



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL  
DESENVOLVIMIENTO DE FASE APLICADO EN  
INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA  
(INSAR)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:  
COVARRUBIAS CALDERÓN CARLOS ARMANDO

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. OSVALDO SÁNCHEZ ZAMORA



MÉXICO, D.F.

ENERO, 2016

**Análisis de los factores que intervienen en el desenvolvimiento  
de fase aplicado en Interferometría de Radar de Apertura  
Sintética (InSAR)**

por

Covarrubias Calderón Carlos Armando

Tesis presentada para obtener el grado de

Ingeniero Geofísico

en la

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

México, D.F.. Enero, 2016

*Dedicado a mi Universidad, y a mis padres,  
que en conjunto conforman lo que me ha definido y  
encaminado en el vasto camino de  
la ciencia y la ingeniería.*

CARLOS ARMANDO COVARRUBIAS CALDERÓN

# Agradecimientos

A mis padres, por su gran trabajo en formarme como una persona independiente y con capacidad de creer en mi mismo.

Al Dr. Osvaldo Sánchez Zamora, quién me incentivó y dirigió en todo momento para lograr concluir éste trabajo.

A mis amigos de la Universidad, con quienes he compartido muy buenos momentos y que me dieron su apoyo moral, Guillermo, Israel, Brenda.

A mi novia Karina que me apoya siempre y me brinda su comprensión y cariño.

A mi amiga Cinthya, con quien trabajé en conjunto y merece el mismo mérito por la realización de ésta tesis, y que por motivos administrativos no fué posible presentar juntos.



# Índice general

<b>1. Introducción a la Técnica InSAR</b>	<b>1</b>
1.1. Historia y Visión General . . . . .	1
<b>2. Prerrequisitos: InSAR</b>	<b>12</b>
2.1. Panorama general . . . . .	12
2.2. Tipos de datos SAR . . . . .	13
2.2.1. Satélites SAR y características . . . . .	13
2.2.2. Formato de datos SAR . . . . .	15
2.3. Software disponible y utilizado en InSAR . . . . .	16
2.3.1. Paquetería <i>Repeat Orbit Interferometric Package: ROI-PAC</i> . . . . .	22
2.4. Modelo Digital de Elevación: DEM . . . . .	22
2.5. Órbitas . . . . .	23
2.5.1. Importancia de los errores orbitales . . . . .	25
2.6. Software de visualización: MDX . . . . .	26
<b>3. Procesamiento de datos en InSAR</b>	<b>28</b>
3.1. Flujo de procesamiento con ROI-PAC . . . . .	28
3.1.1. Estructura de directorios y rutas . . . . .	28
3.1.2. Acondicionamiento de datos . . . . .	30
3.1.3. Procesamiento . . . . .	33
<b>4. Análisis del desenvolvimiento de fase</b>	<b>35</b>
4.1. Fase en imágenes SAR . . . . .	35

4.2. Medición de la altura del terreno mediante la fase interferométrica . . . . .	37
4.3. Aplanamiento Interferométrico . . . . .	38
4.4. Altitud de Ambigüedad . . . . .	39
4.5. Desenvolvimiento de fase ó <i>Unwrapping</i> . . . . .	39
<b>5. Procesamiento de datos de la región que comprende a la ciudad de Celaya, Guanajuato.</b>	<b>42</b>
5.1. Selección de datos . . . . .	44
5.2. Parámetros de Procesamiento . . . . .	48
5.3. Procesamiento. . . . .	50
5.4. Análisis de resultados . . . . .	51
5.4.1. Desenvolvimiento con icu . . . . .	53
5.4.2. Desenvolvimiento con SNAPHU . . . . .	57
5.4.3. Comparación entre ambos métodos . . . . .	59
5.5. Conclusiones . . . . .	62
<b>A. Interferogramas procesados con icu.</b>	<b>65</b>
<b>B. Interferogramas procesados con SNAPHU.</b>	<b>81</b>
<b>Apéndices</b>	<b>94</b>
<b>C. Obtención e instalación de ROI_PAC</b>	<b>94</b>
C.1. Requisitos Previos . . . . .	94
C.2. Instalación . . . . .	95
C.3. Instalación de Ejecutables . . . . .	96
C.4. Configuración del archivo SAR_CONFIG . . . . .	97
C.5. Actualización de rutas a Perl . . . . .	99
<b>D. Tipos de archivo ROI_PAC y Formatos de Archivo</b>	<b>101</b>
<b>E. Instalación de MDX</b>	<b>106</b>
E.1. Requisitos Previos . . . . .	106

E.2. Instalación . . . . . 106

# Índice de figuras

1-1. Método convencional de adquisición en InSAR. . . . .	3
1-2. Interferometría de rumbo y <i>repeat-track</i> . . . . .	5
1-3. Interferómetros. . . . .	6
1-4. Órbitas ascendentes y descendentes. . . . .	8
1-5. Series de tiempo. . . . .	9
1-6. Diagrama de flujo de ROI.PAC . . . . .	11
2-1. Misión SRTM. . . . .	23
4-1. Cambio de fase. . . . .	36
4-2. Parámetros geométricos de un sistema interferométrico satelital SAR . . . . .	38
5-1. Ubicación Geográfica - Celaya, Gto. . . . .	43
5-2. Esquema de todos los interferogramas generados con desenvolvimiento de fase por <b>icu</b> . . . . .	50
5-3. Esquema de todos los interferogramas generados con desenvolvimiento de fase por <b>SNAPHU</b> . . . . .	50
5-4. Área de procesamiento seleccionada, la ciudad se encuentra delimitada por el recuadro rojo, al sur se encuentra el cerro La Gavia. . . . .	52
5-5. Separación temporal . . . . .	54
5-6. Incremento de línea base . . . . .	54

5-7. Método <b>icu</b> . a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9. Podemos observar que un filtrado óptimo para el par interferométrico mostrado se encuentra cerca de 0.6, ya que aunque un valor fuerte (0.9) favorece al desenvolvimiento, suaviza demasiado la señal perdiendo calidad en la delimitación de los rasgos de fase. Original: figuras A-1 - A-6. . . . .	55
5-8. Método <b>icu</b> . a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-9 . . . . .	55
5-9. Método <b>icu</b> . a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-12. . . . .	56
5-10. Método <b>icu</b> . a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-12. . . . .	56
5-11. Método <b>icu</b> . a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro adaptativo, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-12, A-13 - A-15. . . . .	57
5-12. Método <b>SNAPHU</b> . Interferograma completo desenvuelto con grados diferentes (0.1 y 0.4, respectivamente). Original: B-1 - B-4. . . . .	58

5-13. Método <b>SNAPHU</b> . Acercamiento a la ciudad de Celaya de la figura 5-12. En la imagen de la derecha podemos observar un patrón de desenvolvimiento consistente con lo obtenido en la sección 5.4.1. Del lado izquierdo vemos un resultado deficiente si lo comparamos con su contraparte, pero que conserva rasgos similares. Original: B-1 - B-4. . . . .	58
5-14. Método <b>SNAPHU</b> . a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). La intensidad de filtrado no tiene gran impacto sobre la fase desenvuelta. Original: B-7 - B-9. . . .	59
5-15. a) Interferograma desenvuelto con icu, grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9. b) Interferograma desenvuelto con <b>SNAPHU</b> , grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9. El patrón de desenvolvimiento es similar utilizando ambos métodos, <b>SNAPHU</b> tiene un desenvolvimiento con mayor detalle (y presenta un rango más amplio) mientras que icu considera zonas de mayor tamaño que nos dan una visión de los efectos de talla regional . . . . .	60
5-16. a) y c) Interferograma desenvuelto con icu, grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9 desde el centro de la imagen. b) y d) Interferograma desenvuelto con icu, grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9 desde la zona industrial. . . .	61
A-1. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	66
A-2. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	67
A-3. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	68
A-4. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	69

A-5. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	70
A-6. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	71
A-7. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	72
A-8. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	73
A-9. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	74
A-10. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	75
A-11. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	76
A-12. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	77
A-13. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	78
A-14. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	79
A-15. Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	80
B-1. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	82
B-2. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	82
B-3. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	83
B-4. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	83

B-5. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	84
B-6. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	84
B-7. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	85
B-8. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	85
B-9. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	86
B-10. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	86
B-11. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	87
B-12. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	87
B-13. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	88
B-14. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	88
B-15. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	89
B-16. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	89
B-17. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	90
B-18. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen. . . . .	90
B-19. Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . .	91



B-20.Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	91
B-21.Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	92
B-22.Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	92
B-23.Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	93
B-24.Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya. . . . .	93
E-1. Búsqueda de librerías . . . . .	107
E-2. Archivos de instalación de una librería. . . . .	108
E-3. Rutas <b>include</b> de la librería libmotif4. . . . .	109
E-4. Rutas <b>lib</b> de la librería libmotif4. . . . .	109

# Índice de tablas

2-1. Bandas de frecuencia más comunes del radar. . . . .	13
2-2. Satélites usados en InSAR. . . . .	14
2-3. Software disponible para InSAR. . . . .	21
2-4. Formatos soportados por MDX . . . . .	27
3-1. Scripts de acondicionamiento de datos para algunos satélites. . . . .	33
3-2. Pasos durante el procesamiento del script process_2pass.pl. . . . .	34
5-1. Población de datos de la zona de interés. . . . .	44
5-2. Interferogramas seleccionados por SBAS . . . . .	48
5-3. Interferogramas seleccionados por categoría. . . . .	53
A-1. Sets de interferogramas. . . . .	65
B-1. Sets de interferogramas. . . . .	81

# Análisis de los factores que intervienen en el desenvolvimiento de fase aplicado en Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

por

Covarrubias Calderón Carlos Armando

## Resumen

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una técnica ampliamente utilizada para el estudio y monitoreo de los fenómenos de deformación que ocurren en la superficie de la Tierra.

El concepto más importante, y que es el que da sentido a éste tipo de estudios es la **fase interferométrica**, misma que, como se describe en éste trabajo, debe pasar por un proceso de *desenvolvimiento* que en forma apropiada, permite obtener la diferencia entre dos imágenes de una misma región que ha sufrido algún cambio.

El objetivo principal de éste trabajo, es ilustrar, no sólo de manera teórica, sino con ejemplos, los factores que afectan durante el proceso de desenvolvimiento de fase. Escogimos una región que se ha estado estudiando por los problemas de hundimiento que en ella ocurren, y lo que tratamos de obtener es un modelo interferométrico de dicha región, así como mejorar los resultados del mismo. De igual forma, proponer una metodología de "procesamiento de prueba", mediante el cual se encuentren los valores óptimos para obtener mejores interferogramas.

Usando imágenes de la Ciudad de Celaya, Guanajuato; obtuvimos conjuntos de interferogramas haciendo variar parámetros de procesamiento tales como: método de desenvolvimiento, tipo de filtro e intensidad del mismo y el punto de partida para el desenvolvimiento. Después de analizar los conjuntos de interferogramas, se definen los parámetros más adecuados.

Los métodos de desenvolvimiento **icu** y **SNAPHU** se comportan diferente ante el filtrado y el grado de desenvolvimiento. El filtrado y su intensidad se notan más en icu, y, ya que SNAPHU normalmente desenvuelve un área mayor, le afecta más el grado de desenvolvimiento.

# Análisis de los factores que intervienen en el desenvolvimiento de fase aplicado en Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

by

Covarrubias Calderón Carlos Armando

## Abstract

Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a widely used technique for the study and monitoring of deformation phenomena occurring on the surface of the Earth.

The most important concept, and that is what gives meaning to this type of study is the interferometric phase, same, as described in this work, must go through a process of unwrapping that, properly performed, allows to obtain the difference between two images of the same region that has suffered some change across time.

The main objective of this writing, is to illustrate, not only theoretically, but with examples, the factors that affect in the process of *phase unwrapping*. We chose a region that has been studying because of subsidence problems that take place, and what we're trying to get is an interferometric model of the region and improve its results. Likewise, propose a methodology of "test processing", in order to find the optimum values for better interferograms.

Using images of the city of Celaya, Guanajuato; sets of interferograms were obtained by varying processing parameters such as: unwrapping method and threshold, filter type and intensity of it and the starting point for unwrapping. After analyzing the sets of interferograms, the most appropriate parameters are defined.

The **icu** and **SNAPHU** unwrapping methods, behave differently to filtering and unwrapping threshold. Filtering and its intensity is most noticeable in **icu**, and, as usually, **SNAPHU** unwraps a larger area, it is more affected by the unwrapping threshold.

# Capítulo 1

## Introducción a la Técnica InSAR

### 1.1. Historia y Visión General

En 1993, Goldstein *et al.* [1993] presentó el primer mapa interferométrico utilizando imágenes satelitales de Radar de Apertura Sintética (*Sinthetic Aperture Radar*, SAR) mostrando grandes deformaciones de la superficie sólida de la Tierra; en este caso, la superficie de deformación era una corriente de hielo en la Antártida. El mismo año, Massonnet *et al.* [1993] mostró mapas de deformación exquisitamente detallados y espacialmente continuos de la superficie asociada con el terremoto de Landers, con magnitud de momento ( $M_w$ ) de 7.3, en 1992 en el desierto de Mojave, al sur de California. Estos artículos anunciaron una nueva era en la ciencia geodésica, en la que potencialmente podemos medir desplazamientos tridimensionales (3D) de la superficie con continuidad espacial casi total, en una gran variedad de fenómenos naturales y provocados por el hombre.

Una gran lista de ejemplos hasta la fecha incluye todas las formas de deformación (intersísmica, cosísmica, y postsísmica, además de la deformación *asísmica*, característica de un concepto reciente de sismos *lentos o silenciosos*) en y/o alrededor de fallas destinadas a restringir las propiedades reológicas de la misma, el monitoreo de la deformación que puede presentarse en volcanes activos, la mecánica de los glaciares y los cambios temporales en el flujo de éstos, con un evidente impacto en las evaluaciones del cambio climático, y los cambios estacionales y antropogénicos en acuíferos. Más allá de detectar la deformación de la superficie terrestre, la técnica InSAR también puede proporcionar vistas únicas de las interrupciones de la superficie, a

través de mediciones de decorrelación interferométrica, que podrían ser de ayuda por ejemplo, para servicios de emergencia.

El Radar de Apertura Sintética funciona en el rango de frecuencia de las microondas; estos sistemas proporcionan imágenes únicas que representan las propiedades eléctricas y geométricas de una superficie en casi todas las condiciones climáticas. Dado que generan su propia iluminación, las imágenes SAR pueden ser tomadas a la luz del día o en la noche. Los sistemas de cartografía SAR operan típicamente en plataformas aéreas o espaciales siguiendo trayectorias de vuelo lineales, como se ilustra en la Figura 1-1(a). Los datos crudos de la imagen se toman mediante la transmisión de una serie de pulsos codificados por una antena que hace un barrido a lo largo de la trayectoria de vuelo. El eco de cada pulso se registra durante un periodo de recepción entre los eventos de transmisión. Cuando se recoge un determinado número de pulsos, es posible llevar a cabo una compresión 2D por paquetes para enfocar la imagen.

Esta técnica se conoce como SAR porque en la dirección del vuelo (*along-track*), o acimut, se crea una gran apertura virtual por la combinación coherente de pulsos de radar recibidos mientras la antena se mueve a lo largo de ésta trayectoria [Raney, 1971]. Aunque la longitud física de una antena SAR es típicamente del orden de algunos metros, la longitud de apertura sintética puede ser de kilómetros. Debido a que la imagen se adquiere desde un punto de vista lateral, sufre una distorsión geométrica con respecto a las coordenadas del terreno (Figura 1-1(b)).

Al combinar coherentemente las señales procedentes de dos antenas, se calcula la diferencia de fase interferométrica entre ambas para cada punto adquirido. La diferencia de fase está directamente relacionada con la longitud de la trayectoria al punto medido, que depende de la topografía. Conociendo la geometría del interferómetro, la diferencia de fase se debe convertir en altitud para cada punto de la imagen.

En esencia, la diferencia de fase se relaciona con la altura de un punto mapeado (es decir, un punto dado dentro de la imagen tiene coordenadas planas  $X$  y  $Y$ , y el valor de fase asociado a dicho punto corresponde con la coordenada en  $Z$ ), lo que permite hacer una reconstrucción en tres dimensiones de la ubicación de los objetivos.

El enfoque de InSAR para cartografía topográfica es similar en principio a la aproximación estereoscópica convencional. En estereoscopia, se adquieren un par de imágenes del terreno,

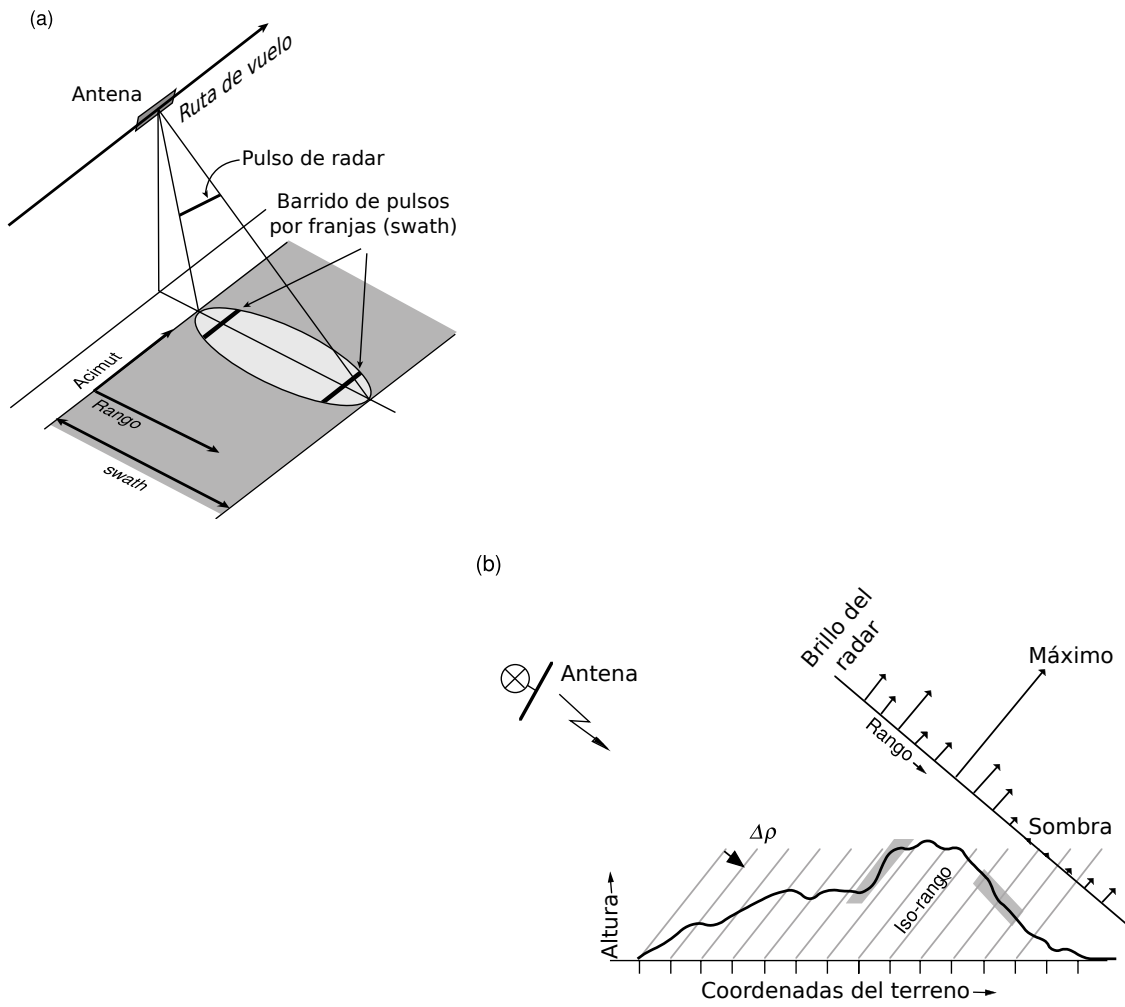


Figura 1-1: Método convencional de adquisición en InSAR [Simons y Rosen, 2007, p. 4].

una desplazada con respecto a la otra; el *paralaje*<sup>1</sup> generado por el desplazamiento permite la recuperación de la topografía debido a que los objetivos a diferentes alturas se encuentran desplazados uno respecto al otro en las dos imágenes, por una cantidad relacionada con sus altitudes [Rosen *et al.*, 2000]. La principal diferencia entre la técnica InSAR y la estereoscopia radica en que, para InSAR, las mediciones de paralaje entre las imágenes SAR se obtienen mediante el cálculo de la diferencia de fase entre las señales recibidas por dos antenas. Estas diferencias de fase se utilizan para determinar el ángulo del objetivo con respecto a la línea base del radar interferométrico directamente. La precisión de la medición con InSAR es típicamente de varios milímetros a centímetros, siendo una fracción de la longitud de onda en que opera el radar, mientras que la precisión de las mediciones de paralaje en estereoscopia suele ser del orden de la resolución de las imágenes (de varios metros o más).

El registro de las dos imágenes SAR para la medición interferométrica, la obtención de la diferencia de fase, y la posterior conversión de los resultados en modelos de elevación digital (DEM) del terreno puede ser altamente automatizado, lo que representa una ventaja intrínseca de la técnica.

La técnica InSAR descrita, utilizando dos aperturas en una sola plataforma, a menudo se llama *interferometría de Rumbo* (XTI). Otros términos son *una sola vía* e *interferometría de un solo paso* (Figura 1-2(a)). Otra técnica de interferometría fue desarrollada por Goldstein y Zebker [1987] para la medición del movimiento de la superficie con imágenes tomadas en diferentes tiempos (Figura 1-2(b)). El intervalo de tiempo entre la toma de las imágenes puede ser desde una fracción de segundo a años. Las imágenes múltiples se pueden considerar como series de tiempo. El movimiento de un objetivo se detecta mediante la comparación de las imágenes. A diferencia de los regímenes convencionales en los que se detecta el movimiento solamente cuando los objetivos se mueven más de una fracción significativa de la resolución de las imágenes, esta técnica mide las diferencias de fase de los píxeles (por pares) de las múltiples imágenes SAR. Si las trayectorias de vuelo y la geometría de toma de imagen en todas las observaciones son idénticas, cualquier diferencia de fase se debe a cambios en el tiempo del reloj del sistema SAR, retardo de propagación variable, o movimiento de la superficie en dirección de la Línea de Visión (*Line Of Sight*, LOS) del radar.

---

<sup>1</sup>Es la desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de observación elegido



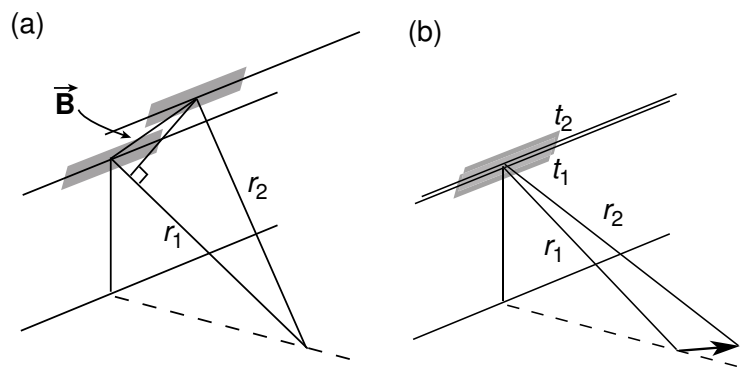


Figura 1-2: a) Interferometría de Rumbo (XTI). b) Interferometría *repeat-track*. [Simons y Rosen, 2007, p. 5].

En la primera aplicación de esta técnica descrita, Goldstein y Zebker [1987] aumentó la apertura de un sistema SAR convencional, separado a lo largo del fuselaje del avión donde va montada la antena. Esta técnica ha sido bautizada como *interferometría along-track* (ATI), debido a la disposición de las dos antenas a lo largo de la línea de vuelo en una sola plataforma (Figura 1-3(b)).

La ATI es en realidad un caso especial de *interferometría repeat-track* (RTI), que puede ser utilizada para generar la topografía y el movimiento. Las órbitas de varios satélites SAR se han controlado de tal manera que casi vuelven sobre sí mismos después de varios días. Los levantamientos aéreos también pueden ser controlados para repetir con precisión las trayectorias de vuelo. Si las rutas repetidas de vuelo dan como resultado un *cross-track* y la superficie no ha cambiado entre las observaciones, entonces el par de observaciones puede servir para medir la topografía. Para los sistemas espaciales, la RTI suele denominarse *interferometría de paso de repetición* (Figura 1-2(b)).

Si la ruta de vuelo se repite perfectamente de tal manera que no hay separación transversal, entonces no hay sensibilidad a la topografía, y se pueden medir movimientos radiales directamente como un sistema de ATI. Sin embargo, puesto que la separación temporal típica entre las observaciones es de días a muchos meses o años, la capacidad de detectar pequeñas velocidades radiales es sustancialmente mejor que el sistema ATI descrito anteriormente. La primera demostración de la RTI para el mapeo de velocidad fue el estudio de una corriente de hielo en la Antártida [Goldstein *et al.*, 1993].

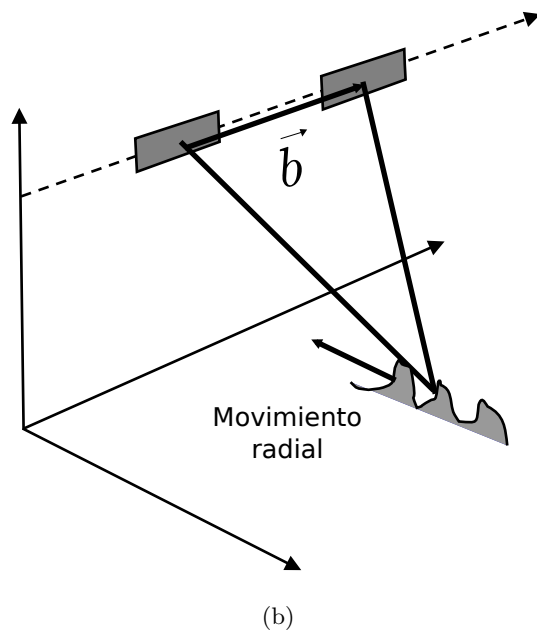
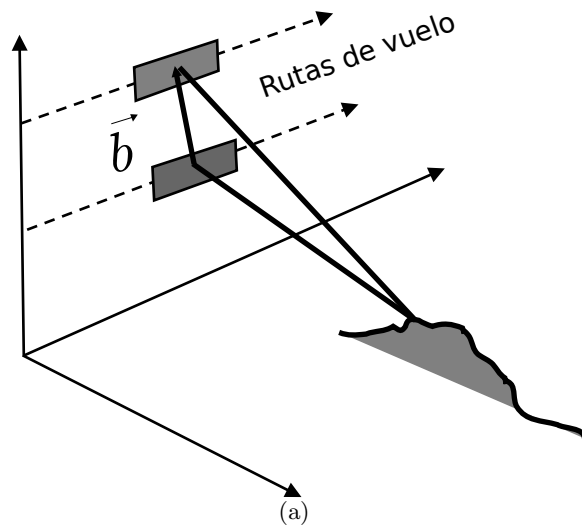


Figura 1-3: a) Interferómetro *cross-track*. b) Interferómetro *along-track*. [Rosen, 2011, p. 40]

Normalmente para las observaciones *repeat-track*, la ruta del sensor no se repite exactamente, por lo que las medidas interferométricas en tiempos separados incluyen la firma de la topografía y del movimiento radial o desplazamiento de la superficie. La manera para reducir estos datos (velocidad o desplazamiento de la superficie) removiéndola la topografía se denomina *interferometría diferencial*.

Hasta la fecha todos los satélites civiles con un sistema SAR montado han sido de *observación a la derecha* en órbitas síncronas solares cercanas a los polos. Esto permite observar un lugar determinado de la Tierra con pasos de órbita ascendente y descendente (Figura 1-4). Con un solo satélite, es posible obtener mediciones geodésicas desde dos direcciones diferentes, lo que permite que las mediciones sean vectoriales. La variedad de geometrías de observación disponibles puede aumentar bastante si un satélite tiene capacidad de observación tanto izquierda como derecha. Del mismo modo, la vecindad en rutas orbitales con observaciones superpuestas en diferentes ángulos de incidencia también puede proporcionar diversas geometrías de visualización.

De forma ideal, las observaciones con una determinada geometría son adquiridas con frecuencia y durante un periodo de tiempo prolongado para proporcionar una buena densidad de datos para analizar. La frecuencia de adquisición de imágenes es clave para una óptima resolución temporal de un determinado fenómeno, así como para combinar múltiples imágenes para detectar señales pequeñas. El mayor problema al que se enfrenta la técnica InSAR es la falta de coherencia entre el par de imágenes que conforman un interferograma, la cual puede estar asociada a la configuración del instrumento, como a cambios físicos abruptos en la superficie terrestre. La figura 1-5 muestra un ejemplo de los satélites ERS-1 y ERS-2, donde se ilustra como escoger imágenes para procesar, suponiendo que se deseen todos los pares de imágenes disponibles que tengan menor decorrelación debido a líneas base grandes, nieve o separación temporal demasiado grande.

Hoy la técnica InSAR es ampliamente aplicada, en gran parte debido a la disponibilidad de datos adquiridos por los satélites ERS-1, ERS-2 y Envisat operados por la Agencia Espacial Europea (ESA), los satélites JERS-1 y ALOS operados por la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial de Japón (NASDA), RADARSAT-1 operado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA), y SIR-C / X-SAR operados por las agencias espaciales de los Estados Unidos, Alemania e Italia.

Existe software comercial y de libre acceso para el procesamiento convencional de InSAR.

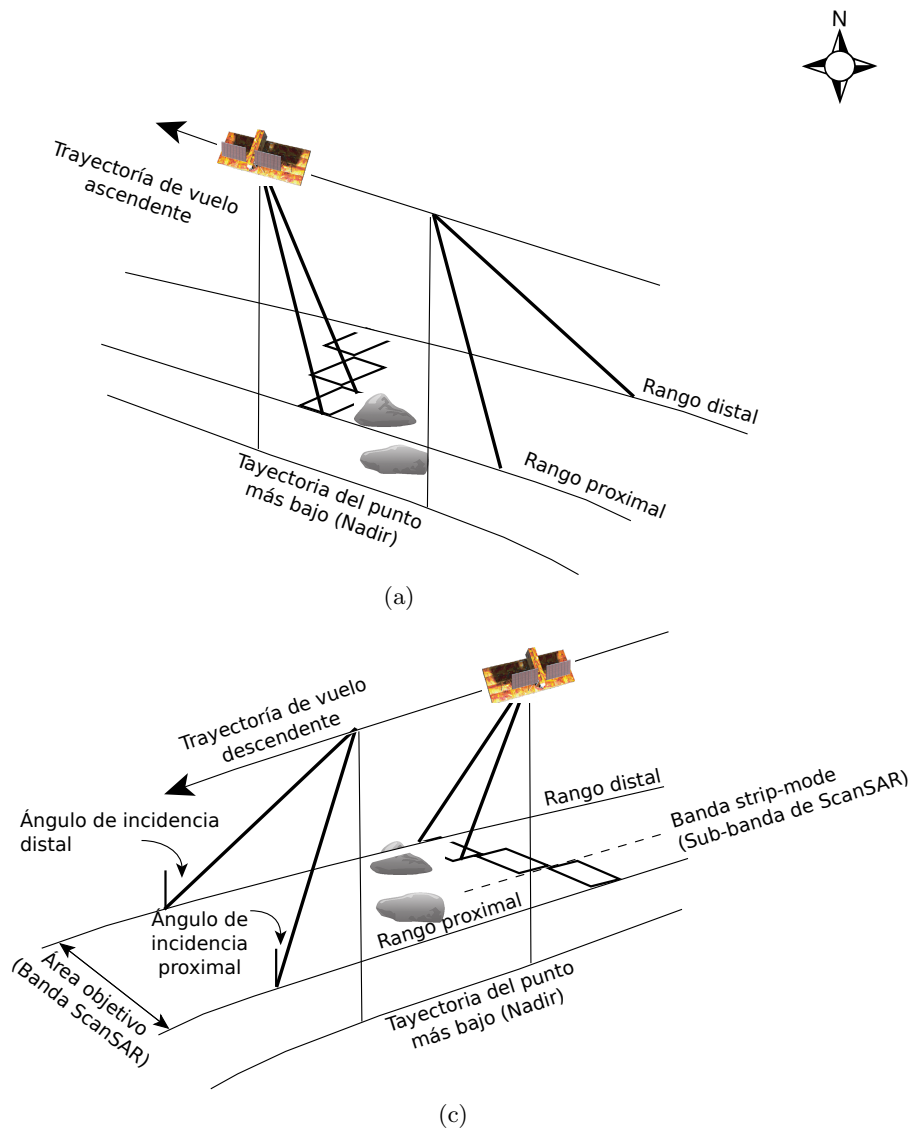


Figura 1-4: a) Órbita ascendente. b) Órbita descendente.[Simons y Rosen, 2007, p. 7].

