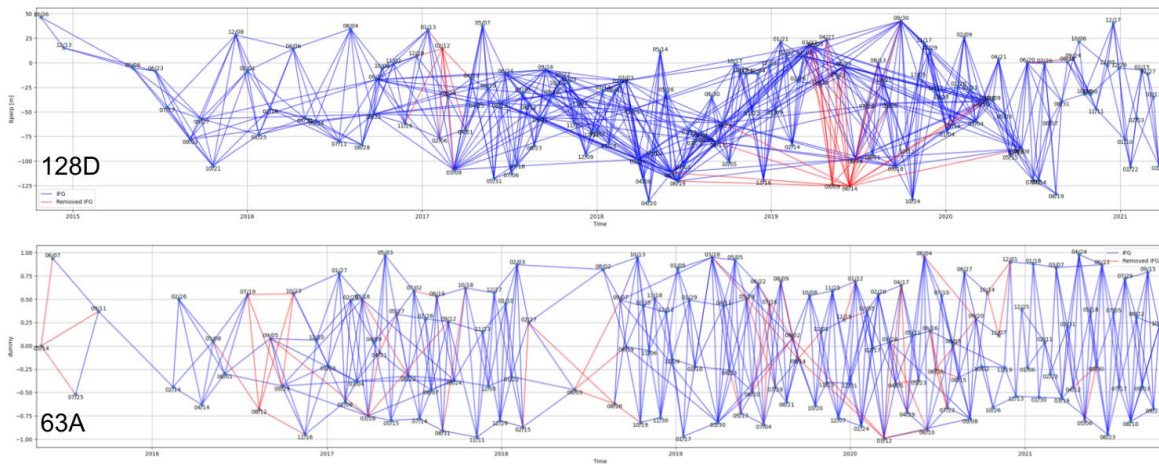


Fig. 20 Gráfico de red de interferogramas utilizados para el análisis.

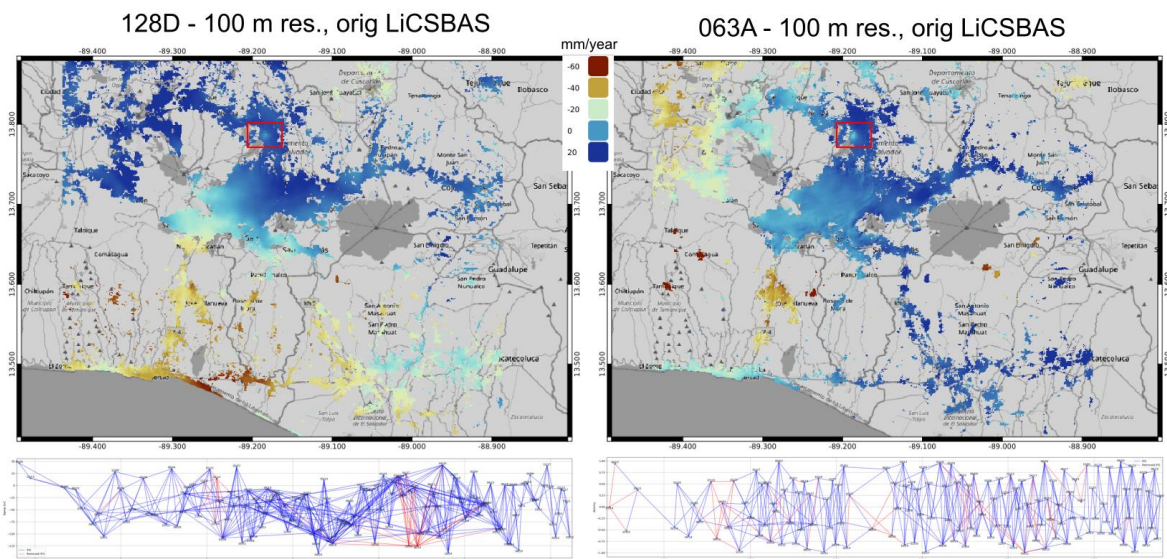


Fig. 21 Deformación LICSBAS de tracks 128 y 63, gráfico de la línea de base perpendicular

