

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

SANTIAGO-CHILE



“PROPUESTA METODOLÓGICA DE FUSIÓN DATOS InSAR CON DATOS UAV PARA EL MONITOREO DE SUBSIDENCIA DEBIDO A MINERÍA SUBTERRÁNEA”

CATALINA ANTONIETA CALISTO NAVARRO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE
MINAS**

PROFESOR GUÍA: MARCELO PÉREZ

PROFESOR CO-GUÍA: GILBERTO RAMIREZ

Noviembre 2021

Dedicatoria

A mis padres Maritza y Claudio por su apoyo indispensable en estos años, por su cariño, amor y regalones en tiempos de frustración, por comprenderme y motivarme a seguir adelante. Por las visitas tan anheladas que me daban la fuerza para seguir adelante y las largas llamadas para desahogarme. A mi hermano Andrés por ser mi compañero de casa en estos últimos años de universidad, acompañarme y hacerme sentir un poquito más cerca de casa, siempre apoyándonos en esas noches largas de estudio.

A mis abuelos, Tata Julio y Omi Sonia, Abu Iris y Tata Gordito por siempre recibirme con alegría cuando volvía a Punta Arenas, por las ricas comidas familiares de los fines de semana, por sus lindas visitas a Santiago, que siempre fueron una alegría en épocas de exámenes y por el cariño incondicional hacia su nieta mayor. Tata Gordito, partiste antes de lo esperado y no alcanzaste a verme titulada, espero que desde donde estés te sientas orgulloso de tu nieta, te quiero por siempre y te extraño todos los días.

A mi familia, tíos, primos, padrinos, gracias por el apoyo y cariño, por siempre creer en mí y estar atentos a como me iba, dando siempre palabras de aliento.

A Diego, gracias por cruzarte en mi camino y acompañarme en esta etapa, por el apoyo incondicional sin importar la distancia ni cuan ocupado estabas. A tu familia por adoptarme como una más y ser mi segunda casa en Santiago, por su cariño y preocupación.

A mis mascotas, Blacky que me acompañó por 18 años y la Patana que me hizo compañía en esas largas noches escribiendo este trabajo.

Gracias a todos que de una u otra manera estuvieron presentes en mi vida universitaria, haciéndola una etapa inolvidable.

Glosario

SAR	: Radar de apertura sintética
InSAR	: Interferometría SAR
DInSAR	: Interferometría diferencial SAR
A-DInSAR	: Interferometría diferencial avanzada SAR
DEM	: Modelo digital de elevación
UAV	: Vehículo aéreo no tripulado
SIG	: Sistema de integración geográfica
GPS	: Sistema de posicionamiento global
IPTA	: Interferometric Point Target Analysis
CPT	: Coherent Pixels Technique
SPN	: Stable Point Network
PS	: Permanent Scatterers
SBAS	: Small Baseline DInSAR
EDM	: Medición electrónica de distancias
DGPS	: GPS diferencial
DORIS	: Sistema Doppler de posicionamiento y determinación de órbita integrado en satélite
MDT	: Modelo digital de terreno
SLR	: Satellite Laser Ranging
GB-SAR	: Ground Based Synthetic Aperture Radar
TLS	: Terrestrial Laser Scanner
GB-LS	: Ground-Based Laser Scanner
ALS	: Airborne Laser Scanner
LiDAR	: Light Detection and Ranging
ALTM	: Airborne Laser Terrain Mapper
LOS	: Línea de visión (Line of Sight)
TRM	: Módulo de transmisión/recepción
SLC	: Single Look Complex
GCP	: Ground Control Points
SFM	: Structure From Motion
QA&QC	: Gestión de calidad y control de calidad
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission

Resumen

La producción de cobre en Chile durante el año 2020 fue de 5,7 millones de toneladas métricas finas, provenientes en un 19% de minería subterránea. Este tipo de minería ha aumentado su participación en el mercado en un 7% en los últimos 15 años y se pronostica que a futuro tanto los yacimientos nuevos como actuales migrarán a métodos de explotación subterráneos, esto a consecuencia del envejecimiento de los depósitos y la mayor profundidad del mineral. Es por esto que toma importancia el estudio de los efectos que conlleva la minería subterránea, en específico los métodos de hundimiento masivo tipo caving, siendo uno de los efectos más importantes a analizar, la subsidencia.

La subsidencia corresponde a una deformación en la superficie que constituye una fuente de peligros tanto para trabajadores como para el medio ambiente. Es por esto, que es importante el monitoreo constante de este movimiento, el cual se ha hecho tradicionalmente mediante métodos topográficos convencionales de técnicas de medición de puntos discretos como nivelación precisa, estaciones totales y sistemas de GPS.

En el último tiempo los sistemas de monitoreo mediante teledetección han ido ganando popularidad en el área por sus altas precisiones, como es el caso de las técnicas satelitales de interferometría SAR (InSAR). Logrando realizar mediciones de áreas extensas sin la necesidad de exponer a trabajadores a áreas de peligro o inaccesibles y con precisiones del orden del milímetro.

Las técnicas InSAR se basan en los satélites de apertura sintética SAR, el cual es un radar de imágenes y sensor activo que emite pulsos de microondas hacia la superficie, la cual dependiendo de sus características los retro-dispersa de vuelta hacia el sensor, obteniendo una señal compuesta por fase y amplitud. Uno de los problemas de la técnica InSAR para la medición de deformación es que la señal se mezcla con la señal de la topografía, es por esto, que se utiliza la interferometría diferencial DInSAR, eliminando la fase topográfica del interferograma, a partir un DEM. Este DEM puede ser obtenido a partir de interferometría simple o a través de un agente externo como un UAV.

A partir de lo expuesto anteriormente se hace interesante evaluar la factibilidad de implementar una metodología DInSAR con DEM obtenido desde UAV y posterior análisis SIG. Para esto se analizan las diferentes etapas necesarias para un estudio mediante esta técnica. En primer lugar, se encuentran las etapas Pre-DInSAR, en donde se realiza un análisis cualitativo de si es posible realizar el estudio mediante esta técnica. Posteriormente está la etapa DInSAR donde se obtiene un mapa de velocidad de deformación, en esta etapa se incorpora un DEM obtenido desde fotogrametría UAV para incrementar la precisión en las coordenadas X e Y de la imagen. Finalmente viene la etapa Post-DInSAR donde se incorpora el mapa de velocidad a un SIG para su análisis.

Además, se hace una revisión bibliográfica de monitoreo de subsidencia debido a minería subterránea, mediante técnicas InSAR, desde distintos satélites, obteniendo que en la mayoría se utiliza la técnica DInSAR y A-DInSAR, con DEM obtenidos principalmente desde interferometría, logrando en todas precisiones del orden de los centímetros y milímetros en la coordenada Z del hundimiento.

Finalmente se investigan softwares disponibles para realizar estos procesos InSAR/DInSAR, generación de DEM desde fotogrametría y de SIG y el tipo de licencia que tienen, existiendo en todas las categorías, softwares de licencia libre para poder realizar los estudios.

Abstract

Copper production in Chile during 2020 was 5.7 million metric tons of fine, 19% coming from underground mining. This type of mining has increased its market share by 7% in the last 15 years and it is forecast that in the future both new and current deposits will migrate to underground exploitation methods, this as a result of the aging of the deposits and the greater mineral depth. Therefore, the study of the effects of underground mining is important, specifically the caving methods, being subsidence one of the most important effects to analyze.

Subsidence corresponds to a deformation on the surface that constitutes a source of dangers for both workers and the environment. This is why constant monitoring of this movement is important, which has traditionally been done using conventional topographic methods of discrete point measurement techniques such as precise leveling, total stations and GPS systems.

In recent times, remote sensing monitoring systems have been gaining popularity in the area due to their high precision, as is the case with satellite interferometry SAR (InSAR) techniques. Achieving measurements of large areas without the need to expose workers to dangerous or inaccessible areas and with accuracies of the order of the millimeter.

InSAR techniques are based on synthetic aperture satellites SAR, which is an imaging radar and active sensor that emits microwave pulses towards the surface, which, depending on its characteristics, backscatters them back towards the sensor, obtaining a signal composed of phase and amplitude. One of the problems of the InSAR technique for measuring deformation is that the signal mixes with the signal from the topography, which is why differential interferometry (DInSAR) is used, eliminating the topographic phase of the interferogram, starting from a DEM. This DEM can be obtained from simple interferometry or through an external agent such as a UAV.

Based on the above, it is interesting to evaluate the feasibility of implementing a DInSAR methodology with DEM obtained from UAV and subsequent GIS analysis. For this, the different stages necessary for a study are analyzed using this technique. In the first place, there are the Pre-DInSAR stages, where a qualitative analysis is carried out on whether it is possible to carry out the study using this technique. Later there is the DInSAR stage where a deformation speed map is obtained, in this stage a DEM obtained from UAV photogrammetry is incorporated to increase the precision in the X and Y coordinates of the image. Finally comes the Post-DInSAR stage where the speed map is incorporated into a GIS for analysis.

In addition, a bibliographic review of subsidence monitoring due to underground mining is made, using InSAR techniques, from different satellites, obtaining that in most the DInSAR and A-DInSAR techniques are used, with DEM obtained mainly from interferometry, achieving all precisions of the order of centimeters and millimeters in the Z coordinate of the subsidence.

Finally, available software is investigated to carry out these InSAR / DInSAR processes, generation of DEM from photogrammetry and GIS and the type of license they have, existing in all categories, free license software to be able to carry out the studies.

Índice

1.	Introducción	10
1.1	Antecedentes	10
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo General	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
1.3	Contenido	12
2.	Metodología	14
3.	Marco Teórico.....	15
3.1	Subsidencia	15
3.2	Métodos de medición de deformación de superficie.....	16
3.2.1	Métodos topográficos convencionales	16
3.2.2	Métodos Geodésicos	17
3.2.2.1	GPS	17
3.2.2.2	DGPS.....	18
3.2.3	Métodos Fotogramétricos.....	18
3.2.3.1	Fotogrametría terrestre	18
3.2.3.2	Fotogrametría aérea.....	19
3.2.3.3	Fotogrametría satelital.....	19
3.2.4	Métodos de Teledetección.....	20
4.	Radar de Apertura Sintética “Synthetic Apertura Radar – SAR”	23
4.1	Resoluciones del sensor	24
4.2	Parámetros específicos y componentes de la imagen Radar	26
4.3	La imagen SAR	30
4.4	Modos de adquisición.....	31
4.5	Mecanismos de interacción de la señal de radar con la superficie	32
4.6	Distorsiones geométricas y radiométricas de la señal	33
4.7	Efecto Speckle.....	35
5.	Interferometría SAR – InSAR.....	37
5.1	Interferograma.....	38
5.2	Tipos de interferometría con radar	39
6.	Interferometría SAR Diferencial - DInSAR.....	41
6.1	Interferometría Diferencial Avanzada A-DInSAR o Técnicas de Multi-Interferograma..	43

6.1.1	Small Baseline DInSAR (SBAS)	43
6.1.2	Interferometric Point Target Analysis (IPTA)	43
6.1.3	Coherent Pixels Technique (CPT).....	44
6.1.4	Stable Point Network (SPN)	44
6.1.5	Permanent Scatterers (PS).....	44
7.	Etapas del proceso interferométrico	45
7.1	Etapas Pre-DInSAR.....	45
7.1.1	Relacionados con el proceso geológico de la zona	45
7.1.2	Datos e imágenes disponibles para el estudio	46
7.1.3	Selección metodología A-DInSAR	47
7.1.4	Selección imágenes	47
7.2	Etapa DInSAR.....	48
7.3	Post DInSAR.....	50
8.	Metodología interferométrica de subsidencia e integración sistema UAV-interferometría	51
8.1	Sistemas UAV	51
8.2	Metodología sistema UAV	52
8.3	Metodología DInSAR para monitoreo de subsidencia.....	55
8.4	Análisis de la información mediante SIG.....	56
8.5	Softwares disponibles.....	57
9.	Casos de monitoreo de subsidencia mediante tecnologías InSAR/DInSAR.....	59
10.	Conclusiones	61
11.	Referencias.....	63
12.	Anexos.....	67

Índice de Figuras

Figura 1: clasificación genética de subsidencia terrestre. Fuente: (Prokopovich, 1986)	16
Figura 2: Fotogrametría terrestre. Fuente: (Fotogrametría. Tema 7, 2009)	18
Figura 3: Fotogrametría aérea. Fuente:(Dron Valencia, Sin Fecha)	19
Figura 4: Fotogrametría satelital	20
Figura 5: Funcionamiento SAR. Lado izquierdo: el radar genera pulsos de microonda proyectados hacia la superficie. Lado derecho, los pulsos al tocar la superficie se dispersan en todas direcciones. Fuente: (European Space Agency, 2007).....	23
Figura 6: Geometría de SAR. Fuente:(Ferretti et al., 2007).....	24
Figura 7: Pulso largo con modulación de frecuencia lineal (Chirp) Fuente: (SARMAP, 2009)	25
Figura 8: Geometría de SAR. Fuente: (Moreira et al., 2013).....	26
Figura 9: Espectro electromagnético y longitud de onda de bandas de satélites radar. Fuente:(Universitat Politècnica de València, 2014).....	27
Figura 10: penetración diferentes bandas en medios con vegetación. Fuente:(Villegas, 2019).....	28
Figura 11: penetración de diferentes bandas en medios de suelo seco. Fuente: (Villegas, 2019).....	28
Figura 12: ángulo de incidencia en superficie.....	29
Figura 13: Izquierda muestra la data SAR sin procesar (señal RAW). Derecha muestra la imagen la procesada (imagen SLC). Fuente: (Barbier, 2006).....	30
Figura 14: en la parte izquierda se observa la imagen de la amplitud y en la parte derecha se observa la fase. Fuente: (Grunfeld Brook, Sin Fecha).....	31
Figura 15: se observan los 3 modos de adquisición de imágenes SAR. A) Stripmap mode. B) ScanSAR mode, c) spotlight mode. Fuente:(Moreira et al., 2013a).....	32
Figura 16: se observan los mecanismos de dispersión. Fuente: (NASA Video, 2018).....	32
Figura 17: distorsión por distancia oblicua. Fuente: Natural Resources Canada	33
Figura 18: Inversión por relieve. Fuente: (Villegas, 2020)	34
Figura 19: desplazamiento de estructuras. Fuente: (Villegas, 2020).....	34
Figura 20: Sombra. Fuente:(Villegas, 2020).....	35
Figura 21: Distorsión radiométrica. Fuente:(Villegas, 2020).....	35
Figura 22: Efecto Speckle. Fuente: (SARMAP, 2009)	36
Figura 23: Efecto Speckle antes y después de corrección. Fuente: (Vijayan et al., 2015).....	36
Figura 25: geometría de la interferometría SAR para medir distancia. Fuente: (Singh et al., 2014) 38	
Figura 25: Diferencia de fase entre 2 imágenes, resultando en el interferograma de la derecha, desde donde se puede obtener el DEM.	38
Figura 26: Interferometría transversal. Fuente: (Moreira et al., 2013).....	40
Figura 27: Diagrama de adquisición en caso de subsidencia entre las dos pasadas de un satélite. Fuente:(Crosetto et al., 2005).....	42
Figura 28: Esquema de la fase general de la metodología DInSAR, Fuente: (Fernández Oliveras, 2009)	49
Figura 29: Esquema de la fase Post-DInSAR de la metodología. Fuente: (Fernández Oliveras, 2009)	51
Figura 30: Ortofoto resultado de vuelo UAV, realizado por Geosupport. Fuente: Geosupport (2020)	52
Figura 31: Traslapo de las imágenes. Vuelo autónomo de sistemas UAV. Fuente: Geosupport (2020).....	52
Figura 32: Esquema UAV RTK. Fuente: (Pix4D, 2017)	53

Figura 33: Esquema UAV PPK. Fuente: (Pix4D, 2017).....	54
Figura 34: Metodología sistema UAV. Fuente: modificado de (Torrado et al., 2016)	55
<i>Figura 35: Esquema de la metodología DInSAR para monitoreo de subsidencia. Fuente: Modificado de: (Fernández Oliveras, 2009).....</i>	<i>56</i>
Figura 36: Resultado del análisis sobre un área de 28 12 km. Campo de velocidad de deformación entre junio de 1995 y agosto de 2000 estimado con 10 interferogramas ERS. Al fondo se encuentra una imagen de amplitud SAR de la misma zona. Fuente: (Crosetto et al., 2005)	60

Índice de Tablas

Tabla 1: Características de las técnicas topográficas clásicas. Fuente: (Tomás et al., 2005).....	17
Tabla 2: Características de los métodos geodésicos. Fuente: (Tomás et al., 2005).....	18
Tabla 3: Características de los métodos fotogramétricos. Fuente: (Tomás et al., 2005).....	20
Tabla 4: Características de los métodos de teledetección. Fuente: (Tomás et al., 2005)	21
Tabla 5: longitudes de onda más frecuentes en sistemas SAR, con sus respectivas longitudes de onda, frecuencias y sensores que las poseen. Fuente: (NASA Video, 2018; SARMAP, 2009).....	27
Tabla 6: se describen las distintas aplicaciones que tienen determinadas frecuencias de radares SAR. Fuente: (NASA Video, 2018).....	28
Tabla 7: Capacidad de los satélites DInSAR para el estudio de movimientos, basada en la escala espacial utilizada en ecología. Fuente: (Canuti et al., 2004)	45
Tabla 8: Capacidad de DInSAR actuales para monitorear movimientos en distintos intervalos de tiempo. Fuente:(Canuti et al., 2004).....	46
<i>Tabla 9: Principales misiones SAR, años de actividad, longitud de onda y nacionalidades. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>47</i>
Tabla 10: Software disponibles para trabajar datos SAR. Fuente: modificado de (Crosetto et al., 2005)	57
Tabla 11: Software para creación DEM desde imágenes UAV. Fuente: elaboración propia.	58
Tabla 12: Software para procesamiento SIG.....	58
Tabla 13: Tabla resumen de casos de monitoreo de subsidencia mediante tecnología InSAR y DInSAR y sus diferentes características.	70

1. Introducción

Las explotaciones mineras de tipo subterránea con métodos de extracción comunes como Block Caving, Sublevel Caving, Room and Pillar entre otros tienen como consecuencia inevitable la subsidencia del terreno. Por lo tanto, la subsidencia se considera como un problema de ingeniería que impacta en lo económico y medioambiental gravemente.

Aunque la subsidencia no se puede eliminar, se puede reducir o controlar en áreas de inminente peligro. Los métodos normalmente utilizados para el monitoreo y control de la subsidencia corresponden a métodos tradicionales de técnicas de medición de puntos discretos como nivelación precisa, estaciones totales y sistemas de GPS. Mediante el monitoreo con estas técnicas se pueden obtener mediciones de precisión alta (orden de los centímetros, hasta milímetros), sin embargo, tienen como desventaja el alto costo de implementación, elevados tiempos para obtener la medición, difícil acceso debido a las condiciones del terreno, no pudiendo usarse para mediciones en tiempo real.

Es debido a esto que con el pasar del tiempo se han buscado nuevos métodos para lograr monitorear la subsidencia. En la última década, las técnicas satelitales de interferometría SAR (InSAR) han tomado fuerza en el área de medición de deformaciones del terreno. Estos sistemas pueden obtener informaciones en áreas extensas de terreno, involucra menor mano de obra, reduciendo de esta forma el costo, además que no está restringido por la accesibilidad del terreno o por condiciones climáticas, nubosidad o luminosidad.

La capacidad de procesamiento de este tipo de imágenes ha mejorado incorporando las técnicas DInSAR que dan la posibilidad de mapear deformaciones superficiales monitoreando su evolución espacial. Además de las técnicas DInSAR avanzado que han incorporado el análisis de grandes stacks de imágenes SAR, permitiendo un monitoreo más preciso de las deformaciones llegando a precisiones del orden de los milímetros.