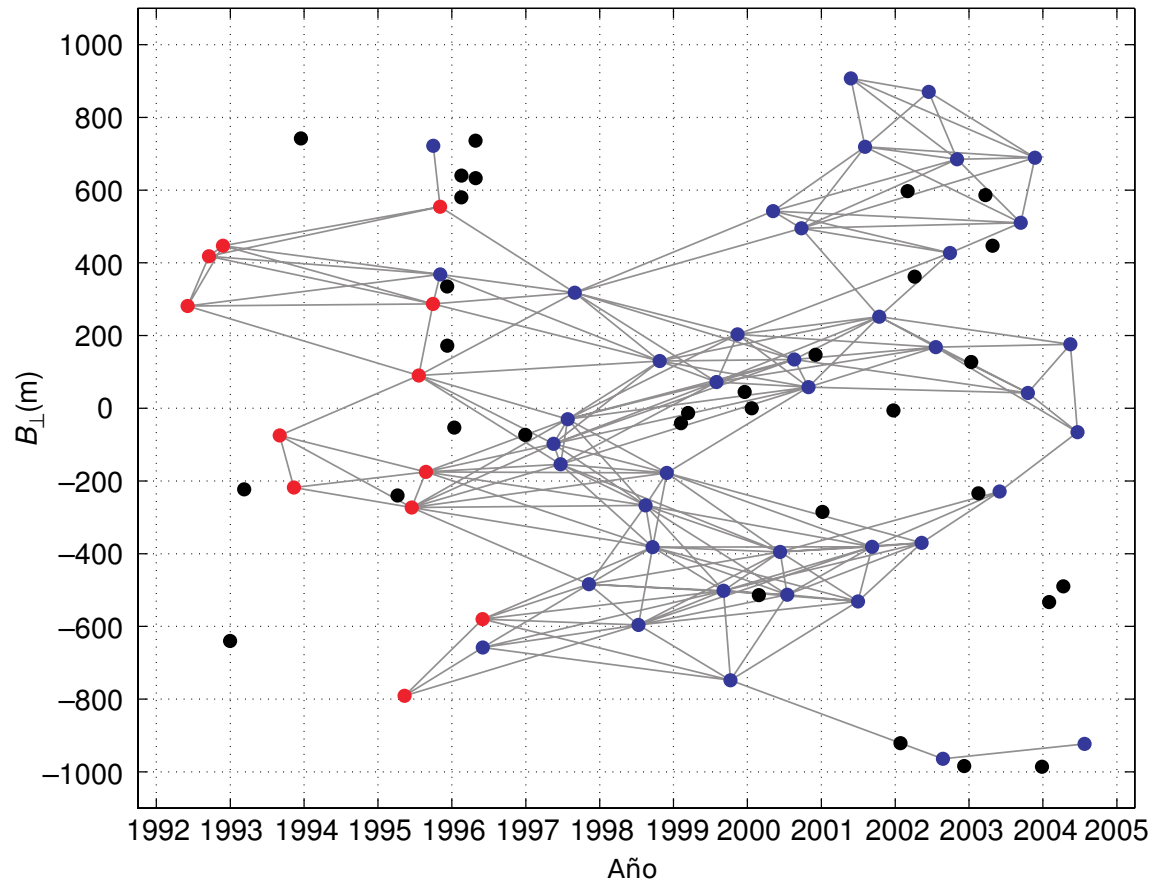


Figura 1-5: Serie de tiempo para satélites ERS-1 y ERS-2 [Simons y Rosen, 2007, p. 8].

Mientras que pueden diferir en detalles, todos ellos deben seguir un flujo de procesamiento básico. La figura 1-6 presenta un flujo desarrollado por los autores de la suite de software Repeat Orbit Interferometric Package (ROI-PAC) [Rosen *et al.*, 2004]. Este diagrama de flujo muestra explícitamente los posibles ciclos iterativos, uso de datos externos y modelos intermedios.

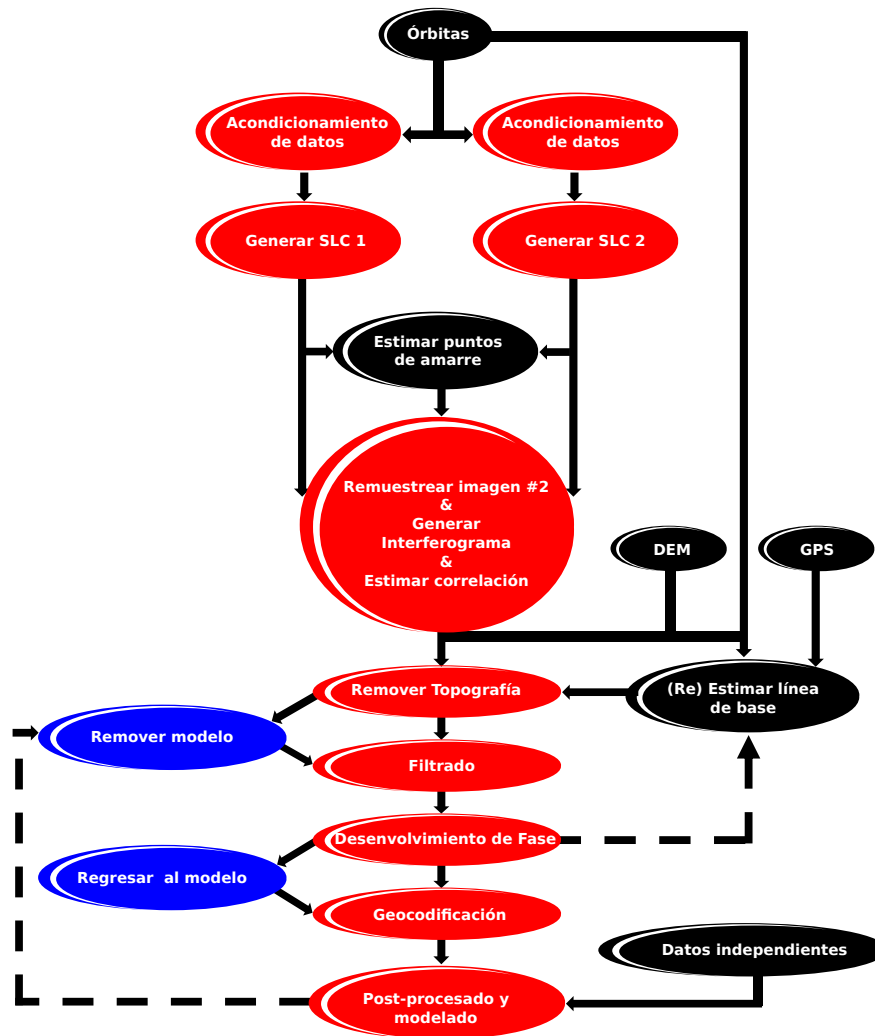


Figura 1-6: Diagrama de flujo que sigue ROI-PAC para generar mapas interferométricos [Fielding, 2009, p. 4].

## Capítulo 2

# Prerrequisitos: InSAR

### 2.1. Panorama general

Para generar un mapa interferométrico, es primordial conocer las diferentes plataformas o misiones (satélites en operación y/o fuera de funcionamiento) que se encargan de recolectar las imágenes SAR, así como particularidades de cada una de ellas (resolución temporal, espectral y espacial; año(s) que estuvo en funcionamiento, institución responsable de su operación, distribución y disponibilidad de datos, formatos de archivo que maneja).

Al escoger la paquetería para procesar, debe considerarse ésta información, para que así se cuente con la mejor alternativa para el proyecto en cuestión. La mayoría de las veces el orden para llevar a cabo éste proceso de selección lo define el área (y fecha) de estudio.

En éste capítulo se hablará de conceptos previos, propios de la técnica InSAR que deben ser revisados para llevar a cabo un estudio de éste tipo.

Se abordaran los conceptos de: tipos de datos (crudos, *raw*) así como su procedencia, características de la paquetería *Repeat Orbit Interferometric Package*: ROI\_PAC, Modelo Digital de Elevación (DEM), órbitas y sus tipos, así como software adicional (externo a ROI\_PAC) que cumple tareas específicas durante la generación de interferogramas.



## 2.2. Tipos de datos SAR

*Radar* es una palabra muy utilizada en la actualidad, la cual es acrónimo de *Radio Detection And Ranging*, y consiste en la emisión y recolección de pulsos de microondas para medir distancias. En el espectro electromagnético, las microondas se encuentran en el rango de 0.3-30 GHz ó longitud de onda de 0.1-1 m; otras aplicaciones de radar pueden operar fuera de éstos límites pero el principio es el mismo. Diferentes partes de éste espectro fueron separadas en un código de nombres durante la Segunda Guerra Mundial, los cuales siguen siendo usados en la actualidad (tabla 2-1). Las bandas comunmente utilizadas por satélites de radar son la banda X, C, L, S (usada por la NASA en la misión Magellan a Venus), la banda Ku (Misión Cassini a Saturno) y la banda P usada algunas veces en aeroplanos.

Banda	Frecuencia	Longitud de Onda ( $\lambda$ )
HF	3 - 30 MHz	100 - 10 m
VHF	30 - 300 MHz	10 - 1 m
UHF	300 MHz - 1 Ghz	1 m - 30 cm
L	1 - 2 GHz	30 - 15 cm
S	2 - 4 GHz	15 - 7.5 cm
C	4 - 8 GHz	7.5 - 3.75 cm
X	8 - 12 GHz	3.75 - 2.5 cm
Ku	12 - 18 GHz	2.5 - 1.6 cm
K	18 - 27 GHz	1.6 - 1.1 cm
Ka	27 - 40 GHz	1.1 cm - 7.5 mm
W	40 - 100+ GHz	7.5 - 3- mm
P	0.3+ Ghz	1+ m

Tabla 2-1: Bandas de frecuencia más comunes del radar.

### 2.2.1. Satélites SAR y características

Una decisión importante en un estudio con SAR es la plataforma que se pretende utilizar, ya que su elección involucra varias interrogantes: en primera instancia, el tipo de estudio nos ayuda a delimitar características que el mismo demanda, como el ciclo de repetición del satélite, así como la(s) banda(s) que se requieren, además, el formato de archivos que maneja el satélite (p.ej. CEOS<sup>1</sup>), su manejabilidad y adaptabilidad para procesar con el software elegido. Por otro

<sup>1</sup>El formato de datos crudos SAR varía dependiendo del satélite, mismo que es regido por el Comité de Satélites de Observación Terrestre (*Commitee on Earth Observation Satellites*, CEOS)

lado, se debe conocer la disponibilidad de datos que existen del área para las fechas requeridas (p.ej. estudios de fenómenos que ocurrieron hace 10 años, o que se busca darle seguimiento desde su aparición), o bien, si el estudio se lleva a cabo en la actualidad, que plataformas se encuentran operando.

Algunos satélites con un sistema SAR incorporado, diseñados con distintos enfoques se muestran a continuación en la tabla 2-2.

Satélite	Año	Ciclo (días)	Banda
ERS1	1991 - 2000	35	C, Ku
ERS2	1995 - 2011	35	C, Ku
Radarsat-1	1995 - 2013	24	C
Radarsat-2	2007 - actual	24	C
Envisat	2002 - 2012	35	C
ALOS	2006 - 2011	46	L
ALOS 2	2014 - actual	46	L
ALOS 3	2015+	46	L
TerraSAR-X	2007 - actual	11	X
COSMO/SkyMed 1	2007 - actual	16	X
COSMO/SkyMed 2	2007 - actual	16	X
COSMO/SkyMed 3	2008 - actual	16	X
COSMO/SkyMed 4	2010 - actual	16	X
SeaSat	1978: 28/06 - 10/10	17/3	L
JERS-1	1992 - 1998	44	L
SIR-C	1994	1	X, C, L
Sentinel-1A	2014 - actual	12	C
Sentinel-1B	2016+	12	C
CryoSat-2	2010 - actual	30	X

Tabla 2-2: Satélites usados en InSAR.

ERS-1 y ERS-2 conformaron la primera constelación de satélites de monitoreo terrestre con sistema SAR que tuvo la Agencia Espacial Europea (ESA), operando en un periodo de 20 años a lo largo del cual aportaron una importante cantidad de datos, a lo que se sumó Envisat en 2002. Actualmente, la agencia se encarga del control de la nueva misión Sentinel, con el Sentinel-1A en órbita y contemplando el lanzamiento del Sentinel-1B en el año 2016; el objetivo de la misión es proveer y dar continuidad a la colección de datos de banda C-SAR tras la retirada de los satélites ERS y Envisat.

Asimismo, otra misión operada por la ESA, con un enfoque más particular de la técnica

InSAR, es CryoSat, especialmente diseñado para el monitoreo de los sectores más dinámicos de la criosfera en la Tierra; utilizando algunas técnicas de la interferometría SAR estándar para afinar su precisión en los márgenes de capas de hielo escarpadas y hielo marino en aguas polares. CryoSat-2 mide la diferencia de altura entre el hielo marino y el agua adyacente, así como los cambios en el espesor.

### 2.2.2. Formato de datos SAR

El formato CEOS consiste de un archivo de directorio de volumen (*Volume Directory File*, en formato ASCII), el cual describe la disposición de los datos en el medio de almacenamiento; el archivo líder (*SAR Leader File*, ASCII y binario) que contiene información pertinente y específica del conjunto de datos SAR (tamaño del archivo de datos crudos -*Raw*-, velocidad y altura de la plataforma, latitud central de observación, longitud y hora de adquisición); el archivo de datos crudos (*Raw Data File*, formato binario) que contiene un registro de cabecera mas los datos SAR en bruto nominalmente almacenados como una línea de datos por registro. Cada valor en el encabezado contiene información útil acerca de los parámetros de los datos recogidos (la hora del reloj del satélite, número de línea, etc.) que están documentadas por las agencias espaciales. Cada línea de registro consiste en un prefijo (cabecera - en el caso de ERS, esto es 412 bytes), los datos en bruto, y un sufijo (no se utiliza siempre).

Los datos binarios en bruto del SAR (excepto la cabecera y el sufijo en cada línea) se almacenan comúnmente en dos formatos: como un número complejo en I / Q (componentes en fase (real) y en cuadratura (imaginaria)) o en video *offset* (números reales). El formato I / Q es el más común para los satélites que discutimos aquí (el video offset se utilizó en SEASAT). La elección del formato de datos se rige por la forma en como la señal de radar que regresa al satélite desde la tierra (el eco) se convierte de analógica a digital. El formato I / Q utiliza un convertidor complejo mientras que el video offset (o de desplazamiento) requiere un convertidor más complicado para guardar los números como reales, pero la cantidad final de datos en cada formato es el mismo. Cada formato tiene diferentes ventajas y requiere diferentes algoritmos para procesar.

Para cada muestra, el voltaje recibido se registra como valores de bytes enteros, cada byte se compone de 8 bits y cada bit tiene un valor de 0 o 1. Por ejemplo, los datos crudos ERS

son cuantizados a 5 bits, es decir, el voltaje se registra como uno de 32 valores ( $2^5$ ) entre 0 y 31, y los datos JERS-1 se cuantifican en 3 bits (o entre 0 y 7). Así, los datos JERS y ERS son significativamente más pequeños que sus archivos binarios equivalentes compuestos por números de punto flotante que por lo general se componen de 4 bytes cada uno, y los datos se pueden leer fácilmente en cualquier ordenador (sin importar si es *big endian* o *little endian*). Con la finalidad de que los voltajes negativos se puedan grabar, se añade un sesgo a todos los voltajes devueltos. Para ERS, este sesgo es de unos 15.5 (pequeñas desviaciones de este valor nominal se pueden determinar a partir de los datos crudos y son calculadas por el canal de transmisión satelital y se incluyen en el archivo líder). Para convertir el número de datos en bruto ( $dn$ ) a un voltaje ( $V$ ), se utiliza la expresión  $V = a * (dn - 15.5)$  donde  $A$  es una constante de escala en función de la ganancia del receptor del radar y del cuantificador de analógico a digital. Dado que los datos se cuantifican directamente como números complejos, cada muestra se registra como un componente real e imaginaria para el formato I / Q, por lo tanto la señal a partir de una muestra dada es compleja ( $dn_{2*n-1} - 15.5, dn_{2*n} - 15.5$ ) donde  $n$  es el número de columna.

### 2.3. Software disponible y utilizado en InSAR

Existen diferentes paquetes de software desarrollados en colaboración por distintas dependencias académicas y científicas para el procesamiento con la técnica InSAR; muchas veces, sobre todo cuando se trabaja de manera interinstitucional, esto puede llegar a ser un problema en cuanto a intercambio y comparación de información, ya que pueden existir variaciones sustanciales entre el proceso de funcionamiento de un software y otro, dando cabida a diferencias entre formatos de archivo, geocodificación, etc.

Esta situación ha fomentado la contribución y participación de investigadores en el desarrollo desde códigos sencillos, scripts o inclusive pequeños paquetes pensados para cumplir tareas específicas (visualización, conversión de formatos, corrección de errores, descarga de archivos adicionales, y otras implementaciones de nuevos métodos y algoritmos de la técnica), en su mayoría de código abierto.

Algunos de los paquetes para interferometría SAR se muestran en la tabla 2-3.

Paquetería	Descripción	Licencia
ROLPAC	<p>ROLPAC (<i>Repeat Orbit Interferometric Package</i>) es un software de código abierto desarrollado y mantenido por el equipo de Caltech/JPL, principalmente para trabajar con datos ERS; actualmente soporta ERS-1, ERS-2, JERS, Envisat, ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X y TanDEM-X (TSX &amp; TDX), Radarsat-1, Radarsat-2, Sentinel-1, y se puede configurar para trabajar con datos "strip-mode" de todos los instrumentos de radar por satélite existentes.</p>	<p>Sujeto a acuerdo de licencia, sin costo a la comunidad internacional para propósitos de investigación.</p>
ISCE	<p><i>InSAR Scientific Computing Environment</i> es un nuevo software desarrollado por Stanford/Caltech/JPL basado en algunos programas en C y Fortran de ROLPAC pero mejorado, unificando muchos aspectos que con éste último debían ser realizados con software externo, y con una mejor geolocalización (utiliza un sistema de coordenadas geodésicas con compensación de movimiento, en lugar del sistema de coordenadas de rango Doppler de ROLPAC).</p>	<p>Sujeto a acuerdo de licencia, sin costo a la comunidad internacional para propósitos de investigación.</p>

Paquetería	Descripción	Licencia
GMTSAR	Es un sistema basado en GMT ( <i>Generic Mapping Tools</i> ), escrito en lenguaje C. GMT se utiliza para mostrar todos los productos como archivos PostScript e imagenes KML para Google Earth. Se ha desarrollado un set de scripts en C-shell para realizar el procesamiento estándar en sólo dos pasos, así como para la alineación de imágenes para apilamiento y series de tiempo. [Sandwell <i>et al.</i> , 2011].	Código abierto (licencia GNU <sup>2</sup> GPL <sup>3</sup> , del proyecto de software libre GNU/Linux).
DORIS	Doris es un paquete de libre uso para la comunidad científica para procesamiento con InSAR desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft (TU-Delft). Está desarrollado en lenguaje C++; actualmente se puede ejecutar en casi cualquier plataforma pues es un programa modular portable.	De licencia pública, para propósitos no comerciales.

---

<sup>2</sup> Acrónimo recursivo de "GNU's Not Unix!" (GNU No es Unix)

<sup>3</sup> General Public License

Paquetería	Descripción	Licencia
GIANt	<p><i>Generic InSAR Analysis Toolbox</i> es un conjunto de bibliotecas de Python y scripts que implementan diversos algoritmos publicados de series de tiempo para InSAR, todo en un mismo entorno de software. GIANt fue desarrollado para la generación, comparación, calibración y validación (Cal-Val) de series de tiempo de interferogramas.</p> <p>Actualmente incluye implementaciones de algoritmos SBAS, N-SBAS y MInTS. También soporta PyAPS para corregir las componentes de fase por la estratificación de la troposfera, y GPS si está disponible para corregir errores orbitales.</p>	Software de licencia libre y código abierto.

Paquetería	Descripción	Licencia
GAMMA	<p><i>GAMMA SAR and Interferometry Software</i> es una colección de programas para procesar datos SAR, InSAR y DInSAR (<i>Differential Interferometric SAR</i>) de sistemas aéreos y espaciales. El software soporta completamente el procesamiento desde los datos crudos hasta productos de alto nivel como modelos de elevación digital, mapas de desplazamiento, análisis y seguimiento de puntos, así como mapas de uso de suelo. Se encuentra organizado en paquetes, cada uno dedicado a un aspecto específico del procesamiento.</p>	Licencia privada, pero con soporte de los desarrolladores.
NPA Satellite Imaging	<p>NPA (<i>Nigel Press Associates</i>) es una división de geociencia dedicada a estudios de percepción remota de la empresa CGG, que trabaja con InSAR, DInSAR, PSI (<i>Persistent Scatterer InSAR</i>), y CRInSAR (<i>Corner Reflector InSAR</i>) desde hace aproximadamente 15 años.</p>	Su software es privado y brindan un servicio integral.



Paquetería	Descripción	Licencia
Sentinel-1 Toolbox (S1TBX)	SENTINEL-1 Toolbox (S1TBX) consiste en una colección de herramientas de procesamiento, lectores y escritores de productos de datos y una aplicación de visualización y análisis que soporta la gran variedad de datos de las misiones SAR de la ESA incluyendo SENTINEL-1, ERS-1 & 2, ENVISAT, además de datos de terceros como ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed y RADARSAT-2. Las distintas herramientas de procesamiento pueden funcionar independientes de la línea de comandos en una interfaz gráfica para el usuario. Incluye herramientas para calibración, filtrado de puntos, correregistro, ortorrectificación, mosaicos, conversión de datos, polarimetría e interferometría. Es desarrollado por la ESA en colaboración con DLR, Brockmann Consult y OceanDataLab.	Código abierto y licencia pública GNU GPL.

Tabla 2-3: Software disponible para InSAR.

Ésta tabla no es exhaustiva, ya que existen muchas otras aplicaciones de software dedicado al manejo de imágenes SAR, además de que se están actualizando y mejorando constantemente por contribuyentes de proyecto como por las dependencias que le dan soporte.

### 2.3.1. Paquetería *Repeat Orbit Interferometric Package*: ROI\_PAC

ROI\_PAC es una colección de programas Fortran y C que, enlazados con scripts de Perl, realizan tareas específicas en el procesamiento de datos.

Específicamente, los programas individuales realizan todo sobre el acondicionamiento de datos crudos, procesamiento de imágenes SAR, formación de interferogramas, estimación de correlación, determinación de la línea base, desenvolvimiento de fase, estimación y remoción de la topografía a partir de un interferograma de deformación, y geocodificación.

Los scripts de Perl controlan combinaciones preestablecidas de estos programas para crear un modelo de deformación de fase geocodificada (o imagen de fase topográfica) a partir de dos imágenes de radar por satélite y un modelo de elevación digital, o crear una imagen de deformación de fase a partir de tres imágenes de radar sin un modelo de elevación digital.

Éstos scripts permiten también un control considerable sobre cada paso del proceso, de tal manera que los programas individuales o combinaciones de programas pueden ser manipulados para producir una salida más favorable sin interacción directa con el propio programa.

ROI\_PAC es el software más ampliamente usado para procesamiento con InSAR en la literatura revisada. El paquete se describe en Rosen *et al.* [2004] y este artículo debe ser citado al utilizar el software. Requiere que el usuario esté familiarizado con sistemas UNIX/LINUX e interactue con su ordenador a través de línea de comandos. Para más detalles sobre la obtención e instalación véase el Apéndice C.

## 2.4. Modelo Digital de Elevación: DEM

Un modelo digital de elevación generado mediante imágenes SAR, es extraído de un interferograma que requiere dos procesos adicionales después de ser calculado: convertir su fase (desenvuelta) a altura y rectificación geométrica.

La misión más importante (con la base de datos más ampliamente usada) es la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que consiste en un sistema de dos equipos antena-reflector de radar, separadas 60 m por un mástil, de tal forma que el par de imágenes es tomado de forma simultánea desde dos puntos distintos (*cross-track*). Voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante los 11 días de la misión STS-99, en febrero del 2000.

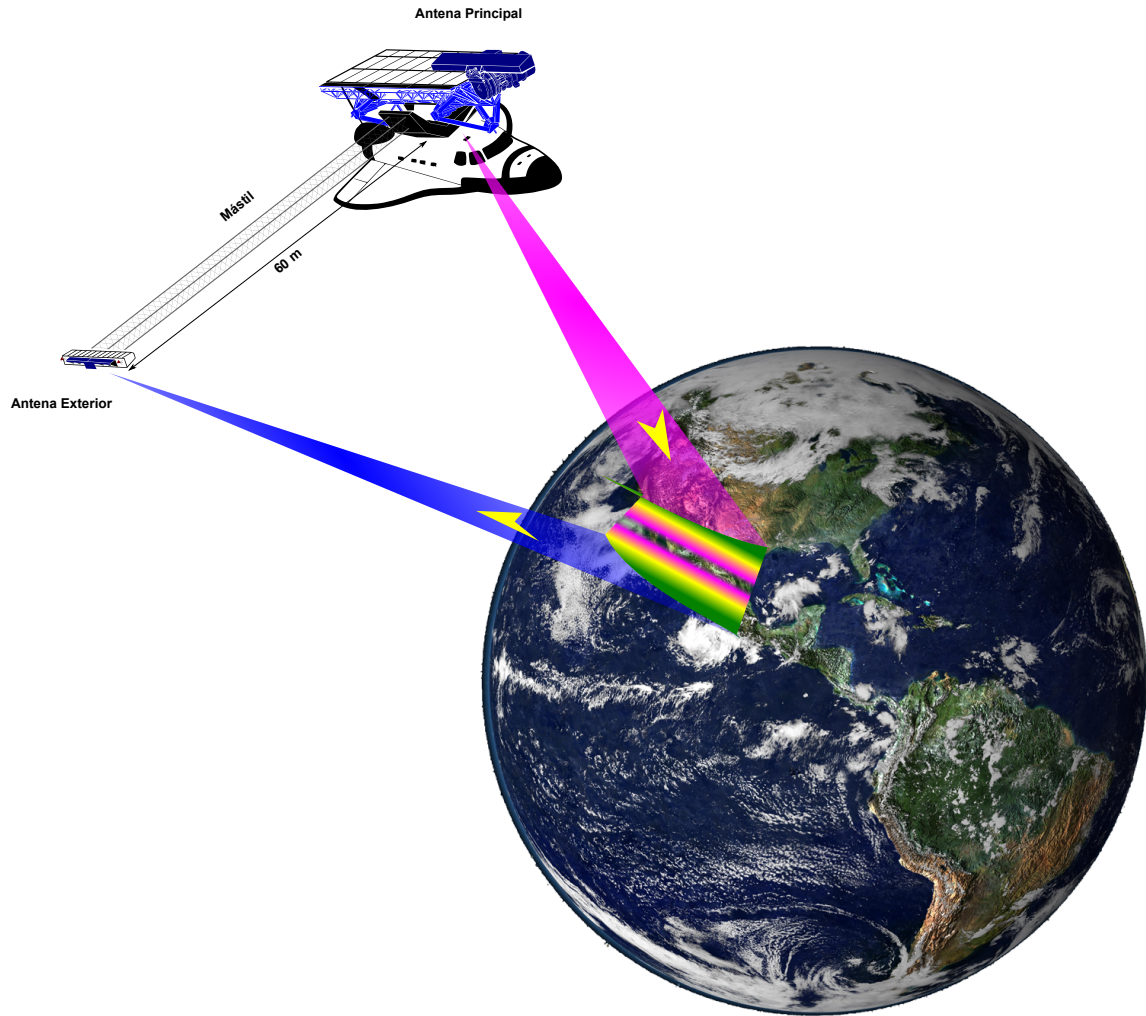


Figura 2-1: Esquema de la misión *Shuttle Radar Topography Mission*.

La resolución que ofrece es de 1 segundo de arco (aprox. 30 metros) sobre Estados Unidos de Norte América y de 3 segundos de arco (aprox. 90 metros) sobre el resto del globo (entre los 56°S y los 60°N de latitud).

## 2.5. Órbitas

ROLPAC fue desarrollado principalmente para trabajar con datos ERS, actualmente soporta ERS-1, ERS-2, datos JERS, ENVISAT y ALOS PALSAR y se adapta para trabajar con datos "en modo de tira" de todos los instrumentos de radar por satélites existentes.

Se necesita proporcionar a ROI\_PAC los datos de órbita del satélite para cada imagen, a estos se les conoce como "ODR" o "archivos de registro de datos de órbita" (ODR orbit files) y se enumeran por separado para ERS 1, ERS 2 y ENVISAT en los archivos de metadatos llamados "arclist".

Los ODR deben transferirse en modo binario y hay que guardar cada ODR y cada *arclist* correspondiente al subdirectorio apropiado. Éste formato contiene los parametros orbitales como excentricidad, inclinación, semi-eje mayor, entre otros que ROI\_PAC utiliza para determinar las distancias del terreno para cada imagen y crear un interferograma. Están disponibles en el Instituto de Tierra Orientada a la Investigación Espacial (Earth-Oriented Space Research):

<http://www.deos.tudelft.nl/ers/>

Cada archivo abarca un intervalo de tiempo específico (intervalo de arco) y se enumeran cronológicamente en el *arclist*, observándose que en el intervalo se superponen un par de días. Por alguna razón, ROI\_PAC espera y selecciona el intervalo de arco más antiguo. Los archivos ODR están disponibles como "precisos", "preliminares" o "entrega rápida". Los primeros son los más exactos, y respectivamente disminuye la exactitud. Si la función de búsqueda devuelve el nombre de un archivo ODR, entonces significa que ya se tienen y no habrá que descargarlo.

Se pueden descargar en la siguientes páginas:

ERS 1: /pub/orbits/ODR.ERS-1/dgm-e04/

ERS 2: /pub/orbits/ODR.ERS-2/dgm-e04/

ENVISAT: /pub/orbits/ODR.ENVISAT1/eigen-cg03c

Para ubicar los archivos de registros orbitales, hay que crear los siguientes directorios:

```
%mkdir full_path/ ROI_PAC_version/orbits/ODR
%cd ODR
%mkdir ERS1
%mkdir ERS2
%mkdir Envisat
```

Después copiar los archivos de órbitas correspondientes a ERS 1, ERS 2, y ENVISAT (sus respectivos directorios).

**NOTA:** Para imágenes de ALOS no se necesita de la información de los archivos orbitales.

A veces es útil contar con los registros orbitales PRC (Precise ERS-1 y ERS-2 orbits), para obtenerlos se debe contactar a la Agencia Espacial Europea. Para utilizarlos se sustituye PRC por ODR en OrbitType (OrbitType=PRC). El nombre de archivo PRC puede interpretarse como:

- PPP = PRC
- yymmdd = indicar la fecha de la órbita : año,mes,día
- no = número de órbita absoluta (revoluciones desde el lanzamiento)
- revi = Identificación de revisión

Después de descargar los archivos necesarios, se debe actualizar la lista de archivos de órbitas ejecutando arclist\_PRC.pl en el mismo directorio.

Para años anteriores al 2008, los datos orbitales para procesar imágenes provenientes de la plataforma ENVISAT eran proporcionados como archivos ODR por la Universidad de Delft. La información orbital posterior a dicho año es proporcionada como archivos DOR\_VOR (para el programa DORIS) por la Agencia Espacial Europea quienes los distribuyen de ésta manera.

Es posible procesar las imágenes provenientes de la plataforma ENVISAT directamente con las órbitas DOR\_VOR en ROI-PAC. Sin embargo, las órbitas DOR\_VOR pueden ser convertidas a ODR mediante el script dorvot\_to\_odr.m, desarrollado en Matlab por la Universidad de Delft [Quiroz, 2012].

### 2.5.1. Importancia de los errores orbitales

Los errores de órbita inducen señales de error casi lineal en la fase interferométrica. Éstos, llamados *rampas de fase*, se derivan de sesgos en la fase de referencia causado por el conocimiento inexacto de la línea de base interferométrica. El concepto de la línea de base interferométrica se revisa en el contexto de una geometría de adquisición InSAR rigurosamente tridimensional.

Durante más de una década, los parámetros de adquisición de los satélites ERS, que son muy similares a los de ENVISAT, se han considerado una norma implícita para simulaciones y análisis específicos de los efectos InSAR.

Hay tres escenarios básicos en el cual la señal de error de órbita no puede ser separada de la señal de deformación:

- a) La señal de deformación tiene una magnitud significativamente mayor que el efecto orbital, en consecuencia se descuida la contribución orbital dando un error, malinterpretándose como deformación.
- b) La señal de deformación no tiene tendencia global. Una tendencia eventual se atribuye a los errores de órbita y por lo tanto se eliminan del interferograma.
- c) La señal de deformación se limita espacialmente y la señal de la órbita fuera del área de interés es representativa de toda la imagen. En este caso, la contribución orbital se estima a partir de la no deformación.

En los enfoques de series de tiempo, los errores orbitales están mitigados suponiendo que son temporalmente no-correlacionados. Sin embargo, hay poca evidencia de los errores de órbita temporalmente correlacionados. Los grandes errores de órbita pueden complicar el desenvolvimiento de fase, que es inherente al enfoque PS (*Persistent Scatterers*) y también puede estar condicionado por la falta de coherencia. Como remedio, el desenvolvimiento puede ser apoyado quitando la estimación aproximada de la contribución orbital [Bähr, 2013].

## 2.6. Software de visualización: MDX

MDX es un software desarrollado por JPL (*Jet Propulsion Lab*) para visualizar datos SAR. Está escrito en lenguaje Fortran y para trabajar con ROI-PAC, éste último incluye un script llamado *mdx.pl* el cual lee automáticamente los formatos de archivo que maneja ROI-PAC (tabla 2-4).

Para detalles sobre la instalación de MDX, consulte el apéndice E.

Extensión de archivo
*.slc
*.int
*.cor
*.unw
*.amp
*.hgt
*.hgt_holes
*.dem
*.dte
*.dtm
*.rect
*.msk
*.byt
*.flg

Tabla 2-4: Formatos soportados por MDX

## Capítulo 3

# Procesamiento de datos en InSAR

En éste capítulo se describirá brevemente cada paso que realiza el software ROI\_PAC para generar un interferograma con fase desenvuelta, para lo cual se hace uso de scripts escritos en Perl, que hacen llamada a los programas en C y Fortran para realizar los distintos cálculos durante el proceso.

Es importante mencionar que es posible prescindir de éstos scripts cuando se tiene un objetivo muy particular y se busca ejecutar algún programa directamente, o en un orden distinto, ya que cada uno de ellos puede trabajar de forma individual.

### 3.1. Flujo de procesamiento con ROI\_PAC

ROI\_PAC sigue una secuencia (esquemática en el capítulo 1, figura 1-6) en la cual los archivos de salida de cada programa son canalizados (de forma automática cuando no se modifica en gran medida la forma de procesar) como archivos de entrada para el siguiente paso del proceso; es importante tener en consideración el espacio de almacenamiento que se designe ya que ninguno de estos archivos es borrado al concluir, puesto que son de utilidad para detectar errores o tener un punto de partida intermedio, en caso de requerirse.

