

Primer Avance

Cecilia Gómez Jiménez

10 de septiembre de 2019

Tarea:

2.-Selección de fechas (B perp) y fechas adquisicion y como afectan la relacion senal/ruido y el nivel de deteccion de poibles desplazamientos de fallas

3.-Busqueda de antecedentes de filtrado de interferogramas (o imagenes) para deteccion de bordes/fallas o analogos de estos.

1.-Cuales son las posible diferencias si se usas otro sensor

1. La imagen SAR y los conceptos de resolución

El término SAR hace referencia al acrónimo en Inglés *Synthetic Aperture Radar* (Radar de Apertura Sintética). Un SAR es un método formador de imágenes mediante microondas, activo, cuya principal aplicación tiene como principal aplicación en percepción remota la formación de mapas ,aprovechando las propiedades de dispersión de la superficie terrestre .

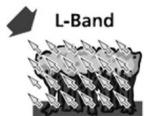
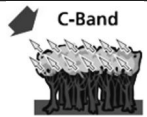
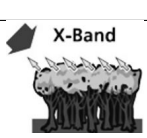
El sistema formador de imágenes más simple mediante radar se denomina RAR, del inglés *real aperture radar* . En una configuración RAR, las dimensiones de la antena definen a la resoluciónn azimutal y mientras más grande sea la antena, mayor sera estaresolución. Sin embargo, un SAR supera por mucho en resolución azimutal a un RAR.

1.1. Congruencia entre banda y espectro

La importancia de la banda presente en cualquier satélite afecta directamente en la penetración de la señal en la superficie terrestre ,ejemplo de ello,si a banda L corresponde al dominio en longitudes de onda $15 \preceq \lambda \preceq 30$ en centímetros [$\text{cm}=10^{-2}\text{m}$] (ver cuadro 1) y al dominio en frecuencia dado por $1 \preceq \tau \preceq 2$ en GHz [$\text{GHz}=10^9\text{Hz}$] (ver Cuadro 1). Como $\tau = c/\lambda$, entonces

$$\lambda = 15[\text{cm}] = 3 \times 10^{-2}[\text{m}] \implies \tau = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8[\text{m/s}]}{3 \times 10^{-2}[\text{m}]} = 2[\text{GHz}] \quad (1)$$

Por consiguiente $\lambda = 30[\text{cm}] \implies \tau = 1[\text{GHz}]$

Banda	Rango de frecuencia [Ghz]	Longitud de Onda[cm]	Satélite	Penetración
Banda L	1-2	15.0-30.0	J-ERS y ALOS	
Banda C	4-8	3.75-7.50	ERS,Envisat, Sentinel, Radarsat	
Banda X	8-12	2.50-3.75	X-SAR	
Región del espectro electromagnético				
Denominación		Longitud de Onda[cm]	Rango de frecuencia	
Microondas		0.1-100	300[Mhz] y 30 [Ghz]	

Cuadro 1: Los sistemas SAR satelitales operativos funcionan en alguna de las siguientes bandas de microondas.El dibujo inferior en el recuadro refiere a la “penetración” de las bandas [Moreira].

1.2. Estimación de un Rango

Cuando un objeto se encuentra a una distancia r_{obj} [m] respecto de una antena radar, una señal modulada en frecuencia, es emitida y enviada por la antena. La antena cambia de modalidad emisora a receptora a intervalos de tiempo cortos Δt (a una frecuencia de pulso $\tau_c = 1/\Delta t$ [GHz]). La antena puede determinar el tiempo t_{obj} [seg] que le toma al pulso recorrer la distancia r_{obj} dos veces (de la antena al objeto y del objeto a la antena), siempre que $\Delta t \leq t_{obj}$. Como la velocidad a la que se mueve el pulso es $c=3 \times 10^8$ [m/s] (la velocidad de la luz), se sigue que,

$$v = \frac{d}{t} \implies c = \frac{2r_{obj}}{t_{obj}} \implies r_{obj} = \frac{ct_{obj}}{2} \quad (2)$$

donde t_{obj} es conocido como tiempo de retardo (como se cita en Téllez Quiñones, 2018) .

1.3. Resolución en rango oblicuo (Slant range)

Para encontrar la distancia o rango (r) a la cual se encuentra un objeto arbitrario, conociendo el tiempo de retardo “ t ”, es claro que $r = ct/2$, despejando $r/t = c/2 \implies dr/dt = c/2$. Esto ayuda a la siguiente expresión

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} \approx \frac{c}{2} \implies \Delta r \approx \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c}{2} * \frac{1}{\tau_c} = \frac{c}{2\tau_c} \quad (3)$$

Donde Δt o t_c representa el periodo o ancho del pulso el cual describe la duración del chirp o pulso modulado en frecuencia. Es decir $\Delta t = t_c$ y $\tau_c = 1/t_c$.

Ejemplo sobre el cálculo de la resolución en rango oblicuo: Si se tiene un radar cuyo ancho de pulso modulado en frecuencia es $\Delta t = 64[\text{ns}]$ (es decir $\tau_c = 15.55[\text{MHz}]$), entonces

$$\Delta r = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}] * 64 \times 10^{-9} [\text{s}]}{2} = 9.6 [\text{m}] \quad (4)$$

Se puede decir que el sistema va a tener una resolución en rango oblicuo de $9.6[\text{m}]$.