En la presente memoria se estudian estos métodos de monitoreo de deformaciones y se plantea una metodología para incorporar al proceso de monitoreo imágenes provenientes de los sistemas UAV, planteadas para mejorar la precisión del mapa de deformación final y la integración con un sistema GIS para el posterior análisis completo de la subsidencia a estudiar. Además, se hace un estudio de diferentes casos donde estas técnicas se han utilizado y los resultados que se han obtenido para comprobar la factibilidad de este método.

1.1 Antecedentes

Debido a la naturaleza de la explotación minera de tipo subterráneo, se genera un desplazamiento del macizo rocoso producto de las labores de extracción de material, a este fenómeno se le conoce como subsidencia.

El conocimiento del grado de hundimiento es un factor importante por considerar en el desarrollo de un modelo de deformación precisa del terreno, de tal manera de poder permitir la predicción del campo de deformación y tensión en la masa de roca.

La importancia del control de la subsidencia radica en que, en toda explotación minera, el macizo rocoso ejerce un esfuerzo constante sobre estas, y si no existe sistema de fortificación adecuado, las explotaciones pueden colapsar. Además, la subsidencia influye en el diseño estructural y su control es un requisito legislativo, siendo sometidos a una revisión y evaluación crítica sobre los posibles impactos ambientales de esta. Esta evaluación considera los impactos sobre la infraestructura externa e interna, así como las medidas de mitigación, control y medición. (SERNAGEOMIN, Sin Fecha) Además, se consideran los posibles efectos de la subsidencia en elementos naturales como arroyos, ríos, lagos, líneas de acantilados, formaciones rocosas y sitios arqueológicos. Debido a esto se hace imprescindible establecer mecanismos de monitoreo que permitan tener conocimiento adecuado y actualizado de este fenómeno, para poder establecer medidas para controlar y mantener la subsidencia dentro de niveles aceptables.

Dentro de las ventajas que presenta el monitoreo de subsidencia se considera el anticipar el comportamiento del macizo rocoso a mediano y largo plazo; identificar anomalías en el corto y mediano plazo; advertir cambios en la condición de riesgos geomecánicos; servir como herramienta de apoyo y/o calibración de sistema de monitoreos. (Geosupport S.A., 2018)

Los métodos tradicionales de monitoreo incluyen nivelación convencional, sistemas GPS y sistemas robóticos de topografía con redes de prismas distribuidos, además de la supervisión en tiempo real de los componentes críticos de infraestructura minera, mediante instrumentación geotécnica y geofísica. (SIMOH, Sin Fecha)

Es en este sentido que la tecnología de teledetección resulta útil para detectar la subsidencia inducida por la minería y proporcionar datos necesarios para los modelos de deformación de estratos de forma global y localizada. Para lograr una metodología eficaz para la determinación, gestión y análisis de datos de subsidencia, se propone el uso del método combinado de sistemas UAV (aviones no tripulados) y los sistemas satelitales de interferometría (InSAR).

En la presente memoria se estudiará la factibilidad de la integración del método de teledetección InSAR con el método fotogramétrico UAV y sistema GIS para la obtención de una metodología de monitoreo de subsidencia, de forma teórica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad de combinar método InSAR con data UAV para aumentar la precisión espacial en la determinación del desplazamiento, fundamentalmente en las subsidencias originadas por los métodos de explotación de minería subterránea.

1.2.2 Objetivos específicos

- Aplicar la metodología DInSAR como herramienta de detección temprana de deformaciones debido a los métodos de explotación de minería subterránea.
- Aplicar sistemas no tripulados para generar ortofotos y nubes de puntos DEM, como herramienta de apoyo a la interferometría.
- Usar sistemas de información geográficos SIG para la gestión de la información espacial referente a la subsidencia.

1.3 Contenido

Capítulo 1: capítulo introductorio, se exponen los antecedentes para la realización de esta memoria, así como el objetivo general y específico.

Capítulo 2: se presenta el marco teórico de la tesis, incluye los conceptos de subsidencia, su importancia y clasificación de este fenómeno. Además, se detallan los distintos métodos de medición de deformación de superficie: topográfico convencional, geodésico, fotogramétrico y teledetección.

Capítulo 3: se expone la tecnología radar de apertura sintética SAR, sus características, cómo funciona, resoluciones del sistema, parámetros específicos, descripción de lo que compone una imagen SAR, modos de adquisición de las imágenes distorsiones, resoluciones y otras características importantes para comprender el funcionamiento.

Capítulo 4: se expone el procedimiento de interferometría SAR o InSAR, qué es, cómo funciona, que se entiende por interferograma, cómo se obtiene y otros conceptos importantes para entender los capítulos siguientes como: desenvolvimiento de fase, decorrelación y tipos de interferometría.

Capítulo 5: se expone el método de interferometría diferencial SAR o DInSAR, qué es y los componentes que lo forman. Además, se hace una pequeña introducción a los métodos de interferometría diferencial avanzada SAR o A-DInSAR y las técnicas más utilizadas: IPTA, CPT, SPN, PS y SBAS.

Capítulo 6: se expone el procedimiento interferométrico para determinar la deformación del macizo a partir de imágenes SAR. Las etapas se dividen entre Pre-DInSAR en donde se estudia la factibilidad

de aplicar la metodología a cierta área de estudio, analizando las características geológicas y geomecánicas del terreno, luego se analizan la disponibilidad de datos e imágenes para estudiar, luego la metodología DInSAR a aplicar y finalmente la selección de imágenes. Posteriormente está la etapa DInSAR, en donde se tiene una fase general y específica. Finalizando con la etapa Post-DInSAR donde se hace el análisis de los resultados y se integran con métodos GIS.

Capítulo 7: se expone la metodología de los sistemas UAV para obtener desde fotogrametría un DEM para integrar a las etapas DInSAR. Luego se detalla la metodología propuesta para obtener un mapa de velocidad de deformación para el monitoreo de subsidencia mediante fotogrametría UAV y teledetección DInSAR. Posteriormente se detalla el proceso de análisis de la información con SIG. Finalmente se muestra un resumen de los software y algoritmos disponibles para el estudio mediante estas técnicas.

Capítulo 8: se realiza benchmarking bibliográfico de distintos casos de monitoreo de subsidencia mediante tecnología InSAR, DInSAR y A-DInSAR, se detallan los años de publicación, la fuente de las imágenes y la cantidad, la ubicación del estudio, el origen del DEM empleado, en los casos correspondientes se detalla la técnica avanzada utilizada y otros detalles relevantes para estudiar.

Capítulo 9: conclusiones de la memoria.

Capítulo 10: referencias del trabajo.

2. Metodología

- 1) Recopilación y escritura del estado de arte con los conceptos de subsidencia, métodos tradicionales para su medición y sus limitaciones.
- 2) Introducción a los métodos de teledetección propuestos: estudio de factibilidad mediante análisis de precisión, factibilidad y confiabilidad del método combinado UAV-InSAR y SIG para procesar información para detectar subsidencia.
- 3) Estudio del fundamento teórico sobre radar e interferometría DInSAR y explicación de las técnicas Avanzadas DInSAR.
- 4) Estudio de las etapas Pre-InSAR, DInSAR y Post-InSAR, metodología que contempla cuatro fases de desarrollo: pre-procesamiento, procesamiento, post procesamiento y análisis de datos.
- 5) Explicación de los métodos fotogramétricos mediante UAV para obtención de DEM precisos, su enlace en la cadena de procesos DInSAR e incorporación del uso de SIG para el análisis de la información.
- 6) Identificación de los Softwares que se usan para el procesamiento de los datos interferométricos UAV y análisis SIG y proposición de la cadena integral de procesos DInSAR.
- 7) Estudio de casos de monitoreo de subsidencia mediante técnicas InSAR, DInSAR o A-DInSAR y elaboración de tabla comparativa para posterior análisis.
- 8) Elaboración de conclusiones

3. Marco Teórico

3.1 Subsistencia

En la bibliografía se encuentran diversas definiciones del concepto de subsidencia, entre ellas se destacan la de NOAA que la define como hundimiento de la tierra debido al movimiento de material subterráneo (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021). Según el libro Ingeniería Geológica, la subsidencia corresponde a un proceso muy lento, que con frecuencia se acelera por actuaciones antrópicas. Puede afectar a todo tipo de terrenos, generalmente a suelos y son debidos a cambios tensionales inducidos en el terreno por las siguientes causas: descenso del nivel freático; minería subterránea y túneles; extracción o expulsión de petróleo o gas; explotación intensiva de acuíferos; procesos lentos de disolución y lavado de materiales; procesos morfotectónicos y de sedimentación; procesos de consolidación de suelos blandos y orgánicos. (González de Vallejo et al., 2002). Según lo recopilado por el "Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms", la subsidencia es el hundimiento repentino o asentamiento gradual hacia debajo de la superficie de la Tierra con poco o ningún movimiento horizontal. El movimiento no está restringido en velocidad, magnitud o área involucrada. Puede ser causado por procesos geológicos naturales, como disolución, deshielo, compactación, deformación lenta de la corteza sólida, o por la actividad humana como la minería subterránea o extracción de petróleo o agua subterránea. (U.S. Bureau of Mines, 1996).

Por motivos de la presente memoria se considerará esta última definición, debido a que incorpora la característica que la componente principal o en algunos casos la única, del hundimiento, es la componente vertical.

Las razones para monitorear la subsidencia en minería subterránea son debido a:

1. Legislación existente
2. Predicción de la subsidencia
3. Maximizar la extracción de mineral
4. Diseño estructural
5. Manejo de riesgos
6. Monitoreo ambiental

Es por esto, que la subsidencia del terreno debido a la minería subterránea es una gran preocupación para la industria de la minería, reguladores gubernamentales y grupos medioambientales, entre otros. (Ge et al., 2003)

La subsidencia se divide en 2 categorías generales: subsidencia endógena y subsidencia exógena. La primera es causada por procesos originados en el planeta y la segunda es el resultado de fuerzas originadas en la superficie de la tierra, en este grupo también se incluyen las consecuencias de actividad humana. (Prokopovich, 1986). En la Figura 1, se observa la clasificación de la subsidencia, que puede ser de tipo endógena como exógena, incluyendo los tipos de acciones que provocan este fenómeno.

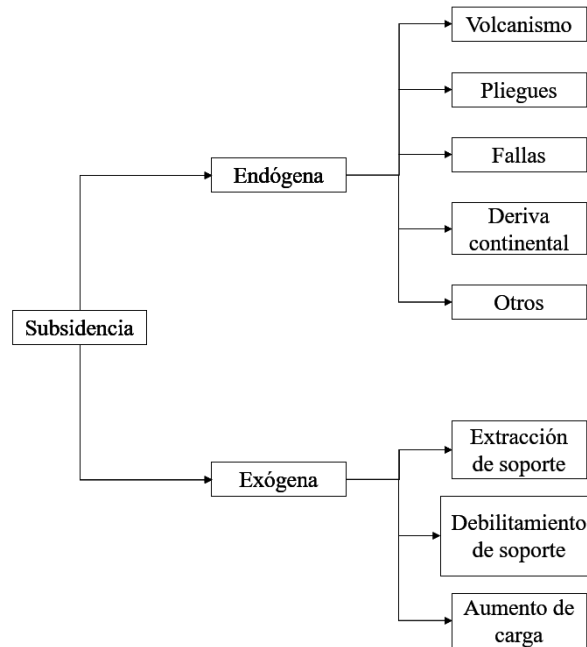


Figura 1: clasificación genética de subsidencia terrestre. Fuente: (Prokopovich, 1986)

3.2 Métodos de medición de deformación de superficie

Los fenómenos como la subsidencia se manifiestan como deformaciones superficiales. Las técnicas de la Ingeniería Cartográfica (técnicas topográficas, geodésicas, fotogramétricas y de teledetección) son empleadas para medir las deformaciones causadas por estos movimientos de tierra. (Tomás et al., 2005). La subsidencia se monitorea actualmente mediante levantamientos terrestres repetidos usando niveles automáticos / digitales (en nivelación de línea), estaciones totales (en desplazamiento de altura EDM) y receptores GPS (en tiempo real y estático) para estudios cinemáticos (Schofield, 1993). A continuación, se describirá brevemente las técnicas de medición de deformación existentes a la fecha, detallando las precisiones promedio de cada método.

3.2.1 Métodos topográficos convencionales

Son técnicas de la cartografía clásica terrestre. Se miden las variaciones de coordenadas (X, Y, Z) de una serie de puntos durante un determinado tiempo para determinar si se produce movimiento. Se clasifican en 2 grandes grupos altimétricos y planimétricos. (Tomás et al., 2005)

Debido a la utilización del recurso humano, el tiempo de trabajo puede ser mayor dependiendo de la extensión del proyecto. Además, los equipos utilizados al no ser 100% automáticos pueden generar errores de tipo sistemáticos y accidentales. Además, están presentes los errores propios de la medición, donde el error más frecuente es debido a las condiciones del entorno en que se ejecuta el

trabajo, como condiciones ambientales complejas, lugar de trabajo riesgoso, lugares de difícil acceso, etc. Por lo tanto, ello dificulta al operario realizar un trabajo seguro y preciso. (EGV Ingeniería, 2020).

En la Tabla 1 se detallan los métodos tradicionales y sus precisiones.

Tabla 1: Características de las técnicas topográficas clásicas. Fuente: (Tomás et al., 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Nivelación trigonométrica o por pendientes	Variación de altitud	dZ	Variable	20 mm
Nivelación geométrica o por alturas	Variación de altitud	dZ	Variable	± 1 mm/km
Nivelación geométrica de precisión	Variación de altitud	dZ	Variable	$\pm 0,1$ mm/km
Triangulación topográfica	Desplazamiento	dX, dY, dZ	<300-1000 m	5-10 mm
Itinerario topográfico (poligonal)	Desplazamiento	dX, dY, dZ	Variable	5-10 mm
Estación total robótica (ETM)	Desplazamiento	dX, dY, dZ	1-10 Km	5 mm \pm 1-5 ppm

3.2.2 Métodos Geodésicos

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Determina la posición de puntos sobre la superficie terrestre mediante coordenadas (latitud, longitud y altura). (Instituto Geográfico Nacional, Sin Fecha). Los sistemas de posicionamiento global (GPS), DORIS y la telemetría de láser por scanner son las técnicas geodésicas mayormente utilizadas para la determinación y estudio de las deformaciones de la Tierra. A continuación, se describirán brevemente estas técnicas.

3.2.2.1 GPS

El sistema de posicionamiento global (Global Positioning System) se compone de tres elementos: los satélites en órbita alrededor de la Tierra, las estaciones terrestres de seguimiento y control y los receptores del GPS. Desde el espacio, los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican los receptores del GPS, ellos a su vez, proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altura, así como la hora local precisa. (Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación y Cronometría por Satélite, Sin Fecha)

3.2.2.2 DGPS

Corresponde al sistema de GPS diferencial (Differential Global Positioning System) se fundamenta en el uso de un georreceptor móvil (rover) y una estación (o estaciones) de referencia (base) ubicada en coordenadas conocidas con una alta exactitud. (Agüero Corzo et al., 2018).

Las características de los sistemas tradicionales para medición de deformaciones por geodesia se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de los métodos geodésicos. Fuente: (Tomás et al., 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
GPS convencional	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ		1-2 cm
DGPS	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Baseline <20 km	1 cm

3.2.3 Métodos Fotogramétricos

La Fotogrametría es la técnica que tiene como objetivo el estudio y la definición de forma precisa de la forma, las dimensiones y/o la posición en el espacio de un objeto, a través de los datos obtenidos de una o varias fotografías, llamados fotogramas. (Global Mediterránea y Global Geomática, 2020). De acuerdo con la plataforma usada para capturar los fotogramas, existen 3 tipos de fotogrametría: terrestre, aérea, satelital.

3.2.3.1 Fotogrametría terrestre

Los fotogramas se obtienen desde plataformas ubicadas en la Tierra. En la Figura 2, se observa el clásico esquema para la realización de fotogrametría terrestre.

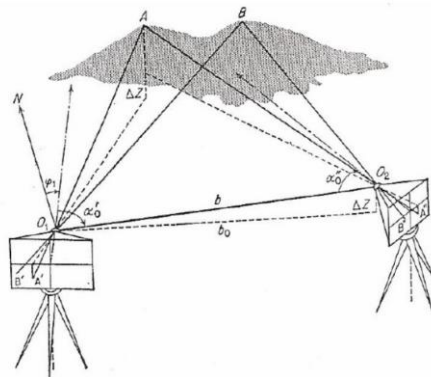


Figura 2: Fotogrametría terrestre. Fuente: (Fotogrametría. Tema 7, 2009)

3.2.3.2 Fotogrametría aérea

En este caso se utiliza una cámara montada en una plataforma aérea (avión, helicóptero, UAV), a bajas altitudes. Este proceso permite la construcción de modelo digital de terreno (MDT) de la zona de interés y mediante la comparación con otros MDT tomados a distintos tiempos, se analizan los cambios. (Tomás et al., 2005). En la Figura 3 se observa un dron capturando fotografías.



Figura 3: Fotogrametría aérea. Fuente:(Dron Valencia, Sin Fecha)

Los UAV (Unmanned Aerial Vehicle), también conocidos como drones corresponden una aeronave sin un piloto humano o pasajeros a bordo. Pueden ser controlados a distancia o volar de forma autónoma (mediante sensores, GPS o sistemas integrados) (Valavanis & Vachtsevanos, 2015).

Los UAV son menos costosos y de tamaño más pequeño en comparación a otras tecnologías aéreas, permitiendo imágenes aéreas de alta resolución a baja altura. La toma de imágenes con estos equipos se puede programar y configurar con precisión en poco tiempo y el uso de estos no está cubierto por la regulación aeronáutica civil, ofreciendo ventajas en cuanto a flexibilidad en comparación con otros métodos aéreos (Gasperini et al., 2014). En cuanto a monitoreo de subsidencia los UAV se seleccionan áreas de subsidencia, se procesan los datos y se utiliza un modelo de elevación digital (DEM) para evaluar las distintas áreas. Luego los datos de subsidencia se obtienen mediante la resta DEM de 2 períodos. (Dawei et al., 2020)

3.2.3.3 Fotogrametría satelital

Se obtienen desde satélites. Debido a la distancia de estos con la Tierra, las resoluciones son bajas. En la Figura 4, se observa la captura de fotografías mediante plataforma satelital.

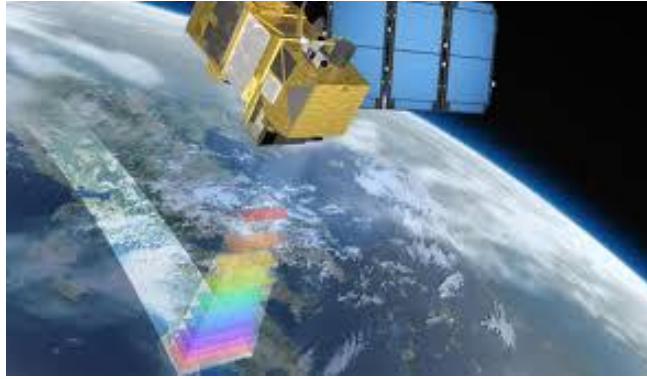


Figura 4: Fotogrametría satelital

En la

Tabla 3 se detallan las precisiones promedio de los distintos tipos de fotogrametría existente.

Tabla 3: Características de los métodos fotogramétricos. Fuente: (Tomás et al., 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Fotogrametría terrestre	Desplazamiento	dX, dY, dZ	< 200 m	± 10 cm
Fotogrametría aérea	Desplazamiento	dX, dY, dZ	H _{vuelo} < 500 m	± 20 cm
Fotogrametría satélite	Desplazamiento	dX, dY, dZ		± 30 cm

3.2.4 Métodos de Teledetección

La percepción remota o teledetección (del inglés Remote Sensing) es por definición una disciplina basada en ciencia y tecnología que permite desarrollar, capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de la Tierra, obtenidos desde sensores en el espacio, sensores aerotransportados y con sensores que capturan datos de mediciones in situ (Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, 2021). En palabras simples, significa obtener información acerca de un objeto sin estar en contacto con él. La fotogrametría queda incluida en este término, pero para el caso de medición de deformaciones de la Tierra se considerará una disciplina independiente. (Tomás et al., 2005)

Se divide en 2 tipos: láser y radar.