#### 3.1.1. Estructura de directorios y rutas

Se debe crear una estructura adecuada de directorios, con un directorio principal que alojará los siguientes subdirectorios y archivos:



- > Directorio Principal
  - > Subdirectorio de datos crudos No.1, <YYMMDD>.
  - > Subdirectorio de datos crudos No.2, <YYMMDD>.
  - > Subdirectorio donde se encuentra el DEM, <DEM>.
  - > Archivo ASCII de parámetros de procesamiento, <nombre\_de\_archivo.proc>
  - > Subdirectorio de órbitas <tipo\_de\_órbita>

Las rutas de los directorios que contienen las órbitas y el DEM deben ser especificadas en el archivo *\*.proc*; ésta estructura es idónea cuando se va a procesar un solo interferograma, para generar varios de una misma zona de estudio puede ser de más utilidad una estructura de la forma:

- > Directorio Principal
  - > Subdirectorio de datos crudos, <data>
    - > Subdirectorio de datos crudos No. 1, <YYMMDD>.
    - > Subdirectorio de datos crudos No. 2, <YYMMDD>.
    - >
    - > .....
    - >
    - > Subdirectorio de datos crudos No. n, <YYMMDD>.
  - >
  - > Subdirectorio donde se encuentra el DEM, <DEM>
  - > Subdirectorio de órbitas, <tipo\_de\_órbita>
  - > Subdirectorio donde se alojan todos los interferogramas <IntDir\_all>
  - > Subdirectorio donde se alojan los archivos de la simulación topográfica <SimDir\_all>
  - > Subdirectorio donde se alojan todos los interferogramas geocodificados <GeoDir\_all>
  - > Subdirectorio de archivos *\*.proc*
  - > Script en bash de procesamiento, <process.sh>

Ésta es solo una forma de procesar propuesta, ya que cada usuario encontrará la que mejor se ajuste a sus necesidades. Las rutas deben ser especificadas en el archivo *\*.proc* que tiene la siguiente estructura:

*SarDir1* = Ruta\_directorio\_de\_datos\_crudos\_No..1 (imagen maestra)

*SarDir2* = Ruta\_directorio\_de\_datos\_crudos\_No..2 (imagen esclava)

*IntDir* = Ruta\_directorio\_interferogramas (si no existe, será creado)

*DEM* = Ruta\_directorio\_DEM (archivos .dem y .dem.rsc)

*GeoDir* = Ruta\_directorio\_geocodificación (por defecto("GEO"))

### 3.1.2. Acondicionamiento de datos

Algunos parámetros para el procesamiento pueden ser definidos desde el principio por el usuario, en el archivo *\*.proc*; mismos que ya tienen un valor predeterminado, pero que en la mayoría de los casos (salvo para procesar ejemplos) deben modificarse para que el resultado tenga sentido. A continuación se enlistan algunos:

- *concurrent\_roi* = *no/yes* Cuando se asigna el valor ("yes") ejecuta el programa roi en ambas imagenes al mismo tiempo.
- *FilterStrength* = (0.75) por defecto; coeficiente para el algoritmo de filtro de espectro de potencia de *psfilt* y *filter.pl*.
- *UnwrappedThreshold* = (0.1) por defecto; umbral de correlación para el desenvolvimiento de fase con el algoritmo "branch-cut"
- *OrbitType* = El tipo de órbita que se utilizará para remover los efectos orbitales (por defecto ("ODR"))
- *BaselineType* = Coincide con el tipo de órbita (\$OrbitType)
- *Rlooks\_sim* = Número de observaciones que se tomarán del interferograma antes de remover los efectos topográficos del DEM; su valor es (4) por defecto para una resolución de pixel de 20 m y una resolución del DEM 90 m (global), es decir,  $\text{int}(90/20 = 4)$ . Para otras resoluciones, debe ajustarse de ésta forma.

- $Rlooks\_int = (Rlooks\_sim)$  por defecto
- $Rlooks\_unw = (Rlooks\_sim)$  por defecto; número de observaciones que se toman del interferograma antes del desenvolvimiento de fase.
- $Rlooks\_sml = (16)$  por defecto
- $pixel\_ratio = (5)$  por defecto; es la relación entre el tamaño de pixel (rango/azimuth) de forma que los pixeles sean cuadrados; para ERS estas dimensiones son respectivamente 20 m/pixel y 4 m/pixel, por lo que se comprimirán  $20/4 = 5$  pixeles azimuth juntos. Para otros satélites debe cambiarse el valor por el indicado, de otro modo el interferograma se verá estirado.
- $Alooks\_sml = (Rlooks\_sml * pixel\_ratio)$
- $unw\_seedx =$  Punto inicial en dirección  $x$  para el desenvolvimiento de fase (con el algoritmo "branch-cut", el valor por defecto es el centro de la imagen).
- $unw\_seedy =$  Punto inicial en dirección  $y$  para el desenvolvimiento de fase (con el algoritmo "branch-cut", el valor por defecto es el centro de la imagen).
- $x\_start = (0.01)$  por defecto; offset promedio entre las  $slc$ 's en dirección del rango ( $x$ ).
- $y\_start = (0.01)$  por defecto; offset promedio entre las  $slc$ 's en dirección del azimuth ( $y$ ).
- $Threshold\_mag = (5.0e-5)$  por defecto; utilizado al crear el archivo .msk.
- $Threshold\_ph\_grd = (0)$  por defecto; utilizado al crear el archivo .msk.
- $sigma\_thresh = (1.0)$  por defecto; utilizado al crear el archivo .msk (1.4 es un valor recomendable; valores mayores a 1.4 se traducen en menos valores considerados por la máscara).
- $smooth\_width = (5)$  por defecto; utilizado al crear el archivo .msk.
- $slope\_width = (5)$  por defecto; utilizado al crear el archivo .msk.
- $mapping = ("dem\_based")$  por defecto.
- $cleanup = ("no")$  por defecto; elimina los archivos  $slc$  y  $gross$  cuando reamp.pl se ha completado.

- *CO\_MODEL* =("NULL") por defecto; usa un modelo de deformación cosísmica en las coordenadas geográficas del DEM.
- *INTER\_MODEL* =("NULL") por defecto; usa un modelo de deformación intersísmica en las coordenadas geográficas del DEM.
- *Filt\_method* =("psfilt") por defecto; algoritmo de filtrado que usa filter.pl, la opción alternativa es adapt\_filt.
- *unw\_method* =("old") por defecto; algoritmo de desenvolvimiento de fase a utilizar - por defecto es **branch-cut**, existen otras opciones como **icu** o **snaphu**.
- *flattening* =("topo") por defecto; al especificar "topo" significa que las líneas de base deberán ser re-estimadas después del desenvolvimiento de fase y antes de la geocodificación; especificando "orbit" no se re-estimarán las líneas base.
- *do\_sim* =("yes") por defecto; si se selecciona "no", se omitirá el paso make\_sim.pl. Se debe seleccionar "no" cuando se procesa múltiples interferogramas en una serie de tiempo que será corregistrada de tal forma que se puede utilizar el mismo DEM convertido a coordenadas radar para todos.
- *MAN\_CUT* =("NULL") por defecto; nombre del archivo para el recorte manual durante el proceso de simulación topográfica (*SIM*).
- *BaselineOrder* = ("QUAD") Cuando se calcula el cambio en la línea base en función del número de línea en el interferograma incluye términos cuadráticos (de forma alterna se pueden utilizar términos lineales: "LIN").
- *MPI\_PARA* =("no") por defecto.
- *NUM\_PROC* =(1) por defecto; número de procesadores a utilizar.
- *ROMIO* =("no") por defecto.
- *ref\_height* = (0.) por defecto; define la altura de referencia.
- *usergivendop1* = (0) por defecto; valor dopler para la imagen 1.

- *usergivendop2* = (0) por defecto; valor dopler para la imagen 2.

Una vez definidos los directorios y parámetros para el procesamiento, es necesario acondicionar los datos (en bruto); dependiendo del satélite, se procederá (de forma muy similar en la mayoría) a correr el script `make_raw_satélite.pl`, según sea el caso (tabla 3-1), al teclearlo tal cual en la línea de comandos despliega las instrucciones.

En general el modo de uso es:

```
% make_raw_satelite.pl archivo_de_imagen tipo_de_orbita fecha
```

Como ejemplo, para Envisat, el comando completo sería:

```
% make_raw_envi.pl ENV1_2_084_2961_42222.baq DOR 100328
```

Satélite	Script
Envisat	<code>make_raw_envi.pl</code>
ERS	<code>make_raw.pl</code>
ALOS	<code>make_raw_alos.pl</code>
Radarsat	<code>make_raw_RSAT-CEOS.pl</code> <code>make_raw_RADARSAT_swath.pl</code>
JERS-1	<code>make_raw_jers.pl</code>

Tabla 3-1: Scripts de acondicionamiento de datos para algunos satélites.

### 3.1.3. Procesamiento

Para iniciar con el procesamiento, y si no se requiere algun cambio en particular, se utiliza el script `process_2pass.pl`, sobre nuestro archivo de parámetros (cuyo nombre normalmente es `fecha1_fecha2.proc`) creado:

```
% process_2pass.pl fecha1_fecha2.proc [inicio] [fin]
```

en donde `[inicio]` y `[fin]` definen el paso de procesamiento a partir del cual empezar, y en cual terminar (tabla 3-2); de no definirse, y si los parámetros son correctos, el procesamiento será completado hasta el último paso, obteniendo un interferograma geocodificado y con fase desenvuelta.

[inicio]/[fin]	Descripción
raw	Este es el punto de partida después de correr make_raw.pl.
roi_prep	Crea los archivos de entrada para el procesador SAR.
orbbase	Calcula las líneas de base.
slcs	Crea las slc's ( <i>single-look-complex</i> ) interferométricas.
offsets	Corregistra dos slc's.
resamps	Remuestrea la imagen esclava a las coordenadas de la imagen maestra.
flatorb	<i>Aplana</i> la imagen y remueve la rampa orbital.
full_res	En éste punto se han creado y correlacionado los interferogramas.
done_sim_off	Calcula el offset entre el interferograma y el DEM.
done_sim_removal	En éste punto se han removido los efectos topográficos del interferograma aplanado.
begin_filt	Inicia el filtrado el interferograma.
filtered	Termina el filtrado.
make_mask	Crea la máscara para el desenvolvimiento de fase.
unwrapped	En éste punto la fase del interferograma ha sido desenvuelta.
redo_base	Re-estima las líneas base empíricamente.
sim_removal_bsim	Remueve la topografía del nuevo interferograma <i>reaplanado</i> .
unwrapped_bsim	Desenvuelve la fase del nuevo interferograma <i>reaplanado</i> .
done	Punto final; convierte el interferograma con todos los efectos anteriormente removidos en coordenadas geográficas.

Tabla 3-2: Pasos durante el procesamiento del script process\_2pass.pl.

## Capítulo 4

# Análisis del desenvolvimiento de fase

La fase, y su respectivo procesamiento, es el concepto crucial, que le da sentido y potencial de aplicación a la interferometría SAR, como es el estudio de la deformación, concebida como un desplazamiento multidireccional, o bien cuando se analiza alguna de sus componentes en una dirección preferente, siendo aplicable hoy en día para diversos y complejos objetivos y modelos topográficos, o en general, donde se involucra la necesidad de realizar ésta clase de mediciones.

En éste capítulo se abordarán los conceptos que involucran a la fase en imágenes SAR, por que es necesario y en que consiste realizar un *desenvolvimiento de fase*, y se concluirá en el capítulo 5 dedicado a ejemplificar y analizar algunos factores que afectan al desenvolvimiento de fase aplicado a una región de estudio.

### 4.1. Fase en imágenes SAR

La radiación transmitida por la antena emisora del radar, debe alcanzar los objetivos (o dispersores) en el terreno y después regresar a la antena receptora para conformar la imagen SAR, es decir, la onda viaja por dos caminos diferentes en su trayecto. Los objetivos que se encuentran a distancias diferentes del radar (con diferentes rangos de inclinación), generan retrasos distintos entre la transmisión y la recepción de la señal.

Debido a la naturaleza sinusoidal de la señal transmitida, este retraso  $\tau$  es equivalente a un cambio de fase  $\phi$  entre las señales transmitida y recibida. El cambio de fase es entonces

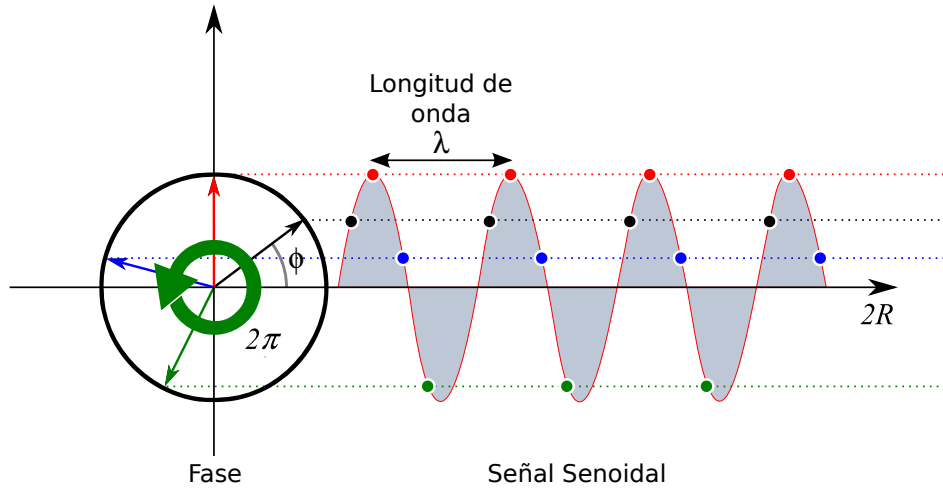


Figura 4-1: Una señal senoidal es periódica con periodo  $2\pi$ . En el caso de un interferómetro de banda estrecha (por ejemplo, ERS y Envisat), la señal transmitida puede ser asimilada como una senoidal pura cuyo ángulo (o fase)  $\phi$  linealmente dependiente del rango de inclinación de la coordenada  $r$ , es decir  $\phi = 2\pi r/\lambda$  (donde  $\lambda$  es la longitud de onda). De ésta forma, asumiendo que la fase de la señal transmitida es cero, la fase de la señal recibida (que recorre una distancia  $2R$  viajando del satélite al objetivo y de regreso), es  $\phi = 4\pi R/\lambda$  radianes (ecuación 4-1). [Ferretti *et al.*, 2007].

proporcional a la distancia total del recorrido de la señal,  $2R$ , dividido entre la longitud de onda transmitida,  $\lambda$ . Éste concepto se ilustra en la figura 4-1.

$$\phi = \frac{2\pi r}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (4-1)$$

No obstante, debido a la periodicidad natural de la señal, distancias de viaje que difieren en múltiplos enteros de la longitud de onda, generan exactamente el mismo cambio de fase. En otras palabras, la fase de una señal SAR es una medida de sólo una fracción de la distancia total la cual es menor que la longitud de onda transmitida. En la práctica, debido al amplio radio entre la resolución de celda (algunos metros) y la longitud de onda, el cambio de fase al pasar de un pixel a otro en una sola imagen SAR resulta aleatorio por lo que su análisis es más complejo.

Un interferograma es generado mediante una *cross-multiplicación*, pixel por pixel, entre la



primera imagen SAR con el conjugado complejo de la segunda (Bamler y Hartl [1998], Massonet y Feigl [1998], Franceschetti y Lanari [1999], Rosen *et al.* [2000]). Por lo tanto, la amplitud del interferograma es la amplitud de la primera imagen multiplicada por la de la segunda, mientras que su fase (fase interferométrica) es la diferencia de fase entre las imágenes.

## 4.2. Medición de la altura del terreno mediante la fase interferométrica

Supongamos ahora que existiera un solo punto dispersor dominante en cada celda (o pixel) del terreno, el cual no varía su posición con el tiempo. Estos dispersores son observados por dos interferómetros (u órbitas) desde dos ángulos de observación distintos; la fase interferométrica de cada pixel depende únicamente de la diferencia entre rutas de viaje para cada imagen hacia la celda considerada. Cualquier otra posible contribución de fase generada por los puntos dispersores es cancelada por su diferencia.

Una vez que se ha identificado un punto de referencia, la variación de la diferencia entre rutas de viaje  $\Delta r$  al pasar de la celda de referencia a otra, se aproxima mediante una expresión que depende de algunos parámetros geométricos (figura 4-2):

$$\Delta r = 2 \frac{B_n q_s}{R} \quad (4-2)$$

$B_n$ : Línea Base Perpendicular.

$R$ : Distancia Radar-Objetivo.

$q_s$ : Desplazamiento entre celdas a lo largo de la línea perpendicular al rango de inclinación.

La variación de fase interferométrica  $\Delta\phi$  es entonces proporcional a  $\Delta r$  dividido sobre la longitud de onda transmitida  $\lambda$ :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R} \quad (4-3)$$

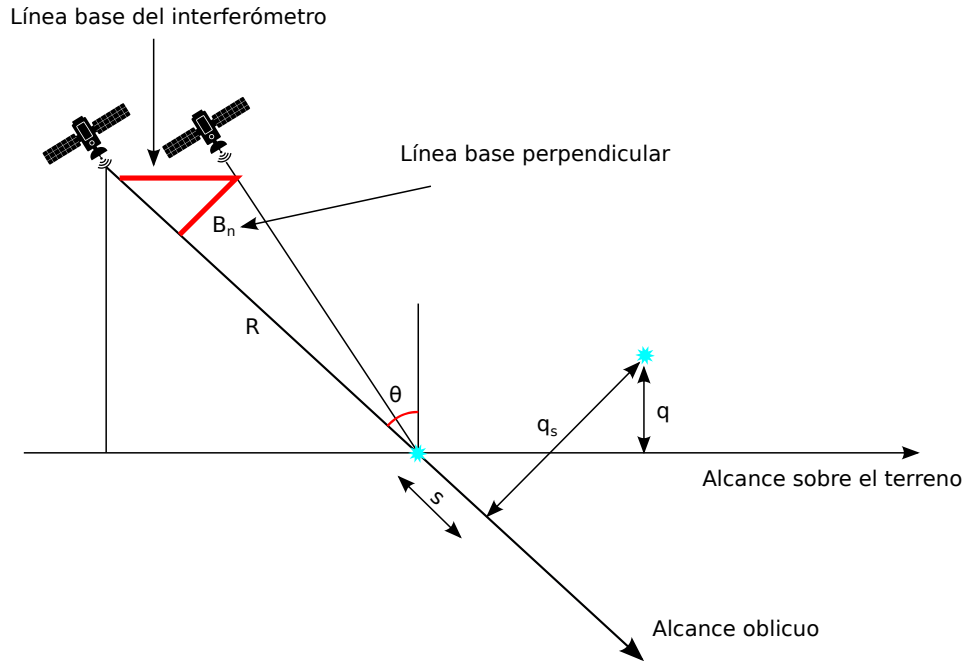


Figura 4-2: Parámetros geométricos de un sistema interferométrico satelital SAR

### 4.3. Aplanamiento Interferométrico

La variación de fase puede ser separada en dos contribuciones:

1. Una variación proporcional a la diferencia de alturas  $q$  entre los puntos objetivos, referido a un plano horizontal de referencia.
2. Una variación de fase proporcional al desplazamiento en la dirección de inclinación  $s$  de los objetivos.

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin\theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan\theta} \quad (4-4)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la radiación respecto al plano de referencia.

Cabe señalar que la línea base perpendicular se conoce a partir de datos orbitales precisos, y el segundo término puede ser calculado y restado de la fase interferométrica. Ésta operación se denomina aplanamiento del interferograma y, como resultado, se genera un mapa de fase proporcional a la altitud relativa del terreno.

#### 4.4. Altitud de Ambigüedad

La altitud de ambigüedad  $h_a$  se define como la diferencia de altitud que genera un cambio de fase de  $2\pi$  después del proceso de aplanamiento. La altitud de ambigüedad es inversamente proporcional a la línea base perpendicular:

$$h_a = \frac{\lambda R \operatorname{sen} \theta}{2B_n} \quad (4-5)$$

Como ejemplo, consideramos el caso del satélite ERS, donde  $\lambda = 5.6\text{cm}$ ,  $\theta = 23^\circ$ , y  $R = 850\text{km}$ , la altitud de ambigüedad (en metros) es entonces:

$$h_a = \frac{9300}{B_n} \quad (4-6)$$

Siguiendo lo anterior, si se decide usar una línea base perpendicular de 100 m, un cambio de fase de  $2\pi$  corresponde a una variación de altitud de aproximadamente 93 m.

En principio, cuanto mayor sea la línea de base, más precisa es la medición de altura, ya que el ruido de fase es equivalente a un ruido de altitud menor. Sin embargo, existen diversos factores (tanto la misma naturaleza de la onda como factores externos) que implican un límite en la longitud de la línea de base perpendicular, sobre el cual la señal sufre decorrelación. Es por ello que existe un valor óptimo de la línea base para el cual se maximiza la relación *señal-ruido*, donde la señal es la altitud del terreno.

#### 4.5. Desenvolvimiento de fase ó *Unwrapping*

El aplanamiento del interferograma proporciona una medición ambigua de la altitud relativa del terreno debido a la naturaleza cíclica ( $2\pi$ ) de la fase interferométrica. La variación de fase entre dos puntos dentro del interferograma *aplanado* brinda una medida de la variación real de altitud, después de eliminar cualquier número entero de *altitudes de ambigüedad* (equivalente a un número entero de ciclos de fase de  $2\pi$ ). El proceso de añadir el múltiplo entero correcto de  $2\pi$  a las franjas interferométricas es llamado desenvolvimiento de fase o *unwrapping*:

$$\psi = \phi + 2\pi * n \quad (4-7)$$

En donde:

$\phi$  = Fase *envuelta*

$\psi$  = Fase *desenvuelta*

$n$  = Número de ciclos

El desenvolvimiento de fase no tiene una única solución, por lo que es importante contar con información *a priori* para restringir las posibles soluciones (por ejemplo, la frecuencia máxima de banda y la potencia de la señal) dentro de el marco de referencia de los datos.

El procedimiento más sencillo (en el caso teórico) puede ser una simple integración de las diferencias de fase, a partir de un punto de referencia. Sin embargo, debido a las discontinuidades de fase (caso más usual en la práctica) no siempre es exacta.

La mayoría de algoritmos para desenvolvimiento de fase, parten de la suposición de que la *fase real* desenvuelta es suave y varía de forma paulatina. Para ser más precisos, se asume que los valores de fase colindantes tienen una variación máxima de medio ciclo ( $\pi$  radianes) uno del otro. Aunque ésta hipótesis normalmente es válida para la mayor parte de píxeles de la imagen, la presencia de discontinuidades causa inconsistencias, ya que el resultado depende de la dirección (rango y azimut) en que se realiza la operación.

Esta característica es evidente siempre que la suma de diferencias de fase envuelta (la integral del gradiente de fase estimado) sobre una trayectoria cerrada es diferente de cero. Para ser coherente, un gradiente de campo debe ser irrotacional; es decir, el rotacional de  $\Delta\phi$  debe ser cero en todas partes [Spagnolini, 1995; Goldstein *et al.*, 1988; Ghiglia y Pritt, 1998]. Cuando ésta condición cumple en todo el interferograma, tenemos un 'Problema trivial'. Desafortunadamente, esto casi nunca es el caso en el procesamiento de datos de InSAR.

La componente rotacional del campo gradiente puede ser estimada sumando las diferencias de fase alrededor de la trayectoria cerrada que forma cada grupo de cuatro píxeles vecinos. Cuando ésta suma es distinta de cero, se dice que tenemos un *residuo* [Goldstein *et al.*, 1988]. Éste valor es normalizado a un ciclo el cual puede ser (+1) o (-1). La suma de las variaciones de fase envuelta sobre una trayectoria arbitraria cerrada equivale a la suma algebraica de los residuos contenidos en la trayectoria.

Dado que los residuos de fase simplemente sirven como criterio de valoración de las líneas de discontinuidad, el verdadero problema es su completa identificación. Estas discontinuidades pueden deberse a dos factores independientes: el ruido de fase, y los cambios abruptos en las pendientes del terreno. En interferometría *repeat-pass* por lo general se manejan valores bajos de SNR (relación señal-ruido) debido a la decorrelación geométrica, y la probabilidad de encontrar una variación de fase ruidosa mayor a  $\pi$  en un terreno aproximadamente plano no es descartable.

Por otro lado, la geometría de adquisición del sensor da lugar a un muestreo irregular. Los pixeles vecinos en dirección del rango pueden corresponder a dos dispersores muy distantes con elevaciones distintas. Las discontinuidades normalmente dependen de la topografía local, el ángulo del nadir, la línea de base y la decorrelación ruidosa.

Para dar solución a éstos problemas, algunos autores han manejado la norma de minimización  $L_p$  mediante la siguiente función de costo:

$$C = \left\{ \sum_{i,j} w_{i,j}^{(r)} |\Delta^{(r)}\psi_{i,j} - \Delta_w^{(r)}\phi_{i,j}|^p + \sum_{i,j} w_{i,j}^{(a)} |\Delta^{(a)}\psi_{i,j} - \Delta_w^{(a)}\phi_{i,j}|^p \right\} \quad (4-8)$$

donde  $0 \leq p \leq 2$ ;  $\Delta$  indica la diferenciación discreta a lo largo del rango (r) y del azimut (a) respectivamente;  $w$  es el factor de peso definido por el usuario; y las sumatorias indican los apropiados renglones ( $i$ ) y columnas ( $j$ ).

Para los fines de este trabajo se manejará el método propuesto por Goldstein *et al.* [1988] "Branch-cut", donde  $p = 0$ , es decir la norma  $L^0$ , y para  $p = 1$ , o norma  $L^1$ , propuesto por Ahuja *et al.* [1993], cuyo algoritmo es mejor conocido como SNAPHU (*Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*).

## Capítulo 5

# Procesamiento de datos de la región que comprende a la ciudad de Celaya, Guanajuato.

En éste capítulo, se muestra una propuesta de metodología para la elección de interferogramas variando los parámetros de procesamiento antes estudiados, de tal manera que se encuentre para cada par interferométrico el conjunto de valores que den como resultado un mejor desenvolvimiento de fase.

Los datos para trabajar comprenden la ciudad de Celaya, en el estado de Guanajuato, México, que se encuentra entre las coordenadas (-100.872117,-100.767061) de longitud y (20.583506,20.474913) de latitud (Figura 5-1). Actualmente se utilizan algunas técnicas para observar y comprender los fenómenos de hundimiento que en ella ocurren, incluida la metodología de InSAR.

Se manejará la siguiente población de datos correspondientes a la localidad mencionada (tabla 5-1); esperando que algún punto aquí descrito pueda llegar a ser de utilidad en trabajos cuyo enfoque sea de aplicación y entendimiento de los problemas asociados al hundimiento en dicha ciudad o en otras.

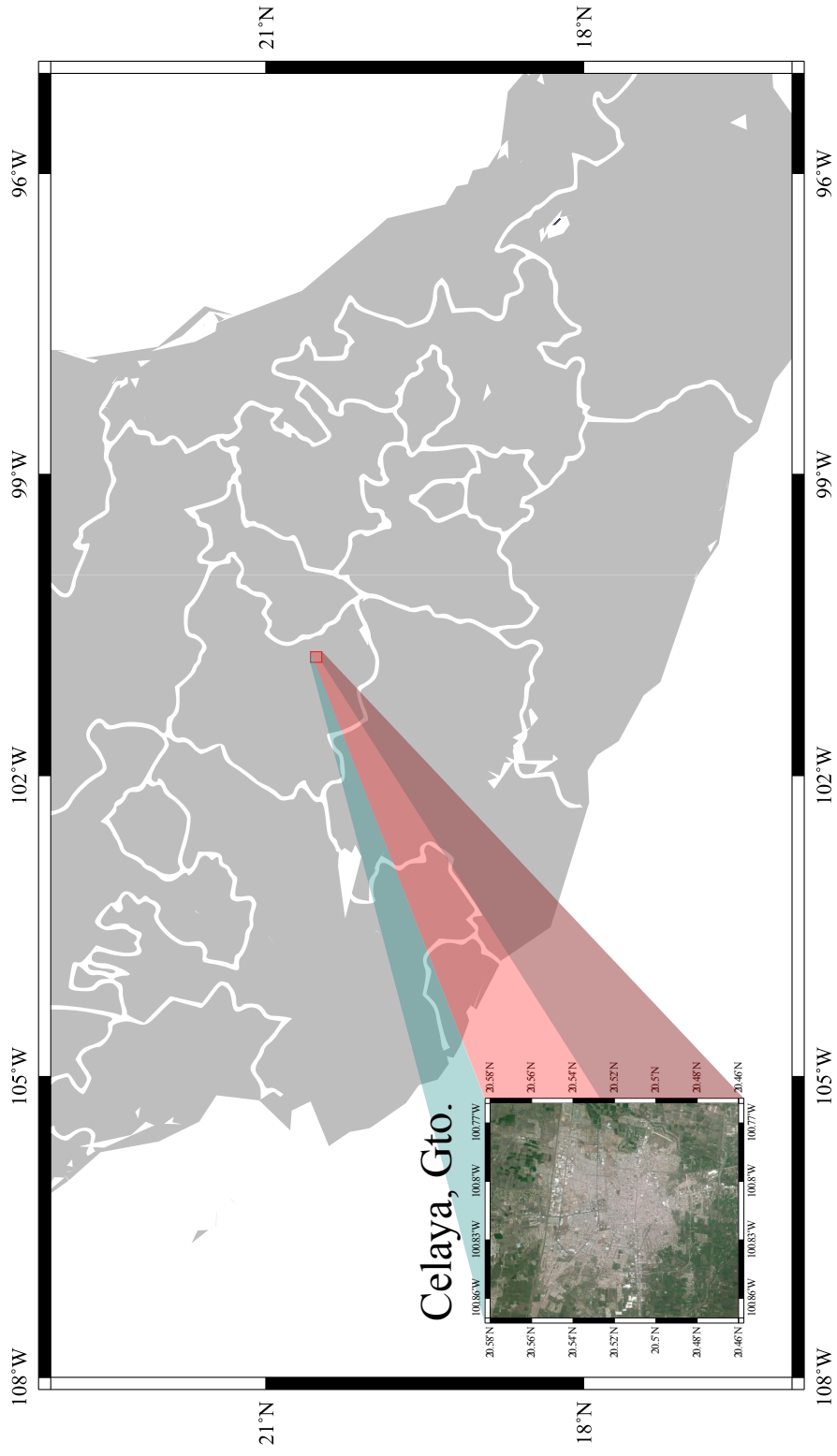


Figura 5-1: Ubicación Geográfica - Celaya, Gto.

Imagen	Fecha
ASA_IM__0CNPDK20030712_164453_000000162018_00069_07137_0325.N1	12-07-2003
ASA_IM__0CNPDK20030816_164457_000000162019_00069_07638_0980.N1	16-08-2003
ASA_IM__0CNPDK20040207_164453_000000162024_00069_10143_2169.N1	07-02-2004
ASA_IM__0CNPDK20040313_164457_000000162025_00069_10644_0223.N1	13-03-2004
ASA_IM__0CNPDK20040417_164454_000000162026_00069_11145_0752.N1	17-04-2004
ASA_IM__0CNPDE20040731_164456_000000172029_00069_12648_1306.N1	31-07-2004
ASA_IM__0CNPDE20041113_164452_000000172032_00069_14151_4334.N1	13-11-2004
ASA_IM__0CNPDE20041218_164452_000000162033_00069_14652_5186.N1	18-12-2004
ASA_IM__0CNPDE20050122_164453_000000172034_00069_15153_6125.N1	22-01-2005
ASA_IM__0CNPDE20050507_164502_000000162037_00069_16656_9612.N1	07-05-2005
ASA_IM__0CNPDE20050611_164500_000000162038_00069_17157_0178.N1	11-06-2005
ASA_IM__0CNPDE20050716_164501_000000162039_00069_17658_0893.N1	16-07-2005
ASA_IM__0CNPDE20050820_164456_000000162040_00069_18159_1288.N1	20-08-2005
ASA_IM__0CNPDE20051203_164449_000000162043_00069_19662_4966.N1	03-12-2005
ASA_IM__0CNPDE20060211_164444_000000162045_00069_20664_1327.N1	11-02-2006
ASA_IM__0CNPDE20060527_164451_000000172048_00069_22167_3165.N1	27-05-2006
ASA_IM__0CNPDE20061223_164450_000000162054_00069_25173_6124.N1	23-12-2006
ASA_IM__0CNPDE20070127_164444_000000162055_00069_25674_7677.N1	27-01-2007
ASA_IM__0CNPDE20081227_164445_000000162075_00069_35694_8873.N1	27-12-2008
ASA_IM__0CNPDE20091003_164440_000000162083_00069_39702_5541.N1	03-10-2009
ASA_IM__0CNPDE20100220_164437_000000172087_00069_41706_8612.N1	20-02-2010
ASA_IM__0CNPDE20100327_164440_000000162088_00069_42207_9482.N1	27-03-2010
ASA_IM__0CNPDE20100501_164437_000000172089_00069_42708_0341.N1	01-05-2010
ASA_IM__0CNPDE20100605_164433_000000172090_00069_43209_1097.N1	05-06-2010
ASA_IM__0CNPDE20100710_164437_000000162091_00069_43710_1805.N1	10-07-2010
ASA_IM__0CNPDE20100814_164438_000000172092_00069_44211_2587.N1	14-08-2010
ASA_IM__0CNPDE20100918_164433_000000162093_00069_44712_9703.N1	18-09-2010

Tabla 5-1: Población de datos de la zona de interés.

## 5.1. Selección de datos

Inicialmente, el criterio para seleccionar los datos depende de dos factores: tamaño de la línea base y, separación temporal entre las imágenes. Recordando el concepto de Altitud de Ambigüedad (véase sección 4.4) el tamaño de la línea base está relacionado con la resolución en ciclos ( $\pi$ ) y su equivalencia en unidades de distancia (y mas específicamente, de altitud), lo cual implica dos posibles consecuencias: una línea base demasiado corta implica que los cambios de fase equivalen a una distancia mayor, obteniendo interferogramas con menos información de los desplazamientos de magnitudes pequeñas, mientras que una línea base demasiado larga



ocasiona una pérdida en la correlación. La separación temporal normalmente se define según el fenómeno que se está estudiando, teniendo en consideración que una separación demasiado grande el mismo problema.