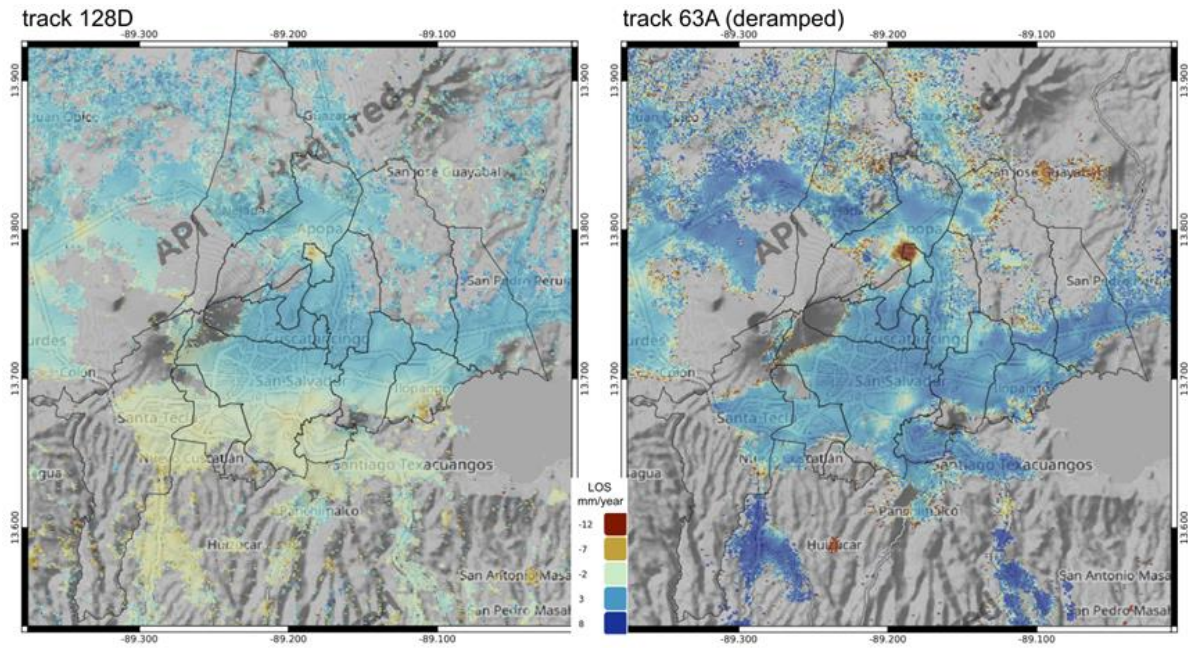


Fig. 22 Estimaciones de la velocidad de la línea de visión para ambas pistas

Descomposición de componentes de movimiento horizontal y vertical

La órbita casi polar de los satélites Sentinel-1 los hace particularmente insensibles al movimiento Norte-Sur. Sin embargo, es posible descomponer las estimaciones de velocidad de las líneas de visión de las trayectorias de satélites ascendentes y descendentes en componentes verticales (VU) y horizontales en la dirección E-O (VE). Para ello, se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_{asc} \\ V_{desc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{asc}) & \sin(\theta_{asc})\cos(\alpha_{asc}) \\ -\cos(\theta_{desc}) & \sin(\theta_{desc})\cos(\alpha_{desc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_U \\ V_E \end{bmatrix}$$

Donde V_{asc} y V_{desc} son las velocidades de línea de vista (LOS), θ en el ángulo de incidencia del radar, y α en el azimut de rumbo del satélite a lo largo de track.

Hay que tomar en cuenta que, dado que las mediciones de InSAR son relativas tanto en el espacio como en el tiempo, se ha relacionado los valores de velocidad de LOS originales con una mediana de todos los píxeles que tienen un alto valor de coherencia, que es una medida de la calidad interferométrica. Los píxeles de alta coherencia normalmente corresponden a áreas urbanas (sin vegetación). La vegetación a menudo induce errores en las mediciones de InSAR (la denominada descorrelación temporal). Aunque se aplicaron varias técnicas (en LiCSAR y LiCSBAS) para mitigar el efecto negativo de la descorrelación, es posible que algunas estimaciones de velocidad y series de tiempo todavía se vean afectadas por la presencia de vegetación y, por lo tanto, contengan errores de estimación. Además, debe tenerse en cuenta que la trayectoria ascendente se ve más afectada por la troposfera turbulenta (el tiempo de la tarde es más turbulento que el de la mañana; las trayectorias ascendentes se miden en la tarde, mientras que las pistas D en las primeras horas de la mañana, Fig. 23). Por lo tanto, ambas velocidades de LOS pueden diferir y, por lo tanto, causar valores incorrectos en las estimaciones de movimiento horizontal. Por lo tanto, se recomienda una interpretación adicional con el apoyo de otros datos existentes. Aun así, gracias a un número relativamente alto de mediciones satelitales que conducen a estos resultados, se puede considerar estos resultados precisos para los propósitos de este proyecto.