1.4. Footprint y Swath

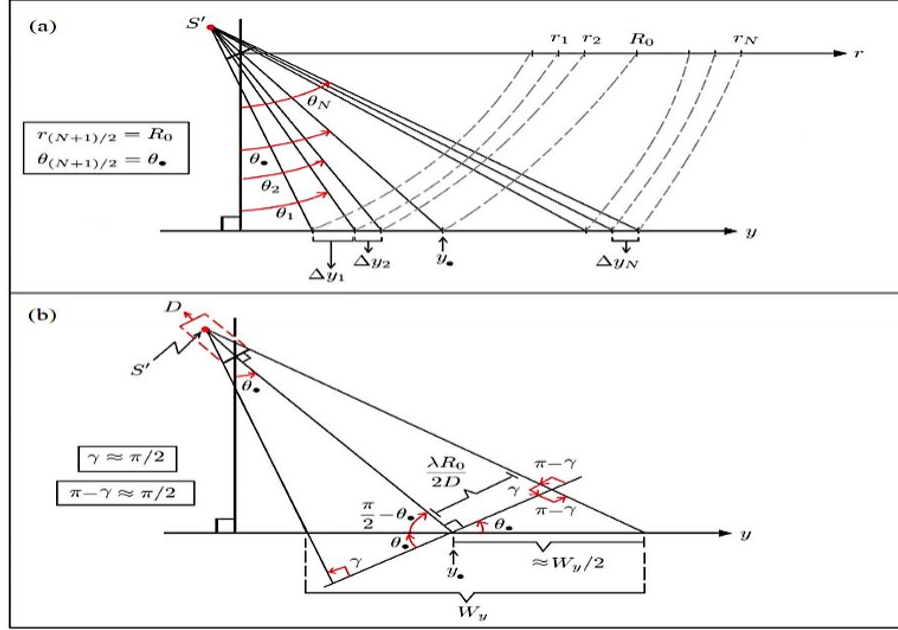


Figura 1: (a) Representación de la resolución en rango terrestre $\Delta y_n = \Delta r / \sin(\theta_n)$, el cual depende del ángulo θ_n con $n=1, \dots, N-1$. En este caso $\Delta r = r_{n+1} - r_n$ es constante y y_{\bullet} es una coordenada casi central respecto a la distribución de los rayos a lo largo del eje y . (b) Representación del footprint a lo largo del rango terrestre, en el cual la distancia W_y es llamada swath. Considerando a Z como la altura satelital, se tiene que $\cos(\theta_{\bullet}) = Z/R_0$.

De acuerdo Tellez Alejandro (2018) se puede interpretar al footprint, como la huella de radiación que una antena rectangular (o el panel de una antena) proyecta sobre el terreno terrestre. Esta huella de radiación sobre el terreno tiene forma de una mancha tipo *sinc* al cuadrado, distorsionada a lo largo del eje y , pero manteniendo su forma a lo largo del eje x . Sin embargo, es el lóbulo central de esta mancha lo que corresponde propiamente al footprint, de la cual, su extensión a lo largo del eje y es conocida como swath. El swath se denota como W_y , así

$$W_y \approx \frac{\lambda R_0}{D \cos(\theta)} = \frac{\lambda R_0^2}{D Z} \quad (5)$$

D corresponde a la longitud de la antena en dirección perpendicular al rango central R_0 cuyo ángulo de look principal es θ_{\bullet} . Un sistema SAR con una antena de longitud azimutal L , que emite una radiación

λ ,y que opera con un rango R_0 ,el factor es

$$W_x = \frac{\lambda R_0}{L} \quad (6)$$

Esta ecuación puede describir el ancho azimutal del footprint de dicho sistema ,tal y como se especifica en [Hanssen] citado por Telles,Alejandro (2018).A manera de ejemplo ilustrativo, un sistema SAR con $\lambda=0.056[m]$ (5.35[GHz],banda C),con una antena de longitudes $L=9.7[m]$ y $D=53[cm]$,trabajando a una altura $Z=800[km]$ con un ángulo de observación $\theta=23^\circ$,producirá un slant range de valor de $R_0 \approx 869.08[km]$.Con estos valores se puede obtener el footprint : $W_x \approx 5[km]$ y $W_y \approx 99.75[km]$.Cabe señalar que hay limitantes físicas para establecer la resolución rango oblicuo, también las hay para la resolución azimutal de un SAR. Si la antena es muy pequeña, habrá a una mayor resolución pero se comprometería la ganancia del cociente-senal-ruido ya que esta ganancia es proporcional al cuadrado de la apertura del sistema.Es así que se muestra como el rango de frecuencia o banda del sensor del radar y otros factores como la altura del satélite en órbita por ejemplo, afectan en la resolución espacial de la imagen SAR .