La ciudad de Celaya presenta un sistema de fallas que la atraviesa de Noroeste (NW) a Sureste (SE), lo cual ha ocasionado un régimen de subsidencia de 7-10 cm/año [Olvera, 2009], hasta los 10-14 cm/año en las zonas más afectadas [Salmerón *et al.*, 2010]. Jaramillo [2012] estudió la zona que comprende la ciudad de Morelia, contenida en el mismo conjunto de datos que aquí se presentan, y estableció una línea base menor a 400 m y un periodo de tiempo menor a 400 días (1.1 años). Se presentarán grupos de interferogramas con una tolerancia mayor en el valor de la línea base, ya que la coherencia no es tan sensible a ella como lo es en función del tiempo, donde se manejarán tiempos de máximo 1.5 años (Tabla 5-2).

Fechas	Diferencia de Tiempo (días)	Diferencia de Línea Base (metros)
20030712 - 20030816	35	-83
20030712 - 20041113	491	-28
20030712 - 20041218	526	327
20030816 - 20041113	456	55
20030816 - 20041218	491	410
20040207 - 20040313	35	457
20040207 - 20040417	70	335
20040207 - 20040731	175	-12
20040207 - 20050122	348	-167
20040313 - 20040417	35	-122
20040313 - 20040731	140	-469
20040313 - 20050507	418	188
20040313 - 20050716	488	165
20040417 - 20040731	105	-347
20040417 - 20050507	383	310
20040417 - 20050716	453	287
20040731 - 20050122	173	-155

Fechas	Diferencia de Tiempo (días)	Diferencia de Línea Base (metros)
20040731 - 20050611	313	-490
20040731 - 20050820	383	-171
20041113 - 20041218	35	355
20041113 - 20050611	208	474
20041113 - 20051203	383	292
20041113 - 20060211	453	214
20041218 - 20050122	33	454
20041218 - 20050611	173	119
20041218 - 20050820	243	438
20041218 - 20051203	348	-63
20041218 - 20060211	418	-141
20041218 - 20060527	523	-216
20050122 - 20050611	140	-335
20050122 - 20050820	210	-16
20050507 - 20050716	70	-23
20050611 - 20050820	70	319
20050611 - 20051203	175	-182
20050611 - 20060211	245	-260
20050611 - 20060527	350	-335
20050820 - 20061223	490	128
20050820 - 20070127	525	-335
20051203 - 20060211	70	-78
20051203 - 20060527	175	-153
20051203 - 20070127	420	166
20060211 - 20060527	105	-75
20060211 - 20070127	350	244
20060527 - 20070127	245	319
20061223 - 20070127	35	-463
20081227 - 20091003	278	-1

Fechas	Diferencia de Tiempo (días)	Diferencia de Línea Base (metros)
20081227 - 20100220	418	-91
20081227 - 20100327	453	223
20081227 - 20100501	488	206
20081227 - 20100605	523	177
20091003 - 20100220	140	-90
20091003 - 20100327	175	224
20091003 - 20100501	210	207
20091003 - 20100605	245	178
20091003 - 20100710	280	74
20091003 - 20100814	315	-42
20091003 - 20100918	350	145
20100220 - 20100327	35	314
20100220 - 20100501	70	297
20100220 - 20100605	105	268
20100220 - 20100710	140	164
20100220 - 20100814	175	48
20100220 - 20100918	210	235
20100327 - 20100501	35	-17
20100327 - 20100605	70	-46
20100327 - 20100710	105	-150
20100327 - 20100814	140	-266
20100327 - 20100918	175	-79
20100501 - 20100605	35	-29
20100501 - 20100710	70	-133
20100501 - 20100814	105	-249
20100501 - 20100918	140	-62
20100605 - 20100710	35	-104
20100605 - 20100814	70	-220
20100605 - 20100918	105	-33

Fechas	Diferencia de Tiempo (días)	Diferencia de Línea Base (metros)
20100710 - 20100814	35	-116
20100710 - 20100918	70	71
20100814 - 20100918	35	187

Tabla 5-2: Interferogramas que cumplen con los criterios de SBAS según Jaramillo [2012], modificando de 400 a 500 la línea base máxima y de 1.1 a 1.5 años el tiempo máximo.

Según el criterio de selección ilustrado en la tabla 5-2, tenemos un total de 78 posibles pares de imágenes que cumplen, de los cuales se elegirán los más representativos dentro del periodo de tiempo que los datos abarcan, considerando un par de casos con una separación temporal corta, mediana y larga (0-181, 182-364, y 364-548 días) a los cuales se les asignarán las categorías A, B y C respectivamente, y de igual manera para las líneas base (0-165, 166-332 y 333-500 metros) cuyas categorías serán 1, 2 y 3, para que combinadas generen los grupos A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 Y C3.

## 5.2. Parámetros de Procesamiento

Como se estudió en el capítulo 3, los parámetros requeridos para crear un interferograma deben ser proporcionados desde el archivo que llamamos *.proc*; algunos son invariantes ya que provienen únicamente de las características de la forma de adquisición del satélite, como son:

- *OrbitType* = HDR # información orbital contenida en el encabezado del archivo.
- *BaselineType* = (*OrbitType*) # No es necesario declararla en el archivo *\*.proc* ya que toma el valor del anterior.
- *Rlooks\_sim* =4 # Valor por defecto para datos Envisat.
- *pixel\_ratio* =5 # Para datos Envisat / beam I2.

Otros parámetros sin embargo, requieren conocimiento sobre su uso y manipularlos puede llegar a mejorar (o no) los resultados según sea el caso; entre ellos se muestran los que se utilizarán:

- *Filt\_method*: Los métodos de filtrado (hasta ahora) incluido en ROI\_PAC, son dos: **psfilt** es un filtrado de espectro de potencia, y **adapt\_filt** es un filtro adaptativo, ambos descritos por Goldstein y Werner [1998].
- *FilterStrength*: La intensidad del filtro, está relacionada con la correlación de fase interferométrica que se va a filtrar; un valor demasiado bajo (o extremo, de cero) implica un filtrado pobre o nulo, mientras que un valor alto implica un filtrado más fuerte. El valor apropiado de la intensidad del filtro no es exacto, se manejan umbrales de correlación "moderados" o "aceptables" de forma empírica. Se encuentra descrito de igual forma por Goldstein y Werner [1998].
- *unw\_method*: El método de desenvolvimiento de fase (véase la sección 4.5) que se utilizará.
- *UnwrappedThreshold*: Determina el grado de desenvolvimiento. Las regiones conectadas con una magnitud mayor que éste umbral se incluyen en el proceso.
- *unw\_seedx* y *unw\_seedy*: Cuando ROI\_PAC comienza el desenvolvimiento de fase en un área con una decorrelación elevada, es común que, al propagarse el error hacia el resto del interferograma, el resultado sea un desenvolvimiento de cero puntos. Para corregir esto, debe buscarse un punto de alta coherencia (0.7 es aceptable, 0.9 muy bueno) justo antes del desenvolvimiento (visualizando el archivo *phase\_var\_ODR\_4rlks.msk* con MDX u otro), y colocar sus coordenadas respectivamente en el valor de *x* la columna, y en el de *y* la fila.
- *DEM*: El modelo de elevación utilizado tiene una resolución de 3 segundos de arco (90 m).

Los valores que se manejarán serán los siguientes: Para el filtrado, se procesará con ambos métodos, con intensidades de 0.3, 0.6 y 0.9 para ilustrar los casos de coherencia baja, aceptable y alta; el desenvolvimiento de fase por otro lado, será como se menciona en la sección anteriormente citada, siendo **icu** y **snaphu** los valores respectivos, con un grado de desenvolvimiento suave (0.1) y fuerte (aprox. 0.2-0.4) [Fielding, 2009], y una "semilla" (*seedx* y *seedy*) o punto de inicio

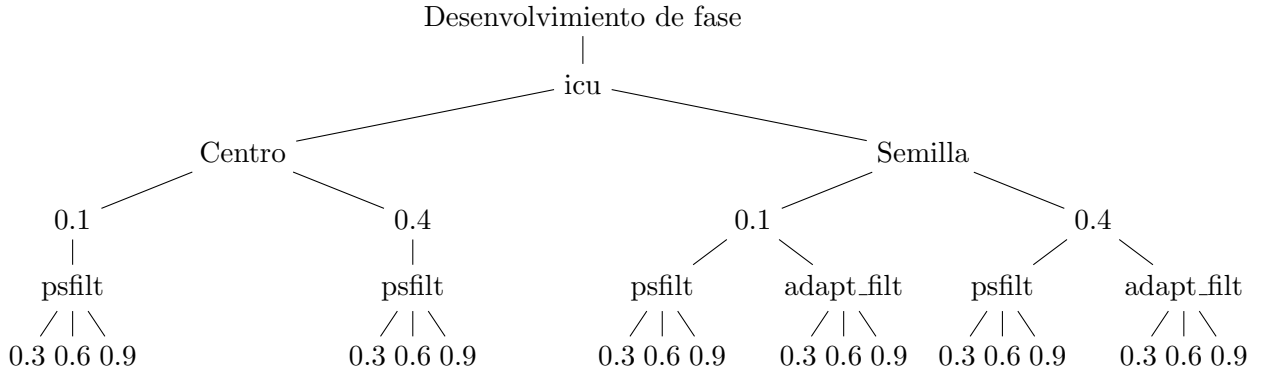


Figura 5-2: Esquema de todos los interferogramas generados con desarrollo de fase por **icu**.

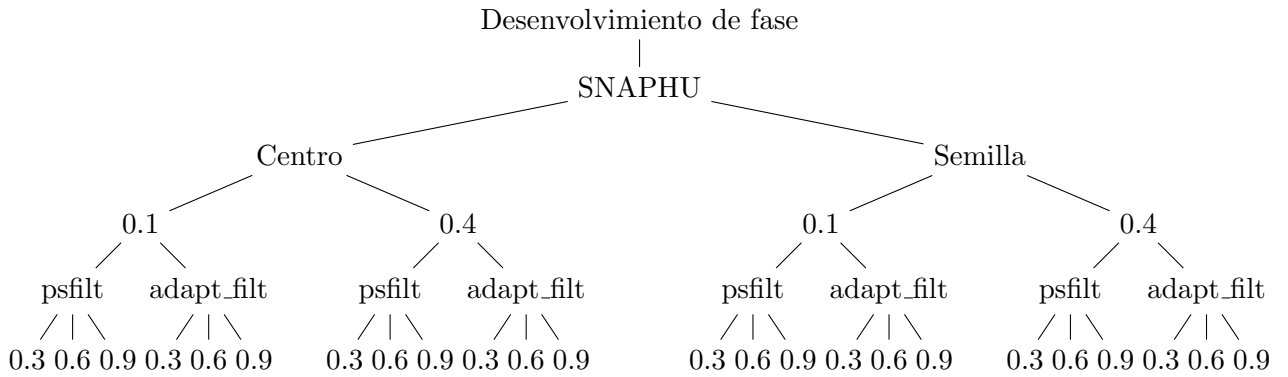


Figura 5-3: Esquema de todos los interferogramas generados con desarrollo de fase por **SNAPHU**.

por defecto (centro de la imagen) y partiendo de un punto de alta coherencia (Figuras 5-2 y 5-3).

### 5.3. Procesamiento.

El área para procesar seleccionada es mayor a la ciudad, específicamente hacia el sur, donde se encuentra el cerro La Gavia (figura 5-4); la finalidad de esto es poder tener un punto de comparación del comportamiento de la fase interferométrica en zonas afectadas de la ciudad,

donde además la variación de altitud es del orden de centímetros a algunos metros, con respecto a una zona elevada, de mayor estabilidad y con un cambio topográfico más notorio.

El procesamiento de los datos se realizó en forma secuencial con los dos métodos de desenvolvimiento propuestos, como se explica a continuación:

- **Selección por categoría.** Se eligieron los pares mostrados en la tabla 5-3, procesando un primer conjunto de todos los posibles interferogramas con parámetros de procesamiento "intermedios" (filtro psfilt con intensidad de 0.6, desenvolvimiento de fase mediante icu con un grado de 0.1 y de 0.4), de tal manera que los primeros en ser descartados fueron aquellos que no lograron ser desenvueltos (el método falla cuando no existen suficientes puntos para desenvolver), y enseguida aquellos que en comparación con sus respectivos semejantes en categoría fueron deficientes.
- **Procesamiento con icu.** Se generaron sets de 9 interferogramas procesados con éste método de desenvolvimiento.
- **Selección de interferogramas para procesar con snaphu.** De los anteriores, se eligieron solamente aquellos en los que se logró desenvolver la zona que abarca la ciudad, que son: A1, A2, B1, B2 y C1.
- **Procesamiento con snaphu.** Se generaron sets de 2 interferogramas desenvueltos con éste método (A1 y A2), los restantes previamente seleccionados tuvieron que descartarse por problemas durante su cómputo.

Adjunto en el Apéndice A, se encuentran todos los interferogramas descritos.

## 5.4. Análisis de resultados

En ésta sección se discuten los resultados obtenidos. Los interferogramas que se muestran para explicar algún caso en concreto pueden estar recortados al tamaño de la ciudad de Celaya para su mejor visualización.

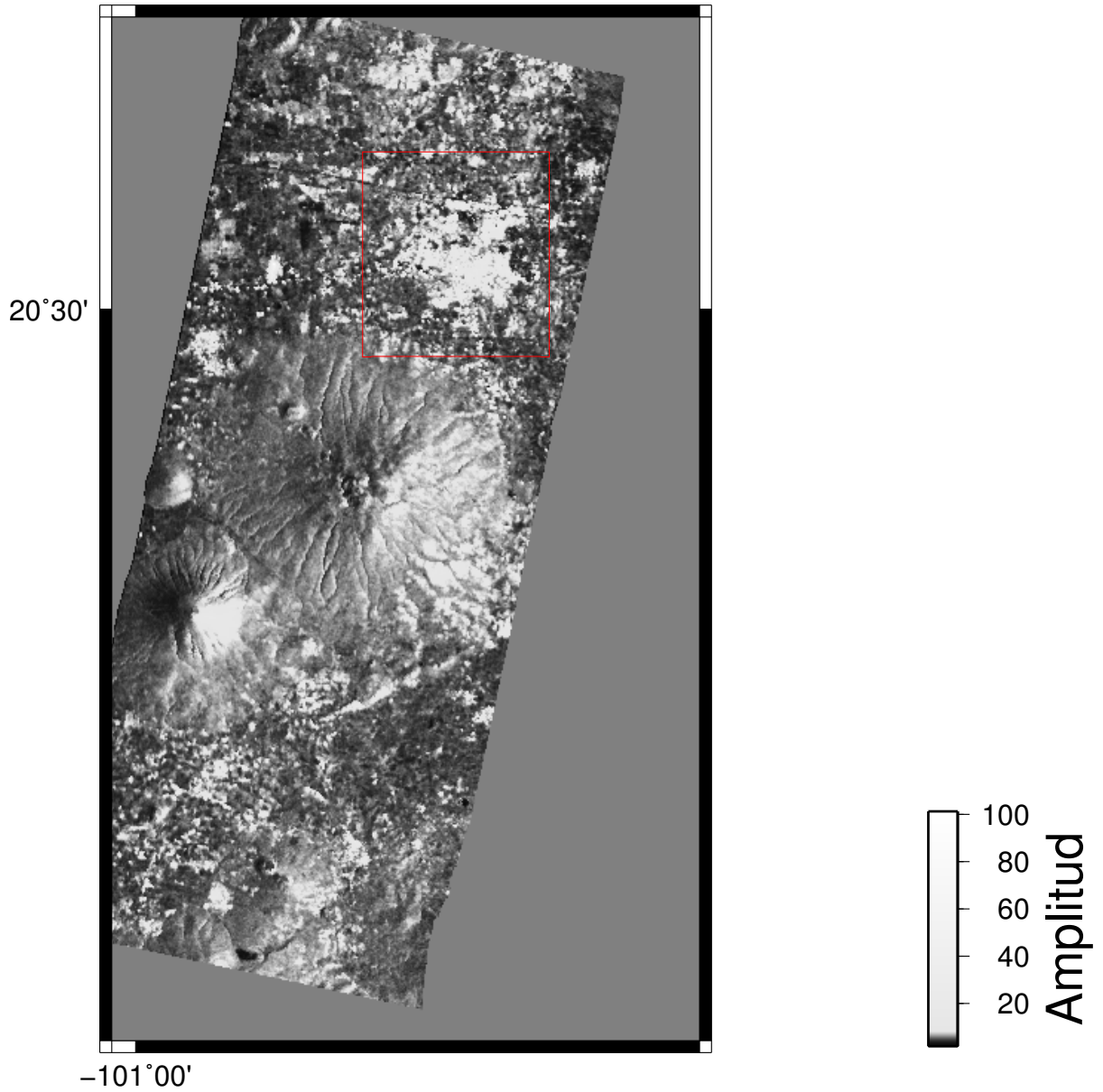


Figura 5-4: Área de procesamiento seleccionada, la ciudad se encuentra delimitada por el recuadro rojo, al sur se encuentra el cerro La Gavia.



Fecha	Categoría	Tiempo	Línea Base
20100501 - 20100710	A1	70	-133
20091003 - 20100327	A2	175	224
20050122 - 20050611	A3	140	-335
20091003 - 20100710	B1	280	74
20100220 - 20100918	B2	210	235
20050611 - 20060527	B3	350	-335
20050820 - 20061223	C1	490	128
20081227 - 20100327	C2	453	223
20040417 - 20050507	C3	383	310

Tabla 5-3: Interferogramas seleccionados por categoría.

#### 5.4.1. Desarrollo con *icu*

Como se mencionó anteriormente, los primeros criterios a considerar para elegir un par interferométrico que sufra una menor decorrelación de fase (y por ende, muestre un mejor desarrollo) es la separación temporal y la diferencia en la línea base. En las figuras 5-5 y 5-6, tenemos un ejemplo evidente de lo que ocurre conforme incrementan éstas variables; en ambos casos existe una disminución de área desvuelta, siendo el tiempo (para nuestro caso) lo que afecta en mayor medida.

Por otra parte, el filtrado (tanto el tipo de filtro como su intensidad) es el factor que más impacta, por encima del grado de desarrollo (que por sí mismo no implica grandes cambios). En las figuras 5-7, 5-8, 5-9, y 5-10 podemos observar como al incrementar la intensidad de filtro *psfilt* sobre un mismo par interferométrico, prevalece el patrón de desarrollo e incrementa la cobertura de área sobre la ciudad; esto cumple para ambos grados de desarrollo mostrados.

El filtro adaptativo es más "agresivo" en comparación al de espectro de potencia; en la figura 5-11 podemos observar que, para el desarrollo de fase por *icu*, reduce mucho más el número de puntos para desarrollar, y al incrementar la intensidad del mismo, no muestra cambios sustanciales en comparación con *psfilt*. En cuanto al grado de desarrollo, no se lograron buenos resultados con su incremento ( $> 0.1$ ) siendo en su mayoría interrumpidos antes de concluir el proceso (no se muestran éstos interferogramas).

Las dos zonas en donde se espera observar alguna diferencia en el desarrollo de fase

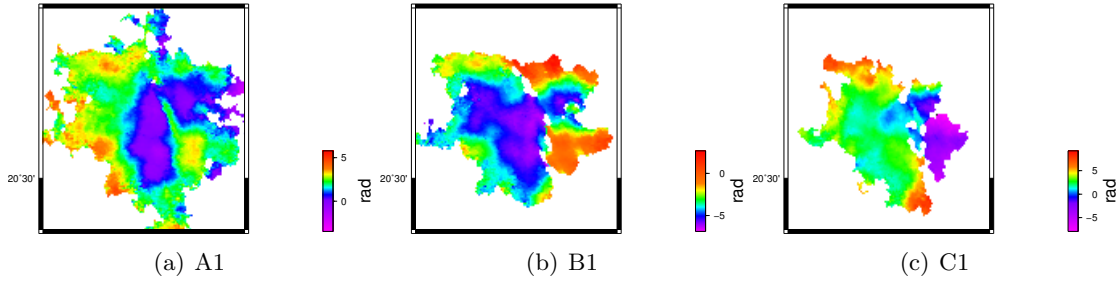


Figura 5-5: Método **icu**. Incremento en la separación temporal sobre la ciudad de Celaya. a) 70 días; b) 280 días; c) 490 días. Original: figura A-5.

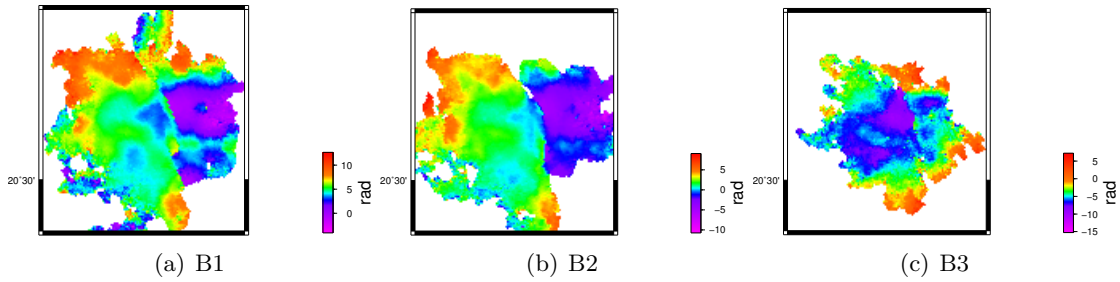


Figura 5-6: Método **icu**. Incremento en la línea base sobre la ciudad de Celaya. a) 145 metros; b) 235 metros; c) 490 metros. Original: figura A-9.

(ciudad de Celaya y cerro la Gavia) muestran a su vez comportamientos distintos: mientras que en la ciudad, si bien, existe un visible patrón de cambio que incrementa (poco) con el tiempo, aparece de forma constante en la mayoría de interferogramas que la cubren, mientras que el desenvolvimiento sobre la zona de la Gavia, es más aleatorio, posiblemente debido en su mayoría al cambio brusco que ocurre por el comportamiento estacional de la vegetación.

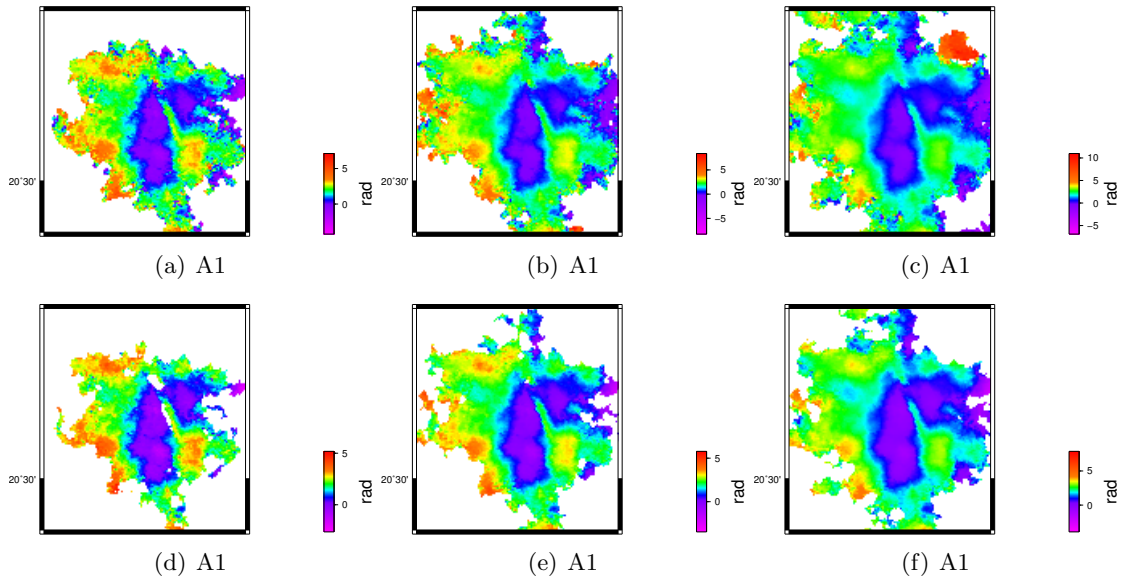


Figura 5-7: Método **icu**. a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9. Podemos observar que un filtrado óptimo para el par interferométrico mostrado se encuentra cerca de 0.6, ya que aunque un valor fuerte (0.9) favorece al desenvolvimiento, suaviza demasiado la señal perdiendo calidad en la delimitación de los rasgos de fase. Original: figuras A-1 - A-6.

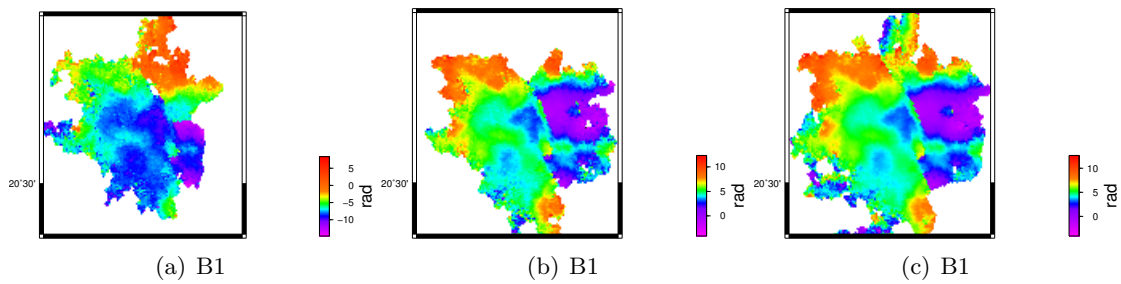


Figura 5-8: Método **icu**. a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-9

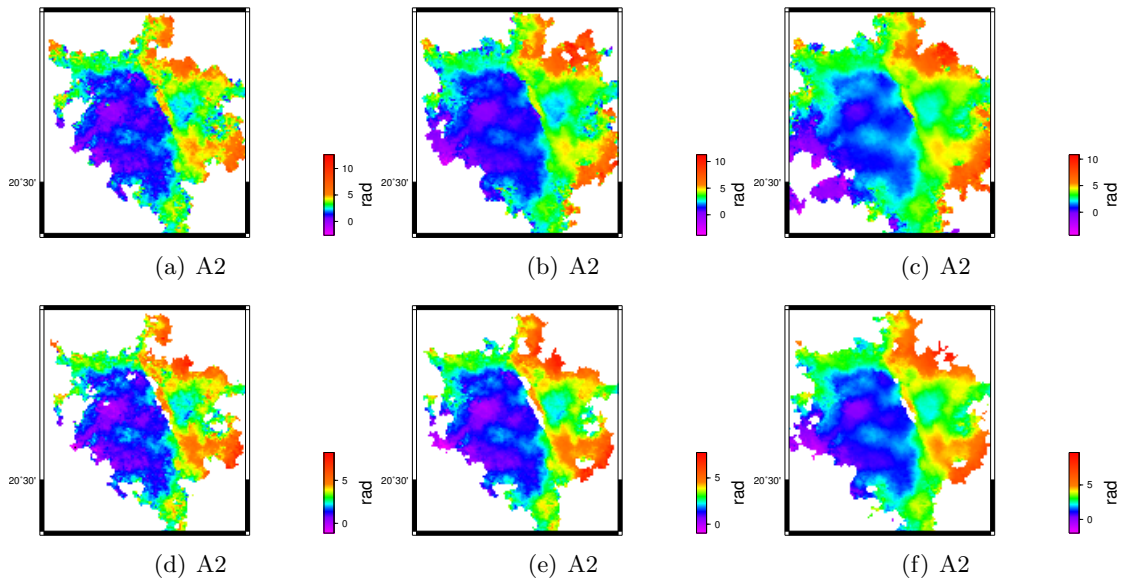


Figura 5-9: Método **icu**. a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-12.

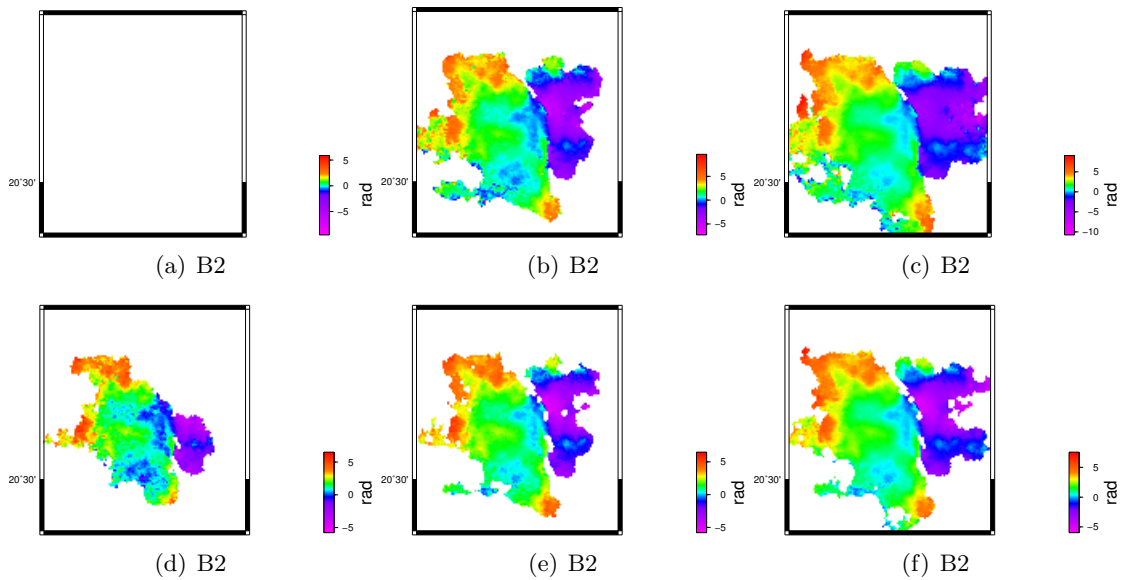


Figura 5-10: Método **icu**. a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-12.

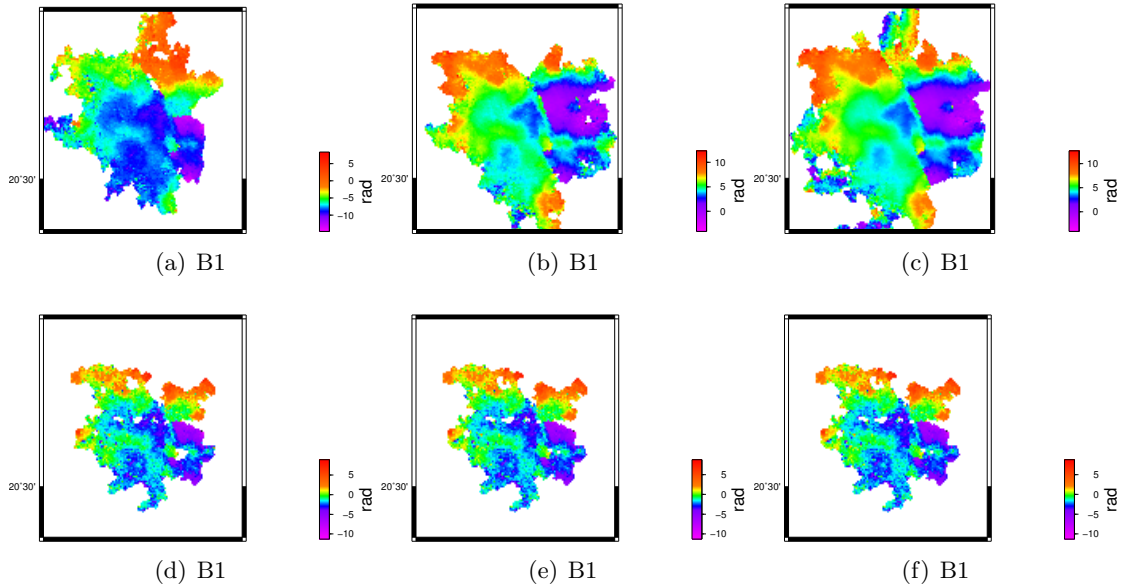


Figura 5-11: Método **ic**. a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro adaptativo, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desenvuelto desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). Original: figuras A-7 - A-12, A-13 - A-15.

#### 5.4.2. Desenvolvimiento con SNAPHU

Procesar con éste método de desenvolvimiento de fase tiene sus ventajas, teniendo en consideración que, con el grado de desenvolvimiento adecuado, SNAPHU desenvuelve todo el interferograma, incluyendo regiones cubiertas por agua, por lo que hay que tomar esto en cuenta (y en caso de tener identificados cuerpos grandes de agua en la zona de estudio, aplicar una máscara de forma manual).

En la figura 5-12, podemos observar un cambio sumamente drástico en el área desenvuelta al modificar el grado de desenvolvimiento, siendo mejor un valor bajo (el valor por defecto es de 0.2). De igual manera podemos observar que en la zona que comprende a la ciudad, es mas uniforme el desenvolvimiento que en el resto de la imagen (figura 5-13).

El filtrado para éste método no implica prácticamente ningun cambio, como se aprecia en la figura 5-14.

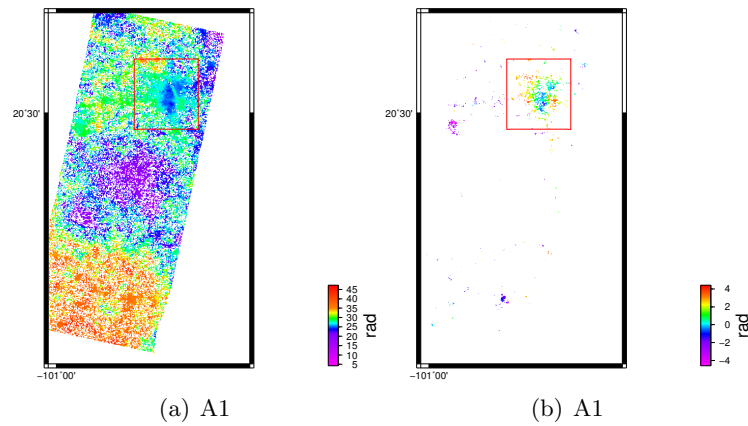


Figura 5-12: Método **SNAPHU**. Interferograma completo desenvuelto con grados diferentes (0.1 y 0.4, respectivamente). Original: B-1 - B-4.