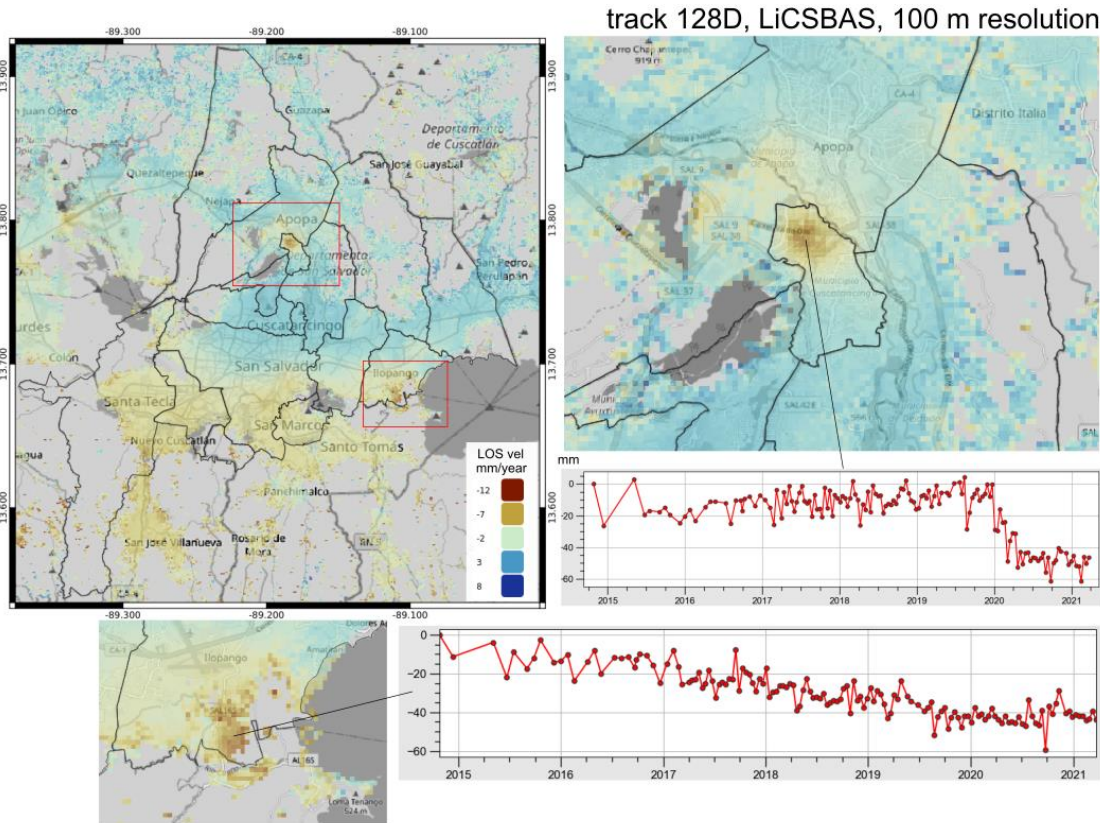


Fig. 23 Deformación LICSBAS de tracks 128, con gráfico de sectores con subsidencia

Al combinar los tracks 128 y 63 (Fig. 7 y 24) se representa los resultados finales de la descomposición (movimiento vertical y horizontal). También se muestra para 3 áreas seleccionadas que se presentan en figuras adicionales (Fig. 25-27), mostrando tasas de movimiento vertical y horizontal estimadas a partir de las observaciones del satélite InSAR, así como series de tiempo de un punto seleccionado a partir de las mediciones originales de ambas pistas.

Hay sectores de Cuscatancingo y de Ilopango muestran subsidencia, la cual podría deberse a aspectos tectónicos o de extracción de agua por medio de pozos.

La zona de Cuscatancingo y Apopa aparecen como de reciente movimiento; zona de Ilopango pareciera que ha mostrado cierto equilibrio pero todavía muestra subsidencia. Otros sectores de otros municipios así como los detallados anteriormente será interesante conocer su relación con aguas subterráneas, tectónica e intervenciones antrópicas. Esta información es muy útil para hacer gestión de riesgos prospectiva e identificar zonas de interés y que hay que dar seguimiento.