1.5. Satélites de radar de apertura sintética (SAR)

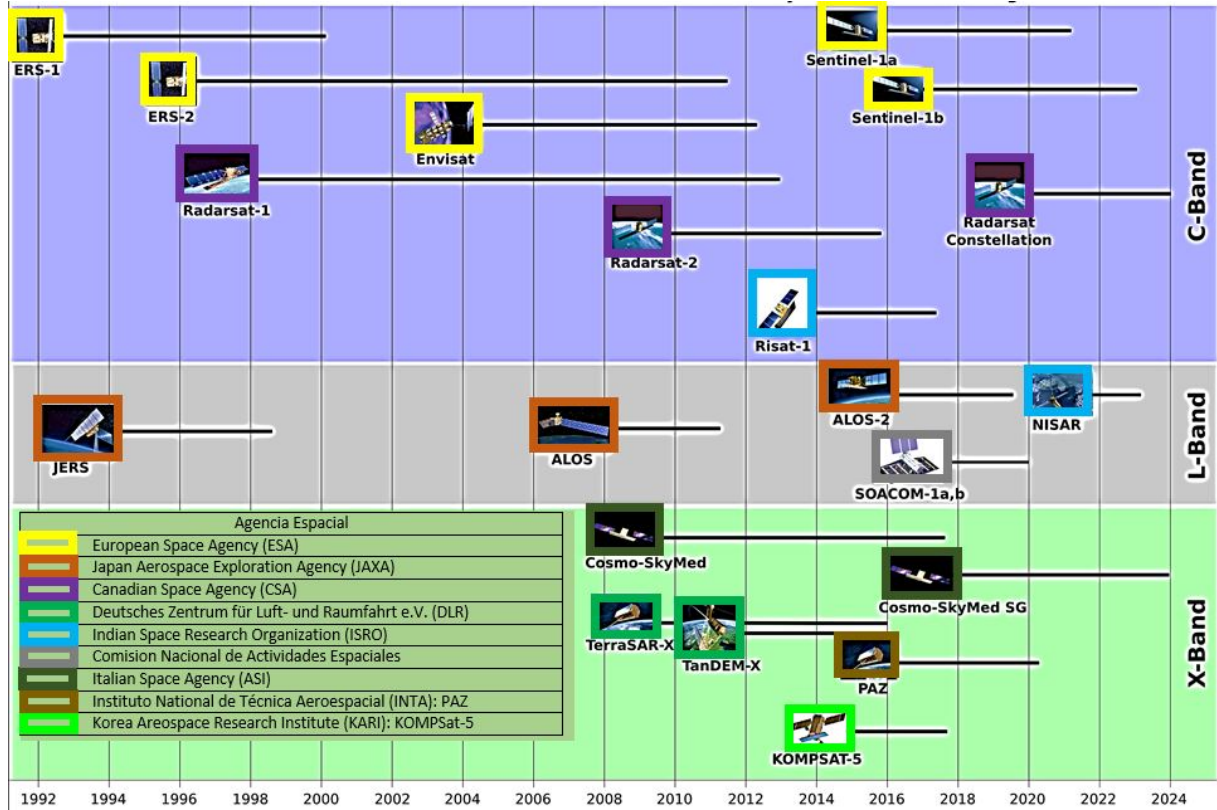


Figura 2: UNAVCO,Ilustración :Varias agencias apoyan las diferentes misiones SAR, Modificado de <https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html>

Los satélites con el Radar de Apetito Sintético (SAR) orbitan la Tierra en una órbita polar síncrona ¹ y las adquisiciones de datos se pueden realizar en cualquier momento del día o de la noche, recolectando datos de amplitud y fase. Los satélites SAR tienen rutas repetidas y operan a frecuencias designadas con banda L, banda C y banda X que son las longitudes de onda predominantes. En la Figura 2 se muestra una tabla de misiones satelitales SAR pasadas, presentes y proyectadas.

1.6. SENTINEL 1

La misión Sentinel-1 comprende una constelación de dos satélites de órbita polar, que operan día y noche realizando imágenes de radar de apertura sintética en banda C, lo que les permite obtener imágenes independientemente del clima. La misión SENTINEL-1 incluye imágenes en banda C que operan en cuatro modos de imágenes exclusivos con diferente resolución (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km). El sensor proporciona información con doble polarización en tiempos de revisión muy cortos y entrega rápidamente el producto. Para cada observación, se necesitan mediciones de la posición y altitud de la nave espacial. La misión se compone de una constelación de dos satélites, SENTINEL-1A (Descendente) y SENTINEL-1B (Ascendente), que comparten el mismo plano orbital. SENTINEL-1 está diseñado para funcionar en un modo de operación preprogramado y sin conflictos, capturando imágenes de todas las masas de tierra, zonas costeras, etc.

Nombre del Sensor	RADARSAT-2	SENTINEL-1A	RISAT-1
Agencia	CSP	ESA	ISRO
Instrumento	C-banda SAR (5.4[GHz])		
Ángulo de incidencia	Side-looking, 15-45° off-nadir		36.85°
Polarización	HH, HV, VV y VH	(VV y VH) ó (HH y HV)	HH y HV
Altura del sensor sobre el Ecuador	789[km]	693[km]	542 [km]
Órbita	Sincrónica al sol (anochece / amanecer)		
Ciclo de repetición de órbita	24 [días]	12 [días]	25 [días]
Resolución	100[m]	5[m] x 20[m]	≈ 25[m]
Ancho de Swath	500[km] (ScanSAR)	250[km] (IWS)	115[km] (MRS)
Lanzamiento	14.Diciembre.2007	03.Diciembre.2014	26.Abril.2012
Tiempo de vida	7 [años]	7 [años]	5 [años]

Cuadro 2: Podest Erika, Características de Imágenes de Radar de Diferentes Satélites. Obtenido de <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/SAR-17/Session2-SAR-Spanish.pdf>

2. Línea Base

Un satélite SAR puede observar la misma área desde un aspecto ligeramente diferente ángulos, esto se puede hacer simultáneamente (con dos radares montados en la misma plataforma) o en diferentes momentos explotando órbitas repetidas de mismo satélite. La distancia entre los dos satélites (u órbitas) en el plano perpendicular a la órbita se llama línea de base del interferómetro (ver Figura 3) y la proyección perpendicular al rango de inclinación es la línea de base perpendicular.

El aumento progresivo de la línea de base y, por lo tanto, el cambio progresivo en el ángulo de visión puede implicar que la frecuencia marginal (propia del sensor) aumente para ser finalmente mayor que el

¹Una órbita síncrona es una órbita geocéntrica que combina altitud e inclinación para lograr que un objeto en esa órbita pase sobre una determinada latitud terrestre a un mismo tiempo solar local.

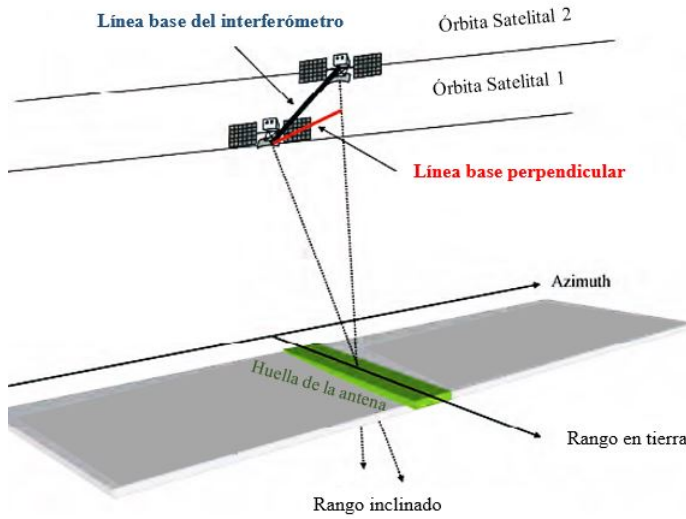


Figura 3: ESA, Ilustración: Geometría de un sistema satelital interferométrico SAR. La separación de órbita se llama línea de base del interferómetro, y su proyección perpendicular a la dirección del rango de inclinación es uno de los parámetros clave de la interferometría SAR. Modificado de [ESA].