En los láser se incluyen a los Scanner Láser, que puede estar montado en plataforma terrestre (Terrestrial Laser Scanner) o en plataforma aérea (LIDAR, ALS o ALTM). El equipo del Láser Scanner está constituido por una fuente láser y dos espejos inclinados. La distancia existente entre el equipo y el escenario se determina midiendo el tiempo que tarda el pulso láser en alcanzar el escenario y volver de nuevo al equipo. La posición relativa del punto del escenario radiado se determina a partir de la medida de la desviación de los espejos. A su vez la fuerza de la señal de retorno es almacenada

en el equipo como un atributo de intensidad de cada punto radiado, ya que se trata de la reflectividad del objeto y, por consiguiente, aporta información sobre las características espectrales del mismo. Las diferencias observadas entre varias reconstrucciones tridimensionales del escenario permiten obtener la distribución de cambios y, por lo tanto, de deformaciones producidas en el propio escenario. (Tomás et al., 2005)

En los radares se dividen según la plataforma empleada para la adquisición de imágenes SAR. Terrestre (Ground Based Synthete Aperture radar, GB-SAR), aerotransportada (airborne radar) y satelital (spaceborne radar).

Los sistemas SAR registran tanto la amplitud como las fases de los ecos radar de la escena para generar una imagen de una magnitud compleja que es la reflectividad electromagnética. Pueden ser de tipo InSAR (interferometría SAR), DInSAR (interferometría diferencial SAR) o A-DInSAR (interferometría diferencial avanzada SAR). En la sección 3 se ahondará en los sistemas SAR y sus características.

En la

Tabla 4 se detallan los distintos tipos de teledetección y sus características:

Tabla 4: Características de los métodos de teledetección. Fuente: (Tomás et al., 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
DInSAR	Desplazamientos en la Línea de vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Baseline \perp < 200m Coherencia > 0,3 en varios puntos adyacentes	3-5 mm
A-DInSAR: Permanent Scatterers (PS)	Desplazamientos en la Línea de vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Coherencia > 0,7 en un solo punto N° de imágenes > 30	1 mm
A-DInSAR: Coherent Pixels Technique (CPT)	Desplazamientos en la Línea de vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Coherencia > 0,4 en un solo punto	1 mm
Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR)	Desplazamientos en la Línea de vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	< 1,5 km	< 1mm
Terrestrial Laser Scanner (TLS) o Ground-based Laser Scanner (GB-LS)	Superposición de MDT	dX, dY, dZ	< 400 m	\pm 1,5 mm (hasta 50 m, para distancias superiores menor precisión)
Airborne Laser Scanner (ALS), Light Detection and Ranging (LiDAR) o	Superposición de MDT	dX, dY, dZ	200 < Hvuelo < 6000 m Distancia base < 50 km	150-200 mm

Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM)				
--	--	--	--	--

En la próxima sección se detallarán conceptos atinentes a la metodología propuesta DInSAR. En primer lugar, hay que conocer qué son los sistemas SAR, InSAR y DInSAR. De este último se estudiará la viabilidad de utilizarlo en conjunto con modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos desde fotogrametría UAV para llegar a precisiones en coordenadas X,Y,Z.

4. Radar de Apertura Sintética “Synthetic Apertura Radar – SAR”

Un Radar de Apertura Sintética (de ahora en adelante SAR), corresponde a una herramienta de la teledetección, categorizado como radar de imágenes y sensor activo, de visión lateral, que proporciona de forma artificial su propia energía radiante, como fuente de iluminación. Puede ser transportado por una plataforma de tipo satelital o un aeroplano. El radar está compuesto por transmisor, receptor, antena y sistema electrónico para grabar y procesar la data. (European Space Agency, 2007)

En palabras simples los pasos del funcionamiento de SAR son:

1. El radar ilumina la superficie oblicuamente en la dirección de desplazamiento de la plataforma.
2. El transmisor genera pulsos de microonda en intervalos regulares de tiempo, que son proyectados por la antena en forma de abanico, hacia la superficie (Figura 5, lado izquierdo).
3. Los pulsos al tocar la superficie se dispersan en todas las direcciones (Figura 5, lado derecho).
4. La antena recibe la porción de la energía reflejada o retro-dispersada (backscatter en inglés) de varios objetos dentro del área iluminada.
5. Al medir el tiempo que demora entre la transmisión y recepción de la señal se puede determinar la distancia y ubicación de los objetos.
6. Tras procesar la señal retro-dispersada se crea una imagen de la superficie capturada.

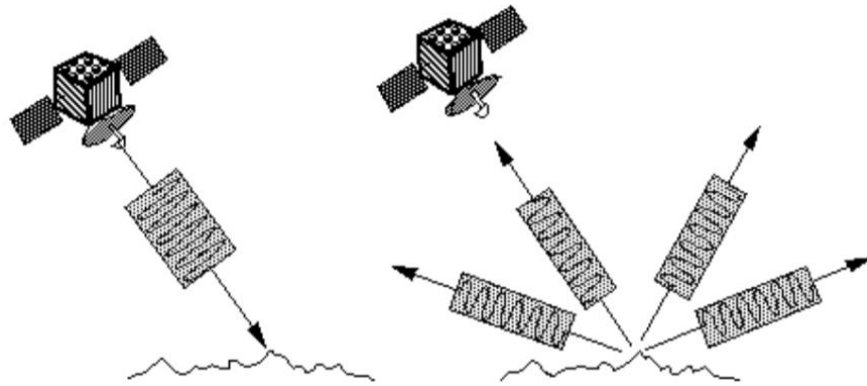


Figura 5: Funcionamiento SAR. Lado izquierdo: el radar genera pulsos de microonda proyectados hacia la superficie. Lado derecho, los pulsos al tocar la superficie se dispersan en todas direcciones. Fuente: (European Space Agency, 2007)

El término apertura sintética se debe a que al combinar las señales recibidas de forma coherente se puede construir una apertura virtual más larga que la longitud física de la antena. (Moreira et al., 2013)

El sensor mide de la parte de la señal retro-dispersada, la amplitud, que corresponde a la intensidad de la señal (medida en unidad de decibeles) y la fase que corresponde a la posición de un punto en el ciclo de la onda (medida en unidades de ángulo o radianes). Con estos parámetros se construye la imagen SAR. (SARMAP, 2009).

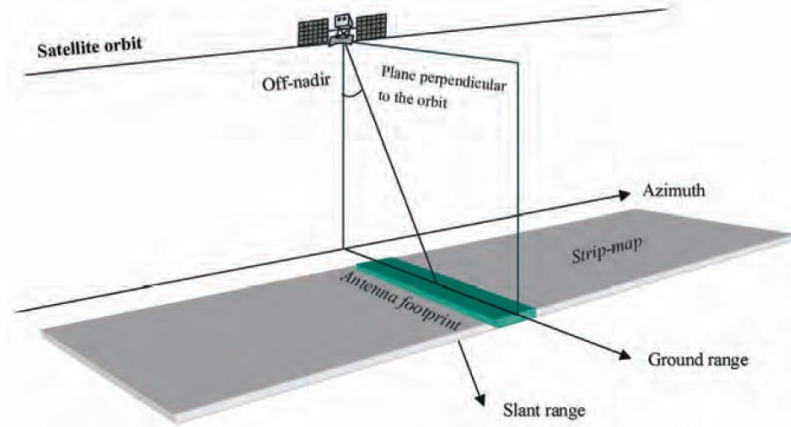


Figura 6: Geometría de SAR. Fuente:(Ferretti et al., 2007)

En la Figura 6 se observa la geometría del sistema SAR. El satélite lleva un radar con la antena apuntando a la superficie de la tierra en el plano perpendicular a la órbita. La proyección de la órbita hacia la Tierra se conoce como la trayectoria terrestre. El área donde se obtienen las imágenes del haz del radar se denomina franja del radar. La inclinación de la antena con respecto al nadir se llama el ángulo off-nadir y en sistemas contemporáneos varía entre 20° a 50°. Por simplicidad se asume que el ángulo de incidencia es igual al ángulo off-nadir. La dirección del movimiento del satélite es la dirección azimut y la dirección de la imagen se denomina dirección de rango (ground range). La dirección a lo largo de la Line of sight (LOS) normalmente se llama dirección de distancia oblicua (slant range direction) (Ferretti et al., 2007)

4.1 Resoluciones del sensor

Al ser un radar de imagen requiere resolución bidimensional, una en dirección del rango y la otra en la del azimut.

La resolución en dirección del rango corresponde a la capacidad que posee el sensor para distinguir entre dos o más objetivos en el mismo rumbo, pero a distintas distancias.

La resolución en dirección del rango está dada por la Ecuación 1:

$$\delta_r \sim \frac{c}{2B}$$

Ecuación 1: ecuación de la resolución en dirección del rango.

Donde c es la velocidad de la luz, y B es el ancho de banda utilizada en la modulación de la frecuencia.

Como se observa en la Ecuación 1, la resolución en dirección del rango es directamente proporcional al ancho de banda del pulso transmitido. Si la duración del pulso es corta, se logra mayor ancho de banda, sin embargo, mientras más corta sea la duración, menor es la energía transmitida y más pobre será la resolución. Para conservar la resolución, el sistema SAR genera un pulso largo con una modulación de frecuencia lineal, llamado Chirp (Moreira et al., 2013).

En la Figura 7 se observa este pulso Chirp.

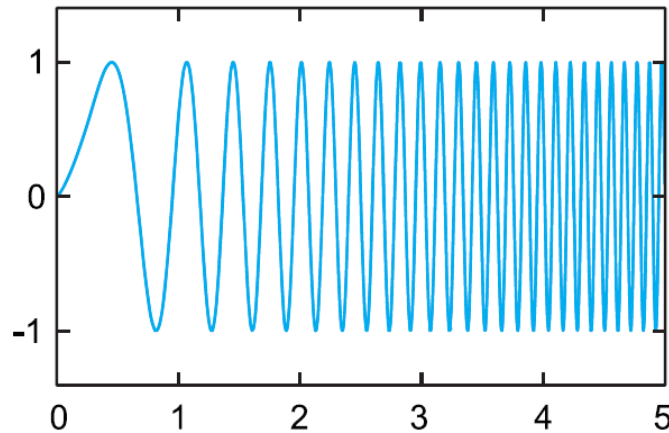


Figura 7: Pulso largo con modulación de frecuencia lineal (Chirp) Fuente: (SARMAP, 2009)

En el caso de la resolución en la dirección del azimut, los sistemas SAR aumentan sintéticamente el tamaño de la antena para aumentar la resolución en la dirección del azimut, mediante la misma técnica de compresión de pulsos utilizada en la resolución en dirección del rango. El tamaño de la antena es la longitud de la trayectoria durante la cual el radar recibe señales retro-dispersadas de un objetivo puntual. El ancho de haz de una antena de longitud d_a se puede aproximar por $\theta_a = \lambda/d_a$.

Desde la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 8 se puede observar que el largo de la apertura sintética correspondiente esta dado por $L_{sa} = \theta_a \cdot r_0 = \lambda r_0/d_a$

Una apertura sintética larga es favorable ya que resulta en un ancho de haz virtual estrecho $\theta_{sa} = \lambda/2L_{sa}$ (el factor 2 aparece debido al camino en 2 sentidos desde la transmisión a la recepción). Resultando la resolución en dirección del azimut: (Moreira et al., 2013)

$$\delta_a = r_0 \theta_a = r_0 \frac{\lambda}{2L_{sa}} = \frac{d_a}{2}$$

Ecuación 2: ecuación de la resolución en la dirección del azimut.

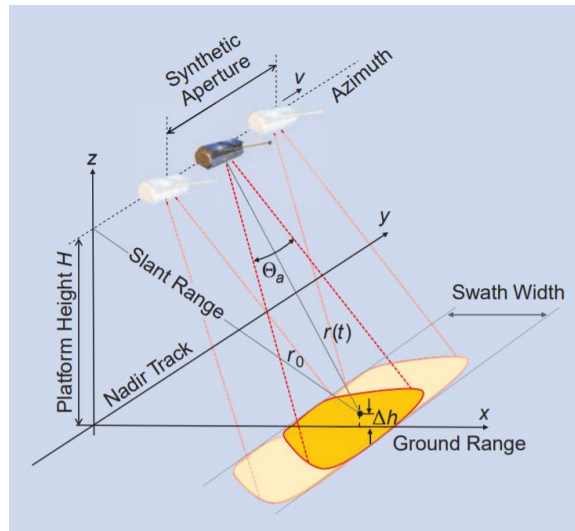


Figura 8: Geometría de SAR. Fuente: (Moreira et al., 2013)

4.2 Parámetros específicos y componentes de la imagen Radar

Existen 3 componentes que influyen en la señal retro-dispersada, estos son longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia.

La longitud de onda se define como la interacción de la señal con el medio. A mayor longitud de onda (menor frecuencia), mayor penetración en el medio.

En la Figura 9 se observan las longitudes de onda que utilizan los sistemas SAR, que varían entre 0,3 cm y 100 cm y sus nombres de banda respectivos, y su posición en el espectro electromagnético (microondas).

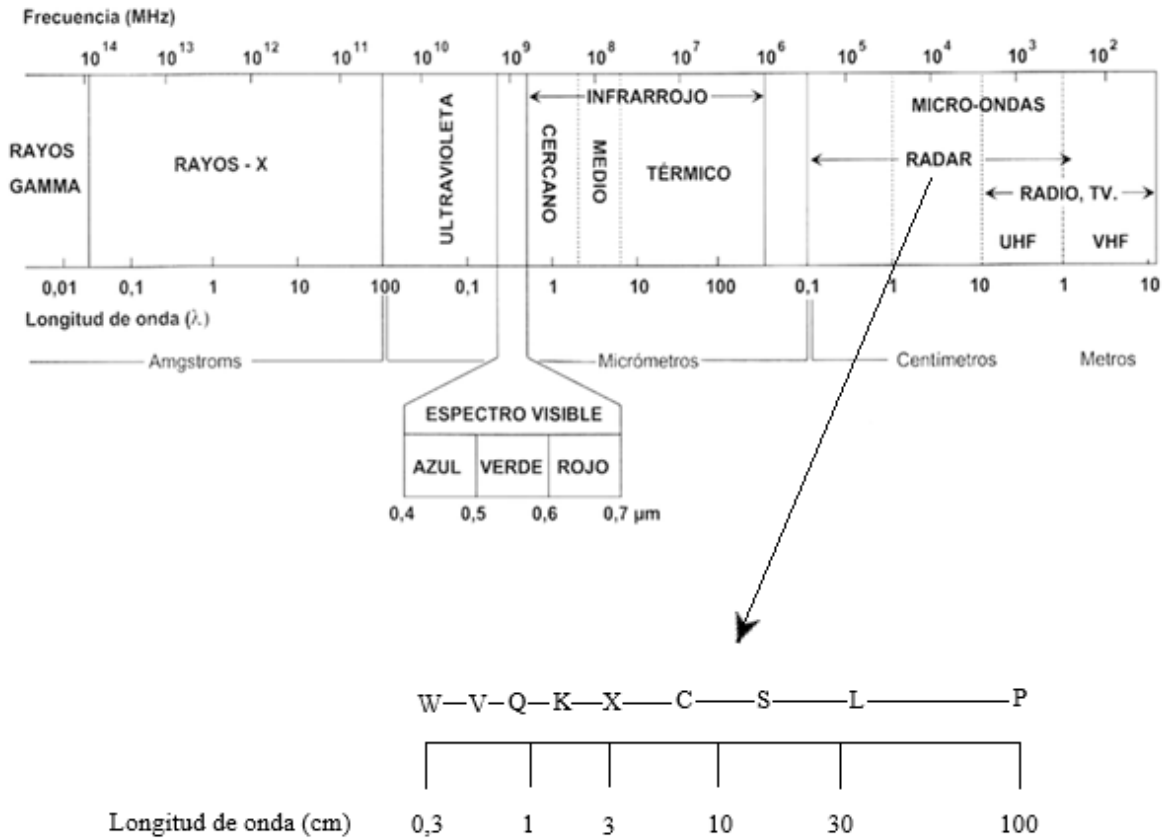


Figura 9: Espectro electromagnético y longitud de onda de bandas de satélites radar. Fuente: (Universitat Politècnica de València, 2014)

Las longitudes de onda más frecuentes en los radares son se definen en la Tabla 5:

Tabla 5: longitudes de onda más frecuentes en sistemas SAR, con sus respectivas longitudes de onda, frecuencias y sensores que las poseen. Fuente: (NASA Video, 2018; SARMAP, 2009)

Designación de banda	Longitud de onda (λ) [cm]	Frecuencia (ν) GH	Sensor radar.
Ka (0,86 cm)	0,8-1,1	40-26,5	-
K	1,1-1,7	26,5-18	Dominio militar
Ku	1,7-2,4	18-12,5	-
X (3 cm, 3,2 cm)	2,4-3,8	12,5-8	TerraSAR-X-1, COSMO-SkyMed
C (6 cm)	3,8-7,5	8-4	ERS-1/2 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, RISAT-1
S	7,5-15	4-2	Almaz-1
L (23,5 cm, 25 cm)	15-30	2-1	JERS-1 SAR, ALOS PALSAR
P (68 cm)	30-100	1-0,3	AIRSAR

Además, en la tabla

Tabla 6, se observan las distintas aplicaciones para las diferentes frecuencias:

Tabla 6: se describen las distintas aplicaciones que tienen determinadas frecuencias de radares SAR. Fuente: (NASA Video, 2018)

Frecuencia de banda	Rango de frecuencia	Aplicaciones
VHF	300 KHz - 300MHz	Follaje/suelo penetrante, biomasa
P	300 MHz - 1GHz	Biomasa, humedad de suelo
L	1GHz - 2GHz	Agricultura, silvicultura, humedad del suelo
C	4GHz - 8 GHz	Océanos, agricultura
X	8 GHz - 12 GHz	Agricultura, océano, radar de alta resolución
Ku	14 GHz - 18 GHz	Glaciología
Ka	27 GHz - 47 GHz	Radar de alta resolución



La muestra la penetración de las bandas X, C y L en áreas de cobertura forestal. La banda X penetrará la parte superior de la vegetación. La banda C penetrará más profundamente y la banda L en la mayoría de los casos penetrará hasta llegar al suelo.

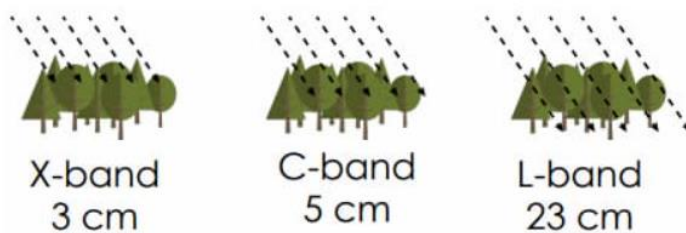


Figura 10: penetración diferentes bandas en medios con vegetación. Fuente:(Villegas, 2019)

En la Figura 11 muestra la penetración en un suelo seco para las bandas X, C y L. Con la banda X nada más se ve la superficie superior con una penetración mínima, mientras que la penetración es mucho mayor con la banda L y, la penetración con la banda C es intermedia entre X y L.

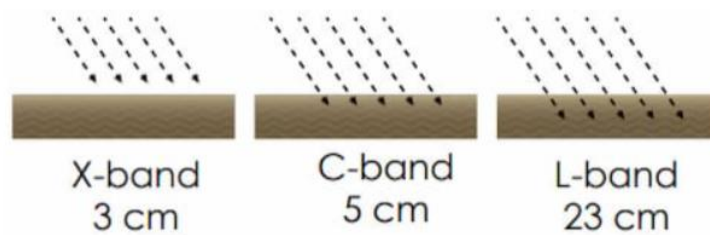


Figura 11: penetración de diferentes bandas en medios de suelo seco. Fuente: (Villegas, 2019)

La polarización corresponde al plano de propagación del campo eléctrico de la señal. Es independiente de la longitud de onda y pueden ser transmitidas y/o recibidas de forma horizontal (H) o vertical (V).

