

**Estimación desde satélites de la fracción de área inundada en humedales
fluviales de un sector de la planicie de inundación del Bajo Paraná, Argentina.**

Por *Ing. Pablo Javier Moncayo Silva*

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

**MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

septiembre, 2017

©IG - CONAE/UNC 2017

© FAMAFA - UNC 2017

Directora

**Dra. Mercedes Salvia. Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE),
CONICET-UBA**



Estimación desde satélites de la fracción de área inundada en humedales fluviales de un sector de la planicie de inundación del Bajo Paraná, Argentina. por Pablo Javier Moncayo Silva se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons ution-NonCommercial-SinDerivar 2.5 Argentina](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/argentina/).

Palabras Claves: Radar de apertura sintética, ALOS PALSAR, COSMO Skymed, zonas de inundación, detección de cambios, microondas pasivas, AMSRE, AMSR2, SMOS, fracción de área inundada, evaluación de la exactitud, matriz de confusión, Bajo Paraná, Argentina.

Resumen.

En esta tesis se integra información de microondas activas y pasivas, para la estimación de la fracción de área inundada en humedales fluviales de un sector de la planicie de inundación del Bajo Paraná en Argentina, apropiada para aplicaciones de tipo operativo de monitoreo. Usando imágenes de microondas activas de los radares de apertura sintética ALOS PALSAR y COSMO Skymed, se aplica una metodología para la detección de cambios para la obtención de áreas inundadas y no inundadas en la zona de estudio y se evalúa la exactitud de estos resultados. Paralelamente se procesó información de microondas pasivas usando imágenes AMSRE, AMSR2 y SMOS, para calcular índices de polarización para áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua. Integrando la información de microondas activas y pasivas, se presenta la metodología para la estimación de fracción de área inundada con una resolución temporal cuasi diaria para los eventos de inundación ocurridos los años 2007, 2009-2010 y 2014 y se explica la correlación de la información de fracción de área inundada para evaluación con información externa.

Key words: Synthetic aperture radar, ALOS PALSAR, COSMO Skymed, flood zones, change detection, passive microwaves, AMSRE, AMSR2, SMOS, flooded area fraction, accuracy assessment, confusion matrix, Lower Parana, Argentina.

Abstract.

This thesis integrates information of active and passive microwaves for the estimation of flooded area fraction in fluvial wetlands in an area of the flooded basin of the Argentinean lower Parana, appropriate for operative type applications of monitoring. Using active microwave images of ALOS PALSAR and COSMO Skymed synthetic aperture radars, methodology of detection of changes is applied in order to obtain flooded and non-flooded areas in the zone of study; accuracy of the results is evaluated. Concurrently, information of passive microwave was processed using AMSRE, AMSR2 and SMOS images to calculate polarization indexes for flooded areas, non-flooded areas and water bodies. Integrating the information of active and passive microwaves, methodology for the estimation of flooded area fraction is presented with a quasi daily temporal resolution for flooding events that happened during the years 2007, 2009-2010 and 2014. It is explained the correlation of the information of flooded area fraction for evaluation with the external information.

Agradecimientos.

Primeramente agradezco a la República Argentina, a través de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), al Instituto Gulich y Universidad Nacional de Córdoba por abrirme las puertas para estudiar esta linda maestría.

A mi directora de tesis la doctora Mercedes Salvia por guiarme en este tema de investigación brindándome sus observaciones y conocimiento, así como por su calidad humana.

A las autoridades y parte administrativa del Instituto Gulich que siempre fueron un gran apoyo, así como a todos los profesores de la maestría que siempre compartieron su conocimiento y brindaron su apoyo.

A la directora de la maestría la Dra. Anabella Ferral por siempre hacer una estancia agradable en el instituto y ayudar en todo lo que se necesita.

Al tribunal de tesis el Dr. Sergio Masuelli, Dr. Homero Lozza y Mgter. Andres Lighezzolo por su tiempo y observaciones para las correcciones finales de la tesis.

A mi familia, a mis padres y hermanas que aunque a la distancia siempre conté con su ayuda incondicional.

A la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral por facilitar los datos hidrometeorológicos y al Laboratorio de Sedimentología y Geomorfología Fluvial de la misma universidad por proporcionar el Mapa de Ambientes del área de estudio.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano por brindarme el apoyo para acceder a la maestría en especial al Tnt. Crnl. Carlos Estrella por su ayuda.

Finalmente a todas las personas que conocí en CONAE con quienes compartí momentos agradables y fueron un soporte en diferentes momentos de mi estancia en Argentina.

ÍNDICE.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Hipótesis.....	2
1.2 Objetivos y desarrollo de esta tesis.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Estructuración de la tesis.....	3
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Área De Estudio.....	5
2.1.1 Vegetación.....	6
2.1.2 Geomorfología.....	6
2.1.3 Hidrología superficial y subterránea.....	7
2.1.4 Mapa de Ambientes.....	8
2.2 Inundaciones en el Paraná.....	9
2.3 Teledetección para el monitoreo de inundaciones.....	11
2.3.1 El Espectro Electromagnético.....	11
2.3.2 Polarización.....	14
2.4 Sensores remotos en Microondas.....	15
2.4.1 Microondas Activa (radar).....	15
2.4.1.1 La Ecuación del Radar.....	16
2.4.1.1.1 Coeficiente de retrodispersión.....	16
2.4.1.2 Radar De Apertura Sintética (SAR).....	17
2.4.1.3 Características del Radar de Apertura Sintética.....	18
2.4.1.4 Geometría de adquisición.....	18
2.4.1.5 Adquisición en rango.....	19
2.4.1.6 Resolución en Rango.....	19
2.4.1.7 Adquisición en Acimut.....	21
2.4.1.8 Frecuencia Doppler y Resolución en acimut.....	22
2.4.1.8.1 Resolución Espacial.....	23
2.4.1.9 Calibración de las imágenes SAR.....	24
2.4.1.10 Correcciones Geométricas.....	25
2.4.1.10.1 Corrección a partir de puntos de control.....	26
2.4.1.10.2 Interpolación de los valores radiométricos (remuestreo).....	27
2.4.1.11 Moteado.....	29
2.4.1.11.1 Incerteza radiométrica debido al moteado.....	30
2.4.1.12 Distorsiones en imágenes radar.....	31
2.4.1.12.1 Distorsiones Geométricas.....	32
2.4.1.12.1.1 Distorsión en escala.....	32
2.4.1.12.1.2 Distorsiones generadas por el terreno.....	33
2.4.1.12.2 Distorsiones Radiométricas.....	33
2.4.1.13 Factores que influyen en la característica de la señal.....	33
2.4.1.13.1 Parámetros del sistema.....	33
2.4.1.13.2 Parámetros del terreno.....	34
2.4.1.13.2.1 Mecanismos de Interacción onda - superficie.....	34
2.4.1.13.2.2 Rugosidad de la superficie.....	35
2.4.1.13.2.3 Forma y orientación de las estructuras del terreno.....	36
2.4.1.14 Constante dieléctrica.....	36
2.4.1.15 Interacción entre la señal del SAR y los cuerpos de agua.....	37
2.4.1.16 Interacción entre la señal SAR y la vegetación no inundada.....	37
2.4.1.17 Interacción entre la señal SAR y la vegetación inundada.....	38
2.5 Estudios multitemporales.....	42

2.5.1 Detección de cambios en imágenes multitemporales SAR.....	43
2.5.1.1 Intervalos de confianza radiométricos. Cálculo de umbrales en la detección de cambios.....	44
2.5.1.2 Post-procesamiento a la detección de cambios.....	44
2.6 Evaluación de la exactitud en datos SAR.....	44
2.6.1 Matriz de confusión.....	45
2.6.1.1 El estadístico Kappa.....	46
2.7 Microondas Pasivas.....	47
2.7.1 Principios físicos utilizados en Microondas Pasivas.....	48
2.7.1.1 Cuerpo negro.....	48
2.7.1.2 Ley de Stefan-Boltzmann.....	48
2.7.1.3 Ley de desplazamiento de Wiew.....	49
2.7.1.4 Ley de Planck.....	50
2.7.1.5 Aproximación de Rayleigh- Jeans.....	51
2.7.2 Emisión en el Microondas.....	51
2.7.3 Emisividad.....	52
2.7.4 Variables físicas de sistemas satelitales en microondas pasivas.....	53
2.7.5 Índices en microondas pasivas.....	55
2.7.6 Estimación del área inundada utilizando datos satelitales en microondas.....	55
2.8 Correlación en los datos de microondas pasivas con información externa para evaluación.....	57
2.8.1 Análisis Gráfico de asociación.....	57
2.8.2 Fórmulas estadísticas utilizadas en la tesis.....	58
2.8.3 Análisis de correlación lineal.....	59
2.8.3.1 Contraste de hipótesis sobre ρ	60
2.8.3.2 Coeficiente de correlación para datos que no cumplen una distribución normal.....	63
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	65
3.1 Materiales utilizados.....	65
3.1.1 Datos hidrológicos de las alturas hidrométricas.....	65
3.1.2 Sistemas satelitales utilizados.....	65
3.1.2.1 Sistemas SAR.....	65
3.1.2.2 ALOS.....	65
3.1.2.2.1 Objetivos de la misión.....	65
3.1.2.2.2 ALOS PALSAR.....	66
3.1.2.2.2.1 Modos de adquisición en ALOS PALSAR.....	66
3.1.2.2.2.2 Características de ALOS PALSAR.....	67
3.1.2.3 COSMO Skymed.....	67
3.1.2.3.1 Objetivos de la misión.....	67
3.1.2.3.2 Modos de adquisición de COSMO Skymed.....	68
3.1.2.3.3 Características de COSMO SkyMed.....	68
3.1.3 Sistemas de Microondas Pasivas.....	69
3.1.3.1 AMSRE y AMSR2.....	69
3.1.3.1.1 Objetivos de las misiones.....	69
3.1.3.1.2 Características de AMSRE y AMSR2.....	69
3.1.3.2 SMOS.....	70
3.1.3.2.1 Objetivos de la misión.....	71
3.1.3.2.2 SMOS MIRAS.....	71
3.2 Metodología aplicada en el procesamiento de imágenes de Microondas Activas.....	71
3.2.1 Preprocesamiento con imágenes SAR.....	72
3.2.1.1 Calibración de imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed.....	72
3.2.1.2 Generación de imágenes de ángulos de incidencia para las imágenes COSMO Skymed.....	73
3.2.1.3 Reproyección de imágenes.....	74
3.2.1.4 Obtención de estadísticas de la imagen calibrada.....	75
3.2.1.5 Georreferenciación de la imagen de ángulos de incidencia.....	76

3.2.1.6 Generación de Mosaicos de imágenes ALOS PALSAR para cubrir el área de estudio.....	79
3.2.2 Imágenes ALOS PALSAR procesadas.....	80
3.2.3 Imágenes COSMO SkyMed procesadas.....	80
3.2.4 Detección de Cambios.....	82
3.2.4.1 Módulo División de cocientes.....	83
3.2.4.2 Elección del Umbral de Cambio.....	84
3.2.4.3 División en intervalos de valores de las imágenes de detección de cambios.....	84
3.2.4.4 Módulo de segmentación de las imágenes de cambio.....	84
3.2.5 Determinación de cuerpos de agua, áreas inundadas y no inundadas.....	86
3.3 Evaluación de la exactitud en mapas generados con imágenes SAR.....	86
3.3.1 Metodología usada para la obtención de las estadísticas para el cálculo de la matriz de confusión para la evaluación de la exactitud.....	87
3.4 Metodología aplicada en el procesamiento de Microondas Pasivas.....	92
3.5 Estimación de la fracción de área Inundada mediante combinación de datos SAR y de Microondas pasivas.....	92
3.6 Análisis de la correlación en los datos de microondas pasivas con información externa.....	93
3.6.1 Metodología usada para la evaluación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa.....	96
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	98
4.1 ZONA TOTAL.....	98
4.1.1 Fracción de área inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.....	98
4.1.2 Valores de PI para cuerpos de agua.....	101
4.1.3 Valores de PI de áreas no inundadas.....	101
4.1.4 Valores de PI_f de áreas inundadas de la zona Total correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR.....	102
4.2 ZONA NORTE.....	103
4.2.1 Fracción de área inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.....	103
4.2.2 Valores de PI de áreas no inundadas.....	104
4.2.3 Valores de PI_f de áreas inundadas de la zona Norte correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed.....	105
4.3 ZONA SUR.....	106
4.3.1 Fracción de área inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.....	106
4.3.2 Valores de PI de áreas no inundadas.....	107
4.3.3 Valores de PI_f de áreas inundadas de la zona Sur correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed.....	108
4.4 Tercera época de análisis de la zona Norte.....	109
4.4.1 Valores de PI_{obs} de la zona Norte.....	109
4.4.2 Valores de PI_f en el esquema de valor constante de la zona Norte.....	110
4.4.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Norte, calculada con el esquema de PI_f constante.....	111
4.4.4 Valores de PI_f en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Norte.....	113
4.4.5 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Norte, calculada con valores de PI_f obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	114
4.4.6 Comparación de los ff obtenidos mediante los distintos métodos de PI_f , tanto constante como de interpolación.....	115
4.5 Tercera época de análisis de la zona Sur.....	116
4.5.1 Valores de PI_{obs} de la zona Sur.....	116
4.5.2 Valores de PI_f en el esquema de valor constante de la zona Sur.....	116
4.5.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Sur, calculada con el esquema de PI_f constante.....	118
4.5.4 Valores de PI_f en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Sur.....	120
4.5.5 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Sur, calculada con valores de PI_f	

obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	121
4.5.6 Comparación de los <i>ff</i> obtenidos mediante los distintos métodos de <i>PIf</i> , tanto constante como de interpolación.....	122
4.6 Segunda época de análisis de la zona Total.....	123
4.6.1 Valores de <i>PIobs</i> de la zona Total.....	123
4.6.2 Valores de <i>PIf</i> según el esquema de valor constante de la zona Total.....	124
4.6.3 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Total, calculada con el esquema de <i>PIf</i> constante.....	125
4.6.4 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Total.....	127
4.6.5 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Total, calculada con valores de <i>PIf</i> obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	127
4.6.6 Comparación de los <i>ff</i> obtenidos mediante los distintos métodos de <i>PIf</i> , tanto constante como de interpolación.....	129
4.7 Primera época de análisis de la zona Total.....	130
4.7.1 Valores de <i>PIobs</i> de la zona Total.....	130
4.7.2 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor constante de la zona Total.....	131
4.7.3 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Total, calculada con el esquema de <i>PIf</i> constante.....	132
4.7.4 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Total.....	133
4.7.5 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Total, calculada con valores de <i>PIf</i> obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	134
4.7.6 Comparación de los <i>ff</i> obtenidos mediante los distintos métodos de <i>PIf</i> , tanto constante como de interpolación.....	136
4.8 Comparación entre períodos de análisis de imágenes ALOS PALSAR con imágenes COSMO Skymed.....	136
4.9 Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos.....	137
4.10 Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación.....	141
4.10.1 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de <i>PIf</i> constante.....	141
4.10.2 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de <i>PIf</i> interpolado.....	144
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	152
ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.....	167
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.....	225
B.1 Primera época de la zona Norte.....	225
B.1.1 Valores de <i>PIobs</i> de la zona Norte.....	225
B.1.2 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor constante de la zona Norte.....	225
B.1.3 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Norte, calculada con el esquema <i>PIf</i> constante.....	226
B.1.4 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Norte.....	227
B.1.5 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Norte, calculada con valores de <i>PIf</i> obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	228
B.2 Primera época de análisis de la zona Sur.....	230
B.2.1 Valores de <i>PIobs</i> de la zona Sur.....	230
B.2.2 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor constante de la zona Sur.....	230
B.2.3 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Sur, calculada con el esquema <i>PIf</i> constante.....	231