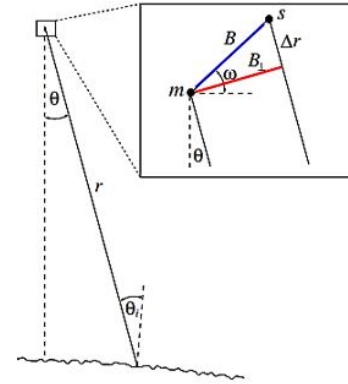


Figura 4: Hooper, ilustración: Geometría de imágenes para interferometría de radar satelital. El sensor se mueve hacia el plano, su posición en el momento de la adquisición *maestra* marcado por m, y en el momento de la adquisición de *esclavos* por s. B es la distancia de referencia entre las posiciones del sensor en los dos tiempos, siendo B_{\perp} componente perpendicular de B, r es el rango desde el sensor hasta la superficie de la Tierra, ω es el ángulo entre la línea de base vector y horizontal, θ es el ángulo de mirada y θ_i es el ángulo de incidencia en la superficie de la Tierra. Modificado de [Hooper].

ancho de banda de la señal haciendo que la franja (punto de retrodispersión) no sea observable. Líneas de base más grandes, por lo tanto, producen franjas con frecuencia creciente. Las rejillas que no encuentran elementos o puntos de retrodispersión con los que interferir en la otra imagen contribuyen al ruido, es así que los interferogramas con línea base grandes tienen muchas franjas apretadas, generalmente son muy ruidosas y difíciles de desenvolver: cuanto menor es la altitud de ambigüedad (es decir, la variación de altura correspondiente a un ciclo de variación de fase), mayor es la probabilidad de la presencia de aliasing en la fase y más difícil es el desenvolvimiento. Para tener un interferograma confiables se debe tener en cuenta deben tener en cuenta la coherencia local (potencia de ruido de fase).

2.1. Selección de imágenes para la generación de DEM con InSAR

En general, se deben seguir las siguientes recomendaciones al hacer modelos digitales de elevación a partir de datos interferométricos:

- Los interferogramas con valores de línea base perpendicular muy pequeños (< 30 m), aunque se les puede aplicar el desenvolvimiento de fase, son casi inútiles debido a su alta sensibilidad al ruido de fase y a los efectos atmosféricos.
- Los interferogramas con una línea de base normal (valores superiores a ≈ 450 m) generalmente son casi imposibles de desenvolver si no hay un DEM disponible a priori y la topografía del área no es muy suave. Además, la coherencia es generalmente pequeña, debido a la alta dispersión geométrica y del volumen.
- La línea de base perpendicular óptima está en el rango entre 150 y 300 [m]. Sin embargo, el mejor

resultado se logra mediante el uso de más de un interferograma: los interferogramas con líneas de base pequeñas pueden explotarse para ayudar a desenvolver los interferogramas con líneas de base altas. Además, se pueden combinar diferentes interferogramas para reducir los efectos atmosféricos.

- Cuando el DEM se pretende utilizar para aplicaciones de interferometría diferencial, se debe utilizar la misma pista que la utilizada para estimar las posibles deformaciones del terreno, a fin de evitar la necesidad de la interpolación de imágenes.
- Los valores de coherencia se ven afectados por el clima local. Evitar adquisiciones durante lluvia, nieve o viento fuerte. Estos fenómenos suelen causar pérdida de coherencia en la fase. La información meteorológica a menudo se puede recuperar de las bases de datos históricas disponibles en la web.

2.2. Selección de imágenes para InSAR diferencial

Hay varias formas diferentes de producir un interferograma diferencial, los criterios para seleccionar imágenes SAR para medir deformaciones en el terreno se enumeran a continuación .

- Par interferométrico único y línea de base cercana a cero

Con un solo par interferométrico (dos imágenes SAR) y línea de base B_{\perp} con un valor cercano a cero, la fase interferométrica contiene la contribución únicamente del movimiento .

- Par interferométrico único y línea de base distinta de cero

Con un solo par interferométrico (dos imágenes SAR) y con línea de base no cercano a cero, la fase interferométrica contiene altitud y contribuciones de movimiento. Se requerirá de un DEM el cual ayudará a re-muestrear las coordenadas geográficas a SAR ,la contribución topográfica es restada al interferograma .

2.3. Consejos para la selección de imágenes SAR

- Seleccionar pares ascendentes o descendentes, dependiendo de cuál puede evitar paralaje² en el área de interés.
- Seleccionar pares de imágenes con la línea de base perpendicular más pequeña en el rango de fechas requerido. Tener en cuenta que cuanto más pequeña es la línea de base, menor es la contribución de la topografía a la fase interferométrica. Como consecuencia, se requerirá de un DEM menos preciso para la resta de la topografía. Además, cuanto más pequeña es la línea de base, mayor es la coherencia esperada.
- Verificar la posibilidad de usar tres imágenes: un par (para la generación DEM) y una tercera imagen, adquirida después del intervalo de tiempo deseado, que muestre una pequeña línea de base perpendicular con la primera o la segunda imagen del par en tándem seleccionado (para hacer un segundo par interferométrico).

²Desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de vista elegido.

2.4. Procesamiento InSAR para el reconocimiento de deslizamientos de tierra

De acuerdo a B. Riedel and A. Walther(2008) la selección de la imagen tiene una influencia significativa en la obtención de la interferograma de deformación. Los criterios varían según los objetos específicos de una investigación. Los parámetros importantes son el tipo de sensor y la disponibilidad de datos, la distribución temporal y espacial de las líneas de base y las características del terreno también son parámetros que tienen gran influencia en el procesamiento de datos.

La orientación de la pendiente espacial se puede tener en cuenta al elegir pistas de satélite descendentes o ascendentes. El primer paso de procesamiento en la cadena de procesamiento es el registro conjunto entre dos escenas de radar. Si estas escenas están registradas conjuntamente, es posible calcular el interferograma multiplicando el señal de fase para cada píxel y la coherencia. De este real interferograma un interferograma sintético, que represente la fase topográfica de un modelo de elevación digital para el área de investigación, tiene que ser restado.

Para obtener valores de entrada razonables para el procesamiento de datos, es útil utilizar órbitas precisas y un DEM, como la Misión Topográfica del Radar del Transbordador Espacial (SRTM) que está disponible para el 90 % de la superficie terrestre con una resolución de cuadrícula de 90 m . Se aplican múltiples pasos de filtro para reducir el ruido del sistema y el procesamiento y para mejorar la señal buscada, es decir, el cambio de la superficie de la tierra.