Las combinaciones de polarización existentes son 4:

HH: transmisión horizontal, recepción horizontal

HV: transmisión horizontal, recepción vertical

VH: transmisión vertical, recepción horizontal

VV: transmisión vertical, recepción vertical

La configuración Quad-Pol mide los cuatro tipos de polarización. Diferentes polarizaciones pueden ser usadas para determinar las propiedades físicas del objeto. (Podest, 2018)

Por último, el ángulo de incidencia corresponde al ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la vertical de la superficie del terreno. Este ángulo varía en la franja de cobertura del radar. Influye en la intensidad de la imagen.

Ángulos más pequeños significan mayor penetración y retro-dispersión más alta, obteniendo tonos más brillantes. Al incrementar el ángulo de incidencia disminuye la retro-dispersión y la superficie aparenta ser más lisa. (Podest, 2018).

En la Figura 12, se muestra un esquema del ángulo de incidencia en la superficie.

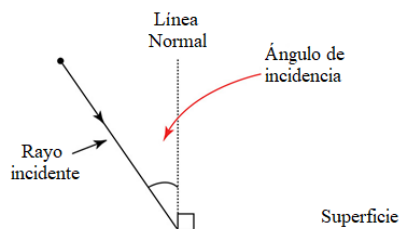


Figura 12: ángulo de incidencia en superficie.

Por lo tanto, la reflectividad y en consecuencia la brillantez de la superficie depende de la fracción de energía transmitida que regresa al radar después de interactuar con objetos en superficie. En específico esta depende de (Podest, 2018):

1. Ángulo de incidencia
2. Frecuencia o longitud de onda
3. Polarización de onda
4. Constante dieléctrica de la superficie
5. Aspeza de la superficie en relación con la longitud de onda
6. Estructura y orientación del objeto en superficie.

Los primeros 3 son características del radar. Los últimos 3 dependen de la superficie.

La constante dieléctrica es una medida de la propiedad eléctrica de la superficie. Influye en la capacidad del material para absorber, reflejar o transmitir la energía. Afecta la dispersión. La presencia de humedad aumenta la constante dieléctrica de un material, por lo tanto, aumenta la reflectividad y brillantez.

La aspereza es uno de los factores dominantes para determinar los tonos. La aspereza se refiere a las variaciones promedio en la altura de la superficie, en relación con el plano. Una superficie lisa tiene variaciones en altura más pequeñas que la longitud de onda del radar. Una superficie será más áspera cuando la longitud de onda disminuya. Las superficies ásperas serán más brillantes en la imagen.

El tamaño y orientación de los objetos influyen en la interacción de las ondas horizontal o verticalmente polarizadas.

4.3 La imagen SAR

Una imagen SAR se puede ver como un mosaico (formado por columnas y filas) de píxeles, cada píxel se asocia con una pequeña área de la superficie de la tierra. Cada píxel entrega un número complejo que tiene información de amplitud y fase de las microondas retro-dispersadas en la superficie. Diferentes filas de la imagen se asocian a diferentes locaciones en el azimut y las diferentes columnas indican las diferentes locaciones en la dirección del rango. (Ferretti et al., 2007)

Una imagen SAR nos proporciona un mapa de reflectividad del área que ilumina. La intensidad de la señal reflejada permite discriminar entre diferentes objetos del terreno. De esta manera aquellos objetos que devuelven más señal al radar se identificaran como puntos brillantes en la imagen y las superficies más lisas o planas son las que devuelven menos señal y se identifican como zonas oscuras. (Gimeno Martínez, 2019).

A diferencia de los sensores ópticos, la visualización de datos SAR sin procesar no dan ninguna información útil sobre la escena. Es solo después del procesamiento de la señal que se obtiene una imagen. En la Figura 13, se observa la diferencia entre la imagen antes de procesar (RAW) y la imagen luego de ser procesada, llamada SLC (Single Look Complex).

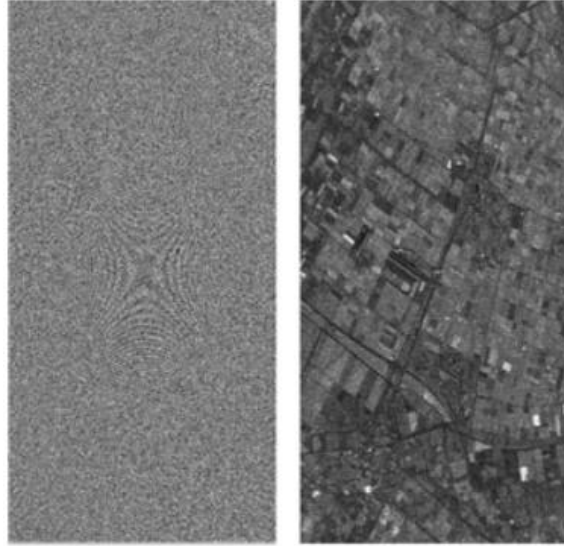


Figura 13: Izquierda muestra la data SAR sin procesar (señal RAW). Derecha muestra la imagen la procesada (imagen SLC). Fuente: (Barbier, 2006)

La amplitud corresponde a la energía retro-dispersada hacia el sensor. Esta depende de las características del objetivo iluminado.

La fase es la distancia r entre el sensor y el objetivo. Cada vez que la partícula recorre una distancia igual a la longitud de onda λ , se dice que recorrió un ciclo igual a 2π . Quedando definida la fase como ϕ según la Ecuación 3. El número 4 se debe a que la onda recorre 2 veces la distancia r (desde el sensor al objetivo y de vuelta).

$$\phi = \frac{4\pi r}{\lambda}$$

Ecuación 3: ecuación de fase.

La Figura 14 muestra la imagen de la amplitud recibida y la imagen de la fase.

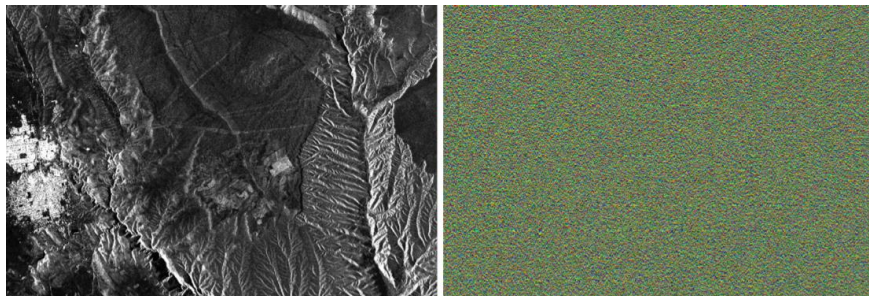


Figura 14: en la parte izquierda se observa la imagen de la amplitud y en la parte derecha se observa la fase. Fuente: (Grunfeld Brook, Sin Fecha)

4.4 Modos de adquisición

Existen diferentes modos de obtención de imágenes, que varían controlando el patrón de radiación de la antena, dividiendo la antena en sub-aperturas y controlando la fase y la amplitud de cada sub-apertura a través de módulos de transmisión/recepción (TRM). Los principales modos de adquisición son Stripmap mode, ScanSAR mode y Spotlight mode. (SARMAP, 2009)

Stripmap mode: es el modo más fundamental, donde el patrón se fija a una franja (swath), generando así una única franja continua.

ScanSAR mode: se emplea cuando se requiere una franja más amplia. Aquí el diagrama de elevación de la antena se dirige sucesivamente a diferentes ángulos de elevación correspondientes a múltiples sub-franjas. Después de un procesamiento apropiado, se produce una imagen de SAR de franja amplia, sin embargo, la resolución del azimut se degrada en comparación con el modo de mapa de bandas.

Spotlight mode: se utiliza cuando se requiere una mejor resolución de azimut. Aquí, el patrón de antena se dirige en azimut hacia un punto fijo para iluminar una región determinada. Sin embargo, no genera imágenes de una franja continua sino de parches individuales a lo largo de la trayectoria de vuelo del radar.

En la Figura 15, se muestran los 3 modos de adquisición de imágenes, Stripmap, ScanSAR y Spotlight y las diferencias entre ellos.

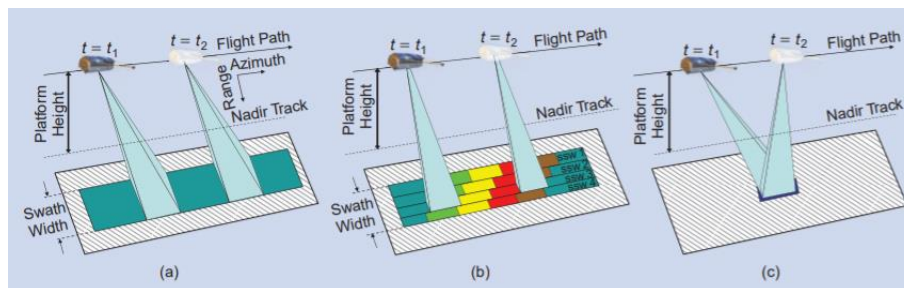


Figura 15: se observan los 3 modos de adquisición de imágenes SAR. A) Stripmap mode. B) ScanSAR mode, c) spotlight mode. Fuente:(Moreira et al., 2013a)

4.5 Mecanismos de interacción de la señal de radar con la superficie

Las imágenes SAR representan un estimado de la retro-dispersión del radar en esa superficie. Superficies más oscuras representan baja retro-dispersión, mientras que áreas brillantes representan gran retro-dispersión.

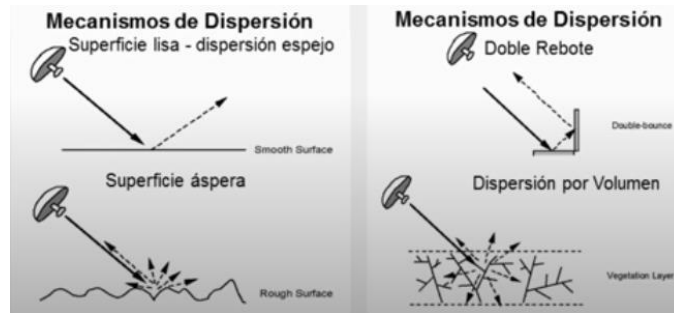


Figura 16: se observan los mecanismos de dispersión. Fuente: (NASA Video, 2018)

En la Figura 16 se pueden observar 4 tipos de mecanismos de dispersión. (Podest, 2018)

En una superficie lisa ocurre una dispersión espejo, donde la mayor parte de la energía incidente es reflejada en la dirección opuesta al radar. En consecuencia, estas áreas aparecen oscuras en la imagen. Esto ocurre en superficies de agua sin vegetación.

En una superficie áspera la energía se dispersa en todas las direcciones y parte llegara al radar. Estas zonas aparecerán brillantes en la imagen.

El doble rebote ocurre cuando 2 superficies forman ángulo recto en dirección al radar, la energía rebota 2 veces, reflejando la mayor parte de la energía. Esto ocurre en áreas urbanas y de vegetación inundada, apareciendo más brillantes en la imagen.

La dispersión por volumen ocurre dentro de un medio, existen múltiples rebotes de diferentes componentes y capas. Visto por lo general en superficies con nieve o vegetación.

4.6 Distorsiones geométricas y radiométricas de la señal

Los efectos de distorsión geométrica deben considerarse al usar datos SAR en investigaciones geotécnicas, especialmente en los proyectos de monitoreo de subsidencias y desplazamientos. Debido a las propiedades geométricas de los datos SAR en la dirección del rango y del azimut, se deben estudiar por separado. Las distorsiones en la dirección del rango son grandes, causadas principalmente por variaciones topográficas. Las distorsiones en azimut son mucho más pequeñas, pero más complejas (SARMAP, 2009). Estas distorsiones son necesario corregir para el correcto análisis de las imágenes.

- **Distorsión por distancia oblicua (Slant Range Distortion):** se debe a la naturaleza de visión lateral del radar. La distancia entre la señal recibida y el sensor no es verdadera, por lo que las áreas más cercanas al sensor se ven más comprimidas y las más alejadas se ven más elongadas. En la Figura 17 se observa la diferencia entre las imágenes debido a la distorsión por distancia oblicua.

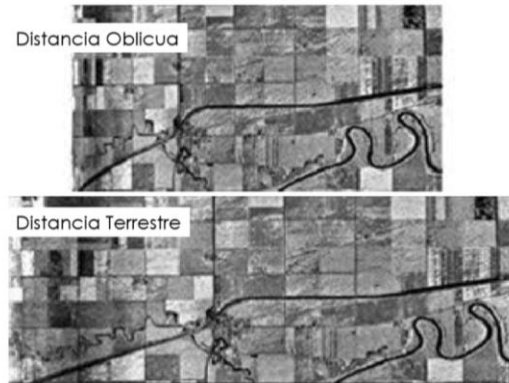


Figura 17: distorsión por distancia oblicua. Fuente: Natural Resources Canada

- **Inversión por relieve (layover):** corresponde a un desplazamiento en la dirección perpendicular al movimiento del radar. Ocurre cuando la señal del radar llega a la cima de una estructura vertical antes de llegar a la base de esta. Indicando que la cima de la estructura está abajo y la base está arriba, apareciendo invertido en la imagen radar. Se puede corregir con un modelo digital de elevación. En la Figura 18, se observa gráficamente los efectos de la Inversión por relieve.

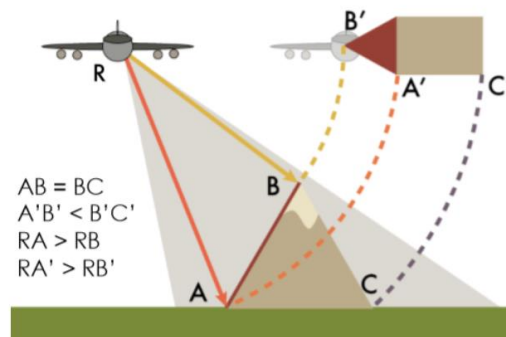


Figura 18: Inversión por relieve. Fuente: (Villegas, 2020)

- **Desplazamiento de estructura (foreshortening):** ocurre cuando la señal del radar llega a la base de una estructura alta (orientada hacia el radar), y esta señal llega antes que la señal que llega a la cima, pero debido a que el radar está mirando de lado, la distancia entre la base y

la cima aparece comprimida, es decir parece ser muy pequeña de lo que realmente es. En la Figura 19 se observa gráficamente el efecto de esta distorsión.

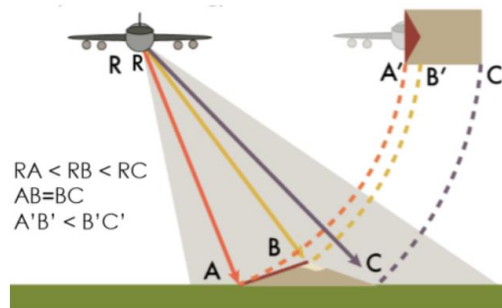


Figura 19: desplazamiento de estructuras. Fuente: (Villegas, 2020)

- **Sombra (shadowing):** Cuando hay topografía demasiado compleja el radar no puede ver detrás de una estructura vertical alta, apareciendo como zonas oscuras. El efecto sombra “shadowing” causa que el área no esté iluminada completamente por el sensor debido a que la pendiente está contraria al sensor. En la Figura 20, se observa un esquema de porque sucede este fenómeno, y como se ve en el producto final.

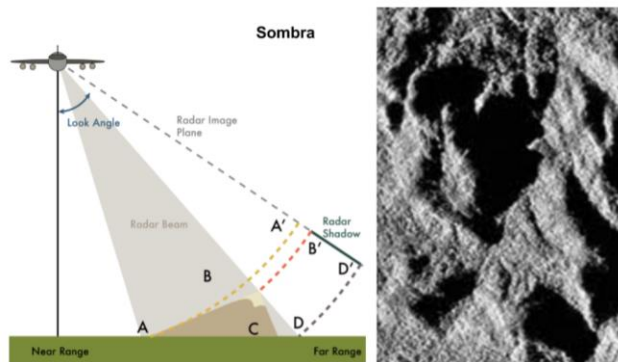


Figura 20: Sombra. Fuente:(Villegas, 2020)

- **Distorsión radiométrica:** cuando el radar transmite la señal, hay un patrón de la antena donde la mayor parte de la energía está concentrada en la parte central del área en iluminación y en las partes aledañas hay menos energía, esto produce áreas más brillantes en el centro de la imagen, y más oscuras en las esquinas. Se puede corregir conociendo el patrón de la antena. En la Figura 21 se observa la diferencia antes y después de corregir la imagen por efectos de distorsión radiométrica.

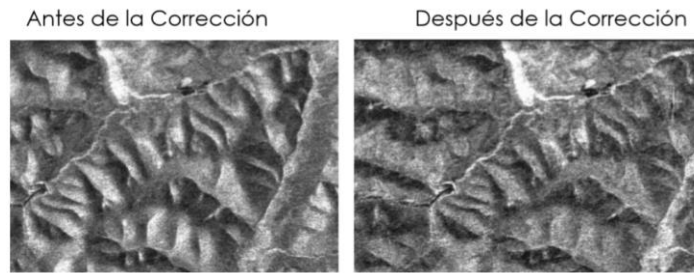


Figura 21: Distorsión radiométrica. Fuente:(Villegas, 2020)

4.7 Efecto Speckle

Corresponde a un “ruido” en la imagen de forma granular que existe inherentemente y degrada la calidad de la imagen. Es causado por la presencia de muchos dispersores elementales con una distribución aleatoria dentro de una celda de resolución, como se observa en la Figura 22. La suma coherente de sus amplitudes y fases da como resultado fuertes fluctuaciones de la retrodispersión de celda de resolución a celda de resolución. En consecuencia, la intensidad y la fase en la imagen final ya no son determinista, pero siguen una distribución exponencial y uniforme, respectivamente. Se puede mejorar el aspecto de este como se observa en la Figura 23 mediante 2 métodos: procesamientos multi-look y filtración espacial. (Moreira et al., 2013a)

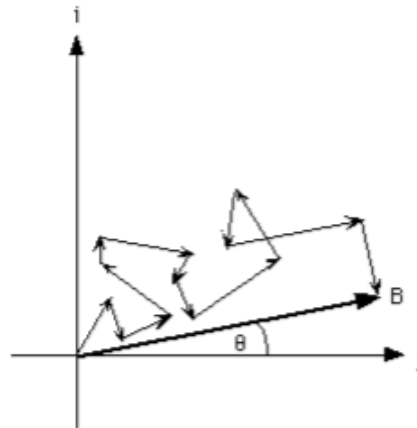


Figura 22: Efecto Speckle. Fuente: (SARMAP, 2009)

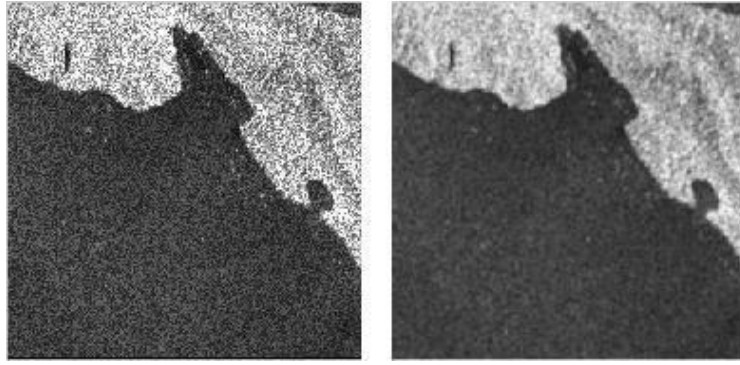


Figura 23: Efecto Speckle antes y después de corrección. Fuente: (Vijayan et al., 2015)

Para poder medir las deformaciones de la superficie utilizando el sistema SAR, se debe aplicar la técnica de interferometría que de forma cuantitativa mide la diferencia de fase entre dos imágenes. En la cual se ahondará en la sección 5.