B.2.4 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Sur.....	232
B.2.5 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Sur, calculada con valores de <i>PIf</i> obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	233
B.3 Segunda época de análisis de la zona Norte.....	235
B.3.1 Valores de <i>PIobs</i> de la zona Norte.....	235
B.3.2 Valores de <i>PIf</i> según el esquema de valor constante de la zona Norte.....	235
B.3.3 Valores de <i>ff</i> de áreas inundadas de la zona Norte, calculada con el esquema de <i>PIf</i> constante.	236
B.3.4 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Norte.....	238
B.3.5 Valores de fracción de áreas inundadas (<i>ff</i>) de la zona Norte, calculada con valores de <i>PIf</i> obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	239
B.4 Segunda época de análisis de la zona Sur.....	240
B.4.1 Valores de <i>PIobs</i> de la zona Sur.....	240
B.4.2 Valores de <i>PIf</i> constantes de áreas inundadas de la zona Norte correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR.....	241
B.4.3 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Sur, calculada con el esquema de <i>PIf</i> constante.....	242
B.4.4 Valores de <i>PIf</i> en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Sur.....	244
B.4.5 Valores de fracción de área inundada (<i>ff</i>) de la zona Sur, calculada con valores de <i>PIf</i> obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.....	245
ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.....	248
ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.....	254
D.1 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de <i>PIf</i> constante.	254
D.2 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de <i>PIf</i> interpolado.	256
D.3 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de <i>PIf</i> constante.....	259
D.4 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de <i>PIf</i> interpolado.....	261
ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.....	264
ANEXO F. Niveles de confianza versus número equivalente de looks.....	275
ANEXO G. Código de los comandos en el programa R para obtener las estadísticas para validar los datos de microondas pasivas.....	276

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.....	5
Figura 2. Imagen del Mapa de Ambientes del área de estudio, de 6 clases de coberturas.	8
Figura 3. Alturas Hidrométricas de la estación Esquina, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015 y de la estación Santa Fe, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015.	10
Figura 4. Interacción entre los campos eléctrico y magnético.	12
Figura 5. Longitudes de onda del Espectro EM.	13
Figura 6. El espectro electromagnético y la interacción de la atmósfera en su camino entre el espacio y la Tierra.	13
Figura 7. Ejemplo de polarización: Lineal, circular y elíptica.	14
Figura 8. Ejemplo de polarización vertical y horizontal.	14
Figura 9. Ejemplo del pulso emitido por el radar.	15
Figura 10. Esquema de un radar. (a) Biestático y (b) Monoestático.	16

Figura 11. Esquema del movimiento del SAR de los ecos generados por el movimiento de la nave para sintetizar una gran antena.	17
Figura 12. Esquema de los diferentes elementos que componen la geometría de adquisición.	18
Figura 13. Ciclos de transmisión-recepción de un SAR.	20
Figura 14. Esquema de la apertura sintética del sistema SAR.	22
Figura 15. Resolución de la imagen SAR en celdas de resolución, definidas por el rango del suelo y resolución de acimut para una sola imagen.	24
Figura 16. Explicación gráfica del Error Cuadrático Medio.	27
Figura 17. Vecino mas cercano.	28
Figura 18. Interpolación bilineal.	28
Figura 19. Convolución cúbica.	29
Figura 20. Esquema del moteado.	29
Figura 21. Comparación de curvas de resolución espacial y resolución radiométrica en función al número equivalente de miradas “looks”.	31
Figura 22. Curva de resolución radiométrica vs ENL.	31
Figura 23. Esquema de las diferentes distorsiones en imágenes radar.	32
Figura 24. Tipos de reflexiones y dispersiones. Mecanismos de dispersión del agua con la superficie de la tierra bajo diferentes condiciones así como componentes especulares y difusos de superficie de radiación dispersada como una función del ángulo de incidencia y la rugosidad de la superficie. ...	35
Figura 25. Tipos de rugosidad sobre la superficie. Reflexión del radar a) Liso, b) Moderadamente rugoso y c) Fuertemente rugoso.	35
Figura 26. El campo E a través de un área cerrada S.	37
Figura 27. Penetración de las señales en Radar.	38
Figura 28. Ilustración conceptual de las principales fuentes de retrodispersión de la vegetación y el efecto de la vegetación inundada en las bandas X y L.	40
Figura 29. Respuestas de retorno del radar relativos de diferentes longitudes de onda y tipos de vegetación inundadas.	42
Figura 30. Elementos que intervienen en la medición de microondas pasiva.	48
Figura 31. Emitancia Espectral Radiante de un cuerpo negro a distintas temperaturas.	50
Figura 32. Radiación detectada por los sensores de microondas pasivas de microondas que es emitida naturalmente por la Tierra.	52
Figura 33. Propiedades de polarización de las emisividades de la superficie del agua y de medios dieléctricos. Emisividad de la superficie del agua a 19 °C en función del ángulo incidente para polarizaciones h y v a 10,5 GHz.	53
Figura 34. Distintos ejemplos sencillos de correlaciones: (a) claramente positiva; (b) claramente negativa; (c) débilmente positiva; y (d) sin correlación.	57
Figura 35. Diversos gráficos de cajas.	58
Figura 36. Región de rechazo y aceptación para el test de t para una correlación.	61
Figura 37. Ilustración conceptual de la forma de observación de los modos de adquisición de ALOS PALSAR.	66
Figura 38. Modos de Adquisición de imágenes COSMO SkyMed.	68
Figura 39. Diagrama de flujo para la obtención de áreas inundadas con imágenes SAR.....	72
Figura 40. Procesamiento de calibración en Nest.....	72
Figura 41. Izq: Pestaña I/O Parameter en SarTools Radiometric Correction Calibration y Der: Pestaña Processing Parameters.....	73
Figura 42. Izq: Band Math y Der: En pestaña Edit Expression donde se ingresa para generar imagen del ángulo de incidencia.....	74
Figura 43. Módulo en Envi para reproyección de imágenes.....	74
Figura 44. Pantalla para mostrar las estadísticas de la imagen.....	75
Figura 45. Matemática de Bandas en ENVI.....	76
Figura 46. Paso para la Georreferenciación de la imagen de ángulos de incidencia con la imagen de referencia.....	76

Figura 47. Selección de la imagen de referencia con la imagen de ángulos de incidencia.....	77
Figura 48. Selección de los puntos de georreferenciación. Al lado izquierdo se indica la imagen Base tomando un punto en la esquina superior izquierda; al lado derecho se indica la imagen a ser georreferenciada tomando un punto en la esquina superior derecha. En la parte inferior se indican los módulos Ground control points Selection e Image to Image GCP List.....	77
Figura 49. Módulo para registro de parámetros en ENVI para georreferenciar imágenes.....	78
Figura 50. Ejemplo de una imagen de ángulos de incidencia georreferenciada (lado derecho), con su par la imagen calibrada (lado izquierdo).....	79
Figura 51. Módulo Map Base Mosaicking.....	79
Figura 52. Ejemplo de los diferentes grupos de las imágenes COSMO SkyMed del área de estudio.	81
Figura 53. Área de estudio dividida en zona Norte y Sur.....	82
Figura 54. Módulo en Erdas para generar la imagen de diferencia de cocientes.....	84
Figura 55. Módulo en Erdas para generar la imagen de detección de cambios, a partir de las imágenes de diferencia de cocientes.....	85
Figura 56. Módulo en Erdas para generar la imagen de detección de cambios, a partir de las imágenes de diferencia de cocientes.....	85
Figura 57. Polígonos en color amarillo, son la grilla de máscaras de agua generados con imágenes Landsat 5 que cubre el área de estudio. Los códigos son p: path y r: row por sus siglas en ingles, acompañada de su código respectivo. El polígono en color tomate es el área de estudio.....	86
Figura 58. Explicación gráfica de los procesos para unión de polígonos adyacentes en los path y row utilizados para validar.....	87
Figura 59. Explicación gráfica de los procesos para la obtención de máscara de agua del INA en el área de estudio.....	87
Figura 60. Explicación gráfica de los procesos para la obtención de zonas inundadas del INA en el área de estudio.....	88
Figura 61. Máscara de áreas inundadas y no inundadas del INA del área de estudio sin cuerpos de agua permanentes.....	88
Figura 62. Explicación gráfica de los procesos para la vectorización del raster.....	89
Figura 63. Herramienta Hawth Analysis Tools, para generar puntos aleatorios.....	90
Figura 64. Puntos aleatorios generados sobre la zona de estudio.....	90
Figura 65. Opción unión espacial.....	91
Figura 66. ejemplo de consulta espacial.....	91
Figura 67. En la sección A, se observa el área de estudio con puntos en formato shapefile del sensor AMSRE. En la sección B se indica el recorte de los datos de AMSRE con la zona Total del área de estudio. En la sección C se indica el recorte de los datos de AMSRE con la zona Norte. En la sección D se indica el recorte de los datos de AMSRE con la zona Sur.....	92
Figura 68. Flujograma de algoritmo para integrar imágenes SAR con Microondas Pasivas.....	93
Figura 69. Explicación gráfica de los procesos para unión de polígonos adyacentes en los path y row utilizados para validar microondas pasivas.....	96
Figura 70. Explicación gráfica de los procesos para la obtención de áreas inundadas del INA en las zonas de estudio. Para el presente ejemplo para la zona Norte.....	96
Figura 71. Metodología para evaluar la correlación lineal entre información externa y los datos de fracción de área inundada de microondas pasivas.....	97
Figura 72. Mapa 4. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007.....	98
Figura 73. Mapa 5. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/05/2007, Fecha de referencia: 05/01/2007.....	99
Figura 74. Valores de ff de la zona Total, usando imágenes ALOS PALSAR, correspondiente al período de imágenes ALOS PALSAR del 23/05/2007 al 16/10/2010.....	100
Figura 75. Alturas Hidrométricas de la estación Esquina, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015.	101
Figura 76. Alturas Hidrométricas de la estación Santa Fe, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015.	102
Figura 77. Valores de ff de la zona Norte, usando imágenes ALOS PALSAR, correspondiente al	

período 23/05/2007 al 06/10/2010.....	104
Figura 78. Valores de ff de la zona Norte, usando imágenes COSMO Skymed, correspondiente al período 12/03/2012 al 08/01/2015.....	104
Figura 79. Valores de ff de la zona Sur, usando imágenes ALOS PALSAR, correspondiente al período 23/05/2007 al 16/10/2010.....	107
Figura 80. Valores de ff de la zona Sur, usando imágenes COSMO Skymed, correspondiente al período 13/04/2012 al 16/01/2015.....	107
Figura 81. Valores de Plobs de la zona Norte de las imágenes AMSR2 y SMOS, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	109
Figura 82. Valores de PIf constante de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L), tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	110
Figura 83. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes AMSR2, bandas C y X, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	112
Figura 84. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes AMSR2, bandas Ku y Ka, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	112
Figura 85. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes SMOS, banda L, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	112
Figura 86. Valores de PIf interpolados de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	113
Figura 87. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSR2, bandas C y X, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	114
Figura 88. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSR2, bandas Ku y Ka, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	115
Figura 89. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes SMOS, banda L, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.....	115
Figura 90. Valores de Plobs de la zona Sur de las imágenes AMSRE, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	116
Figura 91. Valores de PIf constante de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L), tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	117
Figura 92. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes AMSR2, bandas C y X, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	119
Figura 93. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes AMSR2, bandas Ku y Ka, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	119
Figura 94. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes SMOS, banda L, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	119
Figura 95. Valores de PIf interpolados de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L). Tanto para pasada ascendente, como descendente, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	120
Figura 96. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSR2, bandas C y X, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	121
Figura 97. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSR2, bandas Ku y Ka, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	122
Figura 98. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes SMOS, banda L, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.....	122
Figura 99. Valores de Plobs de la zona Total de las imágenes AMSRE, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	123
Figura 100. Valores de PIf constante de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	124

Figura 101. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendentes, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	125
Figura 102. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendentes, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	126
Figura 103. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Ascendentes, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	126
Figura 104. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendentes, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	126
Figura 105. Valores de PIf interpolados de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	127
Figura 106. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	128
Figura 107. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	128
Figura 108. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	129
Figura 109. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	129
Figura 110. Valores de Plobs de la zona Total de las imágenes AMSRE, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	130
Figura 111. Valores de PIf constante de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	131
Figura 112. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	133
Figura 113. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	133
Figura 114. Valores de PIf interpolados de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	134
Figura 115. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	135
Figura 116. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	135
Figura 117. Gráficos de Cajas de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Norte a partir de valores de PIf constantes.....	142
Figura 118. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Norte a partir de valores de PIf constantes.....	143
Figura 119. Gráficos de Cajas de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Norte a partir de valores de PIf interpolados.....	145
Figura 120. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Norte a partir de valores de PIf interpolados....	145
Figura 121. Mapa 6. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 08/07/2007.....	167
Figura 122. Mapa 7. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007.....	168
Figura 123. Mapa 8. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/08/2007.....	169
Figura 124. Mapa 9. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/08/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007.....	170
Figura 125. Mapa 10. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/11/2007.....	171
Figura 126. Mapa 11. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/11/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007.....	172

Figura 127. Mapa 12. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 13/10/2009.....	173
Figura 128. Mapa 13. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2009. Fecha de referencia: 10/01/2009.....	174
Figura 129. Mapa 14. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 16/10/2010.....	175
Figura 130. Mapa 15. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/10/2010. Fecha de referencia: 10/01/2009.....	176
Figura 131. Mapa 16. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007. Zona Norte.....	177
Figura 132. Mapa 17. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/05/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.....	178
Figura 133. Mapa 18. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 08/07/2007. Zona Norte.....	179
Figura 134. Mapa 19. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.....	180
Figura 135. Mapa 20. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/08/2007. Zona Norte.....	181
Figura 136. Mapa 21. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/08/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.....	182
Figura 137. Mapa 22. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/11/2007. Zona Norte.....	183
Figura 138. Mapa 23. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/11/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.....	184
Figura 139. Mapa 24. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 13/10/2009. Zona Norte.....	185
Figura 140. Mapa 25. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2009. Fecha de referencia: 10/01/2009. Zona Norte.....	186
Figura 141. Mapa 26. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 16/10/2010. Zona Norte.....	187
Figura 142. Mapa 27. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/10/2010. Fecha de referencia: 10/01/2009. Zona Norte.....	188
Figura 143. Mapa 28. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 22/06/2014. Zona Norte.....	189
Figura 144. Mapa 29. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 22/06/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.....	190
Figura 145. Mapa 30. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 08/07/2014. Zona Norte.....	191
Figura 146. Mapa 31. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.....	192
Figura 147. Mapa 32. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 16/07/2014. Zona Norte.....	193
Figura 148. Mapa 33. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/07/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.....	194
Figura 149. Mapa 34. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 13/08/2014. Zona Norte.....	195
Figura 150. Mapa 35. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/08/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.....	196
Figura 151. Mapa 36. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 12/10/2014. Zona Norte.....	197
Figura 152. Mapa 37. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 12/10/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.....	198
Figura 153. Mapa 38. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 08/01/2015. Zona Norte.....	199
Figura 154. Mapa 39. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/01/2015. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.....	200
Figura 155. Mapa 40. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007. Zona Sur.....	201
Figura 156. Mapa 41. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/05/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.....	202
Figura 157. Mapa 42. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 08/07/2007. Zona Sur.....	203
Figura 158. Mapa 43. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.....	204
Figura 159. Mapa 44. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/08/2007. Zona Sur.....	205
Figura 160. Mapa 45. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/08/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.....	206
Figura 161. Mapa 46. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/11/2007. Zona Sur.....	207