Se aplican múltiples pasos de filtro para reducir el ruido del sistema y el procesamiento y para mejorar la señal buscada, es decir, el cambio de la superficie de la tierra . Posteriormente, el proceso de desenvolvimiento de fase se ejecuta para generar el interferograma diferencial. Este tipo de procesamiento se llama enfoque de 2 pasadas. La fase topográfica también se puede eliminar mediante el uso de una tercera imagen en relación con la imagen maestra con una línea de base larga generando un segundo interferograma real. El resultado de este enfoque de 3 pasadas es el interferograma diferencial final.

2.5. Ambigüedad de la Altitud

La ambigüedad de la altitud se define como la diferencia de altitud que genera un cambio de fase interferométrico de 2π después de la generación del interferograma. La altitud de ambigüedad es inversamente proporcional a la línea de base perpendicular:

$$h_a = \frac{\lambda r \sin(\theta)}{2B_{\perp}} \quad (7)$$

Si se tiene una $\lambda=5.6[\text{cm}]$, $\theta=23^\circ$, y $r=850[\text{km}]$, la siguiente expresión (en metros):

$$h_a \approx \frac{9300}{B_{\perp}} \quad (8)$$

Como ejemplo, si se usa una línea de base perpendicular de 100 metros, un cambio de 2π de la fase interferométrica corresponde a una diferencia de altitud de aproximadamente 93 metros. Existe una parte superior límite a la línea de base perpendicular, sobre la cual se producen las señales interferométricas y no se pueden generar franjas. En conclusión hay una línea de base perpendicular óptima que maximiza la potencia de la señal al ruido relación (donde la señal es la altitud del terreno).

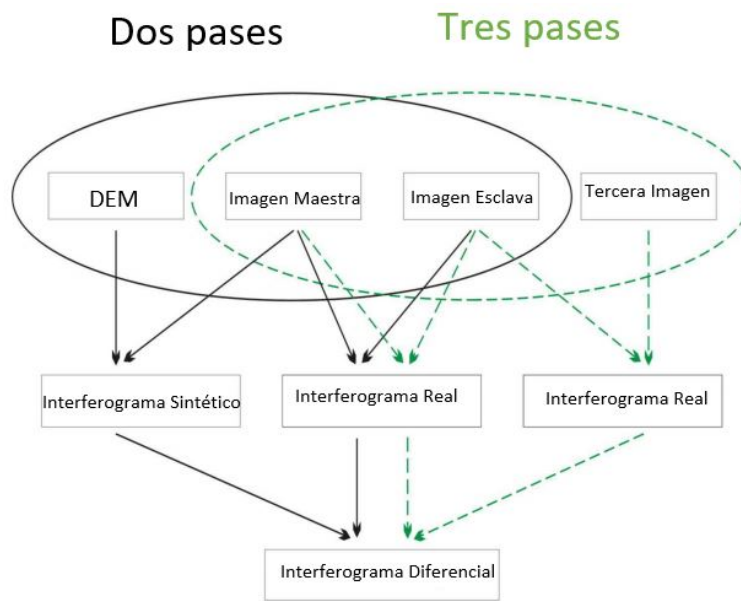


Figura 5: Riedel B., Walther A. ,Ilustración :Diagrama de flujo de los principales esquemas de procesamiento de InSAR. La diferencia entre ambos enfoques radica en el uso de un DEM externo (interferometría de 2 pasadas) o en el uso de una tercera imagen (procesamiento de 3 pasadas) con una línea de base larga en relación con la imagen maestra para la generación de DEM en geometría SAR. El interferograma diferencial resultante debe filtrarse y desenvolverse para la derivación de desplazamientos superficiales, Modificado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00297069/document>

2.6. La línea de base crítica :Sensibilidad

La línea de base crítica depende del tamaño del rango del terreno ,celda de resolución (y por lo tanto también de la pendiente del terreno),la frecuencia de la banda del radar y en la distancia objetivo-sensor. Disminuye para pendientes positivas del terreno y aumenta para las negativas.Este término de ruido de fase, puede eliminarse del interferograma mediante un paso de pre-procesamiento de las dos imágenes SAR, conocida como desplazamiento espectral o filtrado de banda común.El cambio espectral se debe principalmente a una posible variación en el apuntamiento de la antena.

$$B_{\perp,crit} = \frac{W\lambda \tan(\theta - \omega)}{c} \quad (9)$$

Donde W es el rango de ancho de banda de señal .

3. Filtros

3.1. Desplazamiento espectral y filtrado de banda común

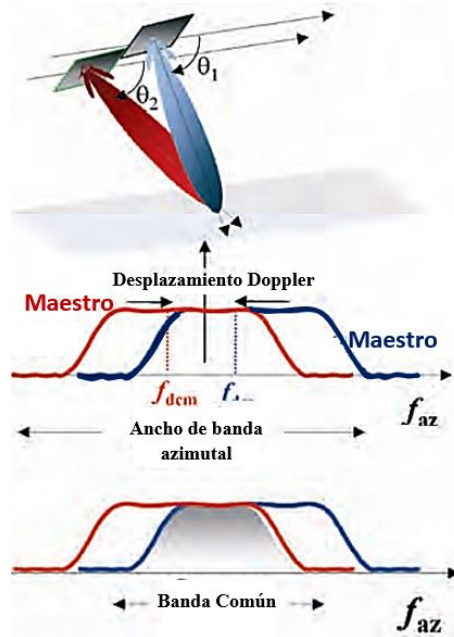


Figura 6: ESA,Ilustración :Filtro de banda común sobre el acimut. En acimut, el cambio se debe a un cambio en el ángulo entrecerrado. Los filtros necesarios para eliminar el espectro no correlacionado se muestran en medio de las dos señales . Las contribuciones se muestran en las parcelas media e inferior. , Modificado de [ESA].