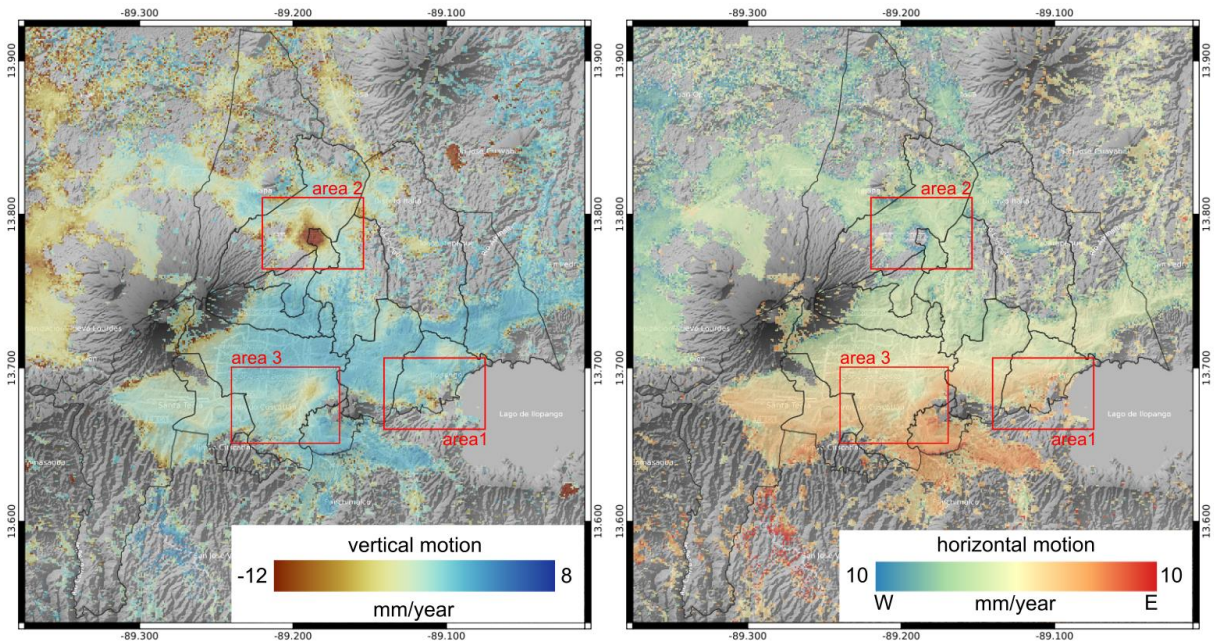


Fig. 24 Estimaciones de velocidad vertical y E-W después de la descomposición de las velocidades LOS. LICSBAS de combinación de tracks 128 y 63.