Figura 162. Mapa 47. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/11/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.....	208
Figura 163. Mapa 48. Clases de cambio entre el 01/10/2009 y el 13/10/2009. Zona Sur.....	209
Figura 164. Mapa 49. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2009. Fecha de referencia: 01/10/2009. Zona Sur.....	210
Figura 165. Mapa 50. Clases de cambio entre el 01/10/2009 y el 16/10/2010. Zona Sur.....	211
Figura 166. Mapa 51. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/10/2010. Fecha de referencia: 01/10/2009. Zona Sur.....	212
Figura 167. Mapa 52. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 25/07/2014. Zona Sur.....	213
Figura 168. Mapa 53. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 25/07/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.....	214
Figura 169. Mapa 54. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 28/07/2014. Zona Sur.....	215
Figura 170. Mapa 55. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 28/07/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.....	216
Figura 171. Mapa 56. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 11/09/2014. Zona Sur.....	217
Figura 172. Mapa 57. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 11/09/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.....	218
Figura 173. Mapa 58. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 13/10/2014. Zona Sur.....	219
Figura 174. Mapa 59. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.....	220
Figura 175. Mapa 60. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 13/11/2014. Zona Sur.....	221
Figura 176. Mapa 61. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/11/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012. Zona Sur.....	222
Figura 177. Mapa 62. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 16/01/2015. Zona Sur.....	223
Figura 178. Mapa 63. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/01/2015. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.....	224
Figura 179. Valores de Plobs de la zona Norte de las imágenes AMSRE, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	225
Figura 180. Valores de Pif constante de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	226
Figura 181. Valores de ff a partir de valores Pif constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	227
Figura 182. Valores de ff a partir de valores Pif constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	227
Figura 183. Valores de Pif interpolados de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	228
Figura 184. Valores de ff a partir de valores Pif interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	229
Figura 185. Valores de ff a partir de valores Pif interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	229
Figura 186. Valores de Plobs de la zona Sur de las imágenes AMSRE, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	230
Figura 187. Valores de Pif constante de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	231
Figura 188. Valores de ff a partir de valores Pif constantes de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	232
Figura 189. Valores de ff a partir de valores Pif constantes de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	232
Figura 190. Valores de Pif interpolados de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSRE (bandas C,	

X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	233
Figura 191. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	234
Figura 192. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.....	234
Figura 193. Valores de Plobs de la zona Norte de las imágenes AMSRE y SMOS, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	235
Figura 194. Valores de PIf constante de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka).Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	236
Figura 195. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	237
Figura 196. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	237
Figura 197. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	237
Figura 198. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	238
Figura 199. Valores de PIf interpolados de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka) .Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	238
Figura 200. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	239
Figura 201. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	239
Figura 202. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	240
Figura 203. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	240
Figura 204. Valores de Plobs de la zona Sur de las imágenes AMSRE y SMOS, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	241
Figura 205. Valores de PIf constante de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka).Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	242
Figura 206. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	243
Figura 207. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	243
Figura 208. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	244
Figura 209. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	244
Figura 210. Valores de PIf interpolados de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka).Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	245
Figura 211. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	246
Figura 212. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	246
Figura 213. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	247

Figura 214. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.....	247
Figura 215. Gráficos de Cajas de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Total a partir de valores de PIf constantes.....	255
Figura 216. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Total a partir de valores de PIf constantes.....	255
Figura 217. Gráficos de Cajas de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Total a partir de valores de PIf interpolados.....	257
Figura 218. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Total a partir de valores de PIf interpolados.....	258
Figura 219. Gráficos de Cajas de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Sur a partir de valores de PIf constantes.....	260
Figura 220. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Sur a partir de valores de PIf constantes.....	260
Figura 221. Gráficos de Cajas de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Sur a partir de valores de PIf interpolados.....	262
Figura 222. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Sur a partir de valores de PIf interpolados.....	263

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Clases de Ambientes del área de estudio con su respectiva clasificación.	9
Tabla 2. Longitudes de onda del microondas y sus frecuencias utilizadas.	13
Tabla 3. Modos en que pueden ser expresados los valores de coeficiente de retrodispersión de las imágenes de radar.	17
Tabla 4. Diferencias encontradas entre las bandas X y L dependiendo de la longitud de onda del radar en vegetación forestal inundada, humedal inundado, pasto inundado y aguas abiertas.	41
Tabla 5. Estructura de una matriz de confusión.	45
Tabla 6. Intervalo de aceptación de los resultados del índice Kappa.	47
Tabla 7. Interpretación a los valores de la correlación lineal simple de Pearson.	60
Tabla 8. Intervalo de aceptación de los resultados del coeficiente de correlación de Pearson.	60
Tabla 9. Principales características de las imágenes ALOS PALSAR.	67
Tabla 10. Características de los modos de medición de SAR, adquisición para imágenes COSMO SkyMed.	69
Tabla 11. Diferencias en las características de AMSRE y AMSR2.	70
Tabla 12. Ubicación de los puntos para la georreferenciación en la imagen calibrada e imagen de ángulos de incidencia.....	78
Tabla 13. Listado de imágenes ALOS PALSAR.....	80
Tabla 14. Listado de imágenes COSMO SkyMed.....	80
Tabla 15. Listado de imágenes ALOS PALSAR y COSMO SkyMed seleccionadas para realizar la detección de cambios.....	83
Tabla 16. Códigos de las imágenes de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua generadas en la tesis y los archivos de máscara de agua del INA con sus respectivas fechas que sirvieron para la validación.....	87
Tabla 17. Combinaciones de consultas espaciales para el llenado de la matriz de confusión de áreas no inundadas e inundadas.....	91
Tabla 18. Esquema del recubrimiento de los path y row de las mascarar del agua del INA con la zona Total, Norte y Sur.....	94
Tabla 19. Fechas de los datos de fracción de área inundada generadas en la tesis y los archivos de máscara de agua del INA con información del recubrimiento de los path y row que los conforman. para la validación de los datos de microondas pasivas.....	95
Tabla 20. Combinación de imágenes ALOS PALSAR utilizadas para la zona Total, con las respectivas fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada. En el código	

de combinación de imágenes, se indica la fecha de inicio de la época y luego la fecha final de la época dentro del período.....	100
Tabla 21. Valores de PIw de la zona Total, para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.....	101
Tabla 22. Valores de PInf de la zona Total, para las bandas C, X, Ku, Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.....	102
Tabla 23. Valores de PIf de la zona Total, para las bandas C, X, Ku y Ka de la imagen AMSRE; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las diferentes épocas de estudio.....	102
Tabla 24. Combinación de imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed utilizadas en la zona Norte, con las respectivas fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada. En el código de combinación de imágenes, se indica la fecha de inicio de la época y luego la fecha final de la época dentro del período.....	103
Tabla 25. Valores de PInf en la zona Norte, para las bandas C, X, Ku, Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.....	105
Tabla 26. Valores de PIf de la zona Norte, para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed para las diferentes épocas de estudio.....	105
Tabla 27. Combinación de imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed utilizadas en la zona Sur, con las respectivas fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada. En el código de combinación de imágenes, se indica la fecha de inicio de la época y luego la fecha final de la época dentro del período.....	106
Tabla 28. Valores de PInf en la zona Sur, para las bandas C, X, Ka, Ku de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.....	108
Tabla 29. Valores de PIf de la zona Sur, para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed para las diferentes épocas de estudio.....	108
Tabla 30. Códigos de las imágenes de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua generadas en la tesis y los archivos de máscara de agua del INA con sus respectivas fechas que servirán para la validación de los productos SAR.....	137
Tabla 31. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Total basado en imágenes de radar en Banda L (23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007).....	137
Tabla 32. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Total basado en imágenes de radar en Banda L (13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009).....	139
Tabla 33. Zona Norte, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	141
Tabla 34. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Norte con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	142
Tabla 35. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	143
Tabla 36. Zona Norte, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de los cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	144
Tabla 37. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Norte con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	144
Tabla 38. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	146

Tabla 39. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Norte. basado en imágenes de radar en Banda L (23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007).....	248
Tabla 40. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Sur. basado en imágenes de radar en Banda L (23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007).....	249
Tabla 41. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Norte basado en imágenes de radar en Banda L (13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009).....	250
Tabla 42. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Sur basado en imágenes de radar en Banda L (13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009).....	252
Tabla 43. Zona Total, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	254
Tabla 44. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Total con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	254
Tabla 45. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	256
Tabla 46. Zona Total, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	256
Tabla 47. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Total con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	257
Tabla 48. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	258
Tabla 49. Zona Sur, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de los cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	259
Tabla 50. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Sur con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	259
Tabla 51. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.....	261
Tabla 52. Zona Sur, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de los cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	261
Tabla 53. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Sur con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	262
Tabla 54. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.....	263
Tabla 55. Niveles de confianza versus número equivalente de looks.	275

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de la Frecuencia.....	11
Ecuación 2. Energía de Radiación, expresado con frecuencia.....	12
Ecuación 3. Energía de Radiación, expresado con longitud de onda.....	12
Ecuación 4. Ecuación del Radar.....	16
Ecuación 5. Rango Oblicuo.....	20

Ecuación 6. Rango Oblicuo proporcional al ancho de banda.....	21
Ecuación 7. Rango en tierra.....	21
Ecuación 8. Ecuación de la dimensión de la apertura sintética.....	22
Ecuación 9. Resolución en Acimut, expresado con la banda Doppler.....	23
Ecuación 10. Banda Doppler.....	23
Ecuación 11. Resolución en Acimut.....	23
Ecuación 12. Coeficiente de retrodispersión definida la matriz de scattering.....	24
Ecuación 13. Coeficiente de retrodispersión de una polarización dada.....	24
Ecuación 14. Coeficiente de retrodispersión.....	25
Ecuación 15. Ecuaciones de transformación de polinomios de primer grado.....	26
Ecuación 16. Ecuaciones de transformación de polinomios de segundo grado.....	26
Ecuación 17. Error cuadrático medio.....	27
Ecuación 18. Error cuadrático medio para cada punto de control.....	27
Ecuación 19. Número Equivalente de vistas (ENL).....	30
Ecuación 19. Criterio de Rayleigh.....	36
Ecuación 21. La ley de Gauss-eléctrica.....	36
Ecuación 22. La ley de Gauss-eléctrica, expresada con la constante dieléctrica.....	36
Ecuación 23. Operación matemática de diferencia para la detección de cambios en imágenes SAR.	43
Ecuación 24. Operación matemática de cociente para la detección de cambios en imágenes SAR..	43
Ecuación 25. Fórmula matemática para los límites del umbral de cambio/no cambio en imágenes SAR.....	44
Ecuación 26. Fiabilidad global del mapa.....	46
Ecuación 27. Exactitud del productor.....	46
Ecuación 28. Exactitud del usuario.....	46
Ecuación 29. Definición del índice Kappa.....	47
Ecuación 30. Fórmula para calcular el índice Kappa.....	47
Ecuación 31. Emisión radiante.....	49
Ecuación 32. Emisión radiante para un cuerpo.....	49
Ecuación 33. Longitud de onda dominante.....	49
Ecuación 34. Ecuación de la ley de Planck.....	50
Ecuación 35. Emitancia Espectral.....	50
Ecuación 36. Integral para evaluar la Emitancia Espectral Radiante de las curvas de un Cuerpo Negro.....	51
Ecuación 37. Aproximación de Rayleigh – Jeans.....	51
Ecuación 38. Condición de Rayleigh – Jeans para que la aproximación sea válida.....	51
Ecuación 39. Condición equivalente de Rayleigh – Jeans para que la aproximación sea válida.....	51
Ecuación 40. Emitancia Espectral.....	52
Ecuación 41. Aproximación a la ecuación para temperatura de brillo.....	54
Ecuación 42. Temperatura de brillo.....	54
Ecuación 43. Temperatura de brillo expresado con emisividad.....	54
Ecuación 44. Emisividad.....	54
Ecuación 45. Delta T.....	54
Ecuación 46. Índice de polarización.....	55
Ecuación 47. Índice de polarización observado.....	55
Ecuación 48. Fracción del área de píxel ocupada por cada uno de los componentes del terreno.....	55
Ecuación 49. Fracción de área inundada.....	55
Ecuación 50. Índice de polarización de área no inundada.....	56
Ecuación 51. Índice de polarización de área inundada.....	56
Ecuación 52. Fórmula para calcular la media.....	58
Ecuación 53. Fórmula para calcular la desviación estándar.....	58
Ecuación 54. Fórmula equivalente para calcular la desviación estándar.....	58

Ecuación 55. Fórmula para interpolación lineal.....	59
Ecuación 56. Coeficiente de correlación lineal de Pearson.....	59
Ecuación 57. Fórmula para calcular la varianza.....	59
Ecuación 58. Covarianza.....	59
Ecuación 59. Correlación lineal simple (r) de Pearson.....	60
Ecuación 60. Correlación del producto de los momentos de Pearson.....	61
Ecuación 61. p-valor.....	62
Ecuación 62. Transformación z de Fisher.....	63
Ecuación 63. Transformación z_obs de Fisher.....	63
Ecuación 64. Límite inferior del Intervalo de confianza para ρ	63
Ecuación 65. Límite superior del Intervalo de confianza para ρ	63
Ecuación 66. Coeficiente de correlación de Spearman.....	63
Ecuación 67. Fórmula para quitar valores menores que cero en la imagen de potencia.....	76

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.

Una de las ventajas principales de la teledetección satelital es la capacidad de cubrir grandes áreas de manera continua (Salvia, 2010). Si bien la teledetección en las longitudes de onda ópticas y del infrarrojo brindan información de manera sistemática desde hace casi 40 años, los sistemas activos y pasivos en microondas desarrollados desde la década del '90 presentan ventajas con respecto a los ópticos en relación a variables hidrológicas.