El filtrado de banda común azimutal tiene como objetivo mantener la correlación.El cambio espectral de azimut debido a la pendiente del terreno es bastante pequeño y puede ignorarse por completo en la interferometría SAR de resolución completa,el cambio espectral es debido a una posible variación en el

apuntamiento de la antena entre las dos adquisiciones (Imágenes SAR) conocido como Doppler³ Centroid (DC)⁴. En la Figura 6 se muestra el efecto de un DC con diferencias en los espectros de acimut de las dos adquisiciones, existen dos porciones de reflectividad desplazadas. Cada filtro tiene pasa-banda, se encuentra centrado en el promedio del Centroid Doppler :

$$f_c(r) = \frac{f_{DC_M}(r) + f_{DC_M}(r)}{2} \quad (10)$$

El filtro de ancho de banda debe mantener en un *ancho de banda común*, correspondiente al área sombreada en la gráfica inferior de la Figura 6. Por eficiencia computacional, realizar el filtrado de *Banda Común* (CB) como primer paso en la generación de interferogramas, por ejemplo, antes del sobremuestreo de rango de imágenes maestras y esclavas. Calcular los filtros es algo complicado, en esta fase, ya que la frecuencia central $f_c(r)$, debe calcularse para píxeles correspondientes.^{en} las dos imágenes, y esto requiere a priori conocimiento, incluso aproximado, de los coeficientes de corrección (maestro y esclavo no están registrados de píxel a píxel en esa etapa). La implementación adecuada del filtrado de acimut (CB), debe incluir una compensación por el patrón de antena y la 'ventana de filtrado' del espectro, que generalmente se introducen durante el procesamiento.

3.2. Filtrado para detección de bordes

Un borde puede ser considerado como una discontinuidad o gradiente dentro de la imagen. Los filtros son fundamentales para la detección de bordes en el procesamiento de imágenes. La detección de bordes es básicamente un método para segmentar una imagen en regiones basadas en discontinuidad, es decir, a partir del análisis de un cambio más o menos abrupto en el nivel de gris o textura, que indica el final de una región en la imagen y el comienzo de otra. Mejorando (o amplificando) la presencia de estas discontinuidades en la imagen, hay una mejora en la calidad de imagen percibida bajo ciertas condiciones, sin embargo, al igual que otros métodos de análisis de imágenes, la detección de bordes es sensible a ruido. La detección de bordes se divide en dos categorías principales: detección de bordes de primer orden y detección de bordes de segundo orden. La detección de bordes de primer orden se basa en el uso de derivados de imágenes de primer orden, mientras que la detección de bordes de segundo orden se basa en el uso de derivados de imágenes de segundo orden (en particular el Laplaciano). La Figura 7 proporciona las definiciones formales de estas cantidades derivadas en ambas formas discretas continuas y correspondientes para una imagen 2-D $f(x,y)$.

Filtros derivados para discontinuidades

El filtro promedio, suma los píxeles sobre el vecindario especificado, el cual tiene el efecto de suavizar o desenfocar la imagen. En efecto, esto es solo integración en forma discreta. Por el contrario, los filtros derivados se pueden usar para detectar discontinuidades en una imagen y juegan un papel central en la nitidez de una imagen (es decir realizando detalles finos). Su nombre implica que los filtros derivados están diseñados para responder en puntos de discontinuidad en la imagen y no dar respuesta en regiones perfectamente lisas de la imagen, es decir, detectan bordes.

³El efecto Doppler se utiliza para evaluar el movimiento mediante la medición de cambios en la frecuencia de los ecos reflejados por las estructuras que se mueven.

⁴DC ubica la energía de la señal azimutal en el dominio de frecuencia azimutal. Es necesario para que la energía de la señal en el espectro Doppler pueda ser capturada correctamente por el filtro de compresión azimutal, proporcionando la mejor relación señal / ruido y la resolución azimutal. La DC varía tanto en rango como en acimut. La variación del alcance depende de la altitud del satélite y de la huella iluminada en el suelo el cual se encuentra en función del alcance. La variación azimutal es causada por cambios lentos en la altitud del satélite en función del tiempo.

Medición de Derivada 2D	Caso Continuo	Caso Discreto
$\frac{\partial f}{\partial x}$	$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}$	$f(x + 1, y) - f(x, y)$
$\frac{\partial f}{\partial y}$	$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}$	$f(x, y + 1) - f(x, y)$
$\nabla f(x, y)$	$\left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]$	$[f(x + 1, y) - f(x, y), f(x, y + 1) - f(x, y)]$
$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$	$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(\frac{\partial f}{\partial x})(x + \Delta x, y) - (\frac{\partial f}{\partial x})f(x, y)}{\Delta x}$	$f(x + 1, y) - 2f(x, y) + f(x - 1, y)$
$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$	$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{(\frac{\partial f}{\partial y})(x, y + \Delta y) - (\frac{\partial f}{\partial y})(x, y)}{\Delta y}$	$f(x, y + 1) - 2f(x, y) + f(x, y - 1)$
$\nabla^2 f(x, y)$	$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$	$f(x + 1, y) + f(x - 1, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 4f(x, y)$

Figura 7: Riedel B., Walther A. ,Ilustración :Operadores derivados: sus definiciones formales (continuas) y sus aproximaciones discretas, Modificado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00297069/document>

3.2.1. Detección de bordes de primer orden

Se han propuesto varios núcleos de filtro que se aproximan a la primera derivada del gradiente de una imagen ,tres de los más comunes de filtro detector de bordes son: Roberts, Prewitt y Sobel. Los tres están implementados como una combinación de dos núcleos: uno para la derivada x y otro para la derivada y(Figura 8). El filtro de Robert calcula una medición de gradiente espacial 2D simple y

Roberts		Prewitt		Sobel																						
<table><tr><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	-1	1	0	Derivada X	<table><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table>	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1		<table><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table>	1	0	-1	2	0	-2	1	0	-1
0	-1																									
1	0																									
1	0	-1																								
1	0	-1																								
1	0	-1																								
1	0	-1																								
2	0	-2																								
1	0	-1																								
<table><tr><td>-1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr></table>	-1	0	0	1	Derivada Y	<table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1		<table><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table>	1	2	1	0	0	0	-1	-2	-1
-1	0																									
0	1																									
1	1	1																								
0	0	0																								
-1	-1	-1																								
1	2	1																								
0	0	0																								
-1	-2	-1																								