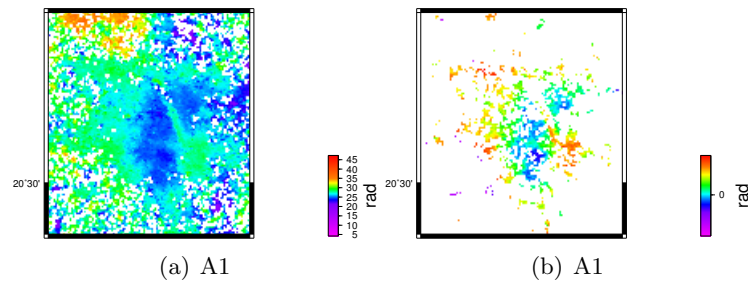


Figura 5-13: Método **SNAPHU**. Acercamiento a la ciudad de Celaya de la figura 5-12. En la imagen de la derecha podemos observar un patrón de desenvolvimiento consistente con lo obtenido en la sección 5.4.1. Del lado izquierdo vemos un resultado deficiente si lo comparamos con su contraparte, pero que conserva rasgos similares. Original: B-1 - B-4.

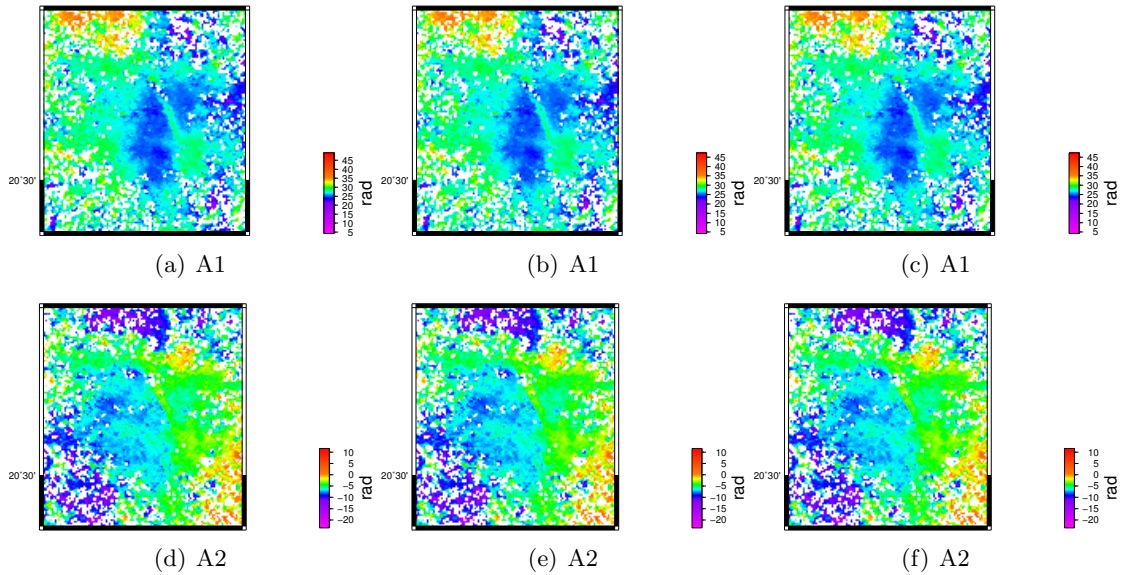


Figura 5-14: Método **SNAPHU**. a), b) y c), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; d), e) y f), grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia, intensidad de 0.3, 0.6 y 0.9; desvueltos desde un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad (Oeste). La intensidad de filtrado no tiene gran impacto sobre la fase desvueltos. Original: B-7 - B-9.

### 5.4.3. Comparación entre ambos métodos

Los métodos de desenvolvimiento de fase analizados anteriormente presentan comportamientos distintos ante la variación de los parámetros de procesamiento iniciales y tienen rangos de operación desiguales, por lo que más que pensar en un punto común a ambos métodos (mismos parámetros y comparar resultados), es más recomendable buscar un punto óptimo por separado que ofrezca un resultado apropiado a la naturaleza misma de cada método (por ejemplo, como se pudo observar en las secciones anteriores, **icu** es un método que logra desenvolver con un grado mucho mayor en un rango de 0.1 a 0.4, mientras que para **SNAPHU** un valor de 0.25 ya es demasiado alto).

En lo que a calidad respecta, podemos encontrar atractivos ambos métodos teniendo en cuenta que, los cambios de fase de mayor relevancia logrados con uno y otro (figura 5-15) se encuentran dentro del mismo orden. Si bien las escalas en radianes pueden ser engañosas, para los alcances de éste trabajo son suficientes, pues lo que interesa es la diferencia de fase; su conversión a unidades de distancia es posterior y requiere de una altitud de referencia.

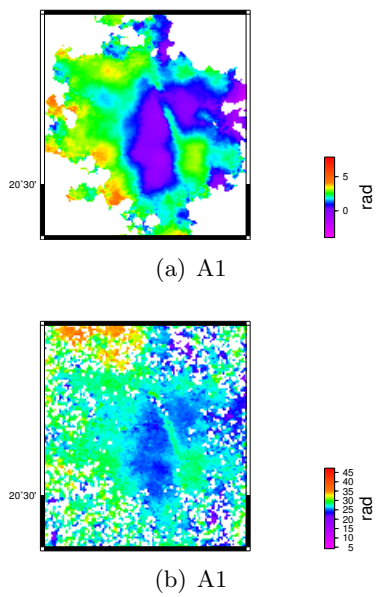


Figura 5-15: a) Interferograma desenvuelto con icu, grado de desenvolvimiento = 0.4, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9. b) Interferograma desenvuelto con SNAPHU, grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9. El patrón de desenvolvimiento es similar utilizando ambos métodos, SNAPHU tiene un desenvolvimiento con mayor detalle (y presenta un rango más amplio) mientras que icu considera zonas de mayor tamaño que nos dan una visión de los efectos de talla regional



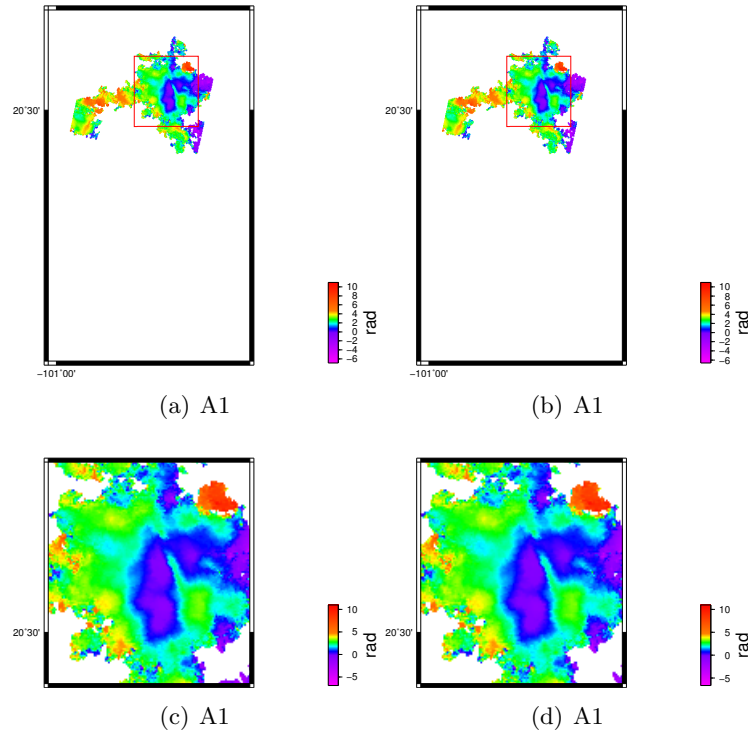


Figura 5-16: a) y c) Interferograma desenvuelto con icu, grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9 desde el centro de la imagen. b) y d) Interferograma desenvuelto con icu, grado de desenvolvimiento = 0.1, filtro de espectro de potencia con intensidad = 0.9 desde la zona industrial.

Otra variable importante, es la "semilla" o punto de partida para el desenvolvimiento. Se propuso utilizar un punto ubicado en la zona industrial de la ciudad para no tener problemas por vegetación ni cambios acelerados como lo es el crecimiento de una zona urbana, pero, más importante aún, porque en dicha zona podemos encontrar un buen número de dispersores que pueden servir como punto de referencia. Para hablar de un cambio a favor o en contra, hay que observar el archivo de correlación previo al desenvolvimiento, en donde justamente, una de las partes de mayor correlación se encuentra en dicha zona de Celaya. En ambos métodos, el uso o no de dicha semilla sí presentó diferencias, particularmente sobre **icu**, en donde existe un cambio favorable al desenvolvimiento, mientras que en SNAPHU no es tan importante (figura 5-16).

## 5.5. Conclusiones

Los métodos de desenvolvimiento aquí mostrados, son los de uso mas frecuente en procesamiento con ROLPAC (y en otros paquetes de software, de forma análoga), y es importante conocer las ventajas y limitantes de cada uno, así como dominar los conceptos que los envuelven para sacar el mejor provecho de ellos, y de ésta manera, generar interferogramas de mayor calidad para su uso en etapas posteriores de la técnica cuya interpretación sea satisfactoria y congruente.

Para ser más específicos, los métodos icu y SNAPHU, se comportan diferente ante dos parámetros en especial, que son el filtrado y el grado de desenvolvimiento. El filtrado (ya sea *psfilt* o *adapt\_filt*) y su intensidad es el que tiene más efecto sobre el método icu. El grado de desenvolvimiento influye más en SNAPHU.

La metodología propuesta y desarrollada en éste último capítulo, muestra concretamente, una forma de seleccionar y generar interferogramas de alta correlación y calidad en el desenvolvimiento de fase.

En la elaboración de interferogramas, es muy común que surjan un sinnúmero de problemas (hablando en términos de cómputo) durante su procesamiento, ya que, aunque la automatización en un contexto ideal es muy efectiva, en la realidad, los datos no son como uno quisiera (datos escasos, con intervalos de tiempo y línea base variables, sumado a factores aleatorios que pudiesen ocurrir como fallas en la adquisición, problemas por vegetación, tormenta, etc).

Muchos de los interferogramas "perdidos", pueden llegar a ser calculados correctamente si se obtienen previamente los parámetros que se ajusten a cada par de imágenes de forma individual. Aquí se resumen las etapas que se proponen para llevarlo a cabo:

- 1) **Selección de un área de estudio.** Es importante proponer el tamaño exacto que nos interesa (ya sea que busquemos ver sólo rasgos locales o bien, que nos interese una cobertura de área mayor) para garantizar que nuestro objetivo esté contenido dentro del interferograma y se optimice el tiempo de cómputo.
- 2) **Selección de datos.**
  - a) *Por satélite.* De acuerdo a los criterios mencionados en la sección 2.2.1.

b) *Selección por línea base y separación temporal.*

c) *Separación en grupos.* Como se hizo en la sección 5.1.

3) **Selección de parámetros con interferogramas de prueba.** Esta parte del proceso, es lo que se ilustra en las secciones previas de éste capítulo.

Lo primero que se debe hacer es definir los parámetros de prueba, es decir los que van a estar cambiando. No se prueba con todos necesariamente, pero en base a lo que experimentamos, son de mayor relevancia los siguientes:

a) *La intensidad de filtrado* ayuda mucho en la definición de los patrones de desenvolvimiento, reduciendo (o intensificando) rasgos que pueden o no interesarnos.

b) *El grado de desenvolvimiento*, (visto como *UnwrappedThreshold*) es el más importante para cuestiones de cómputo, pues un valor incorrecto o demasiado elevado de éste último normalmente conlleva la interrupción del cálculo del interferograma.

c) *El método de desenvolvimiento*, también debe ser elegido en base a éste procesamiento previo, ya que se podrán *comparar* los resultados preliminares de cada uno de ellos (como los mencionados **icu** y **SNAPHU**) y así aplicar el más conveniente.

4) **Procesamiento.** Una vez conocidos los parámetros óptimos (o la forma de encontrarlos), se pueden procesar volúmenes grandes de datos.

Conforme con lo anterior, después de haber desarrollado ésta metodología podemos reducir nuestros resultados como sigue:

- Para la ciudad de Celaya, es posible obtener resultados con ambos métodos de desenvolvimiento de fase, siendo **icu** el más "versátil".

- Como se mencionó, con **icu** se lograron interferogramas de todas las categorías manejadas (A1, A2, A3, B1, etcétera) lo cual permite generar un mayor número de ellos (para series de tiempo) con separaciones temporales máximas (menores a 548 días) y líneas de base grandes (menores a 500 metros), con el filtro *psfilt* (espectro de potencia) y una intensidad de 0.6 en adelante, y un grado de desenvolvimiento tolerable entre 0.1 y 0.4 (icu opera muy bien en éste rango).

- Con SNAPHU, los resultados son igual de buenos (con un grado de desenvolvimiento de 0.1) pero con la limitación de que habría que manejar intervalos de tiempo reducidos (categoría A) y línea base corta (hasta 332 metros), aplicando cualquiera de los dos filtros utilizados, ya que como se observó, no tiene impacto sobre los resultados.

Existe una gran cantidad de fuentes de información sobre InSAR, pero ciertamente, éste tipo de análisis y el nivel de manejo de los conceptos (que son en su mayoría, de nivel básico) descritos en éste trabajo, normalmente es muy difícil en un principio y sólo la experiencia permite adquirirlos en mayor o menor medida.

Para el caso de México, existe un serio problema adicional: el manejo de idiomas no tiene el mismo seguimiento que en otros países, y gran parte (sino es que todas) de las fuentes consultadas, se encuentran en otra lengua (predominantemente inglés, en segundo lugar francés, ruso en un sólo pero muy importante caso, por citar algunas). El material recopilado en éste trabajo tiene además la finalidad de llenar ésta clase de carencias, aun cuando sea a muy pequeña escala.

## Apéndice A

# Interferogramas procesados con *icu*.

Se presentan sets de nueve interferogramas seleccionados de las categorías expuestas (tabla 5-3) procesados con *icu*, dispuestos según los parámetros de procesamiento definidos en la sección 5.2. El tamaño de la línea base incrementa de izquierda a derecha en bloques de 165 metros, y el tiempo de arriba hacia abajo por 181 días. Los espacios en blanco son aquellos que no se lograron desenvolver (si es el caso) pero que corresponden al par de fechas respectivo.

Los sets de interferogramas están conformados como se ilustra en la tabla B-1.

Set	Figura	Método de desenvolvimiento	Umbral de desenvolvimiento	Filtro	Intensidad de filtro	"Semilla"
1	A-1 al A-6	<i>icu</i>	0.1, 0.4	<i>psfilt</i>	0.3, 0.6, 0.9	Centro de la imagen
2	A-7 al A-12	<i>icu</i>	0.1, 0.4	<i>psfilt</i>	0.3, 0.6, 0.9	Zona industrial de Celaya
3	A-13 al A-15	<i>icu</i>	0.1	<i>adapt_filt</i>	0.3, 0.6, 0.9	Zona industrial de Celaya

Tabla A-1: Sets de interferogramas.

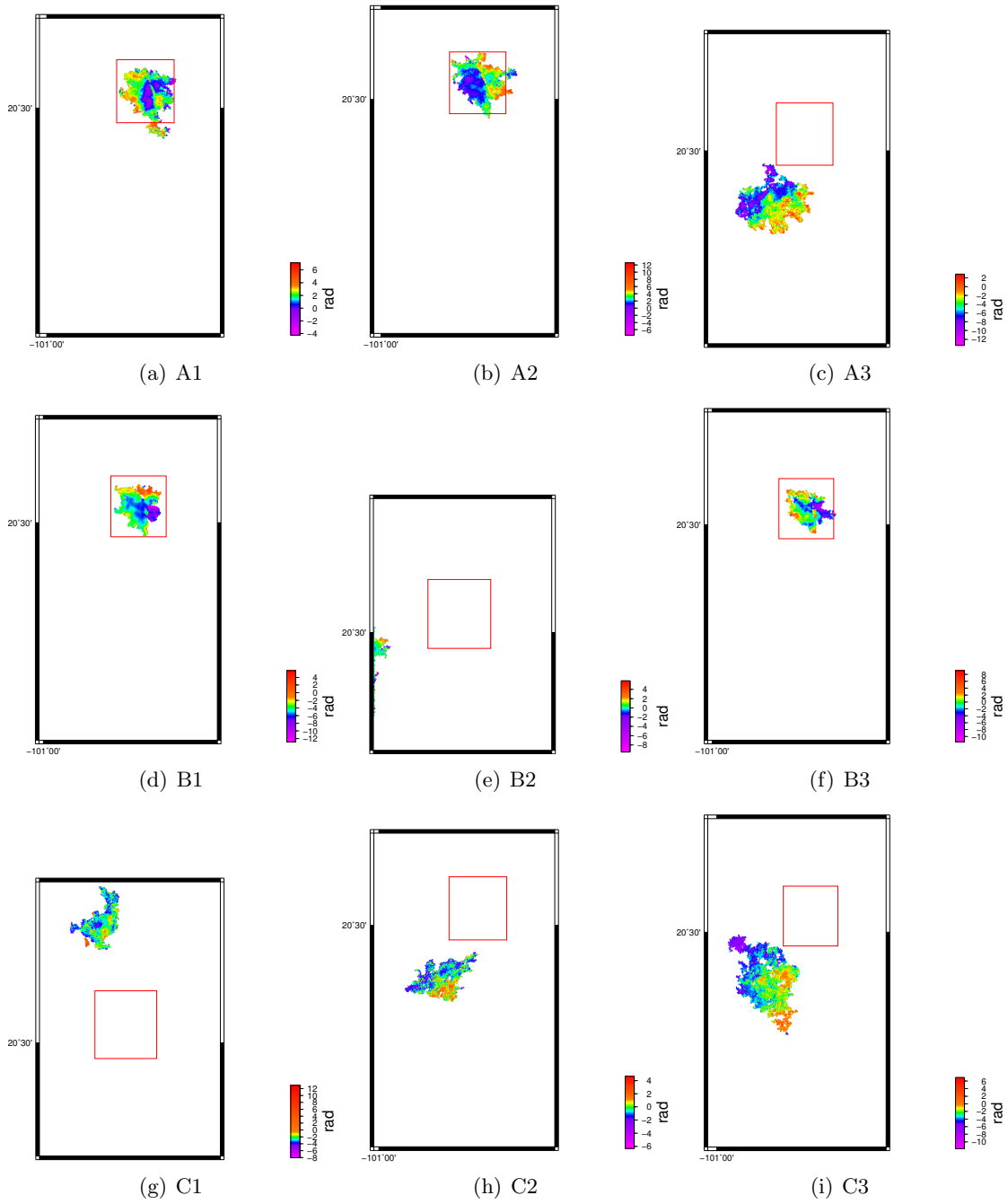


Figura A-1: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen.

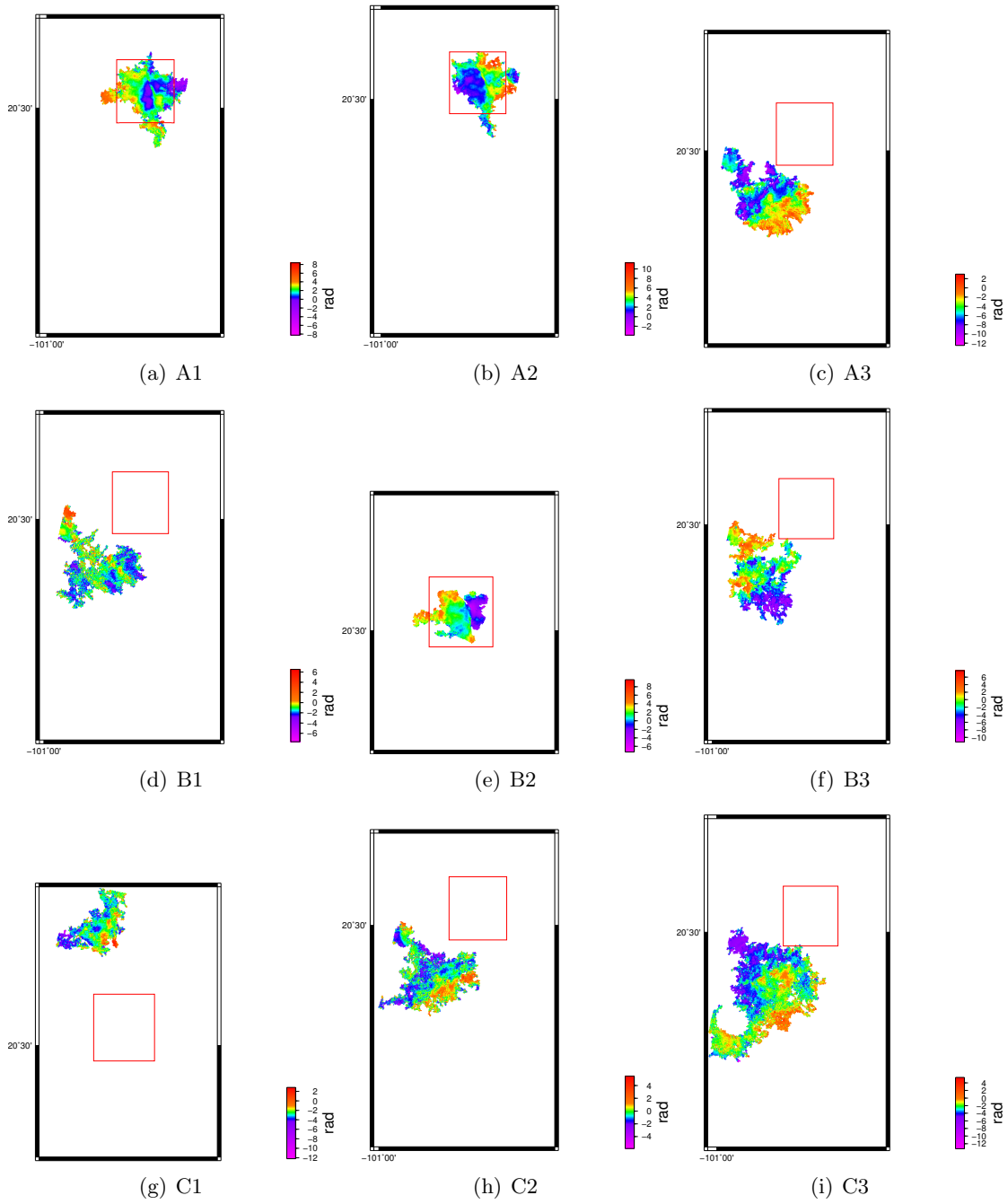


Figura A-2: Método de desenvolvimento: icu, Umbral de desenvolvimento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen.

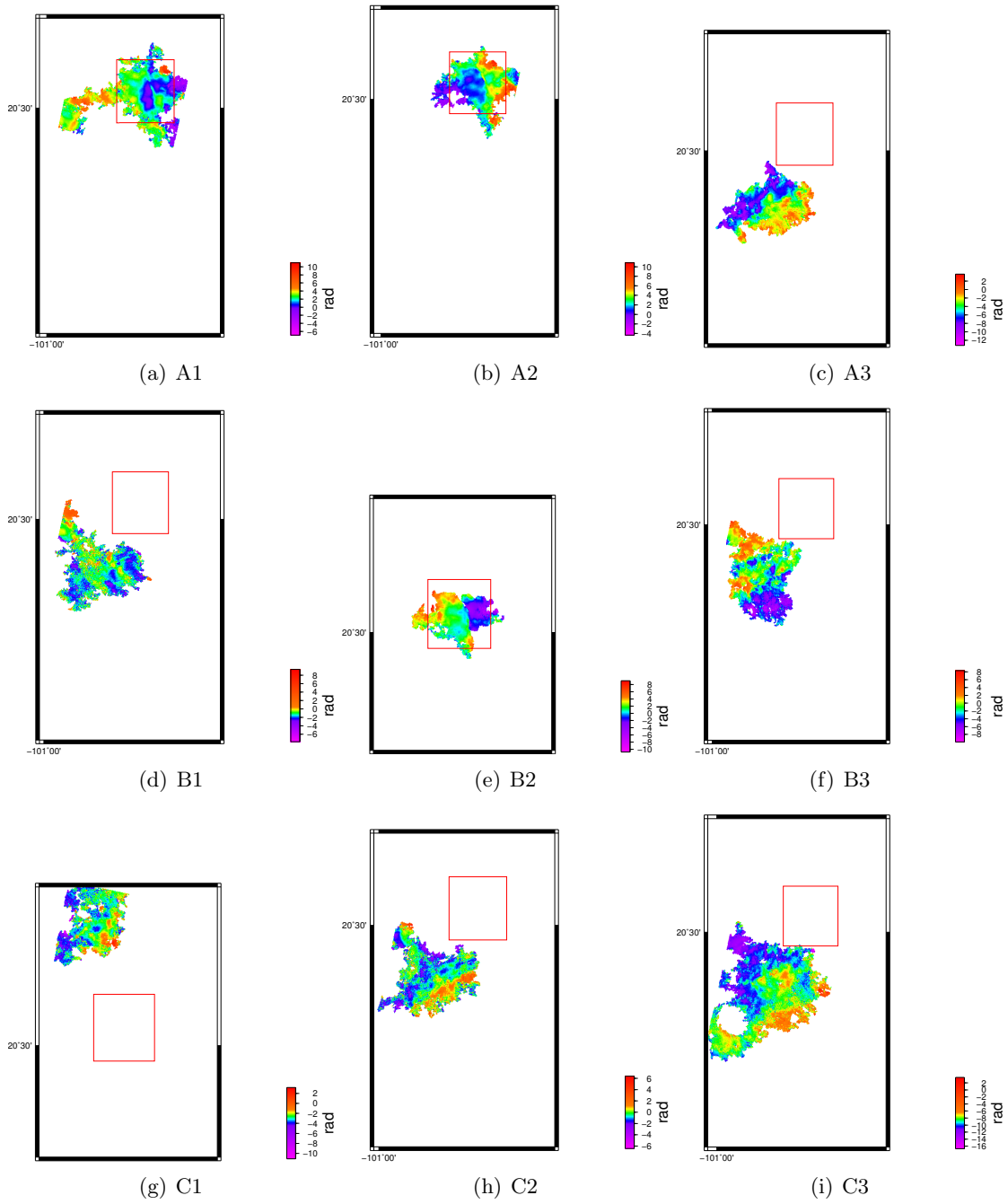


Figura A-3: Método de desenvolvimento: icu, Umbral de desenvolvimento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen.



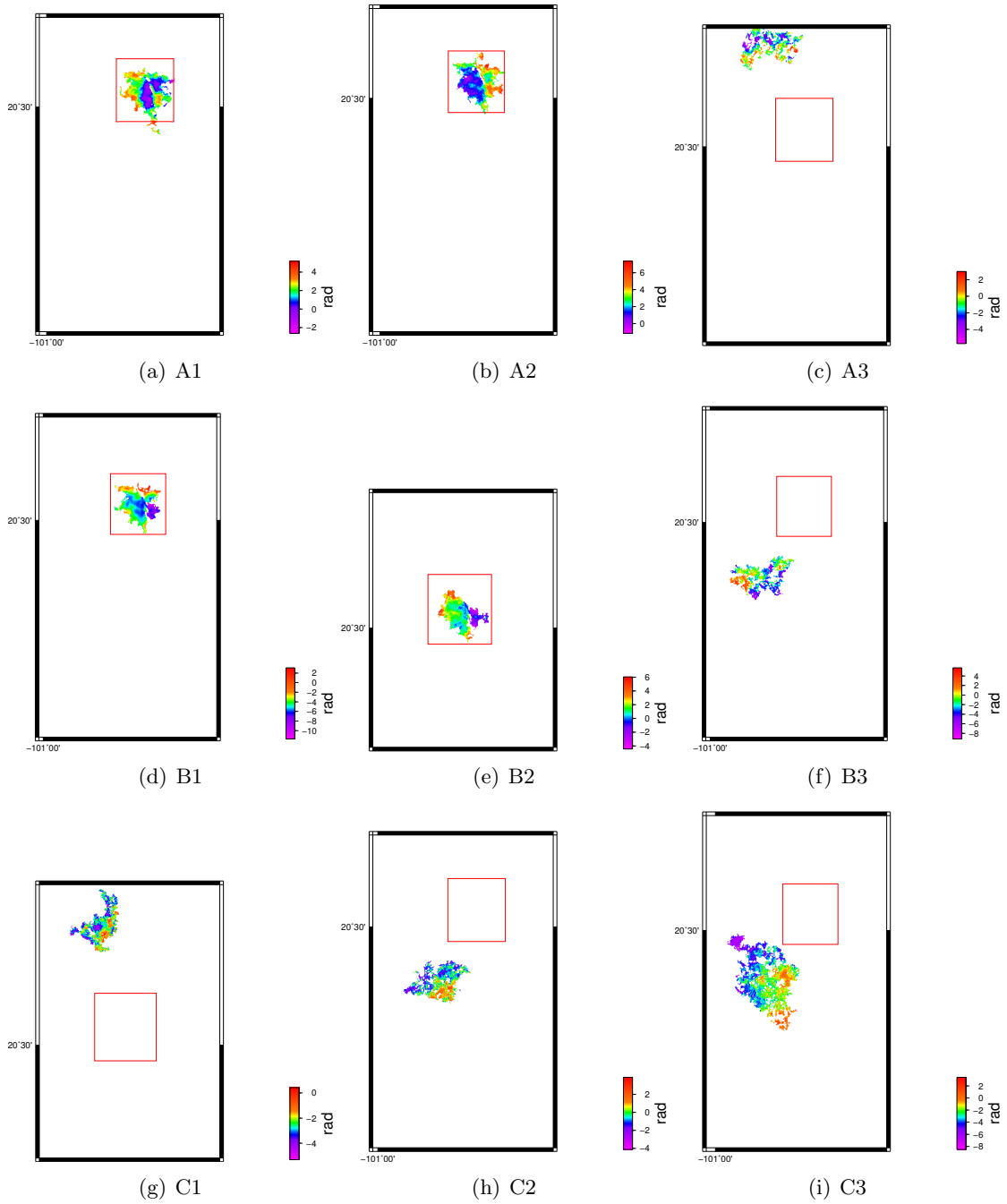


Figura A-4: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen.

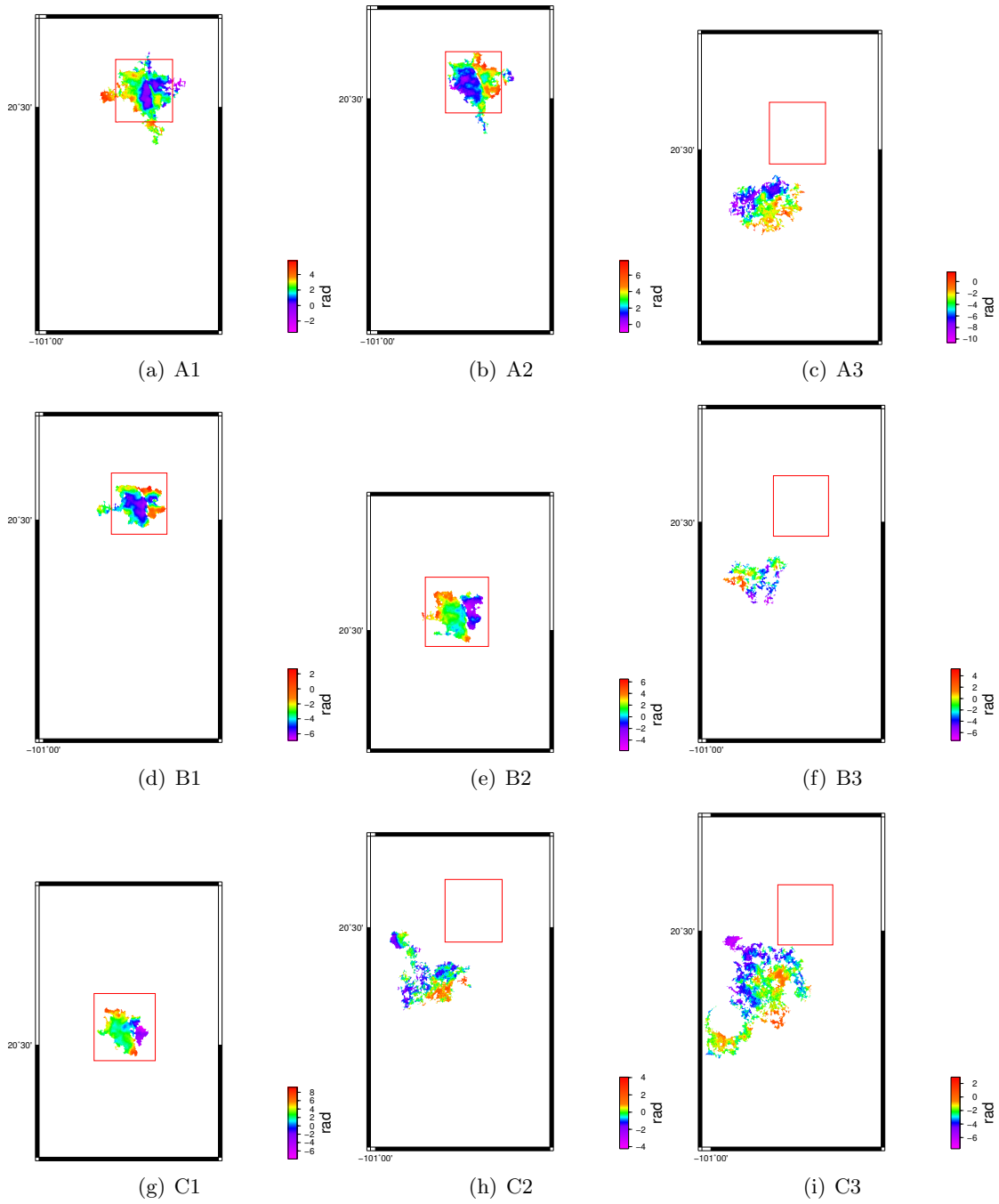


Figura A-5: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen.