5. Interferometría SAR – InSAR

La interferometría SAR (de ahora en adelante InSAR) corresponde a una técnica de teledetección potente y bien establecida que permite la alta precisión en la medición de importantes parámetros geofísicos como topografía superficial, deformación y hundimiento de suelo (Moreira et al., 2013)

La técnica consiste en comparar para una superficie determinada, la fase de al menos dos imágenes SAR de valor complejo, obteniendo un interferograma.

Para que la segunda imagen SAR proporcione información adicional, al menos un parámetro de imagen debe ser diferente en comparación a la primera imagen. Este parámetro puede ser por ejemplo ruta de vuelo, tiempo de adquisición, longitud de onda (determinará el tipo de interferómetro). (Bamler & Hartl, 1998). La imagen principal se conoce como “master image” y la imagen adicional secundaria se conoce como “slave image”.

La línea de base (baseline en inglés) corresponde a la separación de las antenas, siendo el vector que conecta las posiciones de ambas orbitas (Rosen et al., 2000)

Mediante esta técnica es posible detectar y medir pequeñas diferencias de longitud de trayectoria con precisión en el rango de los centímetros o incluso de milímetros. Esta precisión es independiente de la distancia entre el sensor y la escena, lo que hace al InSAR muy relevante para la teledetección aérea y espacial. (Moreira et al., 2013)

En la Figura 24, S1 y S2 corresponden a dos sistemas de radar, separadas por una línea de base b , iluminando la misma área. Para un punto en la Tierra P con elevación y , la fase interferométrica asociada con la señal transmitida y recibida es:

$$\phi_{1(2)} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_{1(2)}$$

Donde $r_{1(2)} = |r_{1(2)}|$ y es la longitud de onda del sistema radar. Ahora la diferencia de fase entre 2 pulsos está dada por:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (r_1 - r_2)$$

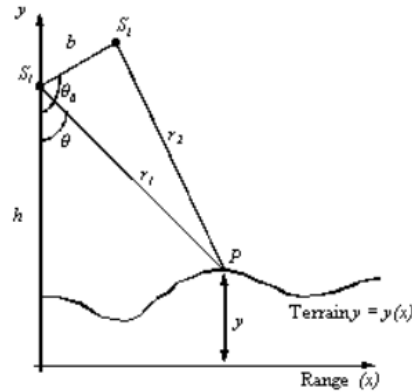


Figura 24: geometría de la interferometría SAR para medir distancia. Fuente: (Singh et al., 2014)

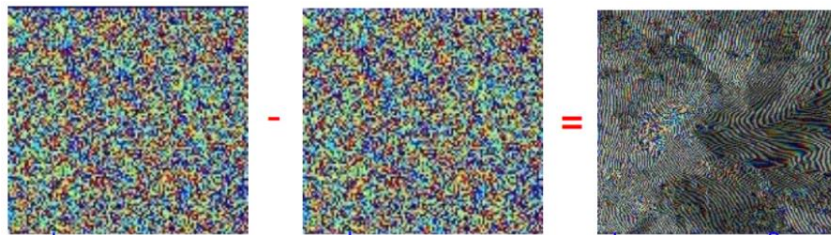


Figura 25: Diferencia de fase entre 2 imágenes, resultando en el interferograma de la derecha, desde donde se puede obtener el DEM.

5.1 Interferograma

Se forma multiplicando píxel a píxel, la primera imagen con el complejo conjugado de la segunda. Por lo que la amplitud del interferograma es de la primera multiplicada por la de la segunda. La fase es la diferencia de la fase entre las imágenes. (Ferretti et al., 2007)

Los interferogramas se construyen a partir de datos SAR y muestran el cambio relativo de la superficie. Requieren dos imágenes en distintos intervalos de tiempo para poder determinar si ha habido algún cambio en la superficie. Si el suelo se ha alejado o acercado al satélite (hundido o elevado) entre los tiempos de las dos imágenes SAR, se reflejará una porción ligeramente diferente de la longitud de onda, dando como resultado un cambio de fase medible proporcional al desplazamiento. El mapa de cambios de fase o interferograma se representa con una escala de color repetida que muestra el desplazamiento relativo entre la primera y segunda imagen. La dirección del desplazamiento (hundimiento o elevación) se indica mediante la secuencia de la progresión del color de las franjas hacia el centro de una característica deformante. (USGS, Sin Fecha). En la Figura 25 se observa lo descrito anteriormente.

Una desventaja de este método es que la diferencia de alcance medida es ambigua de la altitud del terreno, debido al ciclo natural interferométrico 2π . Esta ambigüedad se resuelve típicamente

mediante el uso de información externa junto con supuestos de regularidad apropiados sobre la escena de la imagen, un proceso conocido como desenvolvimiento de fase. (Ferretti et al., 2007)

El supuesto básico para llevar a cabo mediciones interferométricas se conoce como ausencia de decorrelación o coherencia completa, la cual consiste en que mientras la reflectividad compleja del píxel en su conjunto (reflectividad de todos los elementos y de sus caminos diferenciales sensor-objetivo) no cambia en el tiempo transcurrido entre las adquisiciones radar, esto es cancelado desde la fase interferométrica. Sin embargo, en realidad el término denominado reflectividad diferencial residual siempre afecta la fase interferométrica y se conoce como ruido de decorrelación (Colesanti & Wasowski, 2006)

Los factores que provocan que las señales InSAR se decorrelacionen (se vuelvan incoherentes) son:

- Ruido termal y de procesadores
- Dispersión diferencial geométrica y volumétrica
- Rotación de geometría de visualización
- Movimientos aleatorios a través del tiempo

Esta decorrelación se relaciona a la desviación estándar de la fase local del interferómetro. Afectando a la exactitud y desplazamiento y a la habilidad de desenvolver la fase.

Los efectos de la correlación se multiplican a diferencia de los de la fase que se suman. Por lo que una baja coherencia o decorrelación causa una pérdida de información.

5.2 Tipos de interferometría con radar

Las imágenes para InSAR se obtienen de trayectorias de vuelo mutuamente desplazadas o de una misma pista de vuelo, pero en diferentes momentos.

El primero se conoce como interferometría transversal y permite, además de varias otras aplicaciones, una medición precisa de la topografía de la superficie. Las imágenes SAR implican una proyección en el espacio de objetos 3-D a una imagen plana de radar 2-D. Una sola imagen SAR no contiene información del ángulo de elevación ni altura de la superficie en la imagen. Este tipo de interferometría ayuda a superar esta limitación, obteniendo el ángulo de elevación con alta precisión. Para esto se mapea la escena con una segunda antena que se mueve a lo largo de una trayectoria de vuelo que está lateralmente desplazado de la primera antena (Moreira et al., 2013a). Como se muestra en la Figura 26.

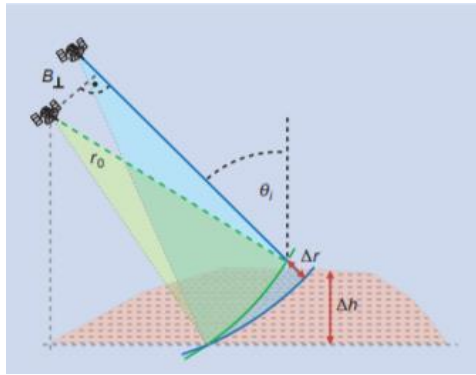


Figura 26: Interferometría transversal. Fuente: (Moreira et al., 2013)

El segundo es conocido como interferometría diferencial o de seguimiento. Variando la línea de base temporal entre las adquisiciones interferométricas, velocidades que van desde varios metros por segundo se pueden medir con precisión hasta unos pocos milímetros por año. (Moreira et al., 2013)

Por lo general la técnica de interferometría SAR (InSAR) se usa para obtener la topografía del terreno, y la interferometría diferencial SAR (DInSAR) se utiliza para la medida de deformación del terreno como subsidencia o movimientos de ladera.

En la Sección 6 se ahondará en el tema de DInSAR y sus conceptos más importantes.

6. Interferometría SAR Diferencial - DInSAR

Uno de los problemas de InSAR es que la señal de deformación se mezcla con la señal de la topografía. Como solución a este problema se plantea la interferometría diferencial, donde la señal topográfica obtenida desde el interferograma topográfico es escalada a condiciones de la línea de base del interferograma de deformación y consecuentemente sustraída, entregando así un interferograma diferencial (Gabriel et al., 1989)

Existen fuentes de ruido de fase, las cuales se debe a la presencia de muchos dispersores en la celda de resolución y su cambio en el tiempo. Se deben considerar principalmente 3 fuentes de ruido: (Ferretti et al., 2007)

- Debido a cambios temporales del dispersor: en áreas con fuentes de agua o con vegetación los dispersores cambian totalmente. En cambio, en zonas con rocas o áreas urbanas los dispersores permanecen estables por años.
- Debido a diferentes ángulos de observación: El efecto speckle cambiará incluso si los dispersores no cambian en el tiempo. Existe una línea de base crítica sobre la cual la fase interferométrica es puro ruido, esta depende de la dimensión de la celda, resolución del rango terrestre, de la frecuencia del radar y de la distancia entre el sensor y el objetivo.
- Debido al volumen del dispersor: La línea de base crítica se reduce en el caso de la dispersión de volumen cuando los dispersores elementales no están dispuestos en una superficie plana, sino que ocupan un volumen (por ejemplo, las ramas de un árbol). En este caso, el efecto speckle depende también de la profundidad del volumen ocupado por los dispersores elementales.

En la Figura 27, se observa el esquema de la técnica DInSAR. En t_0 , el sensor adquiere una primera imagen SAR con fase ϕ_M . Luego se asume que se produce una deformación del terreno $D(t)$, que tiene una evolución determinada en el tiempo, el punto P se mueve a P^1 . El sensor adquiere una segunda imagen en el tiempo t , midiendo la fase ϕ_S (Crosetto et al., 2005).

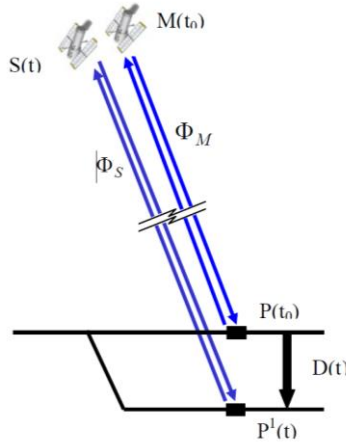


Figura 27: Diagrama de adquisición en caso de subsidencia entre las dos pasadas de un satélite. Fuente: (Crosetto et al., 2005)

La fase interferométrica se ve afectada por diversos parámetros:

$$\Delta\phi_{Int} = \phi_S - \phi_M = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{SP^1 - SP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{Atm} + \phi_N = \phi_{Topo} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_N$$

Ecuación 4: ecuación fase interferométrica.

Donde:

ϕ_S y ϕ_M son las fases interferométricas slave y master.

ϕ_{Atm} es la contribución atmosférica

ϕ_N es la componente del ruido

ϕ_{Topo} es la componente debido a la topografía

ϕ_{Mov} es la componente debido al desplazamiento

SP^1 es la distancia del satélite slave al punto

λ es la longitud de onda radar.

Si se conoce la topografía, mediante un DEM, ϕ_{Topo} se puede sustraer de $\Delta\phi_{Int}$, obteniendo la fase DInSAR $\Delta\phi_{D-Int}$:

$$\Delta\phi_{D-Int} = \Delta\phi_{Int} - \Delta\phi_{Topo_Sim} = \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_{Res_Topo} + \phi_N$$

Ecuación 5: ecuación de fase DInSAR

Donde $\Delta\phi_{Topo_Sim}$ es el componente topográfico simulado o sintético y ϕ_{Res_Topo} es la componente residual debido a errores del DEM.

Cuando dos imágenes SAR interferométricas no son simultáneas, el camino de viaje de la radiación para cada una puede ser afectada diferente por la atmósfera. Factores como humedad atmosférica, temperatura y presión tendrán consecuencia en la fase interferométrica. Esto afecta la medida tanto de altitud como de medida de deformaciones (Ferretti et al., 2007).

Para lograr mejorar las deficiencias de las técnicas DInSAR, existen métodos DInSAR que utilizan grandes conjuntos de imágenes SAR adquiridas sobre la misma superficie, en un tiempo amplio. Estas técnicas se conocen como técnicas Avanzadas DInSAR (de ahora en adelante A-DInSAR) y representan un avance respecto a la capacidad de modelado de deformaciones como calidad de la estimación de la deformación, alcanzando en algunos casos precisión milimétrica, minimización de errores topográficos y efectos atmosféricos. (Crosetto et al., 2005). Las principales técnicas A-DInSAR serán brevemente descritas en la Sección 6.1.

6.1 Interferometría Diferencial Avanzada A-DInSAR o Técnicas de Multi-Interferograma

Existen diferentes métodos, los que se describirán brevemente a continuación, para un estudio más detallado de estos consultar los autores citados.

6.1.1 Small Baseline DInSAR (SBAS)

Esta técnica permite detectar la deformación de la superficie de la Tierra y analizar su evolución temporal. Se basa en el uso de una gran cantidad de adquisiciones de SAR e implementa una combinación de los interferogramas DInSAR multilook, calculados a partir de estos datos, obteniendo finalmente mapas de velocidad de deformación media. (Lanari et al., 2007). Dado que este tema escapa de los alcances de la presente memoria de título, no se ahondará en mayores detalles. Mayor información se encuentra detallada en (Berardino et al., 2002)

6.1.2 Interferometric Point Target Analysis (IPTA)

Corresponde a un método para explotar las características temporales y espaciales de las firmas interferométricas recogidas de objetivos puntuales para mapear con precisión los historiales de deformación de la superficie, las alturas del terreno, y retrasos relativos en la trayectoria atmosférica. En este método el interferograma es interpretado solo para puntos seleccionados. Por razones de almacenamiento se usan estructuras de datos en formato vectorial en lugar de datos ráster utilizados en la interferometría convencional. (Werner et al., 2003)

6.1.3 Coherent Pixels Technique (CPT)

Esta técnica fue desarrollada en el Laboratorio de teledetección (RSLab) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). CPT es capaz de extraer de una pila de interferogramas diferenciales la evolución de la deformación en grandes áreas durante amplios periodos de tiempo. Estima componentes lineales y no lineales del desplazamiento, además del error del DEM y los efectos atmosféricos para un número reducido de interferogramas que se tratan como conjunto y no necesitan imagen master en común. (Blanco-Sanchez et al., 2008)

6.1.4 Stable Point Network (SPN)

Esta técnica utiliza solo una clase particular de píxel, que corresponden a los puntos que muestran un comportamiento electromagnético estable durante el tiempo de observación. Entrega mapas de deformación promedio, series de tiempo de deformación y mapas del error topográfico residual para geocodificar con precisión los productos. (Crosetto et al., 2008)

6.1.5 Permanent Scatterers (PS)

La decorrelación temporal y geométrica a menudo evita que la interferometría SAR sea una herramienta operativa para superficies monitoreo de deformaciones y reconstrucción de perfiles topográficos. Además, las perturbaciones atmosféricas pueden comprometer fuertemente la exactitud de los resultados. Esta técnica estima la velocidad de ciertos puntos de las imágenes. Estos puntos corresponden a objetos en la superficie que permanecen invariables en el periodo de análisis, es decir que cumplan la condición de amplitud estable. Los verdaderos permanent scatterers tienen coherencia sobre el umbral. La densidad mínima de PS debe ser más de 25 por km². Cuando la dimensión del PS es menor que la celda de resolución, la coherencia es buena incluso para interferogramas con líneas de base mayores que la de decorrelación. La precisión de DEM y la detección milimétrica del movimiento del terreno pueden lograrse, ya que las contribuciones de la pantalla de fase atmosférica se pueden estimar y eliminar. (Ferretti et al., 2001)

En la Sección 7 se describirán a detalle las etapas del proceso interferométrico.

7. Etapas del proceso interferométrico

En esta sección se describirán las etapas para el procesamiento de imágenes para el movimiento de terreno mediante DInSAR. Esta metodología fue desarrollada por María Paz Fernández en su Tesis Doctoral titulada “Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría Radar DInSAR” (Fernández Oliveras, 2009) desarrollada en conjunto con el Instituto de Geomática de Cataluña y la Universidad de Granada. Esta metodología se divide en 3 etapas, Pre-DInSAR, DInSAR y Post-DInSAR, que se detallan a continuación:

7.1 Etapas Pre-DInSAR

Esta etapa describe los pasos previos a considerar antes de realizar un estudio mediante DInSAR. En primer lugar, hay que verificar la viabilidad del estudio mediante esta técnica, que fue desarrollada con el objetivo de monitorear movimientos de laderas y subsidencias. Los requisitos por cumplir se pueden dividir en 3 categorías:

7.1.1 Relacionados con el proceso geológico de la zona

Esta categoría se relaciona con las características del proceso que se quiere estudiar:

- a) Extensión de la zona afectada: esta debe ser bastante mayor que la resolución espacial del sensor, para poder apreciar la extensión del terreno afectado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la capacidad de los satélites para el estudio de movimientos a distintas escalas.

Tabla 7: Capacidad de los satélites DInSAR para el estudio de movimientos, basada en la escala espacial utilizada en ecología. Fuente: (Canuti et al., 2004)

Escala espacial	Dimensión (km)	DInSAR
Parcela	0-1	Si
Paisaje	1-10	Si
Mesoescala	10-100	Si
Regional	100-1000	Si
Continental	1000-10000	No

- b) Factor tiempo: determinar el intervalo de tiempo que abarcará el estudio, para lo que hay que tener en cuenta la periodicidad de la toma de imágenes de los sensores disponibles, determinando el intervalo mínimo para realización de interferograma. (Canuti et al., 2004). En la Tabla 8, se muestra la capacidad de DInSAR para monitorear movimientos en distintos intervalos de tiempo.

Tabla 8: Capacidad de DInSAR actuales para monitorear movimientos en distintos intervalos de tiempo. Fuente:(Canuti et al., 2004)

Escala temporal	DInSAR
Segundo, Minuto, Hora, Día, Semana	No
Mes	Si
Año	Si
Década	Si

- c) Velocidad: si la deformación es muy rápida no podrá ser analizada por DInSAR. Por el contrario, los movimientos extremadamente lento o muy lento (<16 mm/año y 1,6 m/año respectivamente, según la escala de velocidad de deformación propuesta por la IUGS/WGL (1995)), pueden ser monitoreados mediante esta técnica debido a las limitaciones debido a los problemas de ambigüedad de fase y decorrelación temporal, que se asocian a los intervalos de adquisición de datos sucesivos. (Canuti et al., 2004)

- d) Tipo de desplazamiento: la estimación de deformación vertical obtenida con DInSAR está referida a la línea de visión del sensor (Line of Sight (LOS)). Los movimientos traslacionales (por ejemplo, la masa se desplaza hacia abajo) podrán ser estudiados con este tipo de técnica.

- e) Características locales: en cuanto a topografía, cobertura (vegetación, obras y edificaciones). Para topografía verificar si la zona se encuentra en una ladera, analizando la pendiente y orientación o cambios bruscos de pendiente, todo esto influye en la adecuada toma de imágenes SAR. En cuanto a cobertura, aquellos tipos que varíen en el tiempo no serán adecuados para el estudio, debido a que generarán ruido en el interferograma. El caso de cobertura no adecuada para el estudio será vegetación (efecto estacional), agua (efecto del oleaje), terrenos erosionables (suelos blandos o macizos rocosos alterados). Siendo las coberturas adecuadas para el estudio con técnica DInSAR las que son permanentes en el tiempo, como afloramientos rocosos poco alterados, construcciones y edificaciones (viviendas, obras civiles).

- f) Orientación y pendiente del terreno: esto se relaciona con la dirección e inclinación de la toma de imágenes de los satélites SAR. Su influencia se debe a la inclinación de la LOS del satélite y los efectos geométricos que produce esto en las imágenes, como se ha explicado en la sección 3.7. Esto influye en la posibilidad de obtener resultados distintos dependiendo de la morfología regional en la que se emplace la zona de estudio.