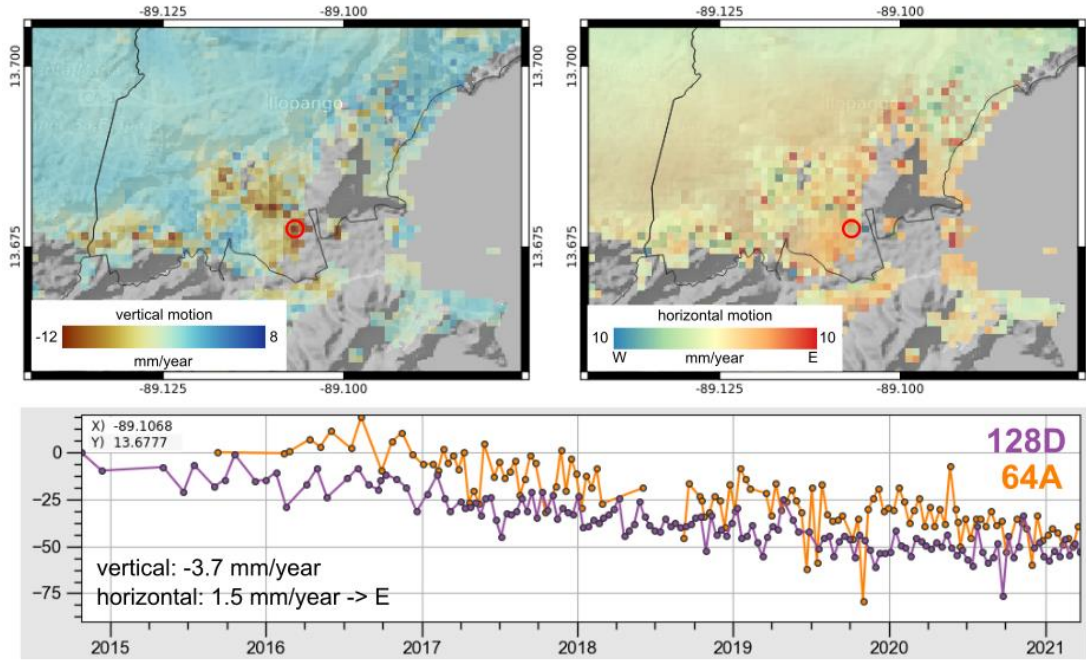


Fig. 25 Zoom de área 1

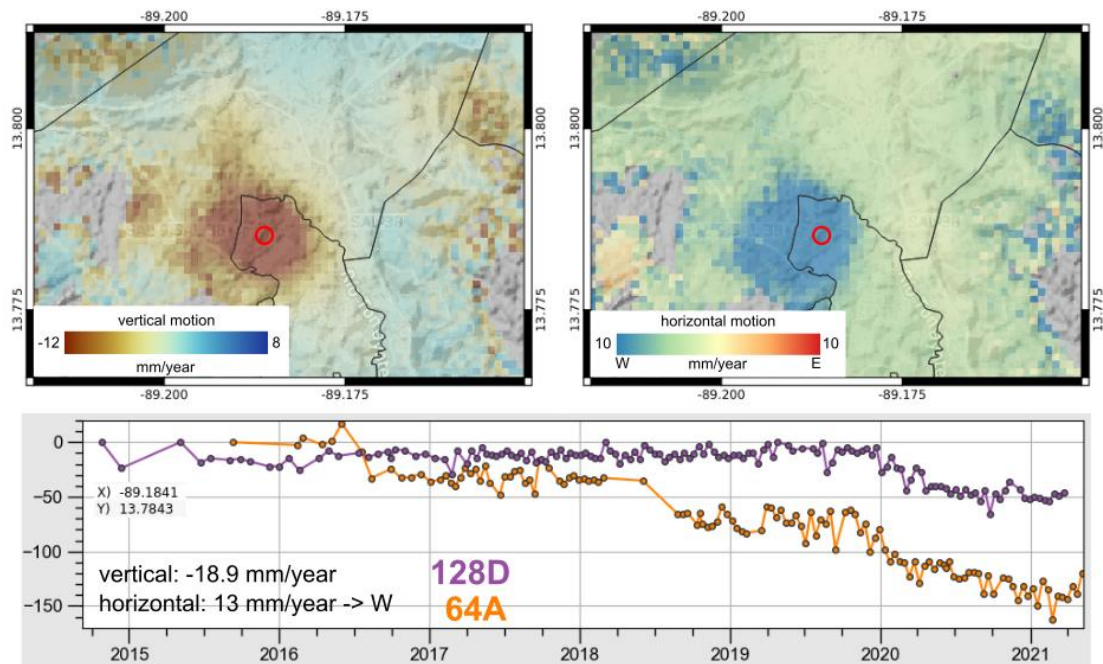


Fig. 26 Zoom de área 2

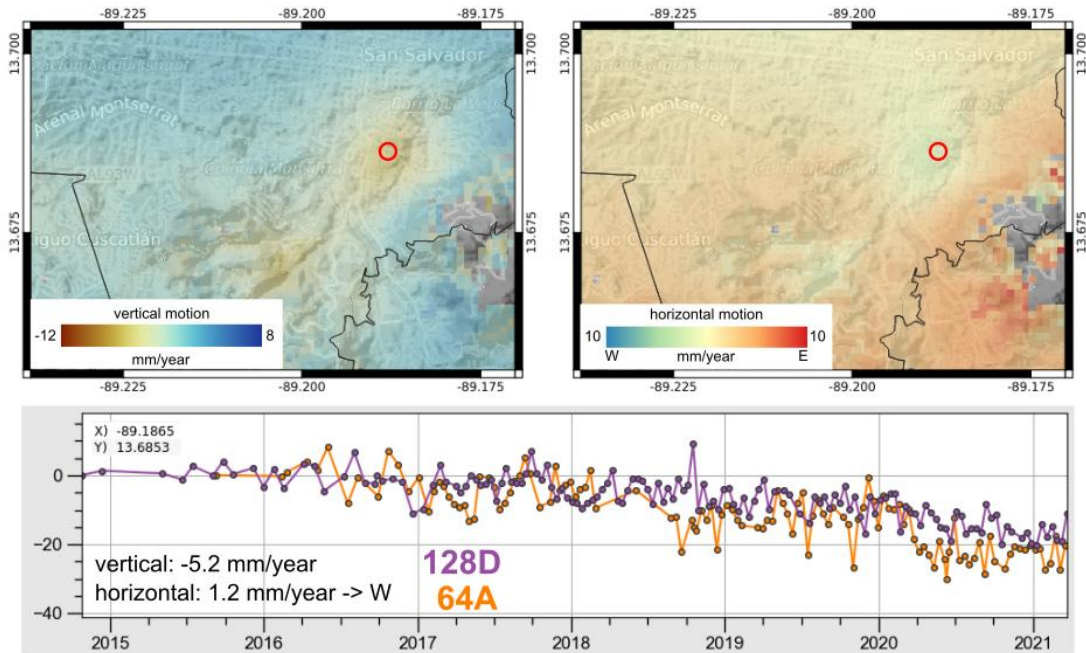


Fig. 27 Zoom de área 3

En cuanto al movimiento horizontal, esta muestra movimiento del sector Sur hacia el Este y sector Norte hacia el Oeste. Lo cual tiene cierta concordancia con Staller et al. (2015) (Fig. 28)