Los sistemas ópticos detectan la radiación en las longitudes de onda del visible (VIS) y el infrarrojo reflectivo (NIR y SWIR), midiendo la reflectancia de los objetos terrestres, y para esto dependen de la radiación solar como fuente de iluminación. Los tipos de interacciones presentes son a nivel molecular, ya que la radiación electromagnética en las longitudes de onda del visible y el infrarrojo posee la energía para excitar electrones de las moléculas del blanco (Rees, 2005). La forma y la orientación de un dispersor también condicionan la naturaleza de la radiación reflejada, pero en un segundo orden. Existen dos limitaciones importantes para el uso de sensores remotos ópticos para la determinación y monitoreo de inundaciones: 1) en general en episodios de inundaciones también hay cobertura nubosa que las ondas del VIS e IR no pueden atravesar y 2) las ondas del VIS e IR no penetran la vegetación, y por lo tanto no tienen la capacidad de observar las áreas inundadas debajo de bosques y/o vegetación herbácea densa que alcance 2 metros o más.

Por el contrario, los sistemas satelitales activos en microondas (radares de apertura sintética) atraviesan la cobertura nubosa y pueden medir de día y de noche ya que poseen su propia fuente de energía. Al interactuar con el terreno, lo hacen con aquellos componentes del tamaño de su longitud de onda, en este caso del orden de centímetros (Rees, 2005). Los componentes del terreno que determinan la reflectividad al radar son su geometría y permitividad. Además, debido al alto contraste entre las propiedades dieléctricas del agua y del suelo seco resultan muy sensibles a la humedad del suelo y a los procesos de inundaciones (Kasischke *et al.*, 2003; Pope *et al.*, 1997; Parmuchi *et al.*, 2002). Adicionalmente y de acuerdo a su longitud de onda, las microondas permiten determinar también áreas inundadas debajo de la vegetación (por ejemplo bosques). Estos sistemas presentan alta resolución espacial (decenas de metros) y resolución temporal intermedia (aproximadamente un mes), y miden el coeficiente de retrodispersión (*bakscattering*) del terreno. Entre los sistemas que se encuentran operativos en banda C puede nombrarse a RADARSAT-2 y Sentinel 1. En banda X se encuentran operativos los satélites de la serie COSMO SkyMed, y los TerraSAR X (Tandem X), y en banda L el sistema ALOS PALSAR 2. Además es posible contar con datos de archivo de los satélites ERS-2, RADARSAT-1 y ENVISAT ASAR (en banda C) y ALOS PALSAR (en banda L). Adicionalmente, en el futuro cercano se podrá contar con datos de la misión argentina SAOCOM (en banda L).

En cuanto a los sistemas pasivos en microondas, presentan alta resolución temporal (diaria) y baja resolución espacial (decenas de km), y miden la temperatura de brillo (T_b) del terreno (emisión en microondas de la superficie terrestre). La baja resolución espacial implica que las observaciones corresponden a píxeles heterogéneos donde la señal medida en cada uno de ellos integra las T_b s de los distintos elementos del terreno (Suelo, agua, vegetación). Sin embargo, esta baja resolución espacial está acompañada de un gran ancho de barrido, lo que permite el monitoreo simultáneo de grandes áreas.

Dos características principales hacen de las observaciones de radiómetros en microondas de gran importancia para el monitoreo de inundaciones. En primer término, las observaciones en microondas son sensibles a las condiciones de humedad de la superficie y por ende, pueden detectar condiciones previas que conducirían procesos normales de escorrentía a eventos de inundaciones de escala regional. Además, al igual que los sistemas activos, estos instrumentos son capaces de adquirir imágenes a través de las nubes, las cuales están generalmente presentes antes, durante y después de eventos de inundación. Esto se suma a la alta resolución temporal, de gran importancia para el monitoreo continuo de la dinámica de las ondas de crecida, en vez del mero estudio de los alcances del área inundada a intervalos regulares pero espaciados temporalmente.

Además, los sistemas en microondas pasivas pueden detectar patrones de inundación también bajo vegetación densa (según la frecuencia de operación del sistema). Un estudio reciente (Ferrazzoli et al., 2010) realizado sobre la cuenca del Plata mostró que es posible monitorear la ubicación de una onda de crecida durante varias semanas usando series temporales del índice de polarización obtenido con datos AMSRE (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS), señalando su contribución e importancia en el monitoreo de eventos a escala regional.

1.1 Hipótesis.

Es posible obtener estimaciones de fracción de área inundada en planicies de inundación del Bajo Paraná, ya sea en suelo desnudo o con vegetación herbácea o arbórea, a partir de la combinación de datos de microondas pasivas y activas así como de algoritmos específicos.

1.2 Objetivos y desarrollo de esta tesis.

1.2.1 Objetivo General.

Esta propuesta plantea desarrollos en el campo de la teledetección en microondas a fin de obtener información eco-hidrológica de relevancia para actividades de manejo y pronóstico en un sector de la planicie de inundación del Bajo Paraná. Se apunta a estimar el área inundada, a partir de datos satelitales en microondas pasivas y activas, con una alta resolución temporal, mediante una metodología simple, que pueda ser incorporada a procedimientos operativos de pronóstico hidrológico.

1.2.2 Objetivos Específicos.

1. Generar mapas de área inundada de alta resolución espacial a intervalos regulares utilizando imágenes de microondas activas (SAR).
2. Utilizar los datos obtenidos mediante microondas activas para obtener los parámetros necesarios para la estimación de fracción de área inundada a partir de datos de microondas pasivas.
3. Utilizando lo obtenido en los puntos 1 y 2, y datos de microondas pasivas, calcular la fracción de área inundada con una resolución temporal cuasi diaria para los eventos de inundación ocurridos los años 2007, 2009-2010 y 2014.

1.3 Estructuración de la tesis.

La tesis está estructurada de la siguiente manera:

En el **CAPÍTULO 2** se describe el marco teórico y se da una introducción al área de estudio, a sus características tales como la vegetación, geomorfología e hidrografía. Se da una explicación del Mapa de Ambientes utilizado. Se habla sobre inundaciones en el Paraná para dar un contexto al lector de como varió estos fenómenos en el tiempo en el área de estudio. Se da una introducción a la teledetección para el monitoreo de inundaciones así como se empieza a dar una introducción a los fundamentos de la misma. Se introduce en la idea de sensores remotos en microondas. Se describe la teoría de microondas activa (radar), su ecuación, el coeficiente de retrodispersión y se da una introducción al radar de apertura sintética (SAR), sus características, la geometría de adquisición, resoluciones en acimut, rango y resolución espacial; calibración de las imágenes SAR. Correcciones geométricas de imágenes, interpolación espacial y radiométrica; el moteado en imágenes SAR, incerteza radiométrica debido al moteado; distorsiones en imágenes radar, distorsiones geométricas, distorsiones radiométricas, los mecanismos de interacción onda – superficie; interacción entre la señal SAR con los cuerpos de agua, vegetación no inundada y vegetación inundada. Luego se indica la temática de estudios multitemporales, detección de cambios en imágenes multitemporales SAR, intervalos de confianza radiométricos y cálculo de umbrales en la detección de cambios. Para luego pasar a la evaluación de la exactitud en datos SAR, matriz de confusión y el estadístico Kappa. Se da una introducción a las microondas pasivas, los principios físicos utilizados, las variables físicas de sistemas satelitales, índices, estimación del área inundada utilizando datos satelitales en microondas. Se habla de la validación de datos de microondas pasivas, realizando una correlación de estos datos con información externa para validación, análisis gráficos de asociación, análisis de correlación lineal y contraste de hipótesis.

En el **CAPÍTULO 3** se describe los materiales utilizados dando una explicación de los datos hidrológicos de las alturas hidrométricas; los sistemas de SAR utilizados ALOS PALSAR y COSMO Skymed y de microondas pasivas AMSRE, AMSR2 y SMOS. La metodología implementada para el pre-procesamiento, calibración, procesamiento y detección de cambios de la información SAR, así como la evaluación de la exactitud en mapas generados con imágenes SAR. La metodología aplicada en el procesamiento de microondas pasivas. Se presenta la metodología para la integración de estos dos tipos de datos activos y pasivos para la estimación de fracción de área inundada. Finalmente se explica la evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de microondas pasivas con información externa para validación.

En el **CAPÍTULO 4** se presentan los resultados obtenidos y se realiza una discusión de los mismos. Se comparan los métodos utilizados para las tres zonas de estudio dentro de la tesis, la Zona Total que cubre la totalidad del área de estudio y fue analizada en dos períodos de tiempo correspondiente a los datos de imágenes ALOS PALSAR y la Zona Norte y Zona Sur que dividen la zona de estudio y fue analizado en tres períodos de tiempo, los dos primeros correspondiente a los datos de imágenes ALOS PALSAR y el tercero correspondiente a los datos de imágenes COSMO Skymed. Se indica los valores de fracción de cuerpos de agua, fracción de área inundada y fracción de área no inundada obtenidas de los mapas de cambio. Se presenta los valores de los índices de polarización de los cuerpos de agua, de polarización de áreas no inundadas y de polarización de fracción de áreas inundadas correspondientes a los períodos de las fechas de imágenes ALOS PALSAR e imágenes COSMO Skymed. En cada período de análisis se indica los valores de índice

de polarización observados y los índices de polarización de fracción de áreas inundadas usando los métodos de valores constante e interpolado. Se indica los valores de fracción de área inundada obtenido con los dos métodos de interpolación. Se hace una comparación de los valores de fracción de área inundada obtenidos mediante los distintos métodos de índices de polarización de fracción de áreas inundadas, tanto constante como interpolado. Se hace una comparación entre épocas de análisis de imágenes ALOS PALSAR con imágenes COSMO Skymed. Luego se hace la evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR y finalmente se hace la evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de microondas pasivas con información externa para validación.

En el **CAPÍTULO 5** se extraen las principales conclusiones generales derivadas de este trabajo en conjunto.

En el **ANEXO A** se muestran los mapas de clases de cambio y de inundación obtenidos mediante detección de cambios de imágenes SAR.

En el **ANEXO B** se muestran los gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.

En el **ANEXO C** se realiza una evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

En el **ANEXO D** se realiza una evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

En el **ANEXO E** se transcribe el código de los programas escritos para la automatización del procesamiento de los datos de microondas pasivas usando programas libres.

En el **ANEXO F** se da un ejemplo en tabla de los niveles de confianza versus número equivalente de looks.

En el **ANEXO G** se transcribe el código de los comandos en el programa R para obtener las estadísticas para la evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de microondas pasivas con información externa para validación.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.

2.1 Área De Estudio.

La zona de estudio corresponde a un sector de la llanura aluvial del Río Paraná en su tramo bajo (Neiff, 1990), ubicada entre las coordenadas geográficas: latitud 30° S y 32.619982° S y Longitud 59.525212° O y 60.937579° O. (ver figura 1).

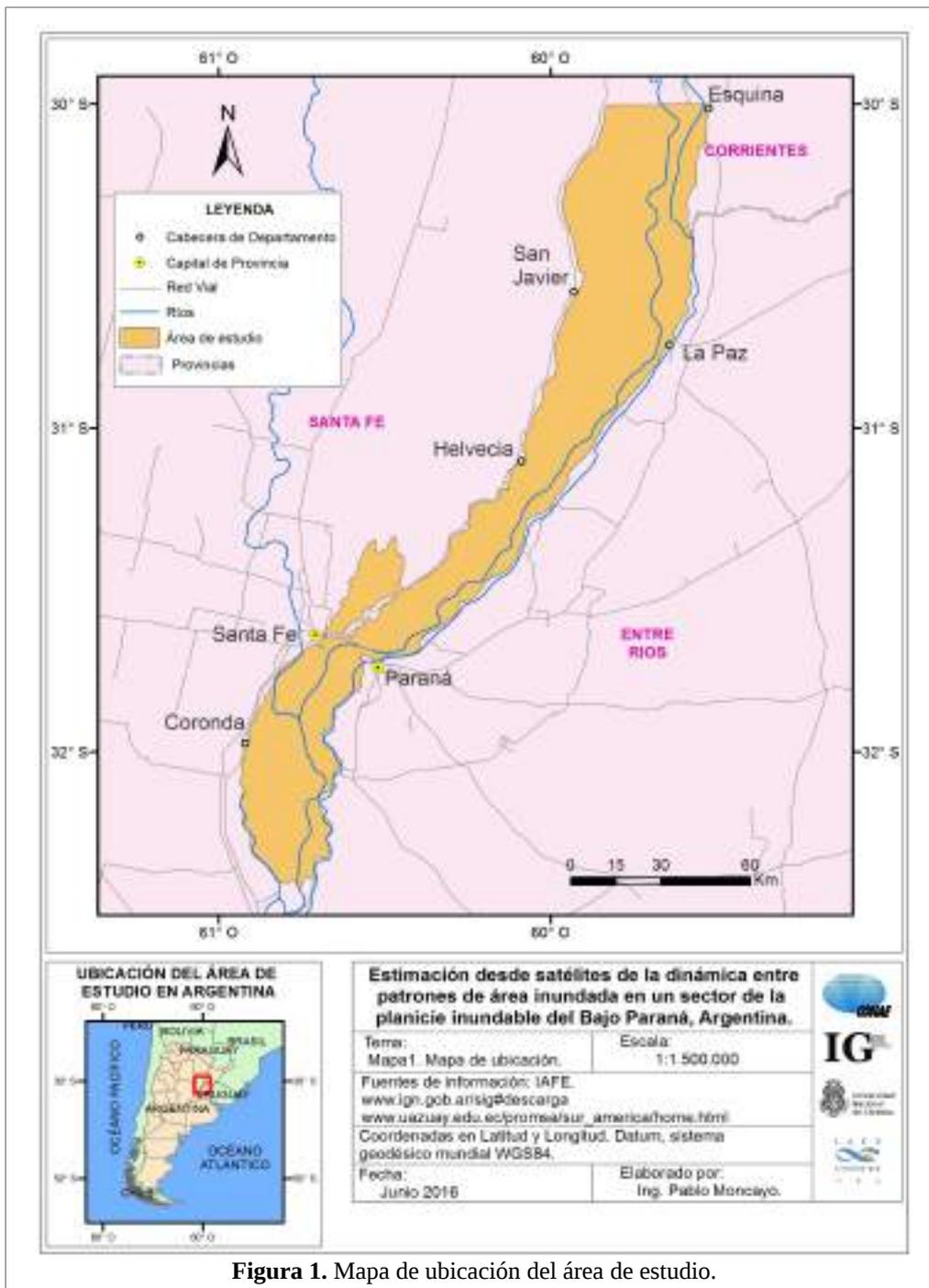


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

Según Marchetti (2010), muchas de las características y procesos que se manifiestan en el área de estudio, tienen sus orígenes emplazados a grandes distancias y con características contrastantes desde puntos de vista geológico – tectónico, hidrológico y sedimentológico. De esta manera El Paraná, al igual que otros grandes ríos de llanura (como el Amazonas y el Orinoco) evidencian la presencia de sedimento proveniente de diferentes formaciones geológicas, lo cual se deduce a partir de las características de los materiales transportados por sus afluentes. Entre ellos, es posible distinguir afluentes de agua blanca, aquellos que traen sedimentos andinos; afluentes de agua negra, los que desaguan planicies arenosas cubiertas por vegetación; y afluentes de agua roja, provenientes de la sub-cuenca brasileña, cargada de arcilla laterítica.

2.1.1 Vegetación.

Según Marchetti (2010), la zona de trabajo se encuentra cubierta por diferentes fisonomías de vegetación, las cuales se distribuyen en parches heterogéneos en respuesta a la variedad de condiciones ambientales características del lugar.