7.1.2 Datos e imágenes disponibles para el estudio

- a) Disponibilidad de información previa: para centrar el análisis y acotarlo. Puede incluir desde inventario hasta estimación de la deformación por otros métodos como topografía clásica o monitoreo con GPS en el área a estudiar, estudios de tipo geológico o geomorfológico de la zona, datos históricos sobre deformaciones, daños, grietas, entre otros.
- b) Características imágenes SAR: como trayectoria del sensor, frecuencia y fecha de toma de imágenes. En cuanto a trayectoria del sensor, puede ser ascendente y descendente, considerar el número total de imágenes disponibles en cada trayectoria. En cuanto a la frecuencia de toma de imágenes, estudiar las combinaciones posibles de imágenes para formar interferogramas, teniendo en cuenta el intervalo temporal entre imágenes.

7.1.3 Selección metodología A-DInSAR

Se necesita una serie de interferogramas de la misma trayectoria. Al ser necesario un número alto de interferogramas, se requiere un número de imágenes tal que sus combinaciones generen un conjunto interferogramas (más de 30), con una distribución lo más uniforme posible dentro del periodo de estudio y con un intervalo temporal adecuado a la velocidad estimada del desplazamiento del terreno y con interferogramas de bases perpendiculares pequeñas para minimizar la componente residual de la topografía. (Berardino et al., 2002; Biescas et al., 2007).

El uso de una pila de interferogramas está condicionado por el objetivo de obtener datos cuantitativos de desplazamiento vertical partiendo del conocimiento previo de que existen zonas afectadas.

7.1.4 Selección imágenes

Los pasos anteriores sirven para verificar la viabilidad del estudio de la zona mediante DInSAR. Lo que sigue es verificar la disponibilidad de imágenes y seleccionar el satélite más adecuado. Lo importante de este paso es determinar el intervalo temporal que se requiere en el estudio, debido a los años en que han estado activos los distintos satélites. En la

Tabla 9 se detallan los principales satélites, y las características importantes para considerar al momento de elegir.

En cuanto a la información sobre costos de este tipo de data, Payam Banazadeh (2016), cofundador y CEO de Capella Space dijo “Hasta el día de hoy, solo tres países han lanzado satélites SAR comerciales: Alemania, Italia y Canadá, y para comprar una imagen de esos satélites, para un cliente comercial tendrá un precio de \$ 3,000 a \$ 6,000”

Tabla 9: Principales misiones SAR, años de actividad, longitud de onda y nacionalidades. Fuente: elaboración propia.

Satélite	Tiempo operativo	Banda	Longitud de onda [cm]	Nacionalidad	Ciclo de repetición (días)	Ángulo (°)	Resolución (m)
ERS-1	1991-2000	C	5,6	Europea	35	23	25

ERS-2	1995-2005	C	5,6	Europea	35	23	25
JERS-1	1992-1998	L	23,5	Japonés	44	39	20
RADARSAT-1	1992-	C	5,6	Canadiense	24	10-58	20-100
RADARSAT-2	2003	C	5,6	Canadiense	24	10-60	3-100
SAOCOM	2003-	L	23	Argentina	7	15-40	10-100
ENVISAT	2002-	C	5,6	Europea	35	14-45	25-250
SENTINEL	2014-	C	6	Español			
PALSAR de ALOS	2006-	L	23,6	Japonés	43	8-60	10-100
TerraSAR-X	2007-	X	3,1	Alemana	11	15-60	3-18

Una vez seleccionado el satélite hay que determinar la zona de interés para realizar el estudio. También hay que decidir si el estudio se hará con imágenes de trayectoria descendente o ascendente, en función de las características de la zona y la disponibilidad de imágenes idóneas.

7.2 Etapa DInSAR

Crosetto et al, (2005), propuso una metodología de dos niveles de estudio complementario para la medición de deformaciones. Este enfoque permite optimizar los recursos, contribuyendo en gran medida al uso operativo de DInSAR para medir deformaciones. Permitiendo analizar el fenómeno en dos niveles:

1. Detección precoz de fenómenos de deformación desconocidos en áreas amplias. Técnica de bajo costo, utilizada para detectar fenómenos de hundimiento desconocido en grandes áreas, proporcionando una primera estimación de las deformaciones. Se realiza con un conjunto limitado de imágenes SAR, disminuyendo el tiempo de procesado.
2. Análisis cuantitativo, más fino y a escala local. Utiliza grandes pilas de imágenes, requiere mayor cantidad de imágenes, por lo tanto, mayor costo y tiempo de procesamiento. Se puede realizar para estudiar fenómenos de deformación de especial relevancia previamente conocidos.

El proceso DInSAR está compuesto de 2 etapas principales (Fernandez et al., 2009). La primera involucra los pasos básicos de procesamiento DInSAR para calcular los interferogramas diferenciales envueltos. El segundo involucra la estimación de la deformación de la velocidad y la interpretación de los resultados y la integración con GIS.

7.2.1 Fase General:

Esta fase incluye las elaboraciones base para cualquier análisis DInSAR. Se puede iniciar el proceso a partir de imágenes RAW o desde imágenes SLC y los pasos se resumen en la Figura 28 y corresponden a:

- a) Co-registro de imágenes SAR: se co-registran las imágenes para hacer referencia a una, es decir, todas las imágenes se transforman a la misma geometría de la imagen de referencia (supermaster).
- b) Utilizando todas las imágenes registradas conjuntamente, se calcula las amplitudes medias o medias de cada píxel y las representamos en la imagen de amplitud media.
- c) Selección de pares de imágenes que se usarán para generar los interferogramas.
- d) Generación de interferogramas diferenciales, que involucra:
 - o Cálculo de interferograma derivado de un par de imágenes SAR registradas conjuntamente.
 - o Simulación de un interferograma sintético para cada interferograma utilizando un DEM de la escena observada. Esta simulación se utiliza para eliminar el componente topográfico del interferograma original.
 - o Eliminando la fase topográfica del interferograma original utilizando el interferograma sintético, se obtiene el llamado interferograma diferencial.

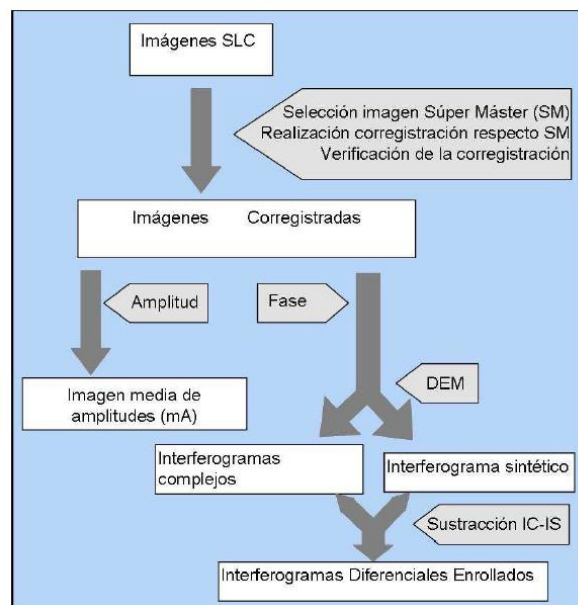


Figura 28: Esquema de la fase general de la metodología DInSAR, Fuente: (Fernández Oliveras, 2009)

7.2.2 Fase específica:

Se basa en el procesamiento DInSAR desarrollado por el Instituto de Geomática (Biescas et al., 2007). Esta fase trabaja con un gran número de imágenes SAR adquirida en la misma área. El principal resultado de esta fase es la velocidad de deformación en la LOS (Line of Sight) del SAR para el intervalo temporal considerado. La estimación de las velocidades de deformación requiere 4 pasos principales.

- Selección de píxeles usando la dispersión de amplitud o coherencia y la conexión de todos los píxeles seleccionados por una red. Con esto se restringe la estimación de velocidad solo a píxeles que contiene fases con bajo nivel de ruido.
- Cálculo de la fase diferencial envuelta para cada borde de la red. Se hace calculando la diferencia de las fases envueltas sobre los dos píxeles conectados por el borde.
- Estimación de la velocidad de deformación, basándose en la maximización de la coherencia temporal. Se hace a partir de valores de fase envueltos.
- Integración de la velocidad de deformación en todo conjunto de píxeles seleccionados.

Este procedimiento corresponde a un enfoque DInSAR simplificado que no involucra directamente la estimación del componente atmosférico. Por esta razón, se puede aplicar para estudiar áreas de extensión espacial limitada (pocos kilómetros de extensión), donde el componente atmosférico tiene un impacto insignificante. Este aspecto simplifica considerablemente la implementación del enfoque propuesto. Puede funcionar con criterios de selección de píxeles basados tanto en amplitud como en coherencia. Se puede utilizar con un número limitado de imágenes SAR, digamos al menos diez. Esto representa una característica clave, especialmente para estudiar fenómenos actuales o recientes, donde generalmente es difícil obtener grandes conjuntos de imágenes SAR. (Biescas et al., 2007)

Para fines de interpretación, el mapa de velocidad de deformación puede superponerse a la imagen de amplitud media para proporcionar una ubicación aproximada rápida del área de movimiento con referencia a la tasa de deformación estimada. La geocodificación permite superponer la velocidad de deformación en mapas topográficos u ortoimágenes. Finalmente, estos resultados se interpretan analizando otros tipos de datos en una aplicación GIS, particularmente para mostrar coincidencias o relaciones espaciales entre los datos DINSAR y las unidades geológicas, epicentros de terremotos, tendencias de fallas activas, establecimiento de pozos y ortofotografía local. (Fernandez et al., 2009)

7.3 Post DInSAR

Luego de realizar los pasos anteriores, se obtiene una imagen de velocidad de deformación en la dirección de LOS, geocodificada. Se integran los resultados con otras informaciones y se analizan en un sistema de información geográfica (SIG). Para esto se necesita transformar la imagen resultante en un formato compatible que pueda ser gestionado por el SIG utilizado. El esquema de este procedimiento se muestra en la Figura 29.

La disponibilidad de información sobre los elementos del territorio que puedan estar relacionados con el proceso de deformación del terreno condiciona el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos. Es además fundamental disponer de una cartografía de base para la localización y contextualización de la zona, como primer paso del estudio de los factores relacionados con el proceso de deformación cuantificado (Fernández Oliveras, 2009)

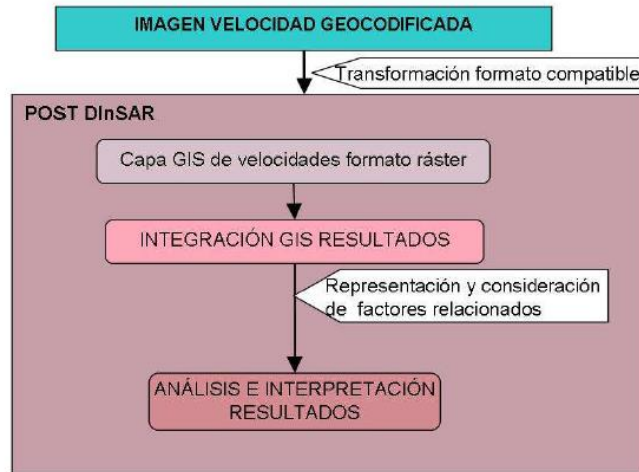


Figura 29: Esquema de la fase Post-DInSAR de la metodología. Fuente: (Fernández Oliveras, 2009)

8. Metodología interferométrica de subsidencia e integración sistema UAV-interferometría

Como se vio anteriormente para aplicar la tecnología DInSAR, se necesita un Modelo Digital de Elevación (DEM), estos pueden ser obtenidos usando métodos como fotogrametría con mapeo aéreo, LiDAR, InSAR y mapeo en terreno (Li et al., 2005)

En esta sección se detallará las características de los sistemas UAV y la metodología para la obtención de un DEM y su integración a la metodología DInSAR.

8.1 Sistemas UAV

Un vehículo aéreo no tripulado (conocido también como dron) es una máquina voladora sin un piloto humano o pasajeros a bordo. Como tal, "no tripulado" implica la ausencia total de un humano que dirija y pilote activamente la aeronave. Las funciones de control para aeronaves no tripuladas pueden ser a bordo o por control remoto. (Valavanis & Vachtsevanos, 2015)

La fotogrametría UAV es una alternativa atractiva al método LiDAR predominante. Esta última es una técnica muy conocida gracias a su alta precisión. Sin embargo, los sistemas LiDAR son pesados y su demanda de energía es alta. Por lo tanto, no son adecuados para sistemas UAV (Mokrane et al., 2019). Los sistemas UAV han ganado una creciente atracción en las geociencias debido a la posibilidad de capturar datos rentables con alta resolución espacial y temporal. Se pueden alcanzar precisiones del orden de los centímetros mediante este método. (Uysal et al., 2015) El bajo peso y buenas propiedades de manejo hacen a los UAV adecuados para el trabajo en terreno. (Rock et al., 2012). La calidad original y la claridad de las imágenes de entrada son esenciales en el resultado de salida de los algoritmos de generación de DEM. Un efecto de baja resolución o borroso en ellos inferirá en un número bajo de características coincidentes entre imágenes superpuestas. Para obtener

la mejor calidad de imagen posible, los parámetros de la cámara deben ajustarse según el escenario específico y las condiciones de iluminación. (Ruiz et al., 2013).

En la Figura 30 se muestra la ortofoto final obtenida a partir de fotogrametría UAV.



Figura 30: Ortofoto resultado de vuelo UAV, realizado por Geosupport. Fuente: Geosupport (2020)

8.2 Metodología sistema UAV

Para la correcta ejecución de una metodología para generación de DEM mediante UAV se debe en primer lugar configurar correctamente la cámara según el área estudiar, luego estudiar los elementos del terreno para confirmar que las imágenes tengan suficientes datos. Luego diseñar y llevar a cabo un plan de vuelo para lograr la cobertura deseada del área de interés. Esta tarea contribuye a la calidad de la adquisición de datos e implica el cálculo del área bajo estudio, el tamaño de píxel, la escala de la foto, la altura de vuelo y porcentaje de traslape longitudinal y transversal. (Ruiz et al., 2013) (Mokrane et al., 2019). La superposición entre imágenes consecutivas es crucial para lograr una buena estimación de las posiciones 3D reales. Normalmente se emplea un factor del 60-70% (Xing et al., 2010) La superposición afecta directamente al número de características coincidentes y, en consecuencia, el paso de calibración y el resultado final pueden variar (Ruiz et al., 2013). En la Figura 31, se muestra un esquema del traslape entre imágenes.

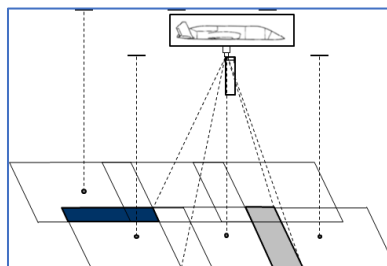


Figura 31: Traslape de las imágenes. Vuelo autónomo de sistemas UAV. Fuente: Geosupport (2020)

Se deben considerar para la selección de UAV y posterior obtención de DEM, los requerimientos geométricos y de precisión según el proyecto Radar; altura de vuelo baja para obtener alta precisión en la información; procesamiento primario en terreno; implementación de información escáner y ET y trazado; integración de productos ortofotos, DSM y DTM para aumentar la precisión del proceso interferométrico.

El principal objetivo de la integración de DEM obtenidos mediante fotogrametría con UAV a la metodología DInSAR, es la obtener una alta precisión en el resultado final. Como se observa en la

Tabla 3, esta precisión de los UAV es de ± 20 cm, esto es considerando un UAV básico y sin post procesamiento. Para mejorar la precisión de este método existen 2 tipos de tecnologías de corrección: RTK (Real Time Kinematic) y PPK (Kinematic postprocesado) que logran el objetivo de mejorar la precisión del resultado final. De esta manera se logra reducir el margen de error del georreferenciado hasta dejarlo en un rango aproximado de 1 a 3 centímetros.

RTK:

Corresponde a la técnica de posicionamiento preciso. Esta técnica establece un enlace de datos directo entre la estación de tierra y el UAV, permitiendo crear correcciones en tiempo real respecto al posicionamiento del dron, en la Figura 32, se observa el esquema descrito.

Esta tecnología presenta una desventaja debido a que depende del enlace de datos con la estación de base para corregir el posicionamiento. Si por algún motivo (distancia o presencia de obstáculos), el enlace es interrumpido, la precisión de esta tecnología puede verse afectada, aumentando el error hasta el orden de metros.



Figura 32: Esquema UAV RTK. Fuente: (Pix4D, 2017)

PPK:

Corresponde a la técnica de posicionamiento preciso y realiza correcciones de posicionamiento una vez que el vuelo del dron ha finalizado. Durante el vuelo, los datos de posicionamiento son almacenados en éste y una vez que el vuelo termina, se combinan los datos almacenados en el UAV con los tomados con la estación de tierra y, mediante un post proceso, se realizan las correcciones de posicionamiento, en la Figura 33, se observa el esquema descrito. Mediante esta técnica no se corre riesgo de pérdida de precisión por interrupción del enlace entre el UAV y la estación.

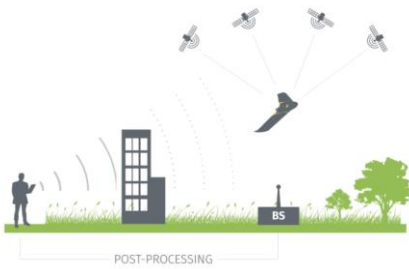


Figura 33: Esquema UAV PPK. Fuente: (Pix4D, 2017)

Posicionamiento mediante GCP:

El procesamiento mediante puntos de control en terreno, GCP (Ground Control Points) es el método para aumentar precisión utilizado durante años. Consiste en establecer puntos de referencia sobre el terreno, cuya localización geográfica está bien definida, facilitando la georreferenciación de la posición en que se tomen las fotografías. Con esta técnica se logra una precisión inferior al centímetro en las imágenes georreferenciadas. La desventaja de este método es el tiempo y trabajo que requiere preparar el terreno con GCP, incluso si el terreno es demasiado complicado puede ser imposible la toma de datos georreferenciados precisos.

La técnica de GCP se puede combinar con drones con tecnología RTK o PPK, mejorando aún más la georreferenciación de las imágenes. De hecho, esto es aconsejable cuando se requieren trabajos con la mayor robustez posible (HispaDrones, 2019)

En resumen, la metodología para obtener un DEM mediante sistema UAV sería:

- Configurar cámara según área a estudiar, estudiar elementos del terreno.
- Planificación vuelo para cubrir área de interés (cálculo del área bajo estudio, el tamaño de píxel, la escala de la foto, la altura de vuelo y el porcentaje de traslape longitudinal y transversal)
- Control en terreno de puntos de control (GCP)
- Ejecución vuelo UAV
- Procesamiento de imágenes con software en terreno.
- Verificación calidad de traslape y línea de vuelo y total recubrimiento del área de interés.
- En caso de conformidad de vuelo por QA & QC, se seleccionan los puntos de apoyo, en caso contrario, repetir el vuelo.
- Procesamiento con software.
- Confección ortofotos y ortomosaicos.
- Control de calidad de productos

En la Figura 34, se resume en un esquema la metodología para la obtención de DEM desde UAV.