Al revisar la información de GPS fijo en Ilopango concuerda con resultados obtenidos con LICSBAS. Ya que muestra movimiento hacia el Este y siempre subsidencia que podría ver reducida su razón de cambio (Fig. 29) Observándose la importancia de movimiento cosísmico.

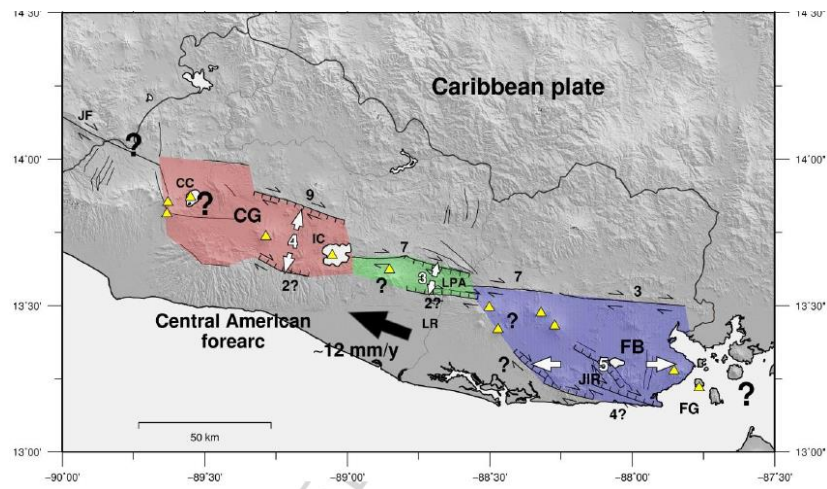


Fig. 28 Deformaciones según Staller et al. (2015)