Entre las fisonomías leñosas son frecuentes los bosques dominados por Sauce criollo (*Salix humboldtiana*), por Aliso de río (*Tessaria integrifolia*), así como también aquellos dominados por ambas especies en forma compartida. Cualquiera de ellos representa a la vegetación pionera que coloniza los bancos de arena y albardones generados por el río. Son estructuralmente simples y el desarrollo de especies trepadoras tales como el Guaco (*Mikania periplicifolia*, *M. cordifolia*), pepinito del monte (*Melothria candolleana*), Habichuela cimarrona (*Vigna adenantha*) y Campanilla palmeada (*Ipomoea cairica*) es notable.

Por otro lado, especies como el Timbó blanco (*Albizia inundata*), el Laurel morotí (*Nectandra angustifolia*), el Ingá (*Inga verna*), el Ibirá (*Croton urucurana*) y el Seibo (*Erythina crista galli*) entre otras, conforman el estrato arbóreo de otro tipo de bosque distribuido en el interior de la planicie de inundación y estructuralmente más complejo.

Entre la vegetación herbácea, pajonales dominados por Paja de techar (*Panicum prionitis*) y unidades de vegetación palustre representadas en diferentes combinaciones de especies según el nivel hidrológico del momento, pueden ser identificadas. En estas unidades son frecuentes diferentes especies de Gamba rusa (*Alternanthera philoxeroides*), Marsh parsley (*Cyclosporum leptophyllum*), Capín (*Echinochloa crus-gavonis*), Clavel del pozo (*Ecoipta prostrata*), Huaquito (*Mikania periplicifolia*) entre otras.

Los diferentes cuerpos de agua son colonizados por varias posibles combinaciones de especies tales como Gramalote (*Paspalum repens*), Helecho de agua (*Azolla filiculoides*), Duraznillo de agua (*Ludwigia peploides*), Acordeón de agua (*Salvinia biloba*), Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), Milhojas acuáticas (*Myriophyllum aquaticum*) y Camalotillo (*Nymphoides indica*) por mencionar algunas de las más frecuentes.

2.1.2 Geomorfología.

La zona de estudio, se emplaza dentro de la sección considerada Bajo Paraná por Neiff (1990), en un sub-tramo denominado Paraná Medio por otros autores (Iriondo, 1972; Drago, 1971). Con 600 km de largo, un ancho variable de entre 13 y 60 km y una superficie aproximada de 7200 km² la

llanura aluvial del Paraná medio se encuentra formada por depósitos de cauce y de inundación (Drago, 1971). Los primeros se encuentran representados por llanuras de bancos de arena o por derrames y por llanuras de meandros, en tanto que las llanuras de avenamiento impedido caracterizan a los depósitos de inundación (Iriondo, 1972).

La *llanura de bancos*, de aproximadamente 5 km de ancho, se encuentra compuesta de islas del cauce principal y terrenos adyacentes al mismo donde los bancos de arena constituyen los elementos geomorfológicos más sobresalientes. Adosándose en forma paulatina, originan lagunas de gran superficie. Los cauces temporarios son escasos, y por procesos de taponamiento dan lugar a cuerpos de agua de tipo léntico. Bañados y pantanos constituyen el resto de los elementos geomorfológicos de esta unidad (Iriondo & Drago, 1972).

La *llanura de meandros* ha sido construida por los cauces distribuidos sobre la margen derecha de la llanura. En la zona de trabajo, el río Colastiné constituye el cauce de mayor importancia en la formación de la llanura de meandros; ésta alcanza entre 10 y 12 km de ancho y aproximadamente 25 km de largo (Iriondo, 1972). Presenta una sucesión ininterrumpida de albardones y lagunas semilunares originadas por la migración de los cauces secundarios (Iriondo & Drago, 1972).

Los depósitos de inundación se encuentran representados en la *llanura con avenamiento impedido*. Esta presenta numerosas lagunas de forma casi circular, de escasa profundidades y generalmente de superficie menor que las anteriores. El avenamiento es dificultoso y los cauces, divagantes y de menor profundidad que los anteriores, comunican a las lagunas entre si y con otros cursos de agua principal. Bañados y pantanos ocupan el resto de la superficie (Iriondo & Drago, 1972).

2.1.3 Hidrología superficial y subterránea.

El área de estudio, se encuentra bajo el régimen de pulsos hidro-sedimentológicos (Junk *et al.*, 1989; Neiff, 1990) del Río Paraná, los cuales se caracterizan por los atributos hidrológicos definidos en la función FITRAS: Frecuencia, Intensidad, Tensión, Regularidad, Amplitud y Estacionalidad (Neiff, 1990). Los pulsos hidro-sedimentológicos constituyen una sucesión de crecientes y bajantes las cuales pueden ser de carácter ordinario en algunos pulsos (anual, bi a tri-anual) y extraordinario (cada 8 a 10 años) en otros (Neiff, 1996; Neiff, 1999).

En cuanto a la hidrología subterránea, Filí (1986) menciona 2 sistemas hidrogeológicos claramente definidos; uno de agua somera y otro de agua profunda. Al respecto, el autor menciona que mientras el primer sistema se halla gobernado por la topografía local y la litología de las formaciones geológicas expuestas, el segundo sistema ocurre debajo del primero y que incluso la circulación llega debajo del nivel del mar. En el primer sistema la recarga del agua subterránea ocurre en áreas ocupadas por remanentes de la vieja planicie de inundación y terrazas altas, y la descarga ocurre por evapotranspiración y escorrentía superficial. Por otro lado, este autor sugiere que la recarga del segundo sistema estaría en un área localizada dentro de los 300 km de distancia y la planicie inundable del río Paraná sería su área de descarga.

En el área de recarga del primer sistema, el agua subterránea contiene calcio y bicarbonato con baja a moderada concentración en tanto que el segundo sistema contiene cloruro de sodio. El agua de ambos sistemas se mezcla no obstante, y en el área de descarga central, prevalece el cloruro de sodio y la concentración total de sales excede los 30 g/litro.

2.1.4 Mapa de Ambientes.

El Mapa de Ambientes del área de estudio fue proporcionado por el Laboratorio de Sedimentología y Geomorfología Fluvial de la Universidad Nacional del Litoral, proveniente de productos de imágenes Terra-MODIS de 250 m (Marchetti *et.al.*, 2015), el cual cuenta con 6 clases de cobertura (ver tabla 1).

En la figura 2, se puede observar el Mapa de Ambientes del área de estudio, que fue editado en la cobertura de los cuerpos de agua del río Paraná para que tengan conectividad en el área de estudio.

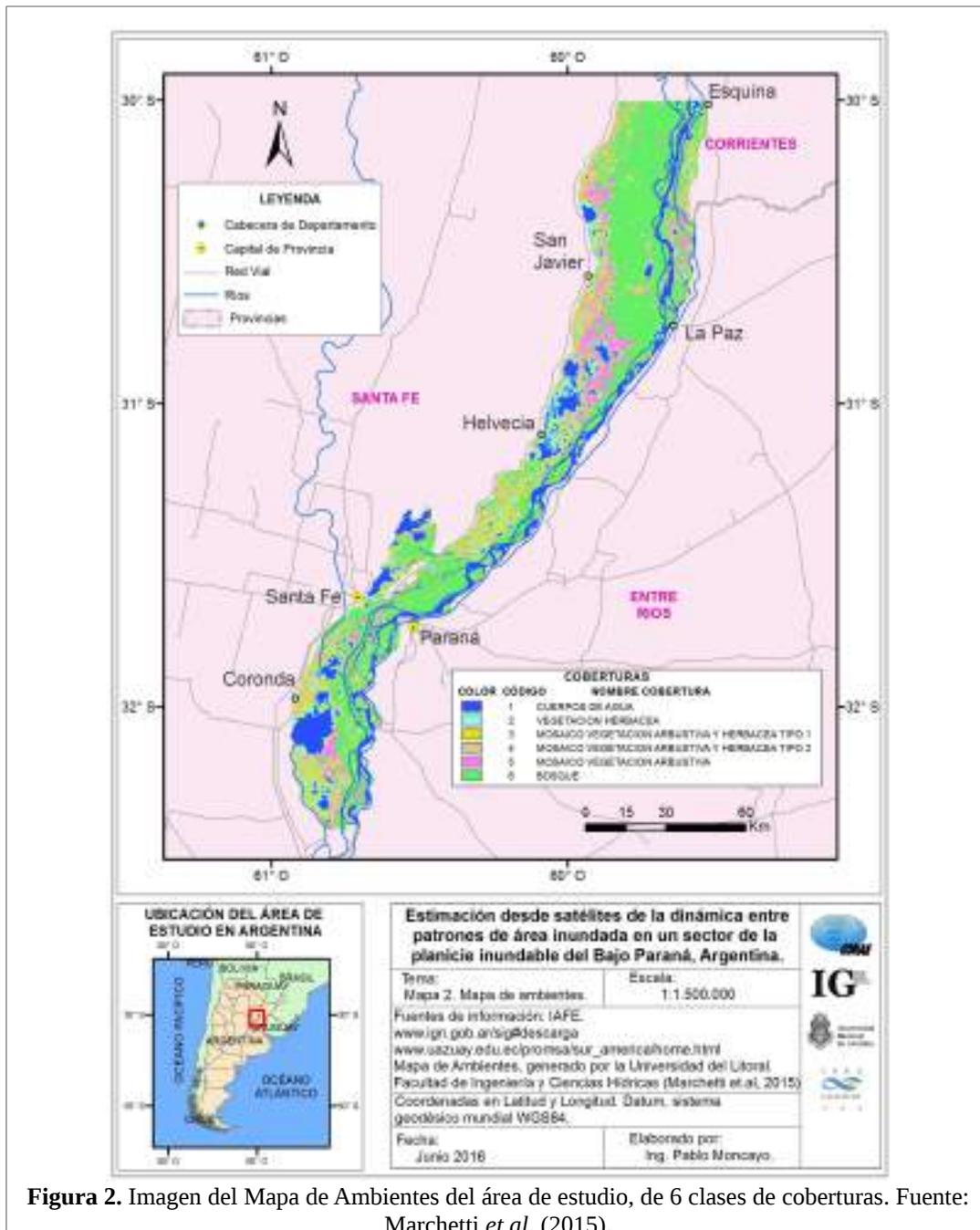


Figura 2. Imagen del Mapa de Ambientes del área de estudio, de 6 clases de coberturas. Fuente: Marchetti *et al.* (2015).

En la tabla 1, se indica las diferentes clases de ambientes con sus respectivas descripciones.

Tabla 1. Clases de Ambientes del área de estudio con su respectiva clasificación. Fuente: Marchetti (2010).

Código de Clase	Nombre de Clase	Descripción
1	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
2	Cubierta vegetal Herbácea	Cubierta vegetal herbácea pantanosa asociado con diferentes tipos de tierras bajas, como las barras e islas, arroyos y corrientes menores, pequeños estanques, bordes de grandes lagos poco profundos, y la parte inferior de los diques de los principales ríos y arroyos.
3	Mosaicos de vegetación arbustiva y herbácea, tipo 1	Cubiertos por mosaicos de tipos de vegetación arbustiva – herbácea. Su presencia puede estar asociada a llanuras de barras de desplazamiento de los principales canales marginales, abanicos de desborde y diques de arroyos menores anastomosados. La cobertura 3, se encuentra en lugares más bajos que la clase 4.
4	Mosaicos de vegetación arbustiva y herbácea, tipo 2	Cubiertos por mosaicos de tipos de vegetación arbustiva – herbácea. Su presencia puede estar asociada a llanuras de barras de desplazamiento de los principales canales marginales, abanicos de desborde y diques de arroyos menores anastomosados. La cobertura 4, se encuentra en lugares más altos que la clase 3.
5	Mosaicos de vegetación arbustiva	No está bien representado en términos de superficie y está asociado con mosaicos de vegetación arbustiva - pantanosa en llanuras de barras de desplazamiento, meandros abandonados con diques bajos y la parte superior de las tierras bajas.
6	Bosque	Bien distribuida a lo largo de las márgenes del río Paraná, en su mayoría asociada a pionero y bosques maduros ubicados en los diques de los ríos Paraná y otros ríos principales, y también en las islas del canal principal.

2.2 Inundaciones en el Paraná.

En el año 2007, en el marco del fenómeno ENOS (Corriente de El Niño – Oscilación del Sur), ocurrió en el área de estudio un evento de inundación provocado por una crecida del río Paraná causada por el exceso de precipitaciones en la cuenca del río Paraguay durante la segunda mitad del año 2006. La crecida del río Paraná se magnificó por la ocurrencia de inusualmente fuertes precipitaciones locales (Salvia, 2010). Esta situación provocó que el río Paraná presentara en las ciudades de Esquina (Provincia de Corrientes) y Santa Fe (Provincia de Santa Fe) niveles mayores a los históricos durante algo más de 6 meses (desde finales de diciembre de 2006 hasta principios de julio de 2007), para Esquina mayores al nivel de alerta por casi un mes (desde el 06 de febrero al 26 de marzo de 2007) (ver figura 3 superior), y para Santa Fe mayores al nivel de alerta por dos meses (desde el 07 de febrero al 08 de abril de 2007), y mayores al nivel de evacuación durante aproximadamente tres semanas (desde el 10 de marzo al 03 de abril de 2007) (ver figura 3 inferior).

El año 2008 fue particularmente seco en la región (en el marco de la sequía a escala regional que afectó al país) (Salvia, 2010), principalmente en los meses de octubre y noviembre (ver figura 3).

A diciembre de 2009, volvió haber una fuerte crecida en el nivel del agua del río Paraná, que duró cinco meses y medio (desde el 02 de diciembre de 2009 al 12 de mayo de 2010), para Esquina mayores al nivel de alerta por tres meses y ocho días (desde el 02 de diciembre de 2009 al 10 de marzo de 2010), y mayores al nivel de evacuación durante dos semanas (desde el 01 al 15 de febrero de 2010) (ver figura 3 superior), y para Santa Fe mayores al nivel de alerta por dos meses y

medio (desde el 29 de diciembre de 2009 al 16 de marzo de 2010), y mayores al nivel de evacuación por más de un mes (desde el 03 de febrero al 05 de marzo de 2010) (ver figura 3 inferior).

A junio de 2014, volvió haber una fuerte crecida en el nivel del agua del río Paraná, que duró tres meses (desde el 01 de junio al 29 de agosto de 2014), para Esquina mayores al nivel de alerta por aproximadamente un mes y medio (desde el 21 de julio al 06 de agosto de 2014) (ver figura 3 superior), y para Santa Fe mayores al nivel de alerta por más de dos semanas (desde el 13 de julio al 30 de julio de 2014) (ver figura 3 inferior).