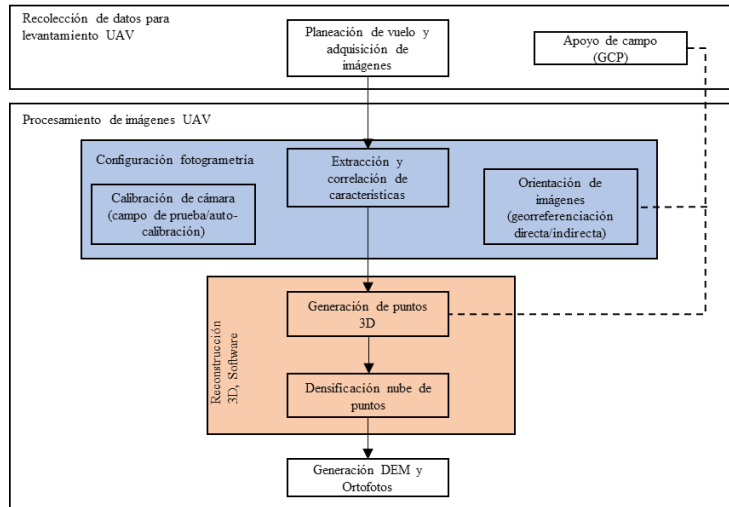


Figura 34: Metodología sistema UAV. Fuente: modificado de (Torrado et al., 2016)

8.3 Metodología DInSAR para monitoreo de subsidencia

La metodología presentada en esta sección se basa en la descrita en la sección 7, comenzando con estudio de viabilidad del proceso con la etapa Pre-DInSAR. Posteriormente está el procesamiento DInSAR, donde para generar el interferograma sintético se introduce la metodología UAV para generación de DEM, para finalmente obtener un interferograma diferencial, desde el cual se obtiene una imagen de velocidad de deformación que luego será analizada en la etapa Post-DInSAR con la integración de los resultados en SIG. En la Figura 35 se encuentra detallado el esquema para el monitoreo de subsidencia mediante DInSAR, integrando sistemas UAV y post procesamiento en SIG.

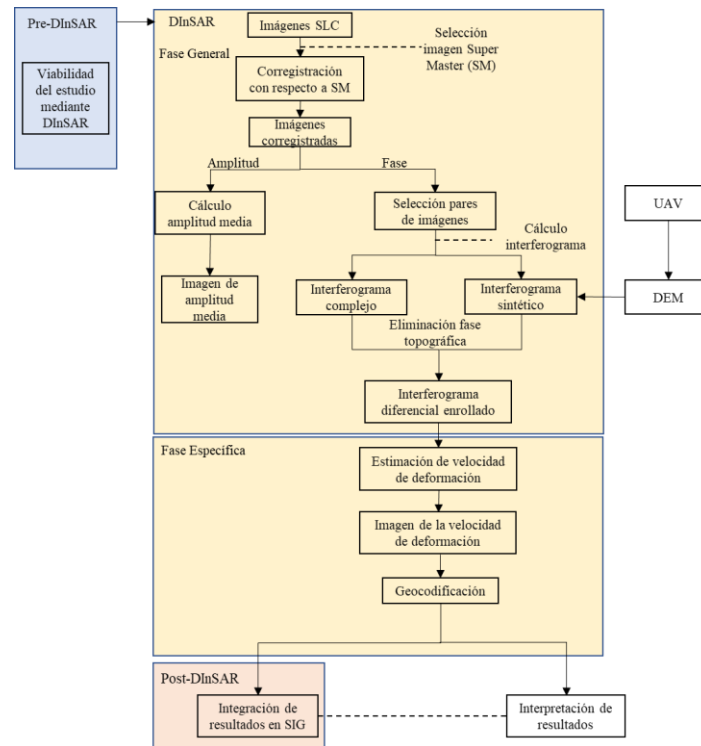


Figura 35: Esquema de la metodología DInSAR para monitoreo de subsidencia. Fuente: Modificado de: (Fernández Oliveras, 2009)

8.4 Análisis de la información mediante SIG

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS) corresponde a una herramienta que permite el análisis y representación de datos espaciales. Trabaja con información georreferenciada. (García, 2021).

Permite crear mapas que comunican, analizan, comparte información y resuelven problemas. Entre sus usos sirve para identificar problemas, monitorear cambios, gestionar y dar respuesta a emergencias, realizar predicciones, establecer prioridades y comprender tendencias en los terrenos a estudiar. (Aeroterra S.A., s. f.)

Entre las funcionalidades que tiene el integrar un sistema SIG se encuentran, mostrar coincidencias o relaciones espaciales entre datos DInSAR y unidades geológicas, epicentros de terremotos, tendencias de fallas activas, posicionamiento de pozos y ortofotografía local. Los ángulos de inclinación promedio se registran y analizan en GIS. Las medidas de deformación obtenidas están geocodificadas con precisión para lograr una combinación fácil de productos DInSAR en relación con diferentes geometrías de adquisición y la integración de dichos productos en un GIS. Esto permite la detección y análisis de desplazamientos de estructuras y edificios individuales en la zona investigada. Combinada con la posibilidad de superponer diferente información espacial, como es habitual en las herramientas SIG, esta modificación también extiende esta característica a la dimensión temporal, permitiendo así un fácil acceso a la información espacio-temporal tridimensional (Lanari et al., 2004)

8.5 Softwares disponibles

La importancia que tiene la técnica DInSAR como herramienta de monitoreo de deformaciones se refleja en la cantidad de softwares disponibles con capacidades de análisis de imágenes SAR. En la

Tabla 10 se detallan algunos softwares con información disponible en la web que sirven para procesar datos SAR y sus derivados como InSAR, DInSAR y A-DInSAR. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se detallan los softwares disponibles para creación de DEM a partir de fotogrametría con UAV. Finalmente, en la Tabla 12, se detallan los softwares disponibles para el procesamiento y análisis de los datos mediante SIG. Hay que tener en cuenta que esta lista no es exhaustiva y que la información detallada proviene de la documentación disponible públicamente.

Tabla 10: Software disponibles para trabajar datos SAR. Fuente: modificado de (Crosetto et al., 2005)

Nombre de Software	Compañía/ Universidad	Sitio web/tipo de licencia	Capacidad de DInSAR
Doris	Delft University of Technology	http://doris.tudelft.nl/ Licencia gratis para fines no comerciales	Generación de productos interferométricos y productos como DEM y mapas de desplazamiento generados desde data SLC. Desde satélites ERS, ENVISAT, JERS, RADARSAT
Roi_pac	Jet Propulsion Laboratory Division de la NASA y Caltech	www.openchannelsoftware.org Licencia gratis para fines no comerciales	DInSAR estándar con ERS1/2, JERS
DIAPASON InSAR Strip	Desarrollado por CNES y mantenido por TRE Altamira	Licencia comercial distribuida por Altamira Information	InSAR en data ENVISAT, ERS y Sentinel-1. Produce interferogramas, mapas de amplitud y coherencia.
Envi	Research Systems Inc (RSI)	www.rsinc.com/envi Licencia comercial	Módulo de ENVI, SARscape, DInSAR tradicional con ERS1/2, JERS-1, RADARSAT, ENVISAT
Vexcel 3DSAR	Vexcel Corporation	www.vexcel.com Licencia comercial	Modulo de EV-InSAR, CTM - Coherent Target Monitoring, con DInSAR Avanzado, compatibilidad con ERS1/2, JERS-1, RADARSAT, ENVISAT
Gamma DInSAR	Gamma Remote Sensing	www.gamma-rs.ch/ Licencia libre.	Colección de programas. Procesamiento InSAR y DInSAR.
GMTSAR	SIO & SDSU	http://topex.ucsd.edu/gmtsar Licencia para público en general	InSAR. Filtro de interferograma, construcción de productos interferogramétricos de fase, coherencia y desplazamientos de LOS en coordenadas radar y geográficas.
FASTVEL Processing Service	TRE-Altamira	Número limitado de licencias de TRE-Altamira	A-DInSAR, Interferogramas diferenciales. Mapas de velocidad media de desplazamiento basados en PS. Desde Sentinel-1, ENVISAR, ERS

SBAS Stripmap	Algoritmo desarrollado por IREA-CNR	Licencia abierta	A-DInSAR (SBAS). Monitorea evolución temporal de deformaciones de superficie. Genera interferogramas
Imagine Radar Mapping Suite	Erdas	Comercial	InSAR. Pre-procesamiento de imágenes para mejorar la interpretación visual. Generación DEM
Sentinel-1 Toolbox	European Space Agency	http://step.esa.int/main/download/ Libre	InSAR. Calibración, filtro de speckle, corrección, ortorectificación, polarimetría e interferometría.
EnviSARscape	Exelis	https://www.13harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape Comercial	InSAR y DInSAR y A-DInSAR (PS y SBAS) Generación DEM y mapas de desplazamiento. Polarimetría e interferometría

Tabla 11: Software para creación DEM desde imágenes UAV. Fuente: elaboración propia.

Nombre	Compañía	Sitio web/ licencia
Agisoft Metashape	Agisoft LLC	https://www.agisoft.com/ Comercial
Pix4DMapper	Pix4D	https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software Comercial
Photomodeler	Photomodeler technologies	https://www.photomodeler.com/ Comercial
Inpho UASMaster	Trimble Geoespacial	https://es-la.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-inpho-uasmaster Comercial
EnsoMOSAIC 3D	Mosaic Mill	https://www.mosaicmill.com/ Comercial

Tabla 12: Software para procesamiento SIG

Software	Compañía	Sitio web/licencia	Capacidad
ArcGIS	ESRI	www.esri.com Fines comerciales	Sistema de información geográfico vectorial
ERDAS	ESRI	www.esri.com Fines comerciales	Sistema de información geográfico Raster
GRASS GIS	GRASS Development Team	https://grass.osgeo.org/ Libre	Análisis, procesamiento de imágenes, manipulación digital del terreno y estadísticas.
QGIS	QGIS Development Team	https://qgis.org/es/site/ Libre	Permite visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas imprimibles

9. Casos de monitoreo de subsidencia mediante tecnologías InSAR/DInSAR

En la presente sección se hace un análisis de trabajos enfocados en el monitoreo de subsidencia debido a minería mediante las técnicas derivadas del procesamiento de imágenes SAR y las diferentes variables y elementos utilizados para llegar a los resultados expuestos.

En la Tabla 13 (ver anexo) se resumen distintos casos de monitoreo de subsidencia causados por minería subterránea, las referencias de los papers consultados se encuentran en el anexo y ordenados por número en la tabla.

Los estudios consultados corresponden a 18 casos desde el año 1996 al 2021, en 10 de ellos se utiliza la metodología DInSAR, en 6 de ellos se utiliza A-DInSAR y en 2 se utiliza InSAR.

De los 6 estudios que utilizan A-DInSAR, 5 de ellos utilizan Permanent Scatterers (PS) y en solo uno se utiliza Coherent Pixels Technique (CPT). La técnica PS elimina el problema de la decorrelación geométrica y temporal al considerar solo dispersores puntuales. Los ejemplos de aplicación de PS han mostrado el amplio espectro de esta técnica en la evaluación de la deformación del suelo. PS ha demostrado ser eficaz y más adecuado que el clásico DInSAR. Se concluye que los principales parámetros de diseño que influyen en la viabilidad y precisión de PS son el número de adquisiciones (imágenes; N), la línea de base temporal (BT) y la línea de base espacial / perpendicular (B). Esta técnica tiene como desventaja la necesidad de contar con grandes cantidades de imágenes SAR y la baja capacidad de muestreo en áreas con vegetación y bosques, y baja capacidad de medición de fenómenos de deformación rápida (Ishwar & Kumar, 2017)

En cuanto a los satélites utilizados en 10 de ellos se utilizan los satélites europeos ERS, en 3 se utiliza JERS, en 2 ENVISAT, en 2 Sentinel, en 1 TerraSAR, Radarsat y PALSAR. Los satélites ERS tienen una longitud de onda menor, siendo más sensibles a los movimientos de Tierra. Los satélites de banda L (23,5 cm) como JERS y PALSAR mostraron un gran potencial al monitorear subsidencia, mostrando grandes capacidades de monitorear movimiento en áreas rurales y vegetales. Otro factor por considerar es que los satélites ERS y JERS en la actualidad no están en órbita y los últimos datos fueron tomados a fines de la década de los 90 y principio de los 2000 por lo tanto sirven para estudios de movimientos históricos. Si se quiere un monitoreo en la actualidad se deben usar los satélites que se encuentran en órbita en la actualidad.

En cuanto al tipo de minería estudiada, 13 de ellas corresponden a minas de carbón, 2 de sal y 3 de metales. Por lo tanto, los fenómenos de subsidencia debido a minería subterránea de carbón han sido mejor estudiados en el tiempo, en comparación con minería subterránea de metales, aunque esto no afecta el análisis, debido a que el proceso de subsidencia es el mismo independiente del tipo de minería realizada y el proceso para monitorear estos fenómenos no es afectado por el tipo de minería.

Los DEM utilizados se dividen entre externos desde cartografía, obtenidos mediante InSAR y SRTM siendo este último el más común, en solo 1 caso se utiliza un DEM obtenido desde LiDAR. En los casos que se utilizó un DEM obtenido por InSAR, se debe a que el paquete de datos analizado contenía un par de imágenes destinadas a crear un interferograma para obtener DEM. Por otro lado, SRTM es la Misión Topográfica Shuttle Radar, que corresponde a un proyecto internacional entre la NGA y la

NASA para obtener un modelo digital de elevación del globo terráqueo, de modo que genera una completa base de mapas topográficos digitales de alta resolución de la Tierra. (Farr et al., 2007).

En la mayoría de los estudios, los sectores y épocas con poca vegetación, ambiente urbanizado y clima estable, fueron los que menos problemas en cuanto a correlación de imágenes presentaron [1, 2, 9 y 17] (Ver anexos, sección 12.2). Caso contrario de los sectores con alta presencia de vegetación, lo cual supuso un problema para el análisis ver referencias [3, 6, 13, 14] (Ver anexos, sección 12.2).

Las precisiones alcanzadas por estos estudios se encuentran en el orden de los centímetros, hasta milímetros en el eje Z, todas logrando una coherencia con respecto a las mediciones con otros métodos y con errores del orden de los milímetros. Comprobando la buena aplicación de estas técnicas en condiciones reales. Como es el caso de la Figura 36, se muestra la imagen obtenida a partir de procesamiento DInSAR, realizado por Crosetto (2005), sobre un área de 28,12 km. Se logra apreciar según la escala, deformaciones del orden de los milímetros.

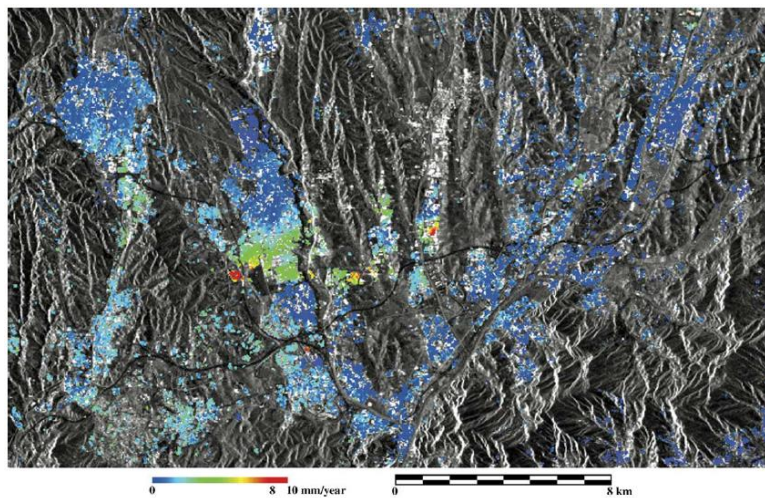


Figura 36: Resultado del análisis sobre un área de 28 12 km. Campo de velocidad de deformación entre junio de 1995 y agosto de 2000 estimado con 10 interferogramas ERS. Fuente: (Crosetto et al., 2005)

10. Conclusiones

Para finalizar el presente trabajo se han cumplido los objetivos, evaluando que si es factible implementar el monitoreo de subsidencia mediante tecnología InSAR integrando los sistemas UAV y posterior análisis en SIG.

Las metodologías DInSAR han sido probadas en diversos estudios de monitoreo de subsidencia a causa de minería, resultando en metodologías exitosas con precisión del orden de los centímetros, e incluso los milímetros en el eje Z del hundimiento. Además, la tecnología ha ido mejorando con el tiempo, siendo cada vez más precisa, adoptando nuevas fuentes de información, como DEM más precisos, y técnicas A-DInSAR que han mejorado las incertidumbres y errores de DInSAR convencional.

Una de las desventajas de este método es la baja precisión en las componentes XY de la imagen SAR, en donde el píxel de la imagen está en el rango de los metros, comparado a la alta precisión en el eje Z, que se encuentra en el rango de los centímetros. Para una buena correcta ejecución de la metodología DInSAR, se necesita un DEM para eliminar la fase topográfica, este puede ser obtenido mediante interferometría (InSAR) o mediante DEM externo. El tamaño del píxel DEM es de suma importancia, debido a que el producto InSAR resultante tendrá el tamaño de píxel del DEM de referencia, de aquí se destaca la importancia de utilizar un DEM de alta precisión proveniente desde sistemas UAV, que a pesar de ser menos costosos que los sistemas tradicionales, tienen precisión alta y son fáciles de utilizar. Para lograr esta alta precisión la metodología UAV puede utilizar las técnicas de post proceso como RTK y PPK, las cuales pueden ser mezcladas con puntos de apoyo terrestre (GCP), para lograr precisiones entre 1 y 3 cm en los casos más favorables. Con esto se logra aumentar la precisión del producto en los ejes X e Y.

Se propone el uso de SIG para el análisis de la información procedente de la interferometría en combinación de los datos de campo proveniente de los sistemas tradicionales y la base cartográfica generada por los sistemas UAV no tripulados. Este paso final permite incluir la multitemporalidad al análisis de la subsidencia, además de permitir analizar la entropía que es un factor característico de la minería, en este se incluyen los movimientos de maquinarias, excavaciones y vegetación en el área estudiada, permitiendo enfocar en análisis en zonas donde haya menos ruido para el correcto resultado.

Con esta información se plantea una metodología para el monitoreo de subsidencias con tecnología InSAR en conjunto con fotogrametría UAV, esto para lograr determinar de forma precisa las coordenadas (X, Y, Z) del movimiento. Esta metodología propone una etapa Pre-DInSAR donde se evalúa cualitativamente la factibilidad de la aplicación de la técnica de acuerdo con las características del terreno a estudiar y la disponibilidad de imágenes. Luego la etapa DInSAR propiamente tal donde se tiene como resultado un mapa de velocidad de deformación y finalmente el análisis del movimiento en software SIG en la etapa Post-DInSAR. Esta metodología debe ser corroborada en futuras investigaciones con datos, además de los algoritmos y software a utilizar para cada una de las etapas deben ser evaluados, de acuerdo con las condiciones y resultados que se necesiten.

A pesar de que las técnicas tradicionales han demostrado resultados aceptables, el método DInSAR tiene la ventaja de ser satelital, por lo tanto, evita que trabajadores se expongan a áreas potencialmente peligrosas o inaccesibles. Sin embargo, una buena metodología de monitoreo debe estar respaldada

con datos de campo, provenientes de los sistemas de monitoreo convencionales detallados en la sección 3 de este trabajo, para corroborar la correcta información y complementar el estudio.

Se debe evaluar la técnica A-DInSAR más apropiada para utilizar, de acuerdo con las condiciones del terreno y del estudio que se quiere realizar, además de la disponibilidad de un gran número de imágenes (más de 30), lo que muchas veces no es posible (debido al alto costo de una imagen SAR) y se tiene que descartar este tipo de análisis.

Otro punto importante son los satélites disponibles para el estudio y los softwares, se debe estudiar la periodicidad de la toma de imágenes y la banda en la que estos operan, además de estudiar la disponibilidad de imágenes para el año de estudio, los costos asociados a realizar una investigación de esta naturaleza y finalmente determinar cada cuanto se requiere realizar la actualización del nivel de subsidencia en la mina.

En cuanto a la disponibilidad de softwares, existen de tipo comercial y de tipo libre, estos últimos han sido validados en diversos estudios en el área.

Se recomienda para futuras investigaciones estudiar los posibles efectos que tiene la subsidencia sobre el stress del macizo, para esto se propone incluir la metodología presentada en esta memoria, permitiendo proyectar los puntos donde hay disminuciones rápidas de nivel, hacia debajo de la superficie, que en conjunto con el estudio de los sistemas geomecánicos de las labores subterráneas permitan anticipar la ocurrencia de eventos como estallido de roca y colapso de galería.