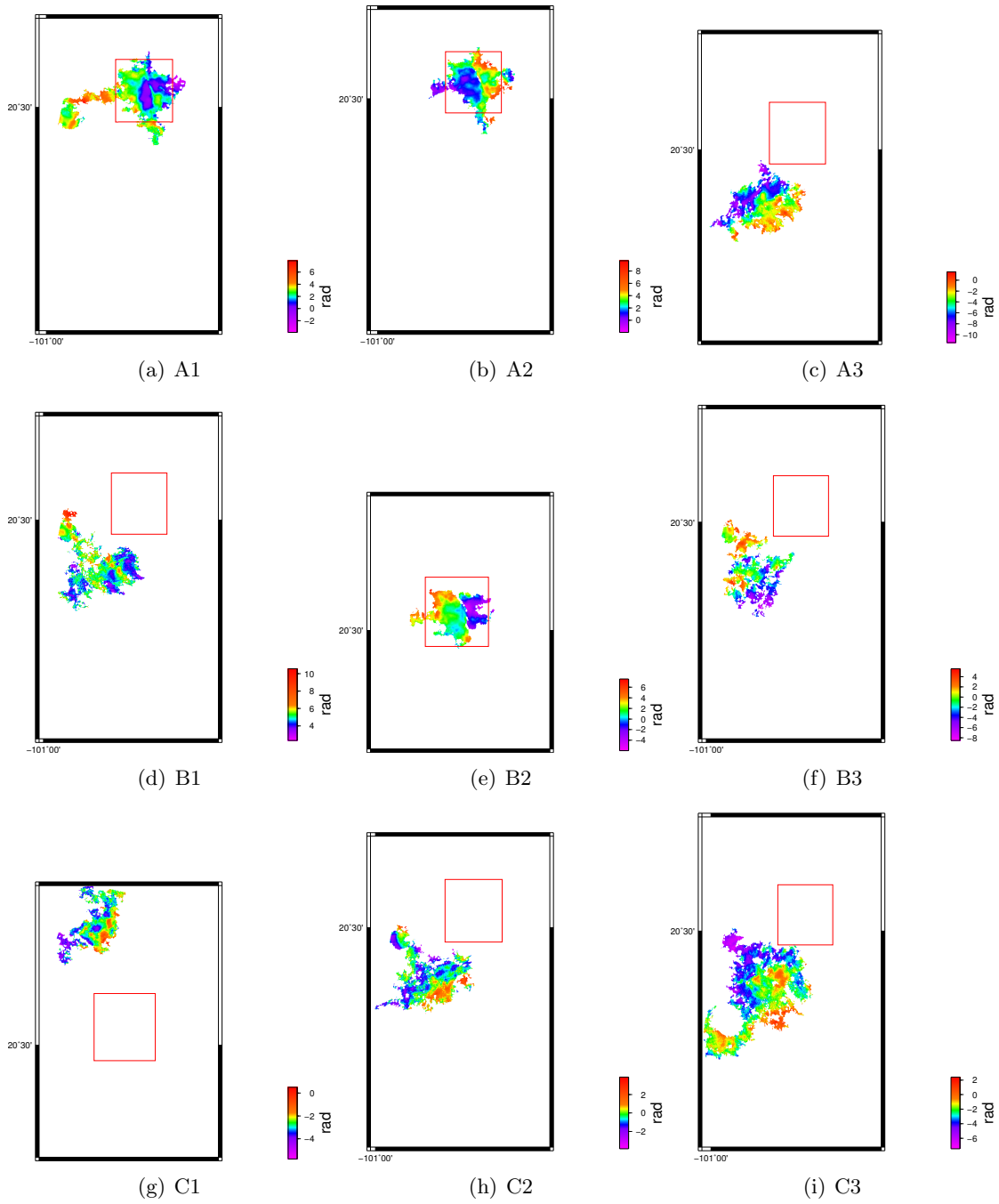


Figura A-6: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen.

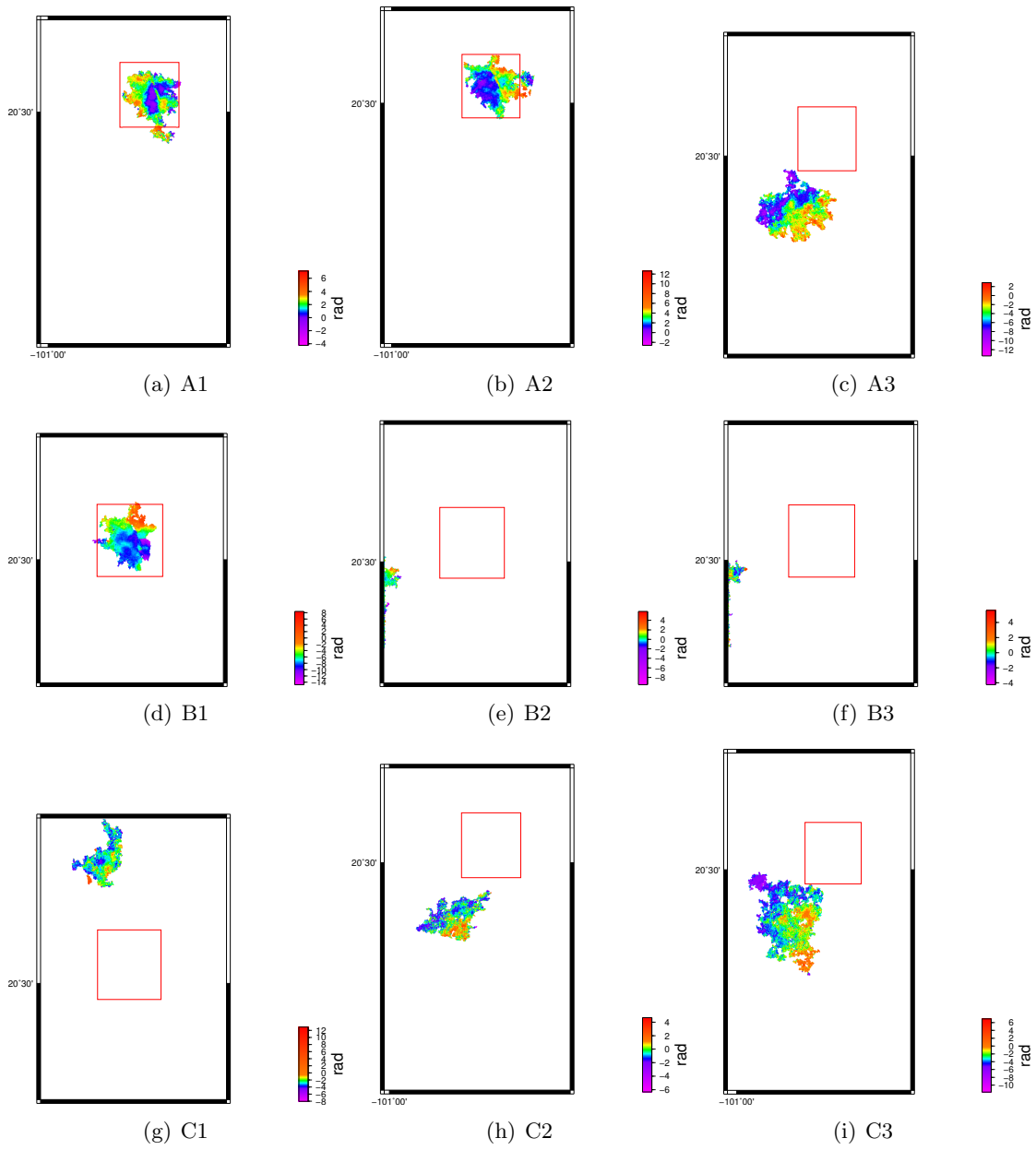


Figura A-7: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

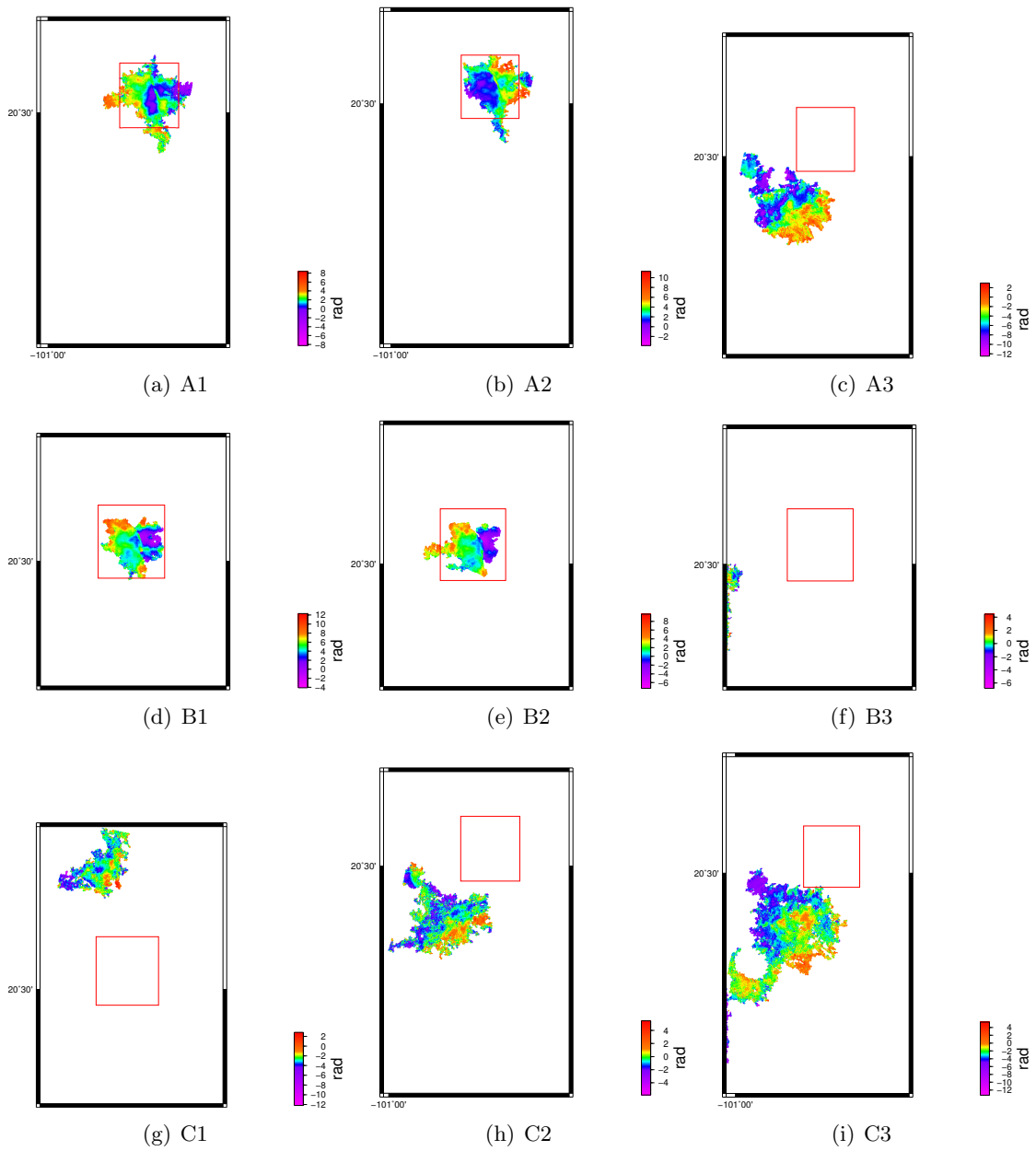


Figura A-8: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

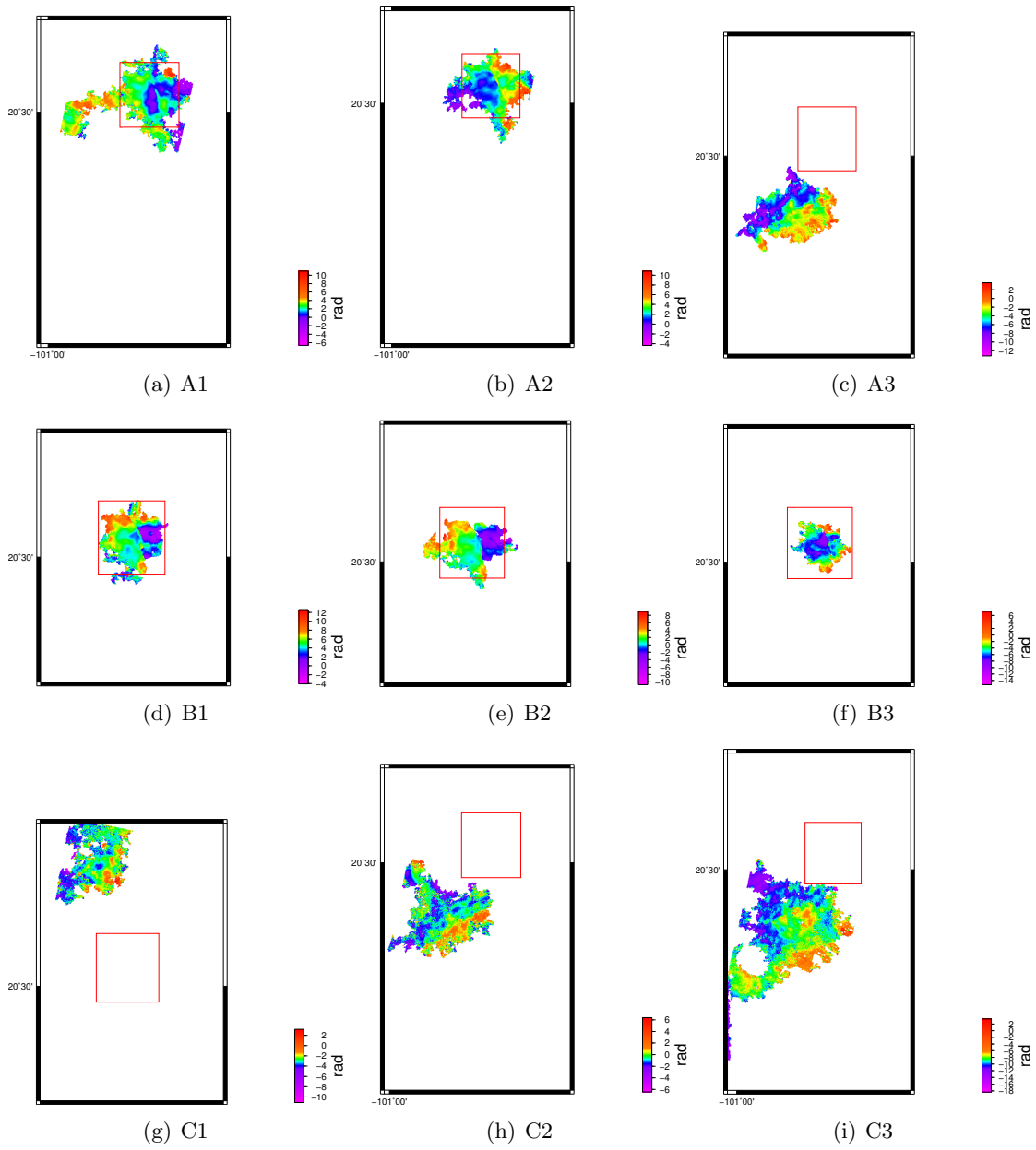


Figura A-9: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

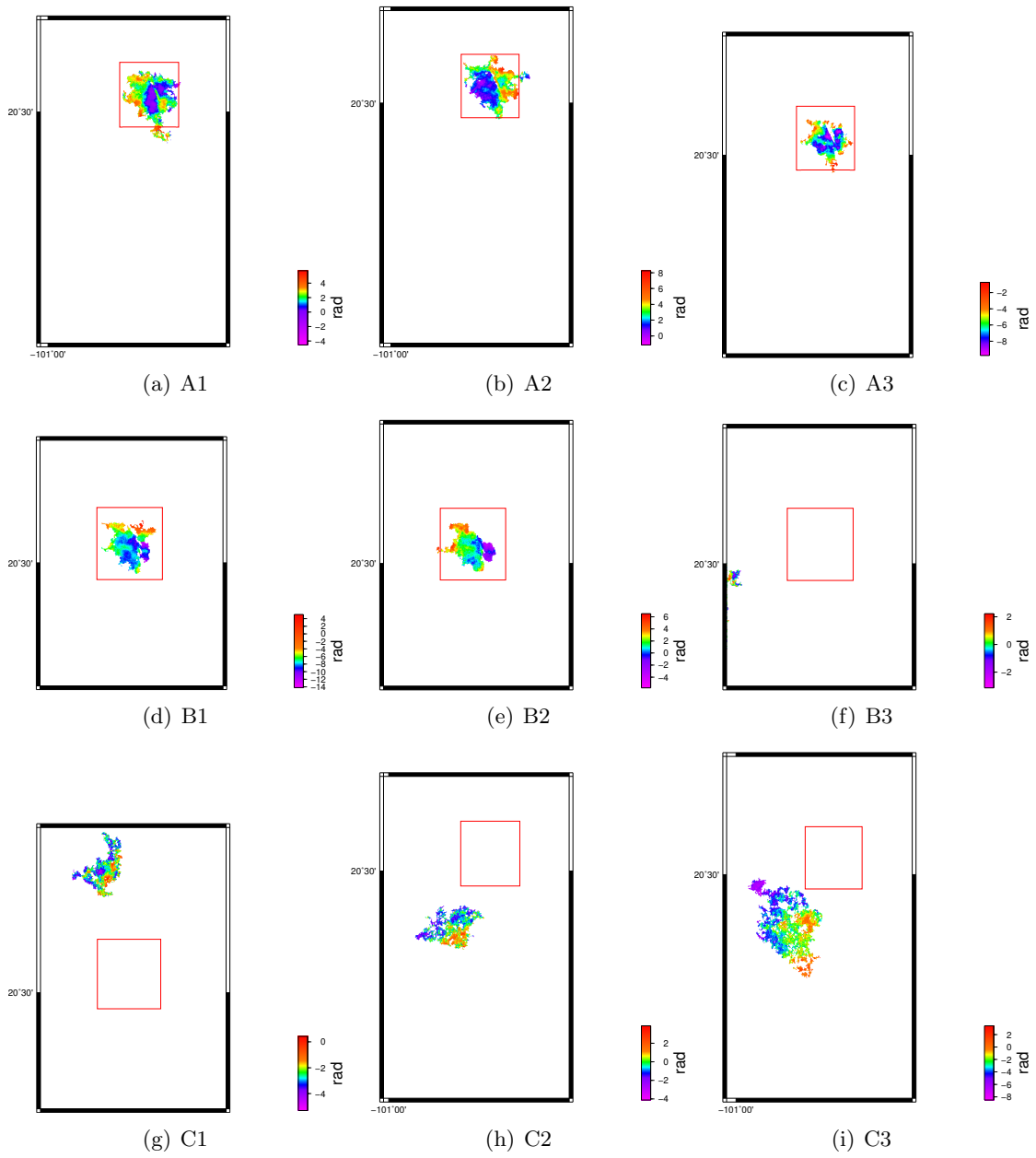


Figura A-10: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

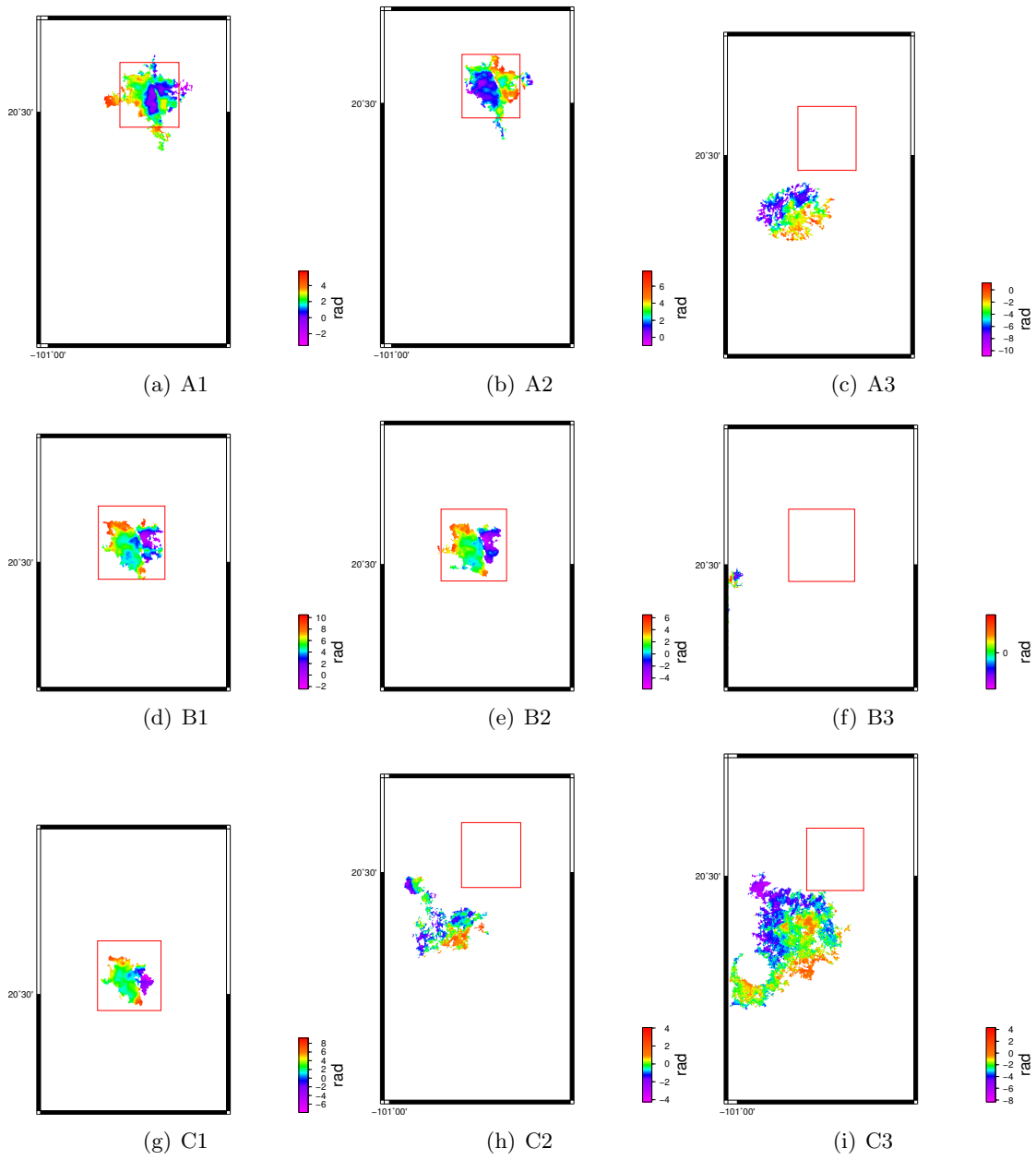


Figura A-11: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.



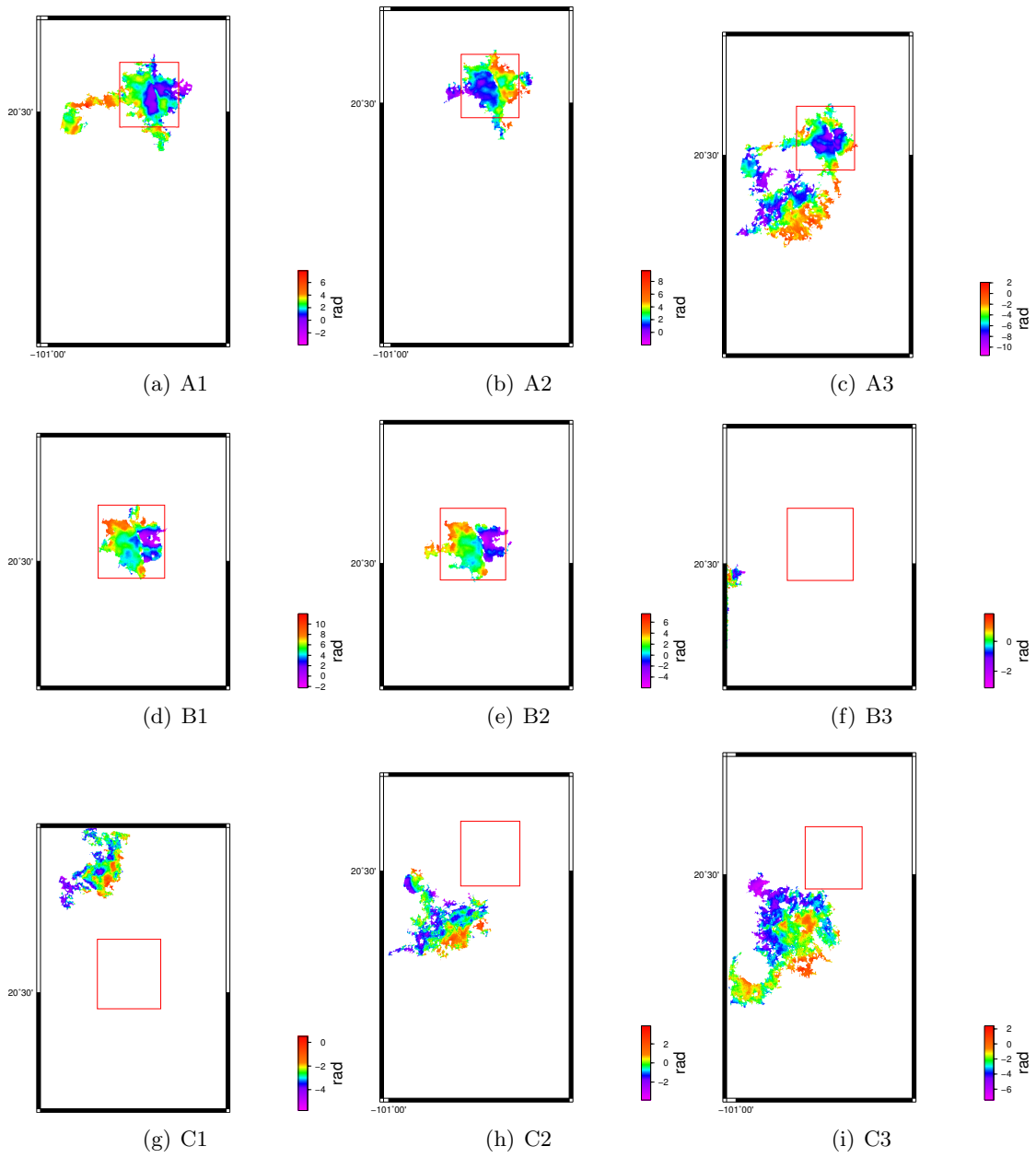


Figura A-12: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

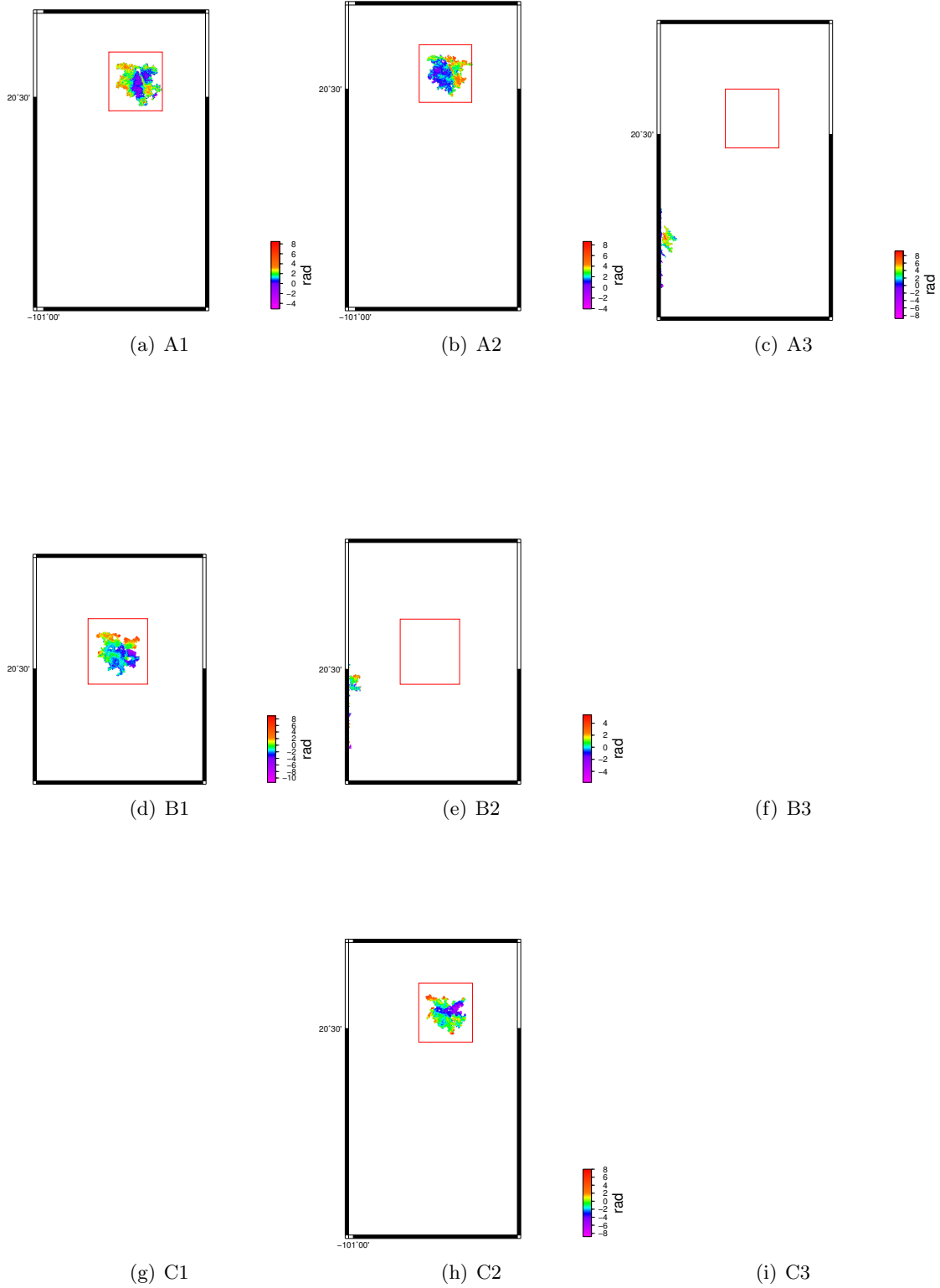


Figura A-13: Método de desenvolvimento: icu, Umbral de desenvolvimento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

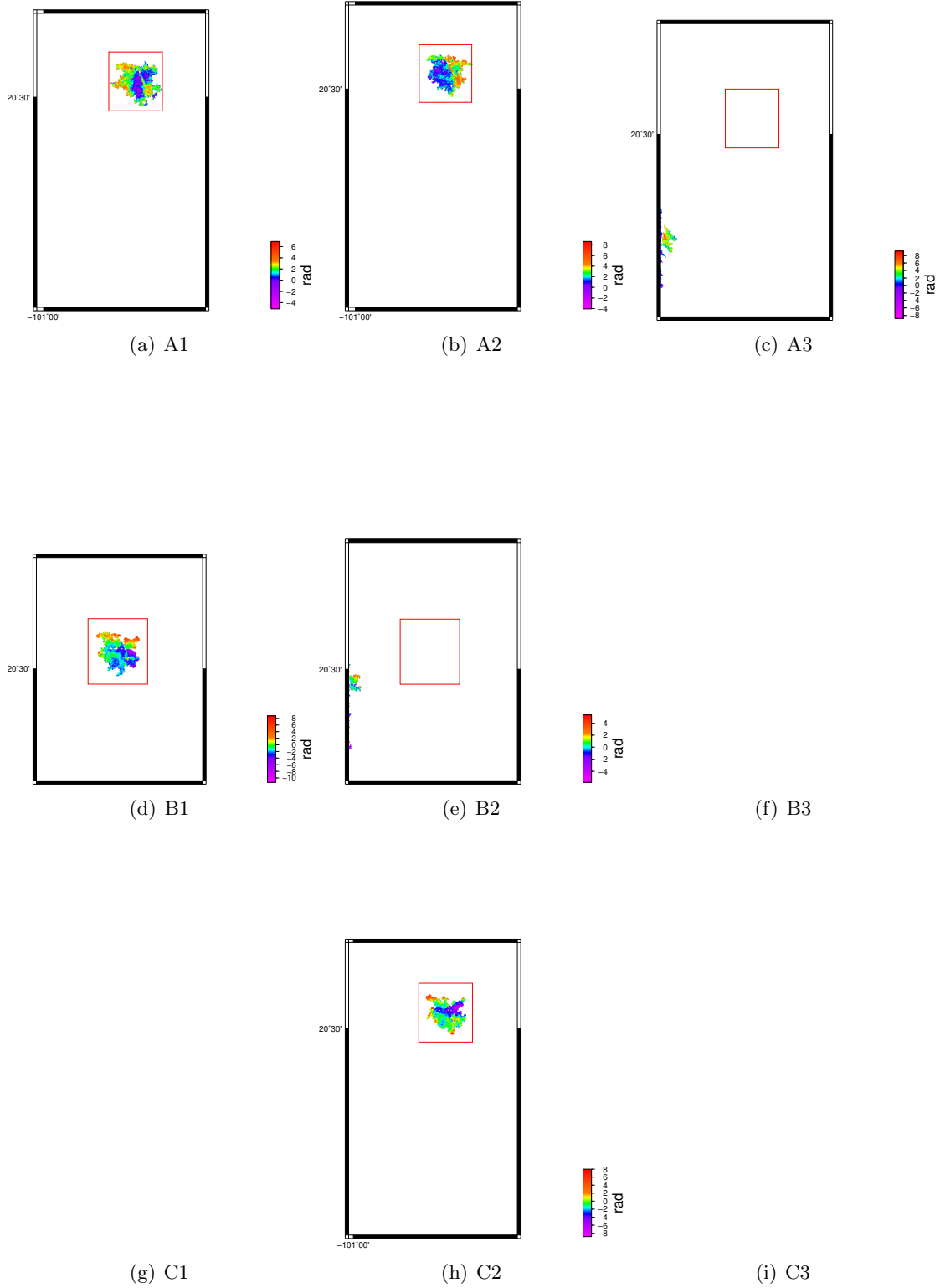


Figura A-14: Método de desenvolvimiento: icu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

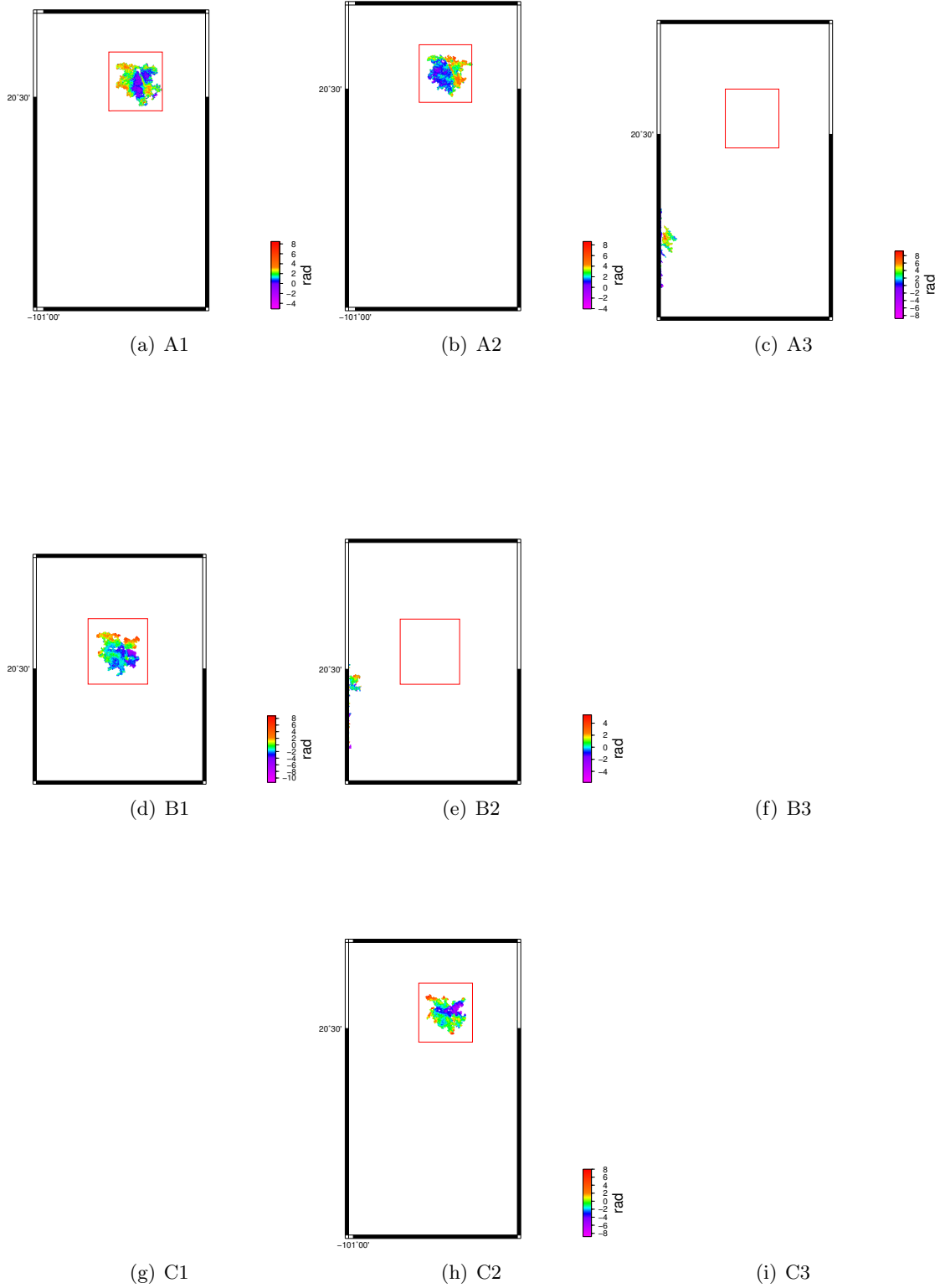


Figura A-15: Método de desenvolvimento: icu, Umbral de desenvolvimento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

## Apéndice B

# Interferogramas procesados con SNAPHU.

Se presentan sets de 2 interferogramas seleccionados de las categorías A1 y A2, procesados con **SNAPHU**, dispuestos según los parámetros de procesamiento definidos en la sección 5.2.