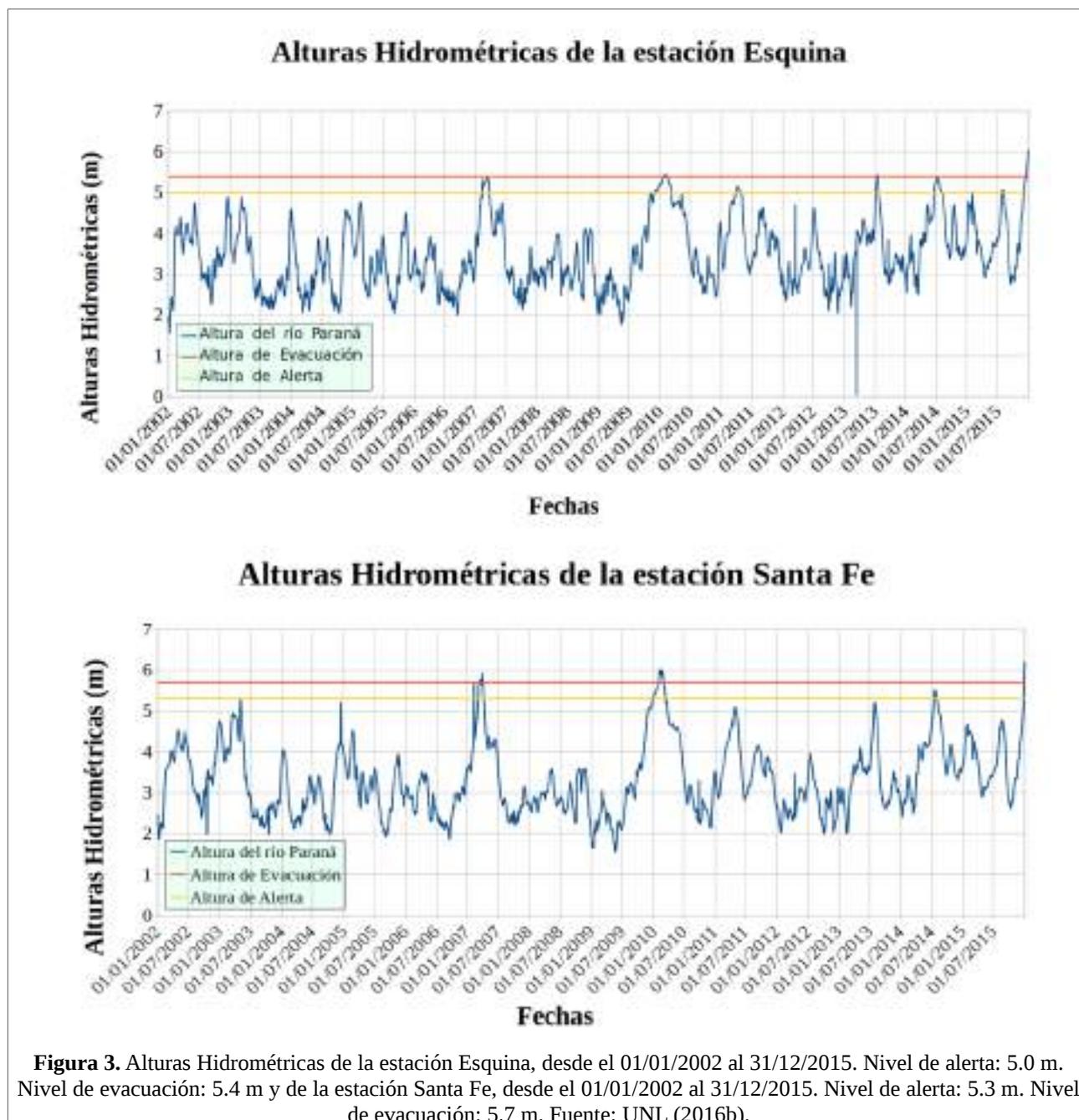


Figura 3. Alturas Hidrométricas de la estación Esquina, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015. Nivel de alerta: 5.0 m. Nivel de evacuación: 5.4 m y de la estación Santa Fe, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015. Nivel de alerta: 5.3 m. Nivel de evacuación: 5.7 m. Fuente: UNL (2016b).

2.3 Teledetección para el monitoreo de inundaciones.

Las técnicas de teledetección por satélite han sido muy útiles para las investigaciones hidrológicas a gran escala, ya que proporcionan un medio único para observar continuamente grandes regiones y son la única alternativa a los datos in situ en zonas remotas (Salvia *et al.*, 2010). El uso de herramientas de teledetección se vuelve especialmente importante cuando el área de estudio es muy extensa, poco accesible, o ambas, como ocurre con los microistemas de humedal en general. Esto es especialmente cierto en eventos extremos, en los cuales es logísticamente difícil y económicamente costoso relevar el área mediante campañas de campo. Es para el monitoreo y evaluación de estos eventos cuando la teledetección se vuelve muchas veces la única herramienta viable (Salvia, 2010).

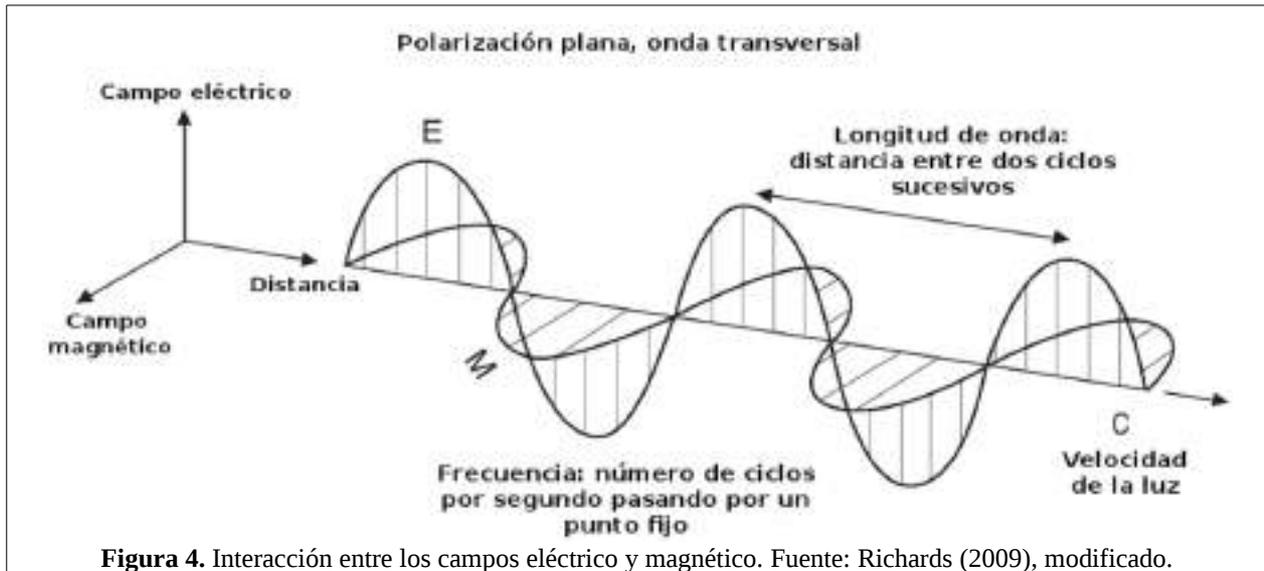
En el caso de monitoreo o evaluación de áreas inundadas, en los sensores ópticos las estimaciones de la extensión del agua superficial usando mediciones visibles o infrarrojas proporcionan una resolución espacial relativamente alta pero no pueden detectar el agua superficial bajo las nubes o la vegetación densa, por lo cual no suelen ser adecuados (Salvia *et al.*, 2010). Esto lleva a una dificultad en la evaluación del evento en sus etapas iniciales, pudiéndose detectar la inundación recién cuando la altura del agua es tal que cubre casi por completo la vegetación (Salvia, 2010). A diferencia de los sistemas ópticos, los radares de apertura sintética (SARs), que operan en las longitudes de onda de las microondas, revisten particular interés para monitorear y mapear la dinámica de inundación de los humedales (Pope *et al.*, 1997, Kasischke *et al.*, 2003, Grings *et al.*, 2006, Grings, 2008), así como sistemas pasivos en microondas (radiómetros) que han demostrado ser sensibles a la condición de inundación de una superficie. Esto se basa en la diferencia entre las propiedades de emisión y/o dispersión del agua con respecto a suelo desnudo o vegetación. Estas diferencias se observan en distintas polarizaciones y frecuencias (Salvia *et al.*, 2010). Las microondas con frecuencia < 10 GHz (Banda X) atraviesan la cubierta nubosa sin ser afectadas. Además, en algunos tipos de cobertura, las microondas pueden penetrar la vegetación e interactuar con el suelo o el agua debajo de ella (Grings *et al.*, 2005; Grings *et al.*, 2006 y Grings, 2008).

2.3.1 El Espectro Electromagnético.

La radiación electromagnética es una forma de energía transferida en forma libre en el espacio, que exhibe tanto las propiedades de onda como de partículas (Hunt, 1980). De acuerdo con sus propiedades de onda, la energía electromagnética es capaz de viajar a través del espacio en un plano armónico en un patrón a la velocidad de la luz (c), cuyo valor es 3×10^8 m/s. La onda consiste en un campo eléctrico (vertical) y uno magnético (horizontal), que son ortogonales entre sí y con la dirección de propagación de la misma (ver figura 4). La onda se puede describir en términos de la longitud de onda (λ) que es la distancia de separación entre picos de onda adyacentes, o su frecuencia (f) que es el número de picos que pasan por un punto fijo en un tiempo dado (Chor, 1986). La ecuación de la frecuencia se indica en la ecuación 1.

Ecuación 1. Ecuación de la Frecuencia.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$



Por otro lado, también se observa que la energía electromagnética se transfiere en unidades distantes llamadas fotones. Esto da lugar a las propiedades de las partículas de la radiación electromagnética (Chor, 1986). La energía de radiación (E) está relacionada con la frecuencia (f) a través de un valor constante conocido como la constante de Planck (h) que es 6.6256×10^{-34} J s (Alonso & Finn, 1999) como se indica en la ecuación 2.

Ecuación 2. Energía de Radiación, expresado con frecuencia.

$$E = h * f \quad (2)$$

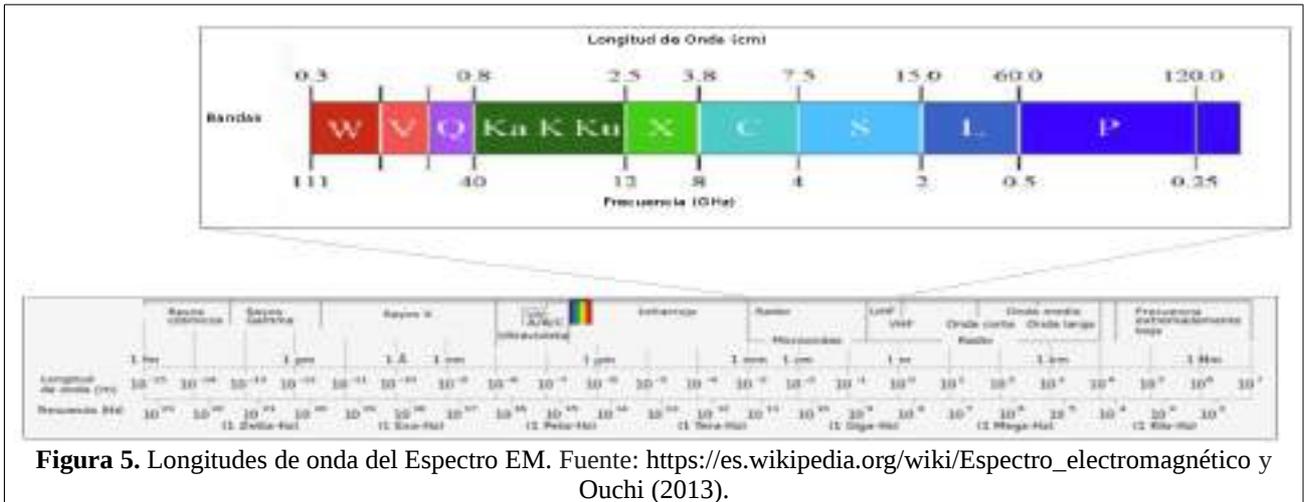
Por sustitución en la ecuación 1, se pueden relacionar las propiedades de la partícula y la onda de la radiación electromagnética como se indica en la ecuación 3.

Ecuación 3. Energía de Radiación, expresado con longitud de onda.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Así, la energía de un fotón varía directamente con la frecuencia e inversamente con las longitudes de onda de la radiación. En otras palabras, cuanto mayor sea la energía, mayor será su frecuencia y menor será su longitud de onda. Estas propiedades representan interacciones entre la energía y la materia en una escala atómica y molecular (Chor, 1986).

En la figura 5 se observa el espectro electromagnético con énfasis en las longitudes de onda del microondas que van de 1 GHz y 300 GHz y que corresponden a una longitud de onda de 1 m a 1 mm. El espectro electromagnético se extiende desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta las ondas gamma de alta energía; también incluye la energía del visible e infrarrojo que es la base de la teledetección óptica (Ulaby *et al.*, 1981).

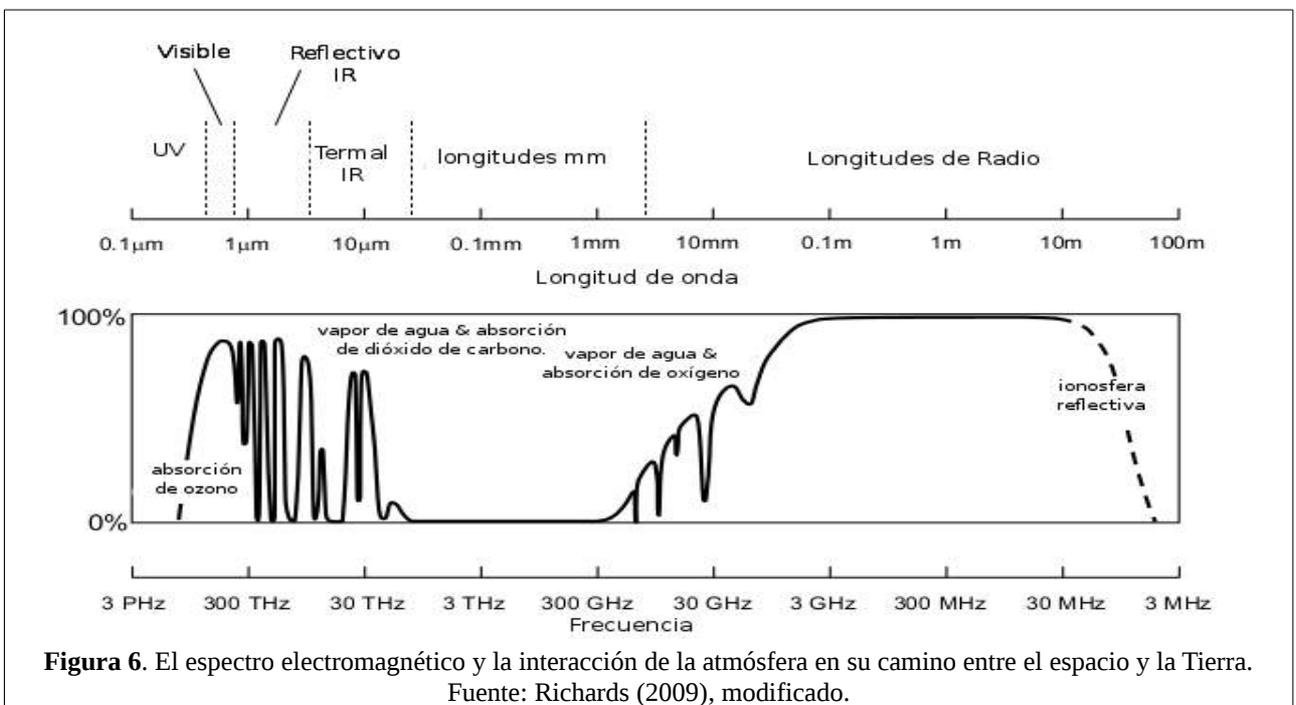


En la tabla 2, se indican las longitudes de onda del microondas y sus frecuencias utilizadas.