Finalmente, los métodos de teledetección como la interferometría SAR, son una alternativa real a la necesidad de monitoreo en faenas mineras, donde se controlan grandes extensiones de área.

11. Referencias

1. Aeroterra S.A. (s. f.). *¿Qué es SIG? | Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado 10 de mayo de 2021, de <https://www.aeroterra.com/es-ar/que-es-gis/introduccion>
2. Agüero Corzo, E. del C., Montilla Pacheco, A. de J., & Valero Segovia, G. J. (2018). Medición de puntos GPS por el método estático con equipo diferencial. Una experiencia didáctica en el Instituto Pedagógico de Maturín. *Tecné Episteme y Didaxis: TED*, 43. <https://doi.org/10.17227/ted.num43-8655>
3. Bamler, R., & Hartl, P. (1998). *Synthetic aperture radar interferometry*. 56.
4. Barbier, C. (2006). *Synthetic Aperture Radar—Another Look at Earth and Planetary Surfaces*. https://www.ercim.eu/publication/Ercim_News/enw65/barbier.html
5. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40, 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
6. Biescas, E., Crosetto, M., Agudo, M., Monserrat, O., & Crippa, B. (2007). Two Radar Interferometric Approaches to Monitor Slow and Fast Land Deformation. *Journal of Surveying Engineering*, 133(2), 66-71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2007\)133:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:2(66))
7. Blanco-Sanchez, P., Mallorquí, J. J., Duque, S., & Monells, D. (2008). *The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring* (169). Birkhäuser.
8. Canuti, P., Casagli, N., Ermini, L., Fanti, R., & Farina, P. (2004). Landslide activity as a geoinicator in Italy: Significance and new perspectives from remote sensing. *Environmental Geology*, 45(7), 907-919. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0952-5>
9. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. (2021). *Percepción Remota*. <https://www.centrogeo.org.mx/investigacion/area-05>
10. Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3-4), 173-199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
11. Crosetto, M., Biescas, E., Duro, J., Closa, J., & Arnaud, A. (2008). Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(4), 443-450. <https://doi.org/10.14358/PERS.74.4.443>
12. Crosetto, M., Crippa, B., & Biescas, E. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*, 79(1-2), 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.016>
13. Dawei, Z., Lizhuang, Q., Demin, Z., Baohui, Z., & Lianglin, G. (2020). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry Technology for Dynamic Mining Subsidence Monitoring and Parameter Inversion: A Case Study in China. *IEEE Access*, 8, 16372-16386. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967410>
14. Dron Valencia. (Sin Fecha). *FOTOGRAMETRÍA CON DRONES*. <https://dronvalencia.es/fotogrametria-con-drones-valencia-ortofoto-3/>
15. EGV Ingeniería. (2020, septiembre 6). Topografía Láser Escáner 3D o Topografía Tradicional. *EGV Ingeniería*. <https://www.egv.cl/topografia-laser-escaner-3d-o-tradicional/>
16. European Space Agency. (2007). *ESA ASAR-Handbook*.
17. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

18. Fernández Oliveras, M. P. (2009). *Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría Radar DInSAR*. Editorial de la Universidad de Granada.
19. Fernandez, P., Irigaray, C., Jimenez, J., El Hamdouni, R., Crosetto, M., Monserrat, O., & Chacon, J. (2009). First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique. *Engineering Geology*, 105(1-2), 84-101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.005>
20. Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*.
21. Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 39(1), 13.
22. *Fotogrametría. Tema 7: PROYECTO FOTOGRAMÉTRICO TERRESTRE - [PDF Document]*. (2009). Fdocuments.Ec. <https://fdocuments.ec/document/fotogrametria-tema-7-proyecto-fotogrametrico-terrestre.html>
23. Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
24. García, P. (2021, febrero 15). ¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica? *Territorio Geoinnova - SIG y Medio Ambiente*. <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/>
25. Gasperini, D., Allemand, P., Delacourt, C., & Grandjean, P. (2014). Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2014.059456>
26. Ge, L., Chang, H.-C., Qin, L., Chen, M., & Rizos, C. (2003). *DIFFERENTIAL RADAR INTERFEROMETRY FOR MINE SUBSIDENCE MONITORING*. 11.
27. Geosupport S.A. (2018). *Manual de procedimientos, alcances y objetivos servicio de monitoreo Rajo Sur División El Teniente*.
28. Gimeno Martínez, N. (2019, abril 1). ¿Qué es un SAR? https://www.inta.es/INTA/es/blogs/ceit/BlogEntry_1554121012176
29. Global Mediterránea y Global Geomática. (2020, febrero 11). Fotogrametría: Qué es, Ventajas y Metodología - Global Mediterránea. *Global - Mediterránea&Geomática*. <https://test.globalmediterranea.es/fotogrametria-que-es/>
30. González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
31. Grunfeld Brook, N. A. (Sin Fecha). *Introducción a interferometría SAR - generación de DEM*. 63.
32. HispaDrones. (2019, diciembre 19). •▷ **【 Diferencia entre el posicionamiento RTK y el PPK 】** » HispaDrones. *HispaDrones*. <https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/diferencia-posicionamiento-rtk-ppk/>
33. Instituto Geográfico Nacional. (Sin Fecha). *Instituto Geográfico Nacional*. Geoportal oficial del Instituto Geográfico Nacional de España. <http://www.ign.es>
34. Ishwar, S. G., & Kumar, D. (2017). Application of DInSAR in Mine Surface Subsidence Monitoring and Prediction. *Current Science*, 112(1), 46. <https://doi.org/10.18520/cs/v112/i01/46-51>
35. Lanari, R., Zeni, G., Manunta, M., Guarino, S., Berardino, P., & Sansosti, E. (2004). An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: A case study of the city of Naples, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), 2855-2867. <https://doi.org/10.1080/01431160310001647750>
36. Lanari, Riccardo, Casu, F., Francesco, Manzo, Mariarosaria, Zeni, Giovanni, Berardino, Paolo, Manunta, M., Michele, Pepe, A., & Antonio. (2007). An Overview of the Small

- Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. *PURE AND APPLIED GEOPHYSICS*, 164, 637-661. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0192-9>
37. Li, Z., Zu, Q., & Gold, C. M. (2005). *Digital terrain modeling: Principles and methodology*. CRC Press.
 38. Mokrane, A., Choukchou-Braham, A., & Cherki, B. (2019). DEM Generation Based On UAV Photogrammetry. *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9014805>
 39. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013a). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6-43. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
 40. NASA Video. (2018). *NASA ARSET: Conceptos Básicos de SAR, Sesión 1/4*. https://www.youtube.com/watch?v=QdKkTQ7fWH0&t=542s&ab_channel=NASAVideo
 41. National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. D. of C. (2021, febrero 26). *What is subsidence?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/subsidence.html>
 42. Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación y Cronometría por Satélite. (Sin Fecha). *Bienvenidos a GPS.gov*. <https://www.gps.gov/spanish.php>
 43. Pix4D. (2017). *¿Los drones RTK/PPK dan mejores resultados?* Pix4D. /es/blog/los-drones-rtk-ppk-le-dan-mejores-resultados-que-el-uso-de-gcp
 44. Podest, E. (2018). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética*. 51.
 45. Prokopovich, N. P. (1986). *CLASSIFICATION OF LAND SUBSIDENCE BY ORIGIN*. 10.
 46. Rock, G., Ries, J. B., & Udelhoven, T. (2012). SENSITIVITY ANALYSIS OF UAV-PHOTOGRAMMETRY FOR CREATING DIGITAL ELEVATION MODELS (DEM). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, 69-73. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-69-2011>
 47. Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodríguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 88(3), 50.
 48. Ruiz, J. J., Diaz-Mas, L., Perez, F., & Viguria, A. (2013). EVALUATING THE ACCURACY OF DEM GENERATION ALGORITHMS FROM UAV IMAGERY. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, 333-337. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-333-2013>
 49. SARMAP. (2009). *SAR-Guidebook*.
 50. Schofield, W. (1993). *Engineering Surveying, Laxton's, Oxford, UK*.
 51. SERNAGEOMIN. (Sin Fecha). *Gestión Ambiental en el SEIA*. <https://www.sernageomin.cl/gestion-ambiental-en-el-seia/>
 52. SIMOH. (Sin Fecha). *Nuevas técnicas de medición*. http://proyectos2.iingen.unam.mx/SIMOH/Nuevas_tecnicas.aspx
 53. Singh, K., Stussi, N., Leong, K., & Hock, L. (2014). *BASELINE ESTIMATION IN INTERFEROMETRIC SAR*. <https://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/singh/index-2.html>
 54. Tomás, R., Delgado, J., & López-Sánchez, J. M. (2005). *TÉCNICAS DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA EMPLEADAS EN EL ESTUDIO DE SUBSIDENCIA Y MOVIMIENTOS DE LADERA: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y ANÁLISIS COMPARATIVO*. 11.
 55. Torrado, J. O. E., Jiménez, J. J. C., & Díaz, H. P. (2016). *Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV*. 20(50), 23.
 56. Universitat Politècnica de València, E. (2014). *Universitat Politècnica de València. Ingeniería del agua*, 18(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
 57. U.S. Bureau of Mines. (1996). *Dictionary of Mining, Mineral, & Related Terms*. 3660.
 58. USGS. (Sin Fecha). *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)*. https://www.usgs.gov/centers/ca-water-ls/science/interferometric-synthetic-aperture-radar-insar?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

59. Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73, 539-543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>
60. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (Eds.). (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>
61. Vijayan, S., Mohan, A., & Cochin University of Science and Technology. (2015). Contourlet based Edge Enhancement and Detection in SAR Images. *International Journal of Engineering Research And*, V4(05), IJERTV4IS051046. <https://doi.org/10.17577/IJERTV4IS051046>
62. Villegas, P. (2019, noviembre 24). *Características de las imágenes de radar de apertura sintética SAR*. Agua y SIG. <https://aguaysig.com/caracteristicas-de-las-imagenes-de-radar-de-apertura-sintetica-sar/>
63. Villegas, P. (2020, febrero 20). *Distorsiones de las imágenes de radar de apertura sintética*. Agua y SIG. <https://aguaysig.com/distorsiones-de-las-imagenes-de-radar-de-apertura-sintetica/>
64. Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, 7, 4362-4364. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1295516>
65. Xing, C., Wang, J., & Xu, Y. (2010). Overlap Analysis of the Images from Unmanned Aerial Vehicles. *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 1459-1462. <https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.360>

12. Anexos

N°	Año	Ubicación	Técnica	Satélite	Tiempo	N° imágenes o interferogramas	Tipo minería	DEM utilizado	Otros	Veloc. De subsidencia obtenidas
1	2000	Gardanne, Francia	DInSAR	ERS-1 y ERS-2	1992-1995	13 imágenes 12 interferogramas	Carbón	DEM externo de IGN 1990 (50x50 pixeles).	Área con ambiente altamente urbanizado	40 mm/mes
2	1996	Cercano a Gardanne, Francia	DInSAR	ERS-1	15 julio, 19 agosto, 23 septiembre 1992	3 imágenes	Carbón	DEM externo de IGN 1990 (50x50 pixeles)	Temporada baja en vegetación y cambio de humedad, baja sensibilidad a la topografía	Resultado similar a mediciones por métodos tradicionales, no se especifica el orden.
3	2005	Roncourt, Francia	A-DInSAR, Permanent Scatterers	ERS-1 ERS-2	1995- 2000	57 imágenes modo descendente	Hierro	Construido a partir de InSAR	Estudio anterior con DInSAR convencional no mostró resultados (vegetación densa). Se comparó precisión con estudios previos (GPS) logrando mejorar la precisión a milimétrica.	Diferencias del orden de 1-5 mm con método tradicional.
4	2005	Catalonia, España	DInSAR. Coherence based methods y permanent scatterers	ERS-1 y ERS-2	1995-2000	13 imágenes 10 interferogramas	Sal potásica	No especifica	Se propone el método de 2 niveles de estimación de deformación: 1) estimación bajo costo, imágenes SAR limitadas, gran área, deformación desconocida. 2) análisis cuantitativo	Diferencias de 0,5 mm/año con métodos tradicionales

									a profundidad, grandes stacks de imágenes, área limitada, deformaciones conocidas.	
5	2016	Yuxian, provincia de Hebei, China	DInSAR y Pixel off set tracking	TerraSAR-X	2015-2016	20 imágenes	Carbón	Obtenido con SRTM		1,96 m totales de hundimiento
6	2014	Huabei, China	DInSAR	JERS-1	1992-1998	4 interferogramas	Carbón	Obtenido con SRTM	Por la cantidad de vegetación no sirven las imágenes ERS. Software usado EV-APP 3.1 y EV-InSAR 3.1	Del orden de cm
7	2008	Tang Shan, Provincia de Hebei, China	DInSAR	ERS y ENVISAT	1996-2000 (ERS) y 2004-2006 (ENVISAT)	4 ERS y 3 ENVISAT	Carbón	Externo (no especifica origen)	Validación con GIS. Software usado DORIS InSAR processor. Desarrollo se hace con software SNAPHU. Se recomienda uso de PS para futuro.	Del orden de cm.
8	2001	The tower colliery, Australia	InSAR y GPS	ERS-2	Enero a mayo 2001	16 imágenes	Carbón	No usa	Se combina con programas de monitoreo con GPS, levantamientos convencionales de nivelación precisa y levantamientos EDM.	No están los resultados
9	2007	Dsitrito minero, La Unión, España	A-DInSAR (CPT)	ERS-1, ERS-2 y ENVISAT	1998-2000 y 2003-2004	38 SLC (24 y 14)	Plomo-Zinc	Obtenido desde Cartographic Numeric	Ausencia de vegetación, existencia de edificios y afloramientos rocosos masivos y	2,3 cm/año

								Database de CARTOMUR ¹	lapso de tiempo corto, permitieron correlación exitosa de imágenes SAR	
10	2007	Gaeun, Korea	A-DInSAR, Permanent Scatterers	JERS-1	1992- 1998	26 imágenes 25 interferogramas	Carbón	DEM construido interpolando mapas digitales de contorno		0,5-0,3 y 0,2 cm/año en puntos 1,7 cm/año
11	2008	Frank Slide, Alberta, Canada	A-DInSAR Permanent Scatterers	RADARSAT-1	2001-2005 y 2006	28	Carbón	Obtenido con LiDAR	Imágenes SLC Software EarthView InSAR (EV-InSAR) ² analizado mediante CTM ³	3,4 mm/año
12	2021	USCB, Polonia	A-DInSAR Permanent Scatterers	Sentinel-1A/B	2018- 2019	175 ascendente y 51 descendente	Carbón	Se usa el ALOS Global digital surface model ALOS World 3D de JAXA ⁴	Propone una fusión entre DInSAR y PS (Permanent Scatterers)	1,05 m/año acumulado
13	2003	Vauvert, Francia	DInSAR	ERS-1 y ERS-2	1993-1999	16 imágenes	Sal	DEM del IGN ⁵	Condiciones no favorables por vegetación. Se monitorea con métodos tradicionales de nivelación y vigilancia microsísmica. Software Gamma	2,2 cm/año
14	2003	Ruhrgebiet, Alemania	DInSAR	JERS	Menos de 132 días	7 imágenes, 5 interferogramas	Carbón	DEM desde InSAR	ERS no es preciso en el área. JERS restringido por poca	6-8 cm/año

¹ Cartographical Service of the Region of Murcia

² Desarrollado por Atlantis Scientific Inc.

³ Coherent Target Monitoring.

⁴ Japan Aerospace Exploration Agency

⁵ French Institut Geographique National

										cantidad de adquisiciones	
15	2011	Henan, China	DInSAR	PALSAR	2007- 2009	13	Carbón	DEM SRTM	desde	Algoritmo SBAS	10 cm/año
16	2019	Mina El Teniente, Chile	DInSAR	Sentinel-1	2014-2018	9 interferogramas	Cobre	DEM InSAR	desde	Se procesan interferómetros con SNAP y SNAPHU. Se propone el uso de PAZ project (X-band) y SAOCOM (argentino, banda-L). Sentinel es libre y gratis	4-5 cm
17	2000	Ruhrgebiet, Alemania	DInSAR	ERS-1 y ERS-2	1 año	9	Carbón	DEM InSAR	desde	Adquisiciones en invierno por la mayor coherencia en áreas de agricultura	6 cm
18	1999	Selby coalfield, UK	InSAR	ERS	1996- 1997	12 interferogramas	Carbón	DEM InSAR	desde		4 cm/mes

Tabla 13: Tabla resumen de casos de monitoreo de subsidencia mediante tecnología InSAR y DInSAR y sus diferentes características.

12.2. Referencias usadas para elaborar la Tabla 13

1. Carnec, C., & Delacourt, C. (2000). Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics*, 43(1), 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00032-4)
2. Carnec, Claudie, Massonnet, D., & King, C. (1996). Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent. *Geophysical Research Letters*, 23(24), 3579-3582. <https://doi.org/10.1029/96GL03042>
3. Colesanti, C., Mouelic, S. L., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec, C., & Ferretti, A. (2005). Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique—A case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 201-207. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274069>
4. Crosetto, M., Crippa, B., & Biescas, E. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*, 79(1-2), 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.016>
5. Depin Ou, Kun Tan, & Shiyong Yan. (2016). Using D-InSAR and offset tracking technique to monitor mining subsidence. 2016 4th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), 400-404. <https://doi.org/10.1109/EORSA.2016.7552838>
6. Dong, Y., Ge, L., & Chang, H.-C. (2014). Mine Subsidence Monitoring by JERS-1 SAR Interferometry. 4.
7. Fang, M., Mingxing, Y., Xiaoying, Q., Chengming, Y., Baocun, W., Rui, L., & Jianhua, C. (2008). APPLICATION OF DINSAR AND GIS FOR UNDERGROUND MINE SUBSIDENCE MONITORING. 7.
8. Ge, L., Rizos, C., Han, S., & Zebker, H. (2001). MINING SUBSIDENCE MONITORING USING THE COMBINED INSAR AND GPS APPROACH. 11.
9. Herrera, G., Tomás, R., Lopez-Sanchez, J. M., Delgado, J., Mallorqui, J. J., Duque, S., & Mulas, J. (2007). Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineering Geology*, 90(3-4), 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.001>
10. Jung, H. C., Kim, S.-W., Jung, H.-S., Min, K. D., & Won, J.-S. (2007). Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. *Engineering Geology*, 92(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.02.007>
11. Mei, S., Poncos, V., & Froese, C. (2008). Mapping millimetre-scale ground deformation over the underground coal mines in the Frank Slide area, Alberta, Canada, using spaceborne InSAR technology. 34(2), 23.
12. Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2021). Monitoring mining-induced subsidence by integrating differential radar interferometry and persistent scatterer techniques. *European Journal of Remote Sensing*, 54(sup1), 18-30. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1759455>
13. Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C., & Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France). *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 468-478. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.005>
14. Strozzi, T., Wegmuller, U., Werner, C. L., Wiesmann, A., & Spreckels, V. (2003). JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1702-1708. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813273>
15. Sun, Q., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., & Hu, J. (2011). Multi-Temporal InSAR Data Fusion for Investigating Mining Subsidence. 2011 International Symposium on Image and Data Fusion, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISIDF.2011.6024224>

16. Vidal-Páez, P., Derauw, D., Fernandez-Sarría, A., & Peralta, M. (2019). Monitoring of Mining Subsidence in a Sector of Central Chile through the Processing of a Time Series of Sentinel 1 Images Using Differential Interferometry Techniques (DInSAR). *Proceedings*, 19(1), 10. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019019010>
17. Wegmuller, U., Strozzi, T., Werner, C., Wiesmann, A., Benecke, N., & Spreckels, V. (2000). Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhrgebiet (Germany) with SAR interferometry. *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, 6, 2771-2773. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2000.859710>
18. Wright, P., & Stow, R. (1999). Detecting mining subsidence from space. *International Journal of Remote Sensing*, 20(6), 1183-1188. <https://doi.org/10.1080/014311699212939>