Los sets de interferogramas están conformados como se ilustra en la tabla B-1.

Set	Figura	Método de desenvolvimiento	Umbral de desenvolvimiento	Filtro	Intensidad de filtro	”Semilla”
1	B-1 al B-6	SNAPHU	0.1, 0.4	psfilt	0.3, 0.6, 0.9	Centro de la imagen
2	B-7 al B-12	SNAPHU	0.1, 0.4	psfilt	0.3, 0.6, 0.9	Zona industrial de Celaya
3	B-13 al B-15	SNAPHU	0.1, 0.4	adapt_filt	0.3, 0.6, 0.9	Centro de la imagen
4	B-19 al B-21	SNAPHU	0.1, 0.4	adapt_filt	0.3, 0.6, 0.9	Zona industrial de Celaya

Tabla B-1: Sets de interferogramas.

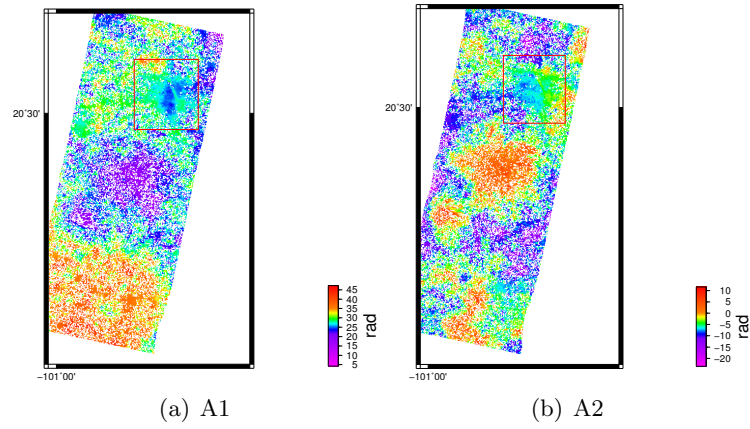


Figura B-1: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen.

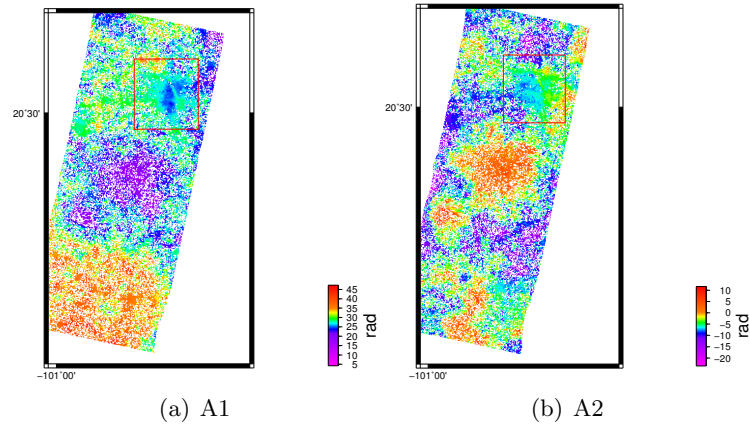


Figura B-2: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen.

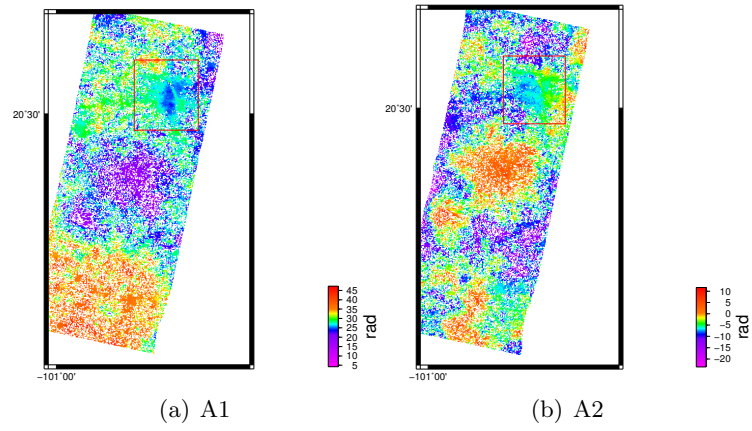


Figura B-3: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen.

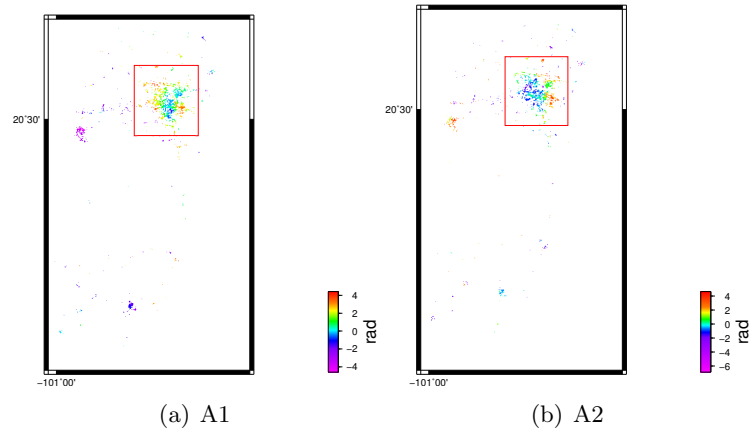


Figura B-4: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen.

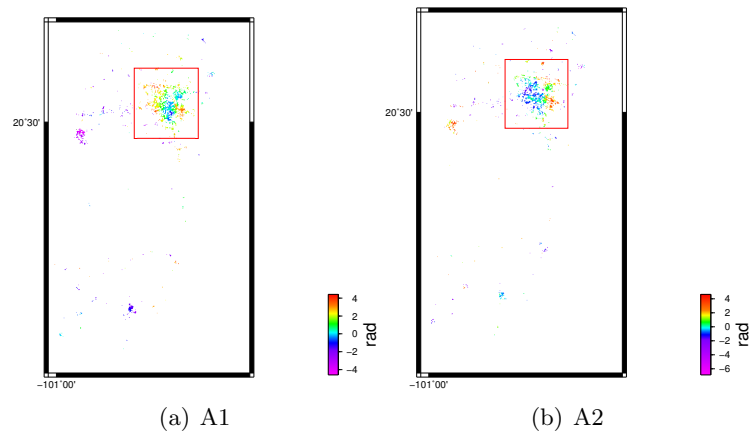


Figura B-5: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen.

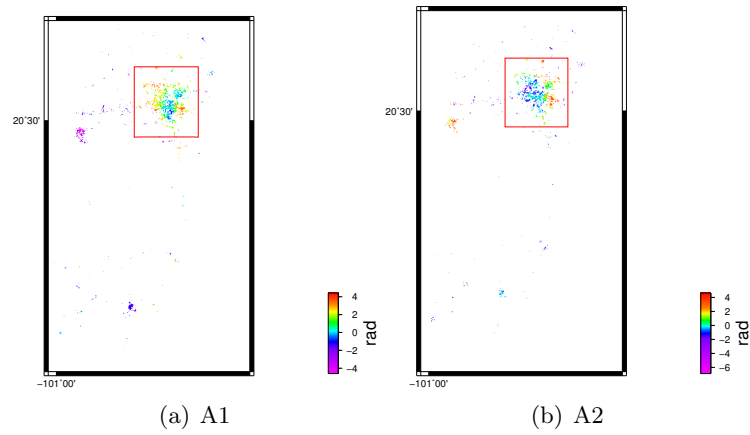


Figura B-6: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen.



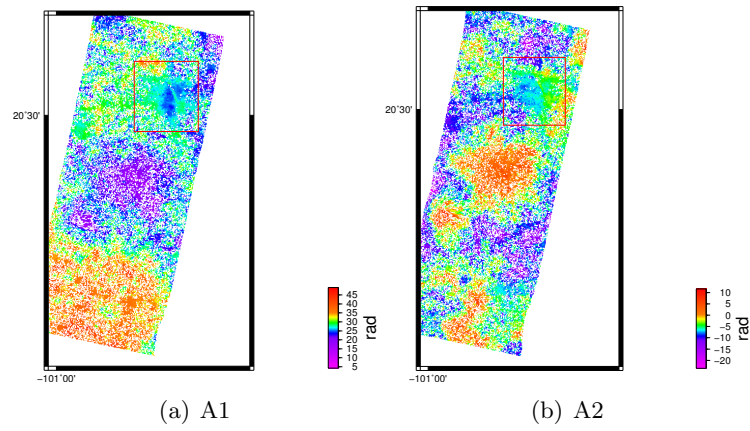


Figura B-7: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

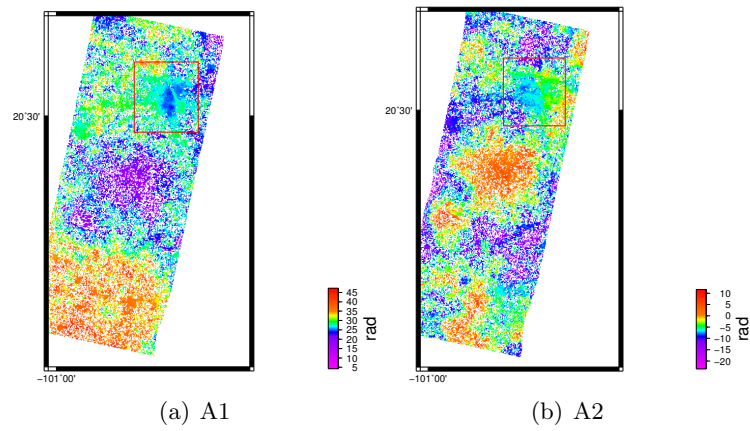


Figura B-8: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

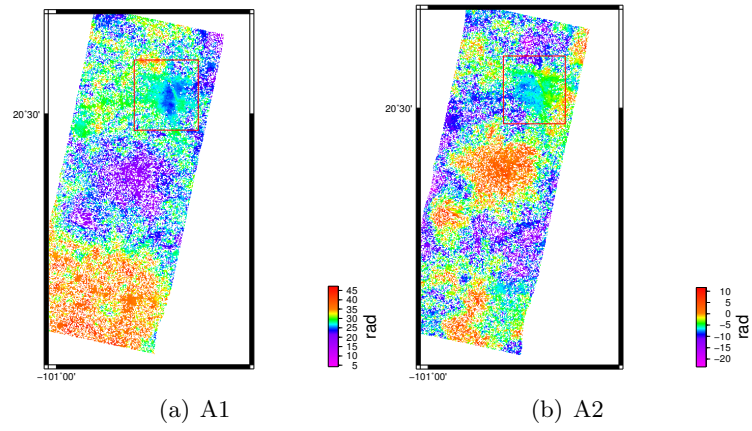


Figura B-9: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

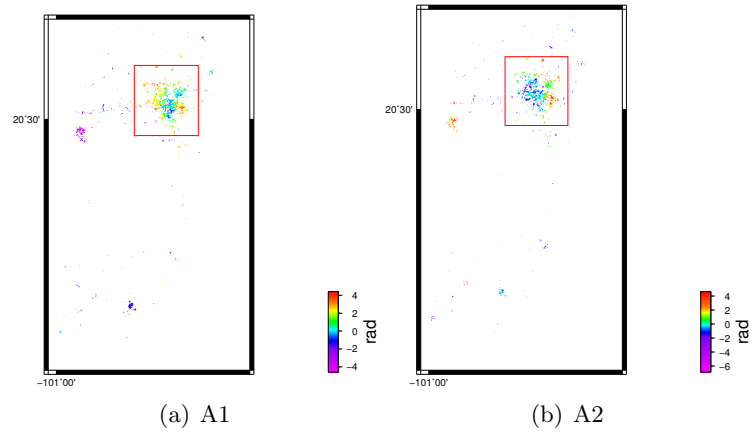


Figura B-10: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

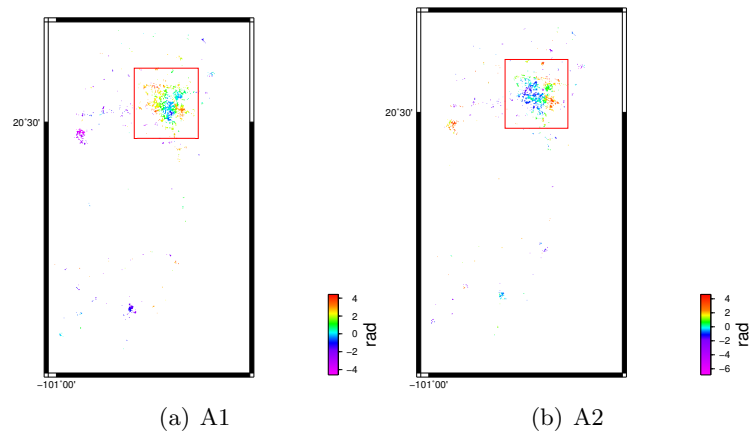


Figura B-11: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

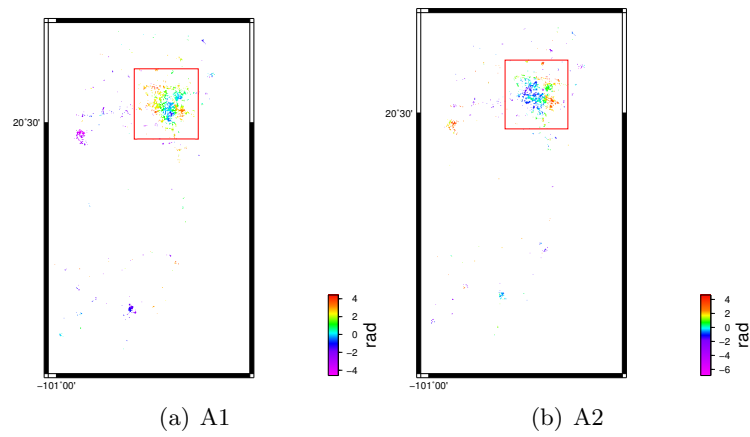


Figura B-12: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: psfilt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

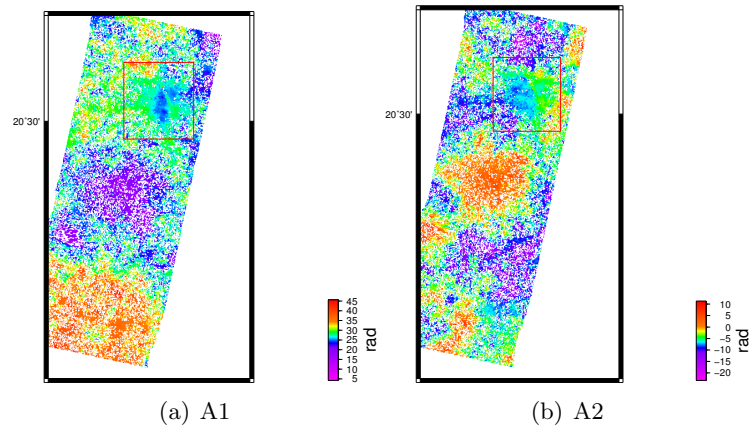


Figura B-13: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen.

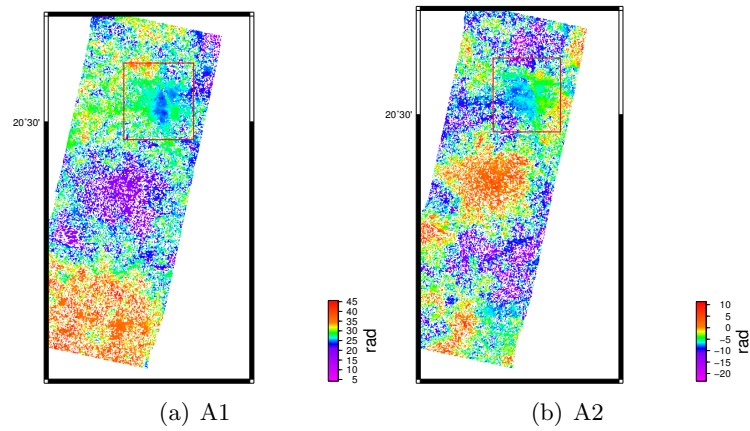


Figura B-14: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen.

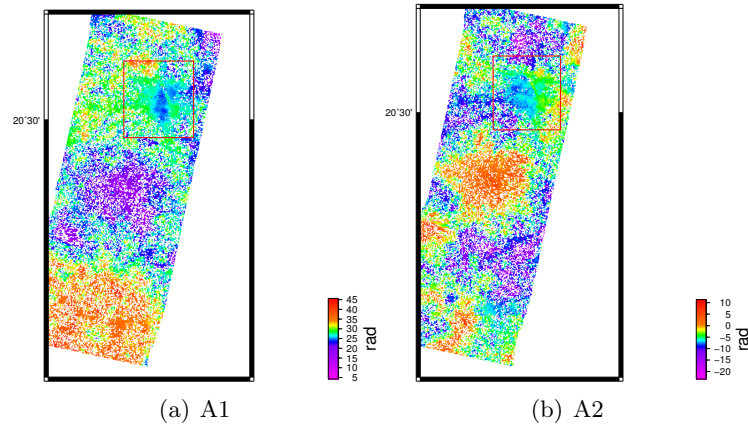


Figura B-15: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen.

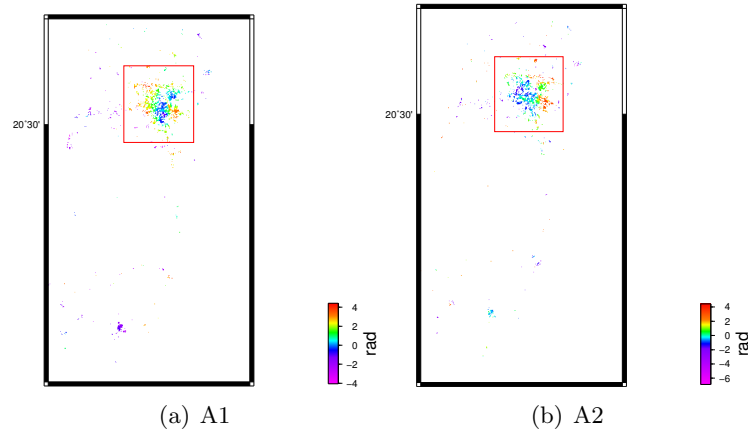


Figura B-16: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: centro de la imagen.

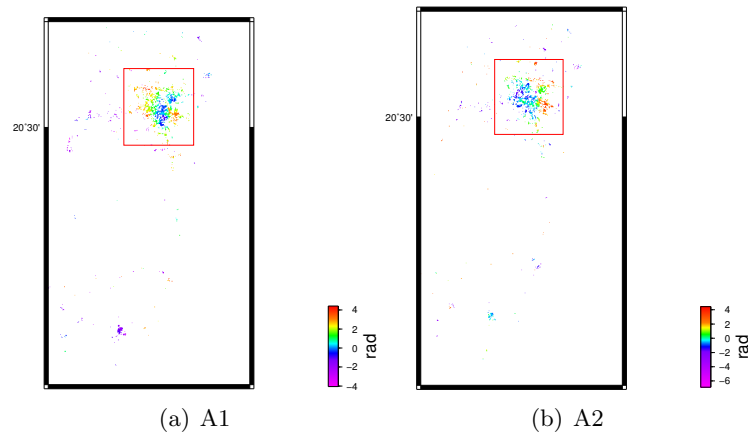


Figura B-17: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: centro de la imagen.

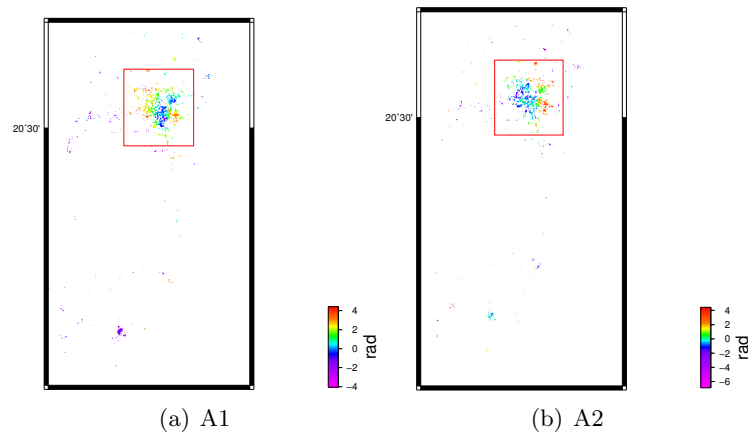


Figura B-18: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: centro de la imagen.

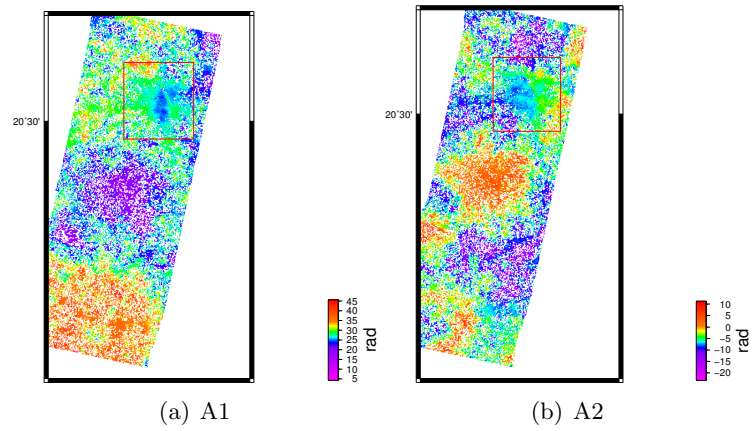


Figura B-19: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

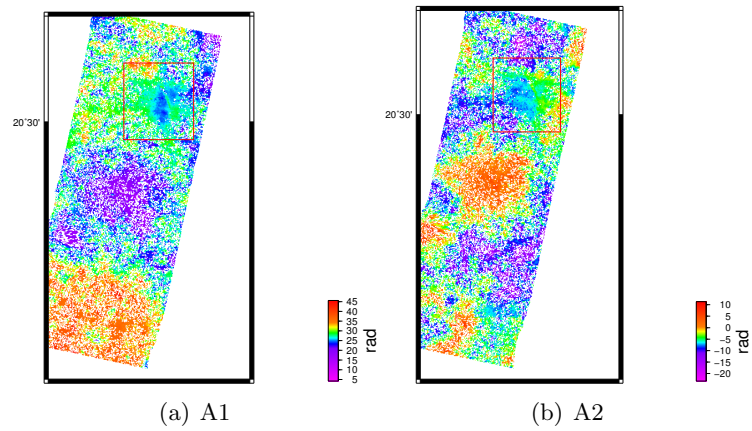


Figura B-20: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

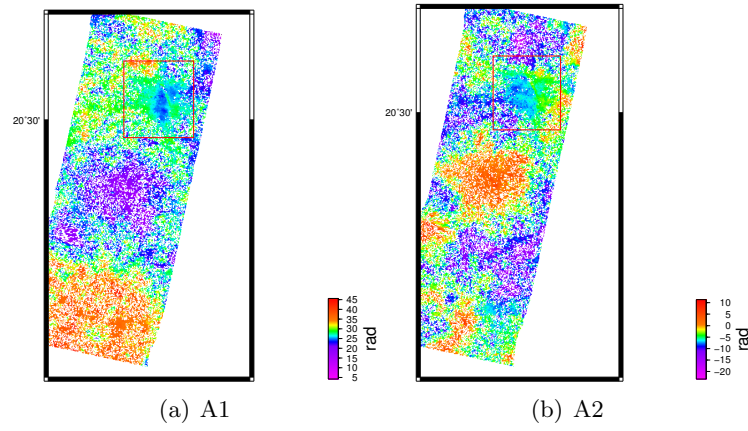


Figura B-21: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.1, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

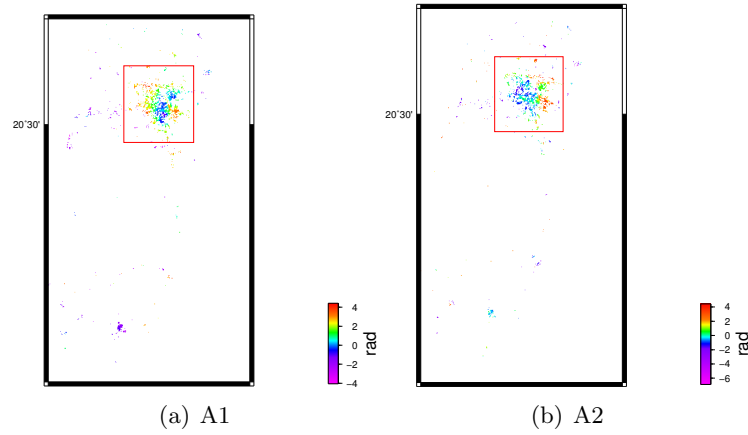


Figura B-22: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.3, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.



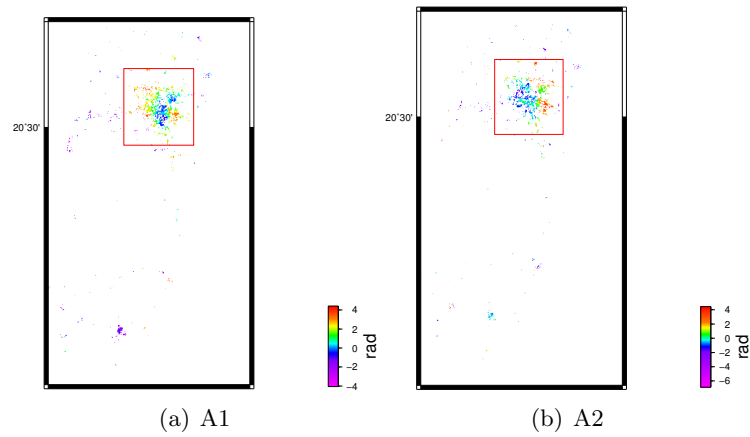


Figura B-23: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.6, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

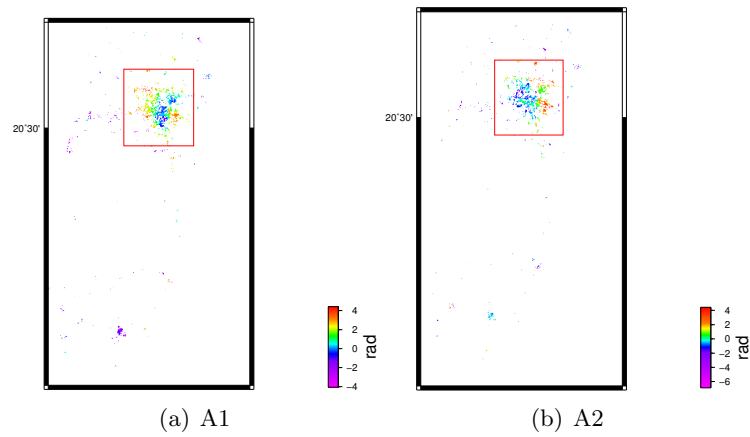


Figura B-24: Método de desenvolvimiento: snaphu, Umbral de desenvolvimiento: 0.4, Filtro: adapt\_filt, Intensidad de filtro: 0.9, Punto de inicio: Zona industrial de Celaya.

## Apéndice C

# Obtención e instalación de ROI\_PAC

ROI\_PAC es un software bajo licencia. La nueva versión (v.3.0.1) tiene un sistema de instalación muy diferente en comparación con versiones previas (v.3.0 y anteriores). La manera más fácil de compilarlo se explica en el archivo

ROI\_PAC\_3\_0\_1/ROI\_PAC/AAREADME\_BUILD\_ROIPAC

El software aquí mencionado y todos los pasos para su instalación fueron probados sobre el sistema Xubuntu v.12.0.4 Precise Pangolin x64 bits. En versiones posteriores (13.04 en adelante) de Xubuntu han surgido complicaciones con las versiones de los compiladores y librerías que a lo largo del proceso se irán requiriendo. Para sistemas MAC OS se recomienda ver el apéndice 1 de Pritchard [2014].

### C.1. Requisitos Previos

Para instalar ROI\_PAC se deben tener previamente instalados los compiladores **cc**, **gcc** y **gfortran**, su instalación es directamente con terminal:

```
%sudo apt-get install cc gcc gfortran
```

También se recomienda instalar el paquete **curl** para algunos comandos que se solicitan durante la instalación

```
%sudo apt-get install curl
```

## C.2. Instalación

Descomprimir y desempaquetar el archivo

```
%tar-xzf ROI_PAC_3_0_1.tgz
```

Lea el archivo de texto ROI\_PAC\_3\_0\_1/README y la documentación adicional que se encuentra en ROI\_PAC\_3\_0\_1/ROI\_PAC/DOC.

```
%cd ROI_PAC_3_0_1 less AAREADME
```

Los siguientes comandos se ejecutan uno a la vez y de forma sucesiva, con algunas modificaciones que el usuario deberá realizar (principalmente la correcta asignación de rutas).

Nos colocamos en el directorio principal:

```
%cd ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC
```

Ejecutamos el software de control del sistema para conservar todas las modificaciones hechas a los archivos de ROI\_PAC:

```
%touch alocal.m4 Makefile.in configure
```

Se instalan las librerías de Transformada Rápida de Fourier y configuramos las variables de ambiente:

```
%./contrib/install-fftw.sh CC=cc
```

```
%export FFTW_LIB_DIR=ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/NetInst/fftw-ddmmyy-hhmm/lib
```

```
%export FFTW_INC_DIR=ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/NetInst/ffw-ddmmyy-hhmm/include
```

Verificar que las variables de ambiente se encuentren en los siguientes directorios:

```
ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/NetInst/fftw-date-time/lib
```

debe contener el archivo libfftw3f.a

```
ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/NetInst/fftw-date-time/include
```

debe contener el archivo `fftw3.f`.