Figura 8: Breckon y Salomon ,Ilustración : Filtros de detección de bordes de primer orden, Modificado de [BRECKON].

eficiente en una imagen que resalta las regiones correspondientes a los bordes.El operador Roberts se implementa utilizando dos convoluciones de máscaras/kernels ,cada uno diseñado para responder al máximo a los bordes que se ejecutan en $\pm 45^\circ$ a la cuadrícula de píxeles (Figura 8 (izquierda),el cual devuelve la derivada en x y derivada y , G_x y G_y .La magnitud G y orientación θ del gradiente de la

imagen está dado por:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (11)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) + \frac{1\pi}{4} \quad (12)$$

El operador cruzado Roberts es rápido de calcular (debido al tamaño mínimo de los núcleos), pero es muy sensible al ruido. Los detectores de borde Prewitt y Sobel superan muchos de sus limitaciones, pero usan máscaras de convolución ligeramente más complejas (Figura 8). Los núcleos Prewitt y Sobel generalmente se prefieren al enfoque de Roberts porque el gradiente no se desplaza en ambas direcciones y se extiende a tamaños más grandes (barridos mayores que 3x3). La diferencia clave entre los operadores Sobel y Prewitt es que en Sobel, el núcleo implementa la diferenciación en una dirección y el promedio gaussiano (aproximado) en el otro. La ventaja de esto es que suaviza la región del borde, lo que reduce la probabilidad de que los píxeles ruidosos o aislados dominen el filtro de respuesta.

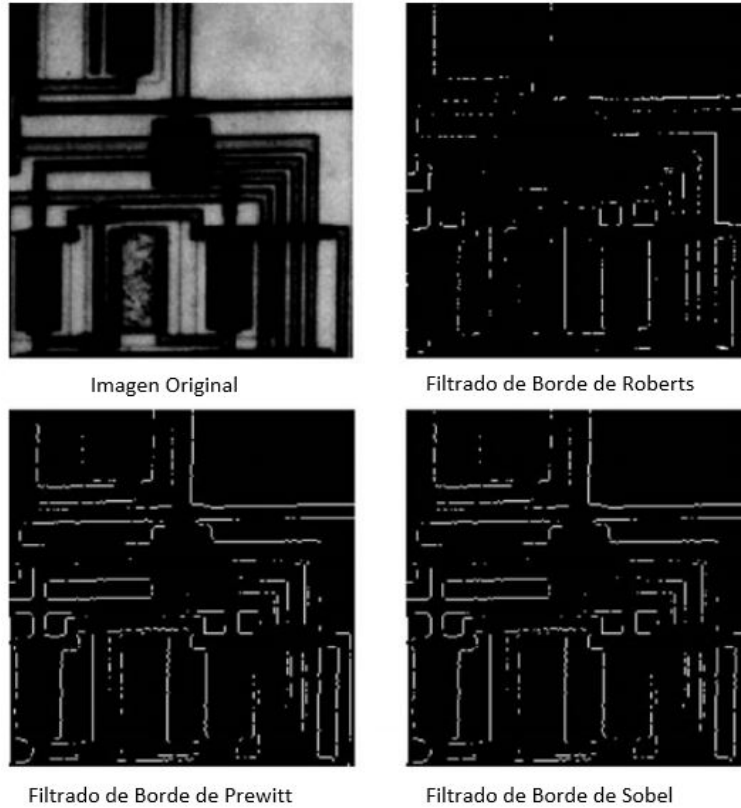


Figura 9: Riedel B., Walther A. ,Ilustración :Respuestas de magnitudes de bordes (Roberts, Prewitt y Sobel) , Modificado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00297069/document>

■ Filtrado separable linealmente

Los filtros Sobel y Prewitt son ejemplos de filtros separables linealmente. Esto significa que el núcleo de filtro se puede expresar como el producto de matriz de un vector de columna con un vector de fila. Por lo tanto, los núcleos de filtro que se muestran en la Figura 8 se pueden expresar de la siguiente

manera:
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ y } \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Una consecuencia importante de esto es que el proceso de filtrado 2-D puede llevarse a cabo mediante dos operaciones secuenciales de filtrado 1-D. Por lo tanto, las filas de la imagen se filtran primero con el filtro de fila 1-D y la imagen filtrada resultante se filtran en columna por el filtro de columna 1-D. Esto produce un ahorro computacional en términos de reducción de la cantidad de operaciones aritméticas requeridas para una convolución dada con un núcleo de filtro. El ahorro es modesto en el caso 3x3 (una reducción de seis multiplicaciones ó adiciones en comparación con nueve para la versión 2-D), pero es considerablemente mayor si consideramos tamaños de kernel más grandes. En general, los filtros separables lineales dan como resultado el almacenamiento de operaciones de orden $2N$ en lugar de un orden de N^2 para convolución 2-D no separable.

3.2.2. Detección de bordes de segundo orden

En general, los filtros de borde de primer orden no se usan comúnmente como un medio para mejorar la imagen. Por el contrario, su uso principal es el proceso de detección de bordes como un paso en la segmentación de imágenes. El medio más común para mejorar la imagen es mediante el uso de una derivada de un operador de segundo orden, el Laplaciano.

■ Detección de bordes laplacianos

Un operador derivado de segundo orden muy popular es el laplaciano:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (13)$$

La forma discreta se da en la tabla de la figura 7. Si se supone la rotación de una imagen de sus ejes a 45° y se superponen la imagen rotada, el Laplaciano en el original, entonces se puede construir un filtro que es invariante bajo múltiples rotaciones de 45° (Figura 9). El operador de gradiente de primer orden tiende a producir bordes gruesos, mientras que el filtro laplaciano tiende a producir bordes más finos en respuesta al cambio de gradiente en lugar del gradiente de la imagen en sí.

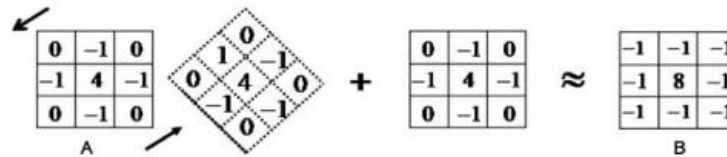


Figura 10: Breckon y Salomon ,Ilustración :Construcción del núcleo discreto laplaciano, Modificado de [BRECKON].