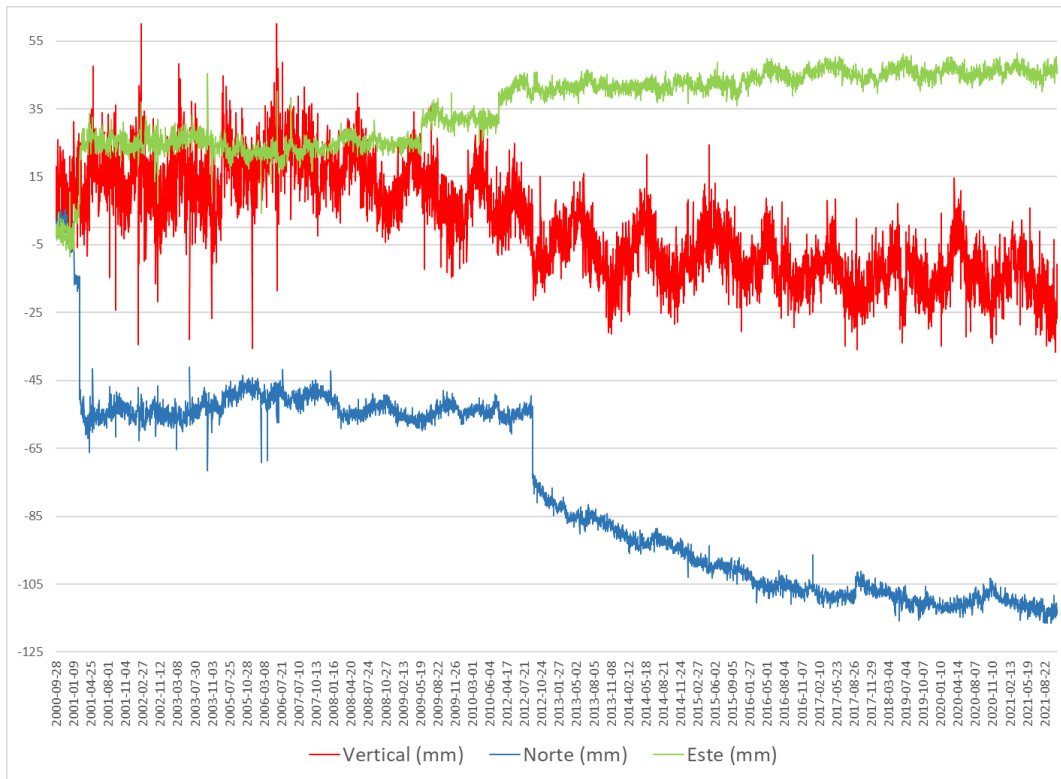


Fig. 29 Movimiento Vertical, hacia al Norte y Este de estación de GPS fija SSIA en Ilopango (2000-2021)
<https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota/data/SSIA>

Conclusiones y Recomendaciones

El uso de imágenes de radar para uso de interferometría es una técnica importante para conocer el movimiento de la superficie. Da una precisión de movimiento de la superficie en milímetros, las nubes no perturban los resultados y se pueden obtener movimientos casi mensualmente usando Sentinel-1. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que las pendientes orientadas al Radar de Apertura Sintética aparecen comprimidas, las pendientes empinadas orientadas al Radar de Apertura Sintética conducen a imágenes fantasmas, las pendientes empinadas orientadas lejos del Radar de Apertura Sintética no reciben señal, también hay efectos de vegetación, frecuencia y polarización. Esto hace necesario hacer correcciones y que en algunos sectores los resultados de imágenes de Radar no puedan mostrar información de cambios en superficie.

Existen zonas dentro del Área Metropolitana de San Salvador que muestran un supuesto movimiento que hay que darle seguimiento, por ejemplo, hay sectores que muestran subsidencia (Cuscatancingo, Apopa, Changallo, Ilopango- parte oriental de aeropuerto, San Salvador, Antiguo Cuscatlán entre otros).

Resultados obtenidos en fase I (Fig. 30-32) mostraban descenso en sectores de Ilopango, se observa mismo comportamiento pero al parecer se ha llegado a cierto equilibrio en la actualidad. Sin embargo en Cuscatancingo es un fenómeno de subsidencia más reciente, siendo necesario investigar en estos sectores si es debido tectónica, actividad antrópica o explotación del acuífero. Estas zonas muestran sismicidad reciente y presencia de pozos de explotación de aguas subterráneas. En estos sectores, se recomienda seguimiento multidisciplinario a movimientos de subsidencia y tratar de relacionarlo con comportamiento normal del volcán/acuíferos o movimientos tectónicos de bloques diastróficos. La problemática que ha estado ocurriendo en la cuenca de las Cañas y Chagüite puede estar relacionada a movimientos de subsidencia del sector y que también ha sido recogido por estación de GPS fija SSIA. Estos mapas de dinámica superficial/interferometria dan zonas con movimiento de subsidencia y elevación, en estas zonas se recomienda poner puntos que tienen que continuar siendo monitoreados con GPS u otras metodologías. Esto para conocer con más certeza procesos endógenos o exógenos que podrían afectar cada zona. Esto dará pie a la toma de decisiones en cuanto al uso de suelo, zonas de protección y mitigación necesarios.