Compilamos ROI\_PAC:

```
./contrib/multibuild.sh
```

Éste comando compila y prueba el paquete de software con varios compiladores. Al probar la compilación, necesitaremos descomprimir los datos de prueba antes de ejecutar el script *multitest.sh*.

```
%ls
```

```
ROI_PAC_3_0_1      ROI_PAC_3_0_1.tgz      roi_pac_test.dir.gz
```

```
%gunzip roi_pac_testdir.tar.gz
```

```
%cd ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/TEST-RUNS
```

```
%../contrib/multitest.sh/full\_path/roi\_pac\_testdir.tar
```

```
/ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/multibuild-ddmmy-hhmm/installs/share/roi_pac
```

```
/ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/multibuild-ddmmy-hhmm/installs/defaults/bin
```

```
/ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/multibuild-ddmmy-hhmm/installs/gfortran/bin
```

Cada prueba toma aproximadamente 40 minutos dependiendo del equipo. Si la prueba es satisfactoria, el producto final es el archivo *geo\_930110-950523.unw* que esta ubicado dentro del directorio *test-runs/defaults/TEST\_DIR/int\_930110-950523*. El archivo esta compuesto de valores de punto flotante en un formato de bandas intercaladas, alternándose en líneas de magnitud y fase. El tamaño del archivo debe ser un poco menos de 10 MB. Los metadatos de la imagen se pueden encontrar en el archivo *geo\_93011-950523.unw.rsc*.

### C.3. Instalación de Ejecutables

Crear un nuevo directorio llamado INT\_BIN donde se colocarán los ejecutables finales.

```
% mkdir ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/INT_BIN
```

Sólo es necesario copiar los archivos de alguna compilación exitosa hecha con el script *multibuild.sh* alojados en ROI\_PAC\_3.0.1/ROI\_PAC/multibuild\*/installs.

```
%cd ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/multibuild*/installs/defaults/bin
%cp * ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/INT_BIN/
```

Posteriormente, es muy recomendable colocar en éste directorio todos los ejecutables que se vayan creando de otros subprogramas que seguramente el usuario encontrará de acuerdo a sus necesidades.

## C.4. Configuración del archivo SAR\_CONFIG

El script de shell SAR\_CONFIG controla la ubicación del código y scripts. Una vez configurado correctamente, las herramientas de ROI\_PAC deberán estar disponibles para el usuario.

El archivo SAR\_CONFIG describe la ubicación de las variables de entorno necesarias que apuntan a los programas y scripts de Perl que utiliza ROI\_PAC, así como la ubicación de los datos de órbitas, entre otros. ROI\_PAC no funcionará si no se establecen correctamente. Se muestra un ejemplo de configuración de las variables en estilo csh y bash. Si utiliza un shell diferente es posible que necesite cambiar la sintaxis del SAR\_CONFIG. Por ejemplo:

```
csh: setenv SAR /home/insar
bash: export SAR=/home/insar
```

Un ejemplo de un archivo SAR\_CONFIG completo sería el siguiente:

```
export SAR=/home/carlos/insar/ROI_PAC_3_0_1
export MY_SAR=$SAR

export SAR_ODR_DIR=$SAR/orbits/ODR
export SAR_PRC_DIR=/home/carlos/insar/TEST_DIR_adapt/PRC

export ROI_PAC=$SAR/ROI_PAC
```

```

export FFTW_LIB=$SAR/NetInst/fftw-150226-2349/lib
export INT_LIB=$ROI_PAC/multibuild-150226-2353/gfortran/LIB/

export INT_BIN=$SAR/ROI_PAC/INT_BIN
export INT_SCR=$SAR/ROI_PAC/INT_SCR

#export INS_DIR=$SAR/INS
export INS_DIR=/home/carlos/insar/BAJA/Envisat/INS
export PATH=$PATH:/home/carlos/insar/BAJA/Envisat/vor

export SAR_ENV_ORB=$SAR_ODR_DIR/Envisat

export PATH=$PATH:$INT_BIN:$INT_SCR
export PATH=$PATH:/usr/lib/x86_64-linux-gnu
export PATH=$PATH:/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/4.6

```

En éste archivo de ejemplo se muestran además las rutas de acceso a los archivos de órbita ERS (SAR\_PRC\_DIR y SAR\_ODR\_DIR), los archivos de órbita Envisat (POR\_DIR y VOR\_DIR), también se definen los directorios INT\_BIN e INT\_SCR. Si se está utilizando csh ó sh, se utiliza la sintaxis **setenv** en lugar de **export**. Cada vez que se desee trabajar en ROI\_PAC debe indicarse la instrucción para cargar la información desde la terminal, indicando la ruta del archivo:

```
% source /ruta_completa/SAR_CONFIG
```

Tambien podemos agregar las rutas a mdx, getorb u otro software relacionado.

```
export MDX="/ruta_completa/mdx/bin" export
```

```
FFTW_LIB="/ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/NetInst/fftw-071005-1457/lib" export
PATH="$PATH:$INT_BIN:$INT_SCR:$MDX"
```

Éste archivo de configuración no tiene un lugar específico donde situarse, sin embargo, se recomienda colocarlo en el directorio principal de ROI\_PAC para tener acceso a él rápidamente.

Otra forma de exportar variables de ambiente, es directamente sobre el archivo *.profile* ó *.bashrc* dentro del directorio principal del usuario, simplemente copiando y pegando el contenido de éste archivo SAR\_CONFIG en alguno de ellos; para usuarios que apenas se están familiarizando con Unix/Linux y ROI\_PAC es una forma rápida de comprender el funcionamiento de las variables de ambiente, ya que directamente sobre éstos archivos se pueden declarar no sólo para ROI\_PAC sino para cualquier software que lo requiera; a largo plazo el usuario encontrará la manera que más le sea conveniente, teniendo en cuenta que al exportar directamente sobre el *.bashrc* (o el *.profile*) su ordenador demorará mucho más en inicializar, así como puede crear confusión la cantidad de información en un solo archivo.

Por último, para tener acceso a ROI\_PAC de manera práctica se recomienda utilizar un *alias* donde se indique la instrucción de *source* antes mencionada, de tal manera que creemos un comando que nos permita cargar el archivo, sin importar en que directorio nos encontremos; ésto se hace escribiendo la siguiente línea en el archivo *.bashrc*:

```
alias sar='source /ruta_completa/ROI_PAC_3_0_1/SAR_CONFIG'
```

donde creamos un nuevo comando llamado *sar* que es equivalente a desplazarse al directorio del archivo SAR\_CONFIG y cargarlo con la instrucción completa.

## C.5. Actualización de rutas a Perl

La ruta de acceso al archivo ejecutable de Perl puede ser diferente en el equipo al que se utiliza en los scripts de ROI\_PAC. Puede comprobar si este paso es necesario mediante la comparación de las rutas en los siguientes comandos:

```
% cd ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/INT_SCR
% grep perl make_raw.pl #!/usr/bin/perl
% which perl /usr/bin/perl
```

El ejemplo anterior muestra que no hay cambios necesarios. Si las rutas son diferentes, hay un simple script en ROI\_PAC\_3\_0\_1/ROI\_PAC/INT\_SCR que se debe editar para todos los scripts de Perl.

```
% cd ROI_PAC_3_0_1/ROI_PAC/INT_SCR  
% chgperlpath.pl
```



## Apéndice D

# Tipos de archivo ROI\_PAC y Formatos de Archivo

A grandes rasgos, la salida de archivos por ROI\_PAC tiene 4 tipos básicos:

- 1) Archivos ASCII utilizados para la entrada o salida de los programas (sufijos: .out, .in, .OFF)
- 2) Archivos binarios reales o complejos:
  - a) Formato RMG (Nombre del pionero en radar Richard M. Goldstein del JPL) se componen de números tipo real \* 4 (32 bytes) en dos matrices lado a lado; éstas normalmente contienen la magnitud y fase de la imagen -en algunos casos, correlación en lugar de fase-. La longitud y ancho de cada matriz se encuentran en el archivo de metadatos (.rsc). El ancho total del archivo binario es igual al doble del ancho de la matriz y los datos se almacenan como (magnitud, magnitud, magnitud....., fase, fase, fase,.....).
  - b) Archivos complejos (o *c8*), contienen valores reales e imaginarios que se almacenan en el archivo binario como (real, imaginario, real, imaginario, etc.)
- 3) Archivos ASCII de metadatos (terminación .rsc - *resource*) asociados a cada archivo binario; y un registro de los cambios realizados en el archivo de metadatos (.rsc.hst, -archivo histórico).
- 4) Archivos ASCII que registran los comandos que se han ejecutado en ROI\_PAC; éstos proporcionan un registro de los comandos que se han ejecutado y el tiempo en que se realizaron.

Durante la depuración a menudo se puede simplemente copiar y pegar estos comandos modificando uno o mas valores. El archivo *log1* muestra la información que fue escrita por los scripts en pantalla, pero por desgracia, usualmente no incluye los mensajes de error.

A continuación se describen las características específicas de estos archivos divididos en dos categorías: archivos de entrada (creados por el usuario) y de salida (generados automáticamente por ROI.PAC) divididos por el sufijo del nombre de archivo.

Archivos de entrada:

- a) \*.proc: Archivo de texto ASCII que especifica los parámetros utilizados en el procesamiento, hay dos tipos principales: los archivos *int\*.proc*, para crear los interferogramas (requerido, el sufijo puede ser diferente) y opcionalmente el archivo *roi.proc* (o *ddmmyyyy.proc*) que se utilizan para crear las slc's.
- b) \*.dem: Archivo binario que contiene el modelo digital de elevación (en coordenadas geográficas o UTM), compuesto por valores enteros con signo de 2 bytes (en metros, a menos que se especifique otra escala). Una cuestión importante a considerar cuando se comparan resultados de InSAR con GPS u otra técnica es si las alturas en el archivo DEM se refieren al elipsoide o al geoide. El contenido del archivo .rsc es:
  - WIDTH: número de columnas.
  - FILE\_LENGTH: número de filas.
  - X\_FIRST: longitud de la esquina superior izquierda.
  - Y\_FIRST: latitud de la esquina superior izquierda.
  - X\_STEP: tamaño de pixel (longitud) en grados para *lat/lon*, metros para UTM.
  - Y\_STEP: tamaño de pixel (latitud) en grados para *lat/lon*, metros para UTM.
  - X\_UNIT: grados o metros.
  - Y\_UNIT: grados o metros.

Archivos de salida:

- a) \*.off = Archivo de texto ASCII de offsets medidos entre dos imágenes. Columnas 1=X, 2=Dx, 3=Y, 4=Dy, 5=relación señal-ruido, otras columnas corresponden con las tres componentes de la covarianza.
- b) \*.in = Archivo de texto ASCII creado por los scripts de ROI.PAC, usado como entrada para algún programa.
- c) \*.out = archivo de texto ASCII a la salida de un programa.
- d) \*.hgt = Archivo binario con la amplitud simulada y la elevación en coordenadas radar, dispuesto como valores reales de 4 bytes intercalados por línea (BIL o rmg).
- e) \*.slc = Archivo binario con valores reales y complejos de 8 bytes que contiene las partes real e imaginaria de la imagen SLC (y las versiones de múltiple-observación de la SLC).
- f) \*.cor = Archivo binario con la amplitud promedio de la imagen usado para formar un interferograma y medir la correlación de coherencia, dispuesto como valores reales de 4 bytes intercalados por línea (BIL o rmg).
- g) \*.raw = Archivo binario de datos crudos I/Q, valores enteros de 1 byte por cada muestra.
- h) \*.aff = Archivo de texto ASCII de transformación de afinación para mapear la imagen simulada a la imagen SAR actual.
- i) \*.unw = Archivo binario que contiene la amplitud de imagen y fase desenvuelta, dispuesto en valores reales de 4 bytes intercalados por línea (BIL o rmg). Las unidades del archivo son radianes y pueden convertirse a centímetros multiplicando por la longitud de onda del radar y dividiendo entre  $4\pi$ . NOTA: los valores de cambio de fase en éste archivo son relativos, es decir, una fase de cero radianes puede ser 1 m ó -1 m, u otro valor que deba ser limitado de otro modo.
- j) \*.flg = Archivo binario con *flags* (indicadores o etiquetas) utilizado y resultado del desenvolvimiento de fase con el método estándar, valores de 1 byte con los flags expresados en bits.

- k) \*.int = Archivo binario de valores reales complejos (8 bytes) que contiene las partes real e imaginaria del interferograma (puede ser leído como valores reales o flotantes intercalados por pixel).
- l) .amp = Archivo binario con las amplitudes de las dos imágenes SAR usadas para formar el interferograma, dispuesto como valores reales de 4 bytes intercalados por línea (puede ser leído como valores complejos de 8 bytes).
- m) \*.msk = Archivo binario con la amplitud de la imagen SAR y la coherencia con ceros en áreas con enmascaramiento, dispuesto como valores reales de 4 bytes intercalados por línea (BIL o rmg).
- n) \*.trans = Archivo binario con la transformación de correspondencia inversa de coordenadas SAR a DEM, dos bandas son la ubicación del pixel (rango y acimut) del SAR por cada pixel del DEM, dispuesto como valores reales de 4 bytes intercalados por línea (BIL o rmg).

Los nombres de archivo antes del sufijo son una descripción abreviada de los pasos que fueron efectuados para crear el archivo, por ejemplo:

- \*rlks\* Especifica el numero de observaciones equiespaciadas tomadas del interferograma a resolución completa, o, para un archivo geocodificado, con la resolución del mismo.
  - filt\_\* Significa que el archivo ha sido filtrado mediante el script *filter.pl*.
  - \*-sim\* Significa que se ha removido la simulación topográfica del interferograma.
  - flat\_\* Se han removido efectos de órbita (*flattening* o aplanamiento).
  - geo\_\* El archivo ha sido geocodificado.
  - SIM\_\* El DEM se ha convertido a coordenadas radar (interferograma simulado) usando la información orbital, pero sin un ajuste muy fino de la posición.
  - radar\_\* El DEM se ha convertido a coordenadas radar (interferograma simulado) usando la información orbital, con ajuste fino de la posición (éste archivo es creado después de SIM\_\*)
- radar\_\*.unw es creado por el script *diffnsim.pl* e incluye los efectos topográficos y de órbita.

radar\_\*.hgt ess creado por el script rect.pl e incluye únicamente los efectos topográficos.

- ramp\_\* La rampa de fase orbital creada por el script diffnsim.pl sin efectos topográficos.

- \*SIM\*, \*ODR\*, \*PRC\* o \*HDR\* significa que el efecto orbital fue removido usando el siguiente tipo: removed using the given type:

ODR = datos de órbita *Delft*.

PRC = DPAF.

SIM = Línea base re-estimada.

HDR = Archivo de cabecera (para Envisat, las órbitas precisas son llamadas HDR).

## Apéndice E

# Instalación de MDX

Los pasos de instalación que a continuación se describen se realizaron sobre la versión **190\_79\_03** de MDX, funcionando en Xubuntu v.12.0.4 Precise Pangolin x64 bits.

### E.1. Requisitos Previos

Primero debemos instalar las siguientes librerías de lesstif y motif:

**lesstif**: lestiff2, xmhtml1, libxt6, libxt-dev **motif**: tk8.4, libmotif-dev, libmotif4, motif-clients

Todas éstas pueden instalarse de forma manual desde línea de comandos con la siguiente sintáxis:

```
% sudo aptitude install nombre_libreria
% sudo apt-get install nombre_libreria
```

Para facilitar las cosas, se utilizó el gestor de paquetes Synaptic (incluido en la distribución de Linux utilizada); se recomienda éste segundo método pues se requerirá para encontrar fácilmente las direcciones de cada una de las librerías.

### E.2. Instalación

Copiar el archivo mdx\_version.tar.gz dentro de la carpeta DGX\_MDX de ROIPAC o al directorio de su preferencia. Descomprimir el archivo mdx\_version.tar.gz:

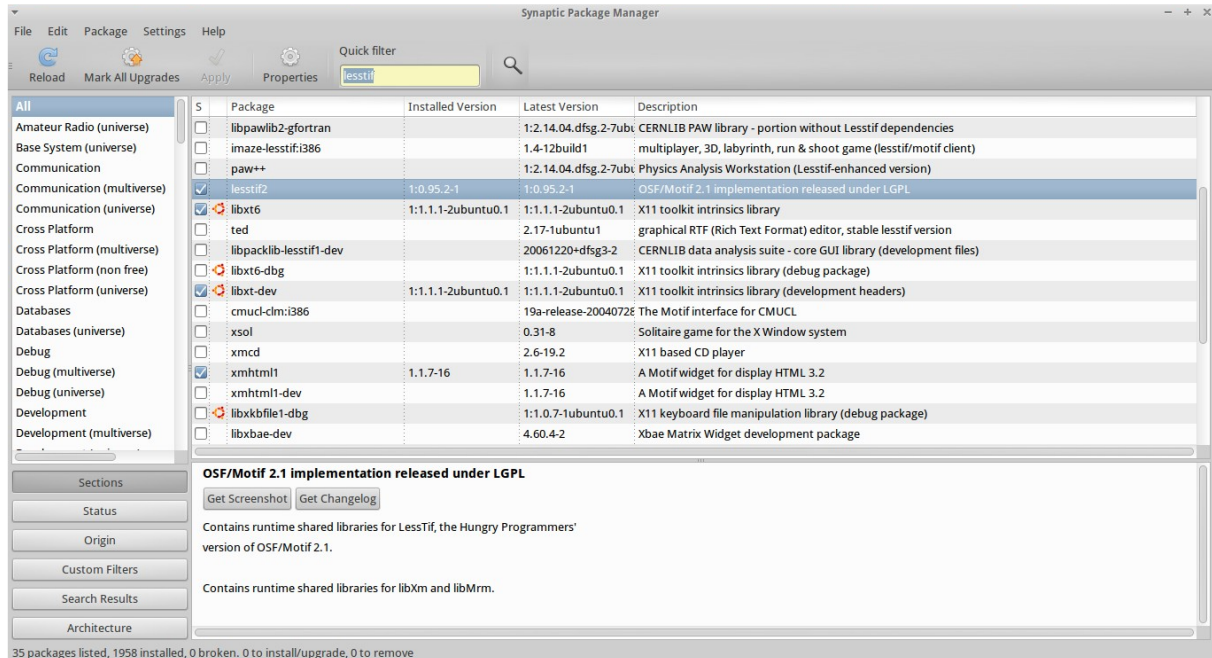


Figura E-1: Búsqueda de una librería en el gestor de paquetes Synaptic.

```
% tar xvf mdx_version*.tar
```

Entrar al directorio de MDX:

```
% cd mdx_version
```

Remover archivos \*.o y ejecutables previos, si es que existen:

```
% rm -f *.o
```

```
% rm mdx
```

Ahora editamos el archivo `Makemdx_gfortran`, indicando los compiladores y la ruta donde desea instalar `mdx`.

**Importante:** deben indicarse las rutas *include* y las rutas *lib* de cada una de las librerías que se instalaron en los prerequisites; las cuales podemos verificar desde el gestor de paquetes Synaptic, tecleando en el buscador el nombre de la librería (figura E-1).

Verificamos que la columna **Installed Version** se encuentre llena con la versión instalada, damos botón derecho y luego **Properties**, y en la ventana emergente nos vamos a la opción **Installed files** (figura E-2).

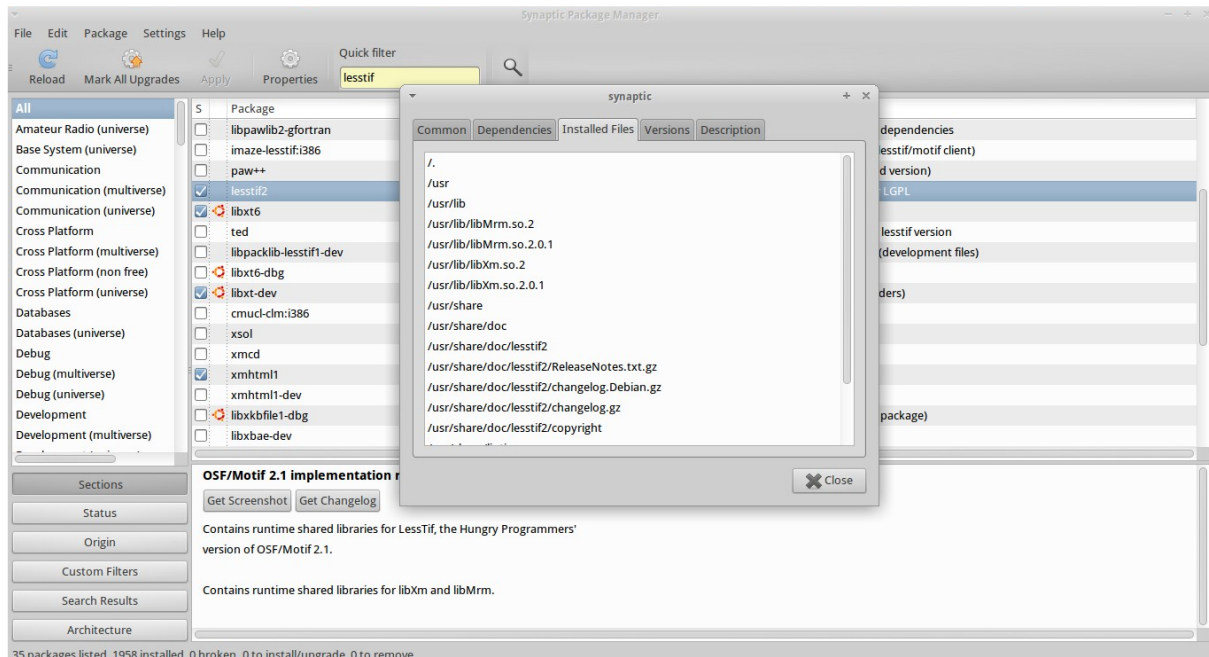


Figura E-2: Archivos de instalación de una librería.

en donde observamos que para el ejemplo, únicamente tenemos rutas lib:

```

/usr
/usr/lib
/usr/lib/libMrm.so.2
/usr/lib/libMrm.so.2.0.1
/usr/lib/libXm.so.2
/usr/lib/libXm.so.2.0.1

```

Otro ejemplo, para la librería libmotif4, donde las rutas sombreadas de la figura E-3 son las rutas **include** y en la figura E-4 son las rutas **lib**.

Dentro del archivo pondremos entonces, para las librerías **include**:

```
XINC= -I/direcci\'on_completa1 -I/direcci\'on_completa2 (...etc)
```

y para las librerías **lib**:

```
XLIB= -L/direcci\'on_completa1 -L/direcci\'on_completa2 (...etc)
```



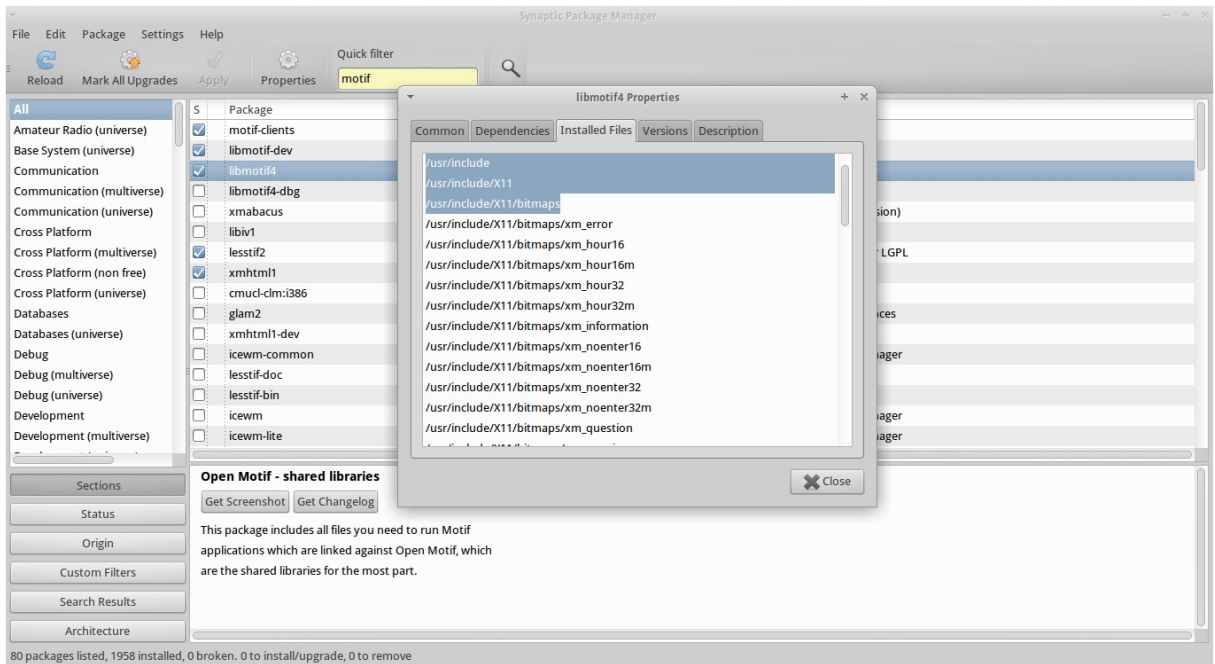


Figura E-3: Rutas **include** de la librería libmotif4.

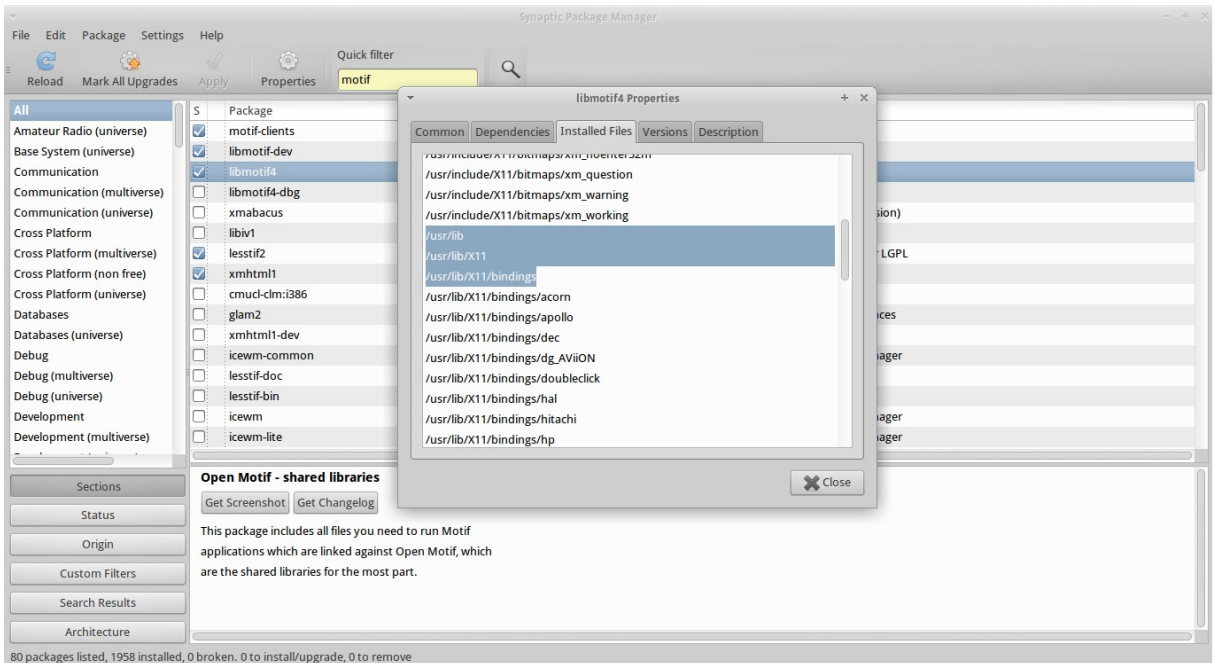


Figura E-4: Rutas **lib** de la librería libmotif4.

**Importante:** Se deben indicar cada uno de los subniveles en un -I ó -L

```
-I/usr/include -I/usr/include/Mrm -I/usr/include/X11 -I/usr/include/X11/Xtrans  
-I/usr/include/X11/bitmaps
```

Puesto que en cada una de dichas direcciones (ver en Installed Version/Properties/Installed files de la ventana de Synaptic) se encuentran archivos que el compilador requerirá para generar el ejecutable de MDX.

A continuación se muestra un ejemplo del contenido modificado del archivo.

```
FC = gfortran  
# FFLAGS = -DM10 -ffixed-line-length-none -O  
FFLAGS = -DI064 -ffixed-line-length-none -O  
CC = gcc  
# CFLAGS = -DM10 -O  
CFLAGS = -DSUN -DI064 -O  
XINC = -I/usr/lib/x86_64-linux-gnu/pkgconfig -I/usr/include -I/usr/include/X11/Xtrans  
-I/usr/include/X11 -I/usr/include/X11/bitmaps -I/usr/include/Mrm -I-I/usr/include/Xm  
  
XLIB = -L/usr/lib -L/usr/lib/X11 -L/usr/lib/bindings -L/usr/lib/x86_64-linux-gnu -lXm  
-lXt -lX11  
  
LIB = -lm  
LC = gfortran  
XTARGS = mdx  
all: $(XTARGS)  
graphx_mdx.o : graphx_mdx.c  
$(CC) $(CFLAGS) $(XINC) -c graphx_mdx.c  
mdx.o : mdx.F  
$(FC) $(FFLAGS) -c mdx.F  
rdf_reader_subs.o : rdf_reader_subs.f  
$(FC) $(FFLAGS) -c rdf_reader_subs.f
```

```
mdx : mdx.o graphx_mdx.o rdf_reader_subs.o
```

```
$(LC) mdx.o graphx_mdx.o rdf_reader_subs.o -o mdx -force_flat_namespace $(XINC)  
$(XLIB) $(LIB)
```

Compilamos el programa con la instrucción:

```
% make -f Makemdx_gfortran
```

**NOTA:** Esto debe crear un archivo ejecutable llamado **mdx**. Durante el proceso de compilación aparecerán varios mensajes de alerta (warnings).

Finalmente copiar el ejecutable al directorio INT\_BIN o donde tengamos todos nuestros binarios de ROIPAC. **NOTA:** Revisar que las rutas se encuentren correctamente en el .bashrc ó .profile según sea el caso.

Para visualizar un archivo (MDX reconoce archivos de tipo: \*.slc, \*.int, \*.cor, \*.unw, \*.amp, \*.hgt, \*.hgt\_holes, \*.dem, \*.dte, \*.dtm, \*.rect, \*.msk, \*.byt, \*.flg) tecleamos en la terminal:

```
% mdx.pl nombre_archivo.tipo
```

# Bibliografía

- AHUJA, R., MAGNANTI, T., Y ORLIN, J. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall (1993)
- BÄHR, H. *Orbital Effects in Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry*. 1<sup>a</sup> edición. Karlsruher Institute für Technologie Scientific Publishing (2013)
- BAMLER, R. Y HARTL, P. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Inverse Problems* **14**:R1–R54 (1998)
- FERRETTI, A., MONTI-GUARNIERI, A., PRATI, C., Y ROCCA, F. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. 1<sup>a</sup> edición. ESA Publications (2007)
- FIELDING, E. *ROI\_pac Internals*. 1<sup>a</sup> edición. UNAVCO (2009)
- FRANCESCHETTI, G. Y LANARI, R. *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC Press (1999)
- GHIGLIA, D. Y PRITT, M. in *Two-Dimensional Phase Unwrapping - Theory, Algorithms, and Software*. John Wiley and Sons (1998)
- GOLDSTEIN, R., ZEBKER, R., Y WENER, H. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping. *Radio Science* **23**:713–720 (1988)
- GOLDSTEIN, R.M. Y WERNER, C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters* **25**:4035–4038 (1998)
- GOLDSTEIN, R. Y ZEBKER, H. Interferometric radar measurement of ocean surface currents. *Nature* **328**:707–709 (1987)

- GOLDSTEIN, R., ENGELHARDT, H., KAMB, B., Y FROLICH, R. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream. *Science* **262**:1525–1530 (1993)
- JARAMILLO, S.I.H. *Análisis de series temporales de la subsidencia en cuencas en el centro de México obtenidas a partir de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR): Caso Morelia*. 1ª edición. Instituto de Geofísica, UNAM (2012)
- MASSONET, D. Y FEIGL, K. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics* **36**:441–500 (1998)
- MASSONNET, D., ROSSI, M., Y CARMONA, C. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* **364**:138–142 (1993)
- OLVERA, J.A. *Evolución de los procesos de subsidencia-creep-falla, casos: Morelia, Mich. y Celaya, Gto.: México, D.F.* 1ª edición. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. Tesis Doctoral (2009)
- PRITCHARD, M.E. *Open-source software for geodetic imaging: ROI-PAC for InSAR and pixel tracking*. 1ª edición. ROI-PAC wiki (2014)
- QUIROZ, P.L. *Manual de Instalación ROI-PAC y Programas de la Metodología Small Baselines (SBAS)*. 1ª edición. Centro de Geociencias, UNAM (2012)
- RANEY, R. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **S-7**:499–505 (1971)
- ROSEN, P.A. *Principles and Theory of Radar Interferometry*. 1ª edición. UNAVCO (2011)
- ROSEN, P.A., HENSLEY, S., PELTZER, G., Y SIMONS, M. Updated Repeat Orbit Interferometry Package released. *Eos* **85**:47–47 (2004)
- ROSEN, P., HENSLEY, S., Y JOUGHIN, I. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE* **88**:333–382 (2000)

- SALMERÓN, J.D., MADRIGAL, V.H., NO MONROY, V.G., GIORDANO, N., CANO, E.C., MOLINA, O.D., Y VALENCIA, V.C. Geometry and monitoring with GPS of the subsidence-creep-fault processes in Celaya, Guanajuato, Mexico, in Abstracts of the Eighth International Symposium on Land Subsidence 2010: Querétaro, Qro. *International Association of Hydrogeological Sciences* **29** (2010)
- SANDWELL, D., MELLORS, R., TONG, X., WEI, M., Y WESSEL, P. *GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools*. 1ª edición. Scripps Institution of Oceanography Technical Report (2011)
- SIMONS, M. Y ROSEN, P.A. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy. *Treatise on Geophysics* **3**:391–446 (2007)
- SPAGNOLINI, U. 2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* **33(3)**:579–589 (1995)