■ Laplaciano de Gaussian

Para contrarrestar esta alta sensibilidad al ruido del filtro laplaciano, el núcleo laplaciano estándar (Figura 4.11) se combina comúnmente con el núcleo gaussiano para producir un método de filtrado robusto. Estos dos núcleos podrían aplicarse secuencialmente a la imagen como dos operaciones de convolución separadas: suavizando primero con el núcleo gaussiano y luego con el laplaciano. Sin embargo, como la convolución es asociativa, se puede combinar el núcleo(kernel) convolucionando al operador de suavizado gaussiano con el operador laplaciano para producir un solo núcleo: el filtro laplaciano de Gauss. Este núcleo único es entonces aplicado a la imagen en una sola pasada. Esto ofrece un ahorro computacional significativo al reducir a la mitad aproximadamente los cálculos requeridos. La respuesta del filtro será cero en áreas de gran intensidad en la imagen uniforme, mientras que será

diferente de cero en un área de transición. En un borde dado, el operador devolverá una respuesta positiva, en el lado más oscuro y negativo en el lado más claro.

- Detector de cruce por cero

La propiedad de cruce por cero del Laplaciano también permite otro método de detección de bordes: el método de cruce por cero. Se usa un detector de cruce por cero para localizar píxeles en los que el valor del laplaciano pasa por cero (es decir, puntos donde el laplaciano cambia de signo). Esto ocurre en los bordes de la imagen donde la intensidad de la imagen cambia rápidamente (o en áreas de cambio de intensidad debido al ruido). Es mejor pensar en el cruce por cero como un tipo de detector de características en lugar de un detector de borde específico. La salida del detector de cruce por cero suele ser una imagen binaria con líneas de un solo píxel de grosor mostrando las posiciones de los puntos de cruce por cero. El punto de partida para el detector de cruce por cero es una imagen que se ha filtrado. Los cruces por cero que resultan son fuertemente influenciado por el tamaño del gaussiano utilizado para la etapa de suavizado de este operador, a medida que aumenta el suavizado, cada vez menos contornos de cruce por cero serán encontrados, y los que permanezcan corresponderán a características de mayor y mayor escala en la imagen. Algunos puntos a tener en cuenta con este operador son:

1. En el caso general, todos los bordes detectados por el detector de cruce por cero tienen la forma de curvas cerradas de la misma manera que las curvas de nivel en un mapa siempre están cerradas.
2. El filtro es bastante susceptible al ruido si la desviación estándar de el alisado gaussiano es pequeño. Una solución a esto es aumentar el suavizado gaussiano para preservar solo los bordes fuertes. Una alternativa es mirar el gradiente del cruce por cero y solo mantenga cruces por cero cuando este esté por encima de un cierto umbral (es decir, usar la tercera derivada de la imagen original). Esto tenderá a retener solo los bordes más fuertes, pero a medida que la tercera derivada también es muy sensible al ruido, esto amplifica enormemente cualquier frecuencia alta del ruido en la imagen.

3.2.3. Mejora de bordes

Se puede hacer uso de la detección de bordes de segundo orden como un método para mejorar los bordes (comúnmente conocido como nitidez de imagen).

- Afilado de bordes laplaciano

El laplaciano solo responde a los pequeños detalles en la imagen (es decir, aquellas regiones de la imagen donde el cambio en el gradiente es significativo) pero tiene una respuesta cero en regiones constantes y regiones de gradiente suave en la imagen. Si es así, se toma la imagen original y se suma o resta el Laplaciano, por lo que se puede esperar mejorar el detalle en la imagen artificialmente. Usando la definición laplaciana de la Sección 4.5.3.1, podemos definir esto de la siguiente manera:

- El filtro de máscara de enfoque

Un filtro de mejora de borde alternativo para los enfoques basados en el Laplaciano es el filtro de máscara de enfoque (también conocido como filtro de refuerzo). El filtrado de enfoque funciona restando una versión suavizada (o desenfocada) de una imagen del original para enfatizar o mejorar la información de alta frecuencia en la imagen (es decir, los bordes). Primeramente este operador produce una imagen de borde de la imagen original. La versión suavizada de la imagen se obtiene típicamente filtrando el original con una media o un núcleo de filtro gaussiano, a imagen de diferencia resultante se agrega al original para lograr cierto grado de nitidez: mediante el uso de un factor de escala constante, asegurando que la imagen resultante esté dentro de lo apropiado rango, los bordes no son demasiado nítidos en la imagen resultante.

Referencias

- [1] [BRECKON] Breckon Toby ,Solomon Chris. (2011). Fundamentals of Digital Image Processing. 04.09.2019, de y John Wiley Sons, Ltd
- [2] [Moreira] A. Moreira, 4th Advanced Training Course in Land Remote Sensing-Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications, (Horokopio University-ESA, 2013).
- [3] [Hanssen] R.F. Hanssen, Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2001).
- [4] [ESA]European Space Agency. (Febrero 2017). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. 30 de Agosto del 2019, de European Space Agency Sitio web: <https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf>
- [5] [ESA2]European Space Agency. (Febrero 2017). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. 30 de Agosto del 2019, de European Space Agency Sitio web:<https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptC.pdf>
- [6] [Hooper] Hooper, Andy Segall, P Zebker, H.A.. (2007). Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. Journal of Geophysical Research. 112. 10.1029/2006JB004763.
- [7] Xiaohua Xu,Paul Wesse , Matt Wei ,David Sandwell,Xiaopeng Tong,Rob Mellors. (Mayo,2011). GMTSAR:An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. 18 de Octubre del 2018, de Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, WA Sitio web: <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR₂NDTEX.pdf>
- [8] B. C. Barber. (Noviembre 1983). Look Filtering. En Theory of Digital Imaging from Orbital Synthetic Aperture Radar(76). Londres: Royal Aircraft Establishment.
- [9] Roland Burgmann,Paul A. Rosen,and Eric J. Fielding. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's surface topography and its deformation . En Annual Reviews(49). California ,EE.UU.: California Institute of Technology.