Tabla 2. Longitudes de onda del microondas y sus frecuencias utilizadas. Fuente: Moreira *et al.* (2013).

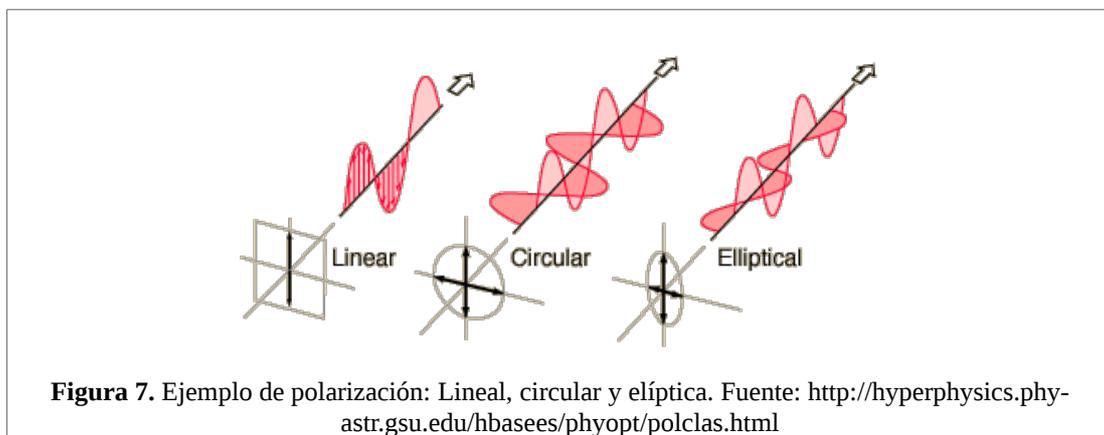
Frecuencia de la Banda	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Frecuencia [GHz]	40–25	17.6–12	12–7.5	7.5–3.75	3.75–2	2–1	0.5–0.25
Longitud de Onda [cm]	0.75–1.2	1.7–2.5	2.5–4	4–8	8–15	15–30	60–120

Dentro del rango de frecuencias de microondas, la emisión de radiación y absorción de la atmósfera es sensible a parámetros como la humedad, la lluvia y la temperatura. Por lo tanto, las microondas juegan un papel importante en la observación de la atmósfera, así como de la superficie de la Tierra (Ulaby *et al.*, 1981). En la figura 6 se muestra el espectro de transmisión de la atmósfera.

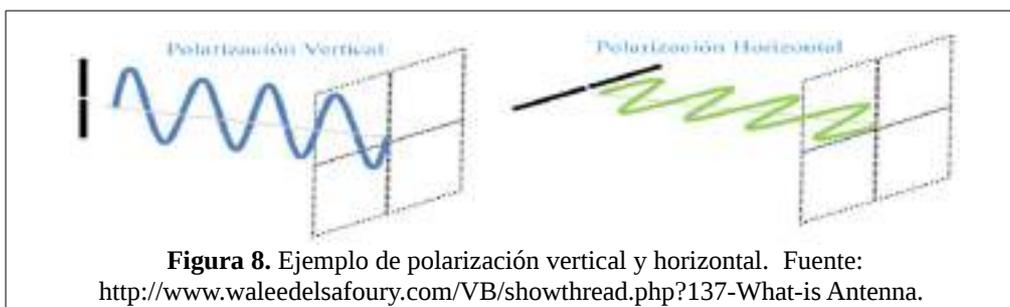


2.3.2 Polarización.

La polarización de una onda plana describe la forma y lugar de la dirección del vector eléctrico (En un plano ortogonal a la dirección de propagación) en función del tiempo (Ulaby & Van Zyl, 1990). Una onda es polarizada cuando la orientación de la energía electromagnética que se transmite puede ser controlada. Se refiere a la orientación espacial del plano de oscilación eléctrica que se orienta verticalmente, horizontalmente, o en algún otro ángulo (Lusch, 1999). En el caso general, el lugar del vector eléctrico en un plano ortogonal a la dirección de propagación es una elipse, y la onda se denomina polarizada elípticamente. Bajo ciertas condiciones, la elipse puede degenerar en un segmento de una recta o de un círculo, y la polarización se llama entonces lineal o circular (Ulaby & Van Zyl, 1990). En la figura 7 se ve un ejemplo de los tipos de polarizaciones.



Según Lusch (1999), aunque todos los ángulos son posibles, solo se utilizan las orientaciones verticales u horizontales. En la figura 8, se observa a la izquierda un ejemplo de polarización vertical y a la derecha la polarización horizontal.



Según ITC (2004), la polarización de una onda electromagnética es importante en el campo de la teledetección en microondas, ya que dependiendo de la orientación de la onda transmitida y recibida, la respuesta será distinta y dará diferente información sobre los objetos de la superficie terrestre. En las descripciones de sistemas la polarización se expresa a través de las siguientes abreviaturas:

- HH: transmisión horizontal y recepción horizontal.
- VV: transmisión vertical y recepción vertical.
- HV: transmisión horizontal y recepción vertical.
- VH: transmisión vertical y recepción horizontal.

2.4 Sensores remotos en Microondas.

Los sensores remotos en microondas proporcionan información sobre la estructura y contenido de humedad del terreno, lo que es complementario con la información obtenida mediante los sistemas ópticos. Los sensores de microondas se pueden clasificar como activos (radares) o pasivos (radiómetros), en donde cada clase de sensor proporciona una visión única de las propiedades eléctricas y mecánicas del entorno detectadas (Long, 2009).

2.4.1 Microondas Activa (radar).

Radar es el acrónimo de **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging (que puede traducirse como Detección y medición de distancia por Radio). Los radares operan en la región de las microondas del espectro electromagnético e incluyen longitudes de onda de 1 milímetro a 1 metro. (Henderson & Lewis, 1998).

Radar se refiere a un instrumento, así como a una técnica. El instrumento, emite pulsos electromagnéticos en las longitudes de onda de las microondas y detecta las reflexiones de estos pulsos provenientes de objetos en su línea de visión. Mientras que la técnica utiliza el tiempo de viaje del pulso, tanto de ida como de vuelta para determinar la distancia al objeto detectado y su intensidad de retrodispersión (ver sección 2.4.1.1.1) para inferir cantidades físicas, tales como el tamaño o la rugosidad de la superficie (Skolnik, 1962, citado en Hanssen, 2002). En la figura 9a, se indica un ejemplo de la operación de radar, enviando un pulso hacia la superficie terrestre y obteniendo retrodispersión del pulso que regresa al sensor; en la figura 9b, se indica un diagrama de un pulso simple enviado desde la antena radar y su retrodispersión.

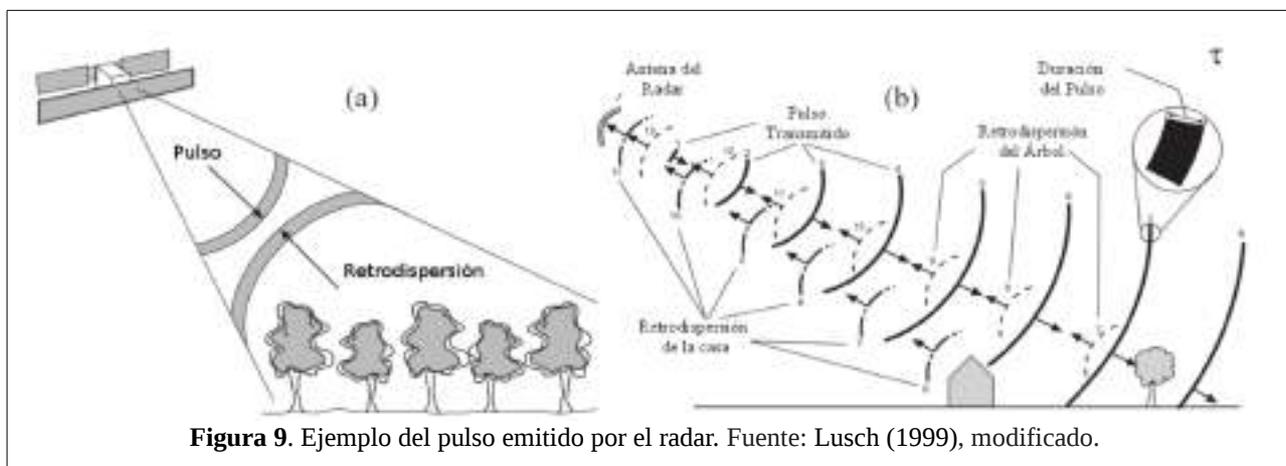
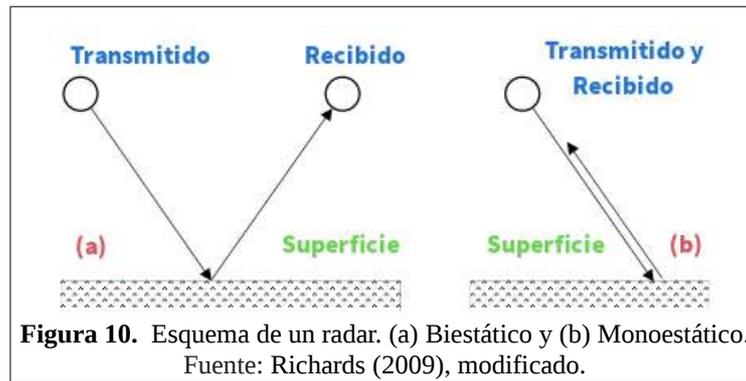


Figura 9. Ejemplo del pulso emitido por el radar. Fuente: Lusch (1999), modificado.

De acuerdo a la ubicación de las antenas transmisora y receptora, el sistema puede denominarse biestático o monoestático. En el primer caso, el transmisor y el receptor en un sistema de imágenes de teledetección por microondas están ubicados por separado (figura 10a). En el segundo caso, el transmisor y el receptor están juntos y, a menudo, comparten la misma antena (figura 10b); hasta la fecha, esta última ha sido la configuración usada en teledetección de radar (Richards, 2009).



2.4.1.1 La Ecuación del Radar.

Un Radar puede ser modelado por la llamada ecuación de Radar (ver ecuación 4), que liga la potencia recibida con la potencia transmitida en presencia de un blanco caracterizado por la denominada sección eficaz al Radar (Radar Cross Section) (σ) (Maitre, 2001) y es el flujo promedio por unidad de tiempo que recibe la antena (Lanfri, 2011). Para el caso de los SAR, donde la antena de transmisión es la misma que la de recepción se define siguiendo la ecuación 4 (Maitre, 2001, citado por Panozzo, 2013). La sección eficaz al Radar (σ) es redefinida como la retrodispersión del Radar por unidad de área (σ^0) y es conocido como coeficiente de retrodispersión. (ver sección 2.4.1.1.1) (Henderson & Lewis, 1998).

Ecuación 4. Ecuación del Radar.

$$Pr = Pe \frac{G^2 \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4 a} \quad (4)$$

Donde:

Pr : potencia recibida,

Pe : potencia enviada,

G : ganancia de la antena,

λ : longitud de onda,

a : pérdida debido a la absorción del medio de propagación,

R : distancia entre la antena y el blanco.

El término R^4 corresponde a la atenuación geométrica debido a la distancia viajada por el pulso electromagnético enviado. La atenuación es de R^2 en el viaje hacia el blanco y nuevamente R^2 en el retorno a la antena (Maitre, 2001, citado por Panozzo, 2013).

2.4.1.1.1 Coeficiente de retrodispersión.

El σ^0 , es una función compleja que toma en cuenta las dimensiones (área) y constantes dieléctricas del material retrodispersor, y depende de la frecuencia y polarización de la onda incidente (Maitre, 2001). Es definido con respecto al plano nominalmente horizontal y, en general tiene una variación significativa con respecto al ángulo de incidencia (ver sección 2.4.1.4), la longitud de onda (ver sección 2.2), y la polarización (ver sección 2.3.2); así como con las propiedades de la propia superficie de dispersión tales como la geometría (ver sección 2.4.1.4), la rugosidad (ver sección

2.4.1.13.2.2) y la constante dieléctrica (ver sección 2.4.1.14) (SARMAP, 2008).

Los valores de σ° de las imágenes de radar pueden ser expresado de diferentes formas. La Intensidad de una onda electromagnética es proporcional al flujo promedio de energía por unidad de tiempo (potencia), o sea al valor cuadrático medio del campo eléctrico. Entonces la potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda (Salvia, 2014). A su vez, σ° puede ser indicado como amplitud que se expresa como la raíz cuadrada del σ° . Finalmente puede ser expresado en forma logarítmica, por ejemplo en decibeles (σ°_{dB}) (Lanfri, 2011).

En la tabla 3 se indican los diferentes modos en que pueden ser expresados los valores de coeficiente de retrodispersión de las imágenes de radar.

Tabla 3. Modos en que pueden ser expresados los valores de coeficiente de retrodispersión de las imágenes de radar.
Fuente: Laur *et al.* (2004)

Potencia	Amplitud	Decibeles
σ°	$\sqrt{\sigma^\circ}$	$10 \cdot \log \sigma^\circ$

2.4.1.2 Radar De Apertura Sintética (SAR).

Un radar de apertura sintética es un sensor de radar montado sobre una plataforma móvil. De manera similar a un radar de apertura real (RAR), las ondas electromagnéticas se transmiten secuencialmente y los ecos de retrodispersión son recogidas por la antena del radar. En el caso del SAR el tiempo consecutivo de la transmisión/recepción se traduce en diferentes posiciones, debido al movimiento de la plataforma (Moreira *et al.*, 2013). El registro de datos que abarca las señales que se habrían recibido por una apertura real muy larga de la antena, que es la fuente del término "apertura sintética" (Njoku & Farr, 2013). Los sistemas SAR logran mejorar la resolución espacial de las imágenes gracias a que aprovechan el movimiento del satélite, sumado a técnicas de procesamiento, para simular una antena de mayor porte (Henderson & Lewis, 1998).

En la figura 11 se indica un esquema del movimiento del SAR de los ecos generados por el movimiento de la nave para sintetizar una gran antena.