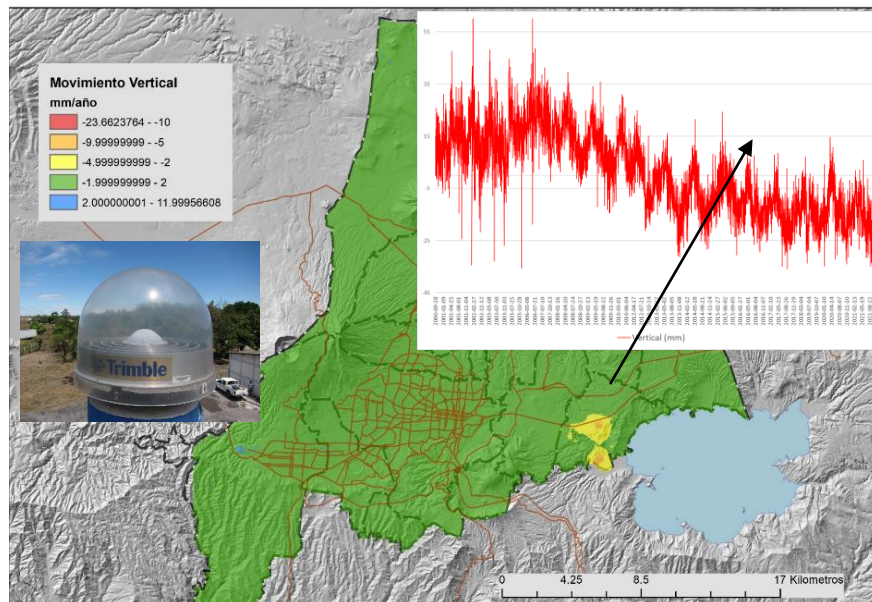


Fig. 30 Deformación vertical según GPS fijo SSIA
<https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota/data/SSIA>

Referencias

Baxter, S. (1995). Impacto ambiental en el río las Cañas. San Salvador: Ed. Biblioteca BANCASA.

Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti, “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2375–2383, 2002.

Chavez J, Šebesta J, Kopecky L, Lopez R, Landaverde J (2014) Application of geomorphologic knowledge for erosion hazard mapping. *Nat Hazards* 71:1323–1354. doi:10.1007/s11069-013-0948-8

Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, “Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in differential SAR interferometry”, *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 38 (5), 2000.

Gupta, Ravi P. “Remote Sensing Geology” Springer, 3rd Edition, 428 p. (2017)

Hooper, A., “A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches”, *Geophysical Research Letters* 35, 2008.

Lazecky, M., Hatton, E., Gonzalez, P., Hlavacova, I., Jirankova, I., Dvorak, F., Sustr, Z., Martinovic, J. (2020a). Displacements Monitoring over Czechia by IT4S1 System for Automated Interferometric Measurements Using Sentinel-1 Data. *Remote Sens.* 2020, 12, x; doi: 10.20944/preprints202008.0043.v1

Lazecky, M., Canaslan Comut, F., Nikolaeva, E., Bakon, M., Papco, J., Ruiz-Armenteros, A. M., Qin, Y., Sousa, J. J. M., and Ondrejka, P.: Potential of Sentinel-1A for nation-wide routine updates of active landslide maps, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B7, 775-781, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B7-775-2016, 2016.

Lazecký, M., Bakoň, M., Hlaváčová, I., Sousa, J. J., Real, N., Perissin, D., Patricio, G., 2017b: Bridge Displacements Monitoring using Space-Borne SAR Interferometry, 6 pp., *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (J-STARS)*, vol.PP, no.99, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2587778

Lazecky, M., Bakon, M., Perissin, D., Papco, J., Gamse, S., 2017c: Analysis of dam displacements by spaceborne SAR interferometry, 9 pp., In: *ICOLD 2017, Prague*, 3-7 July 2017.

Lazecký, M.; Spaans, K.; González, P.J.; Maghsoudi, Y.; Morishita, Y.; Albino, F.; Elliott, J.; Greenall, N.; Hatton, E.; Hooper, A.; Juncu, D.; McDougall, A.; Walters, R.J.; Watson, C.S.; Weiss,



J.R.; Wright, T.J. LiCSAR: An Automatic InSAR Tool for Measuring and Monitoring Tectonic and Volcanic Activity. *Remote Sens.* 2020d, 12, 2430, <https://doi.org/10.3390/rs12152430>.

Morishita, Y.; Lazecky, M.; Wright, T.J.; Weiss, J.R.; Elliott, J.R.; Hooper, A. LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sens.* 2020, 12, 424, <https://doi.org/10.3390/RS12030424>.

Yu, C.; Li, Z.; Penna, N.T.; Crippa, P. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2018, 123, 9202–9222.

Capacitaciones realizadas

Intercambios presenciales con especialistas de República Checa:
Ms.C. Michal Rajchl, Ph.D., Especialista en Geomorfología, Geología, Sedimentología de República Checa
Ms.C. Tomáš Hroch Especialista en Geomorfología, Geología e Ingeniería Geológica de República Checa

Evento, “Acciones para Disminuir Riesgos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Presentación de Mapas Geomorfológico y Peligrosidad”. 23/09/2021



Visita-taller para recorrer puntos de monitoreo en cuenca alta del Río Las Cañas , el sábado 25 de septiembre.