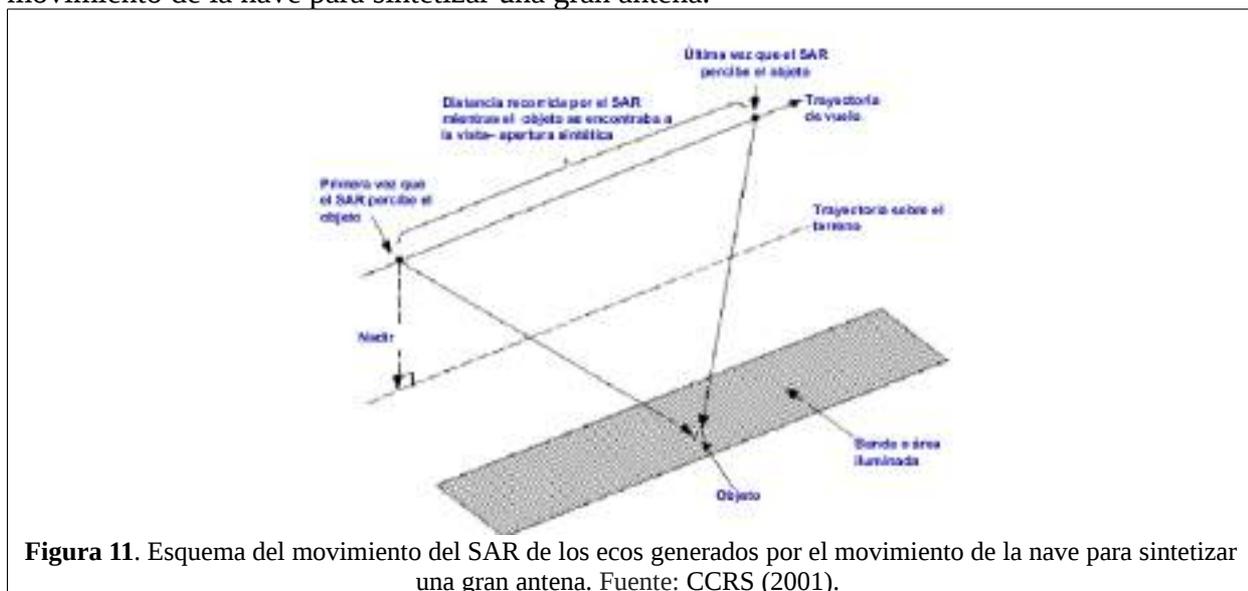


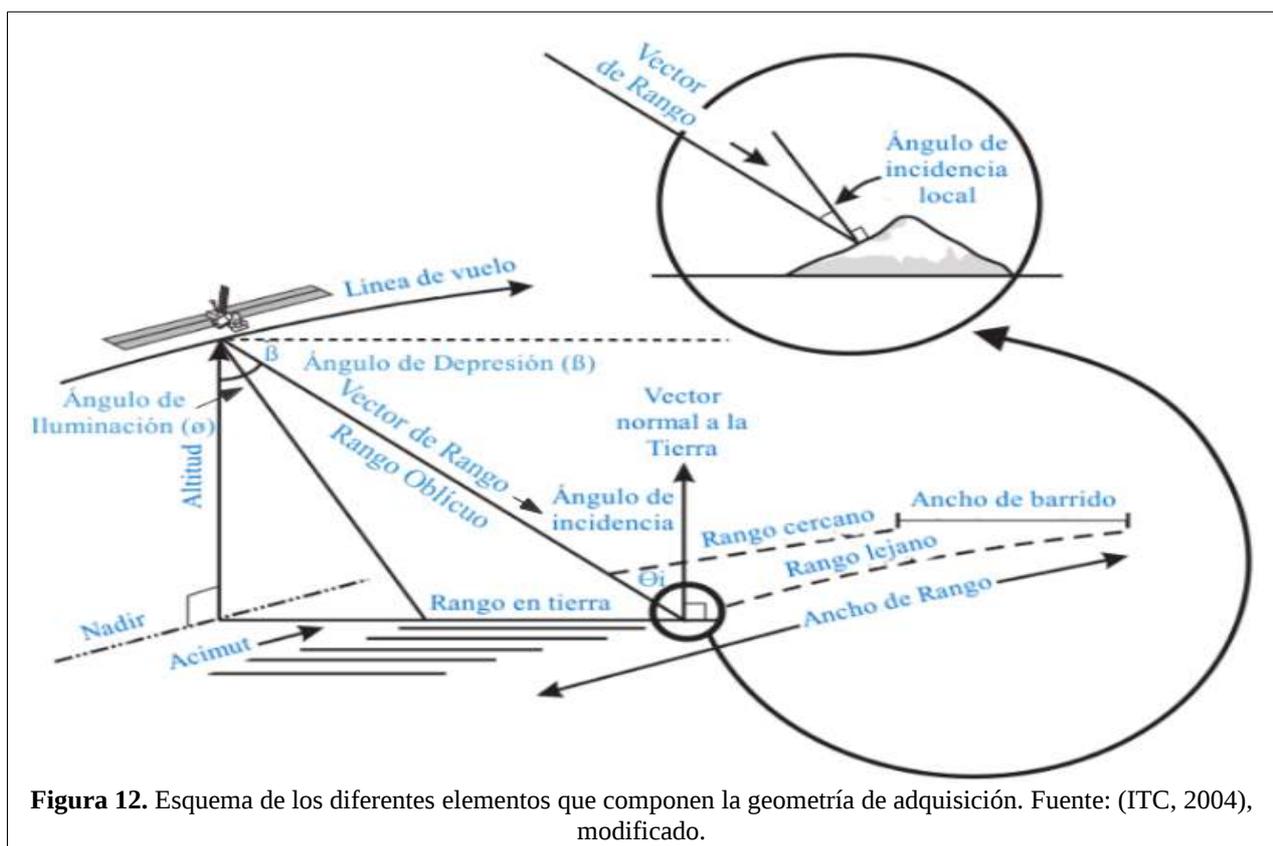
Figura 11. Esquema del movimiento del SAR de los ecos generados por el movimiento de la nave para sintetizar una gran antena. Fuente: CCRS (2001).

2.4.1.3 Características del Radar de Apertura Sintética.

El SAR presenta algunas características que se enumeran a continuación: Las nubes y otros componentes atmosféricos no interfieren con la detección y, por lo tanto de formación de imágenes, en las longitudes de onda utilizadas para el radar. Permite el sensado en todas las condiciones climáticas a menos que haya precipitaciones particularmente graves y se utilizan longitudes de onda muy cortas (Richards, 2009), tienen un efecto significativo sólo en los radares que funcionan por debajo de 2 cm de longitud de onda, los efectos de la lluvia son relativamente intrascendentes en longitudes de onda por encima de 4 cm (Henderson & Lewis, 1998). La plataforma lleva su propia fuente de energía (Richards, 2009), por lo que es independiente de las condiciones de iluminación solar y permite el sensado diurno/nocturno (Cumming & Wong, 2005). La resolución geométrica es independiente de la altura del sensor o longitud de onda (Curlander & McDonough, 1991).

2.4.1.4 Geometría de adquisición.

El SAR observa los objetos de forma lateral, el haz de microondas ilumina un área en la superficie de la Tierra (ITC, 2004). En la figura 12, se indica un esquema de los diferentes elementos que componen la geometría de adquisición.



A continuación, se explican los elementos de la geometría de adquisición:

- *Altitud* es la distancia perpendicular entre sensor satelital y la superficie terrestre. (ITC, 2004)

- *Nadir* es la intersección entre la superficie terrestre y la normal a ella que pasa por el satélite (Panozzo, 2013).
- *Línea de vuelo* es la dirección de vuelo que sigue la plataforma en una órbita (ITC, 2004), el satélite se desplaza hacia el polo norte en un lado de la Tierra y luego hacia el polo sur en el otro; estos toman el nombre de pasada ascendente y descendente respectivamente (CCRS, 2001).
- *Dirección de mirada* se refiere a la orientación de las características de la línea de vuelo (Henderson & Lewis, 1998), se cuenta con miradas de toma hacia la derecha o hacia la izquierda, esto hace posible además que una misma zona geográfica pueda observarse desde lados opuestos, bajo distintas condiciones de iluminación (Marchionni & Cavayas, 2014).
- El *acimut* sigue la dirección de la línea de vuelo.
- El *Rango Cercano* es la porción de la imagen que es más cercana a la línea de vuelo del satélite que lleva el radar (es decir, la parte más cercana al nadir).
- El *Rango Lejano* es la parte de la imagen que está más lejos del Nadir.
- El *ancho de barrido* es la porción de la superficie que es iluminada por el SAR para formar la imagen, está determinado por la distancia entre los rangos cercano y lejano.
- El *Rango Oblicuo* (r_{sl}) es la distancia entre la antena y el objeto.
- El *Rango en tierra* (r_{gr}) es la proyección de r_{sl} en el suelo.
- El *Ángulo de Iluminación* (\emptyset) es el ángulo entre la vertical de la antena con el suelo y el pulso transmitido al punto de incidencia (ITC, 2004).
- El *Ángulo de incidencia* (θ_i) es el ángulo entre la línea de la señal del radar y la vertical local, con respecto al geoide, es uno de los factores de mayor influencia de la retrodispersión del radar y la apariencia de objetos en la imagen causado por el acortamiento o la inversión de relieve (ver sección 2.4.1.12.1.2).
- El *Ángulo de Depresión* (β) es el ángulo entre la línea horizontal de la antena y el pulso transmitido al punto de incidencia (Henderson & Lewis, 1998). Al pasar del Rango cercano al Rango Lejano, el ángulo de incidencia aumenta, es importante distinguir entre el *ángulo de incidencia* del sensor y el *ángulo de incidencia local* que es el ángulo entre el haz de radar y la superficie normal local, que varía en función de la pendiente del terreno y la curvatura de la Tierra (ITC, 2004).

2.4.1.5 Adquisición en rango.

Los SAR envían pulsos cortos modulados linealmente en frecuencia llamados “*chirps*”. Cada chirp es enviado en dirección aproximadamente perpendicular al vector de velocidad de la plataforma y está determinado por una duración τ_p , una frecuencia central f_c y una tasa de variación de la frecuencia K_r (Panozzo, 2013).

2.4.1.6 Resolución en Rango.

Es la distancia mínima a la que tienen que estar dos objetos en el terreno para que puedan ser separados. Para esto se determina la diferencia en tiempo entre dos ecos de retorno (ITC, 2004). Si el tiempo de arribo del comienzo del eco del pulso del blanco más lejano arriba luego del final del eco del más cercano, entonces estos pueden ser distinguidos por el sistema (Curlander & McDonough, 1991). La figura 13 muestra la geometría lateral del sistema SAR y la forma en que el

pulso se expande en forma concéntrica desde el sensor a la velocidad de la luz. En ella se muestran con líneas punteadas el comienzo y el final del pulso.

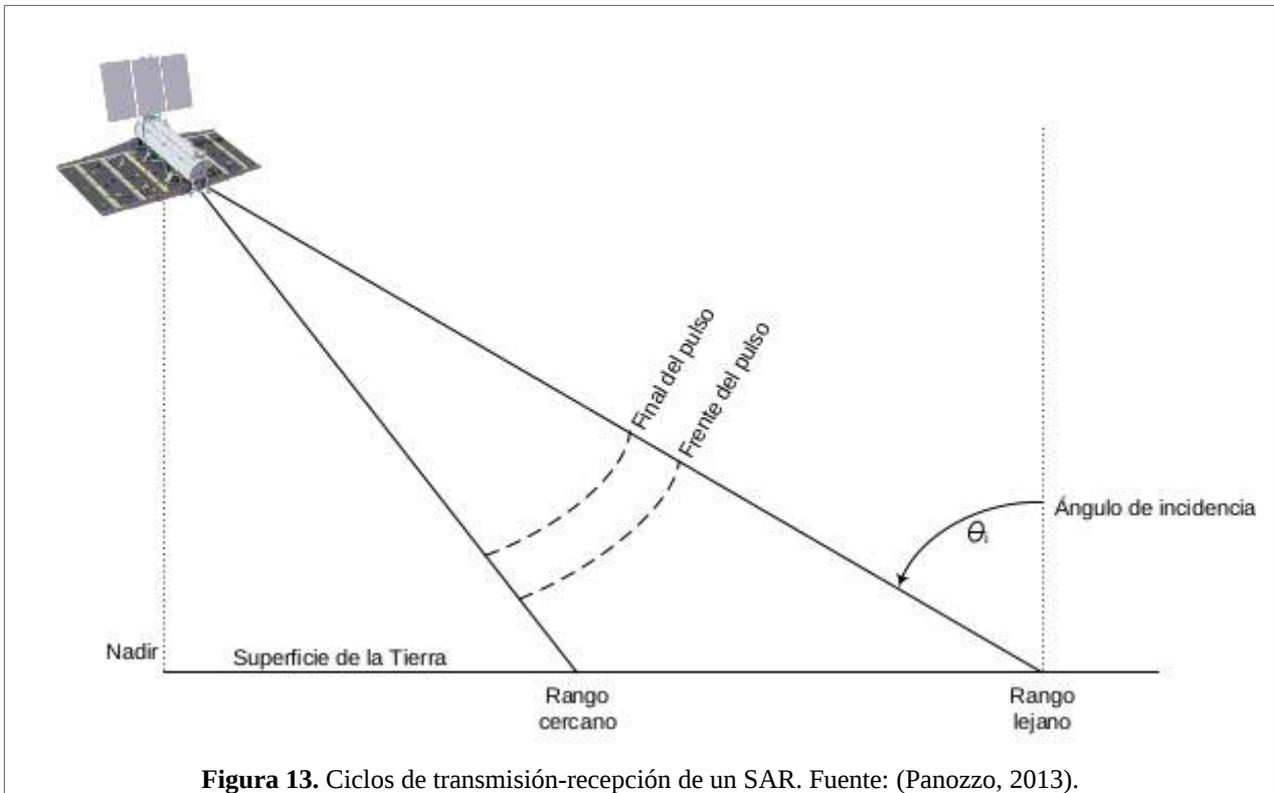


Figura 13. Ciclos de transmisión-recepción de un SAR. Fuente: (Panozzo, 2013).

La resolución en rango puede ser representada por el r_{sl} o el r_{gr} . La resolución del r_{sl} es independiente de la altura de la órbita y es la mitad de la longitud del pulso transmitido τ_p (Martinis, 2010), la resolución en rango oblicuo de un radar convencional puede ser calculada como:

Ecuación 5. Rango Oblicuo.

$$r_{sl} = \frac{c \tau_p}{2}, \quad (5)$$

donde c es la velocidad de la luz.

Como se puede observar en la ecuación 5, a menor duración del pulso mejor resolución. Para el caso de los radares convencionales, la duración del pulso es inversamente proporcional al ancho de banda B del mismo (Curlander & McDonough, 1991), dado que se necesita un mayor número de frecuencias para poder representar a dicho pulso en el espectro (dominio de las frecuencias), y por lo tanto la resolución en rango oblicuo puede ser descrita por la ecuación

Ecuación 6. Rango Oblicuo proporcional al ancho de banda.

$$r_{sl} = \frac{c}{2B}, \quad (6)$$

Para el caso de los sistemas SAR el pulso (chirp) está modulado linealmente en frecuencia y por lo tanto logra un mayor ancho de banda B mediante el envío de pulsos más largos en tiempo, contrariamente a lo que sucede con los radares convencionales. Dado que resulta más sencillo, desde el punto de vista de la electrónica necesaria a bordo del satélite, enviar un pulso de mayor duración modulado en frecuencia que un pulso extremadamente corto a alta potencia, el hecho de lograr una mejor resolución en rango cuando mayor es la duración del chirp hace que su utilización sea ideal para los sistemas SAR (Franceschetti & Lanari, 1999).

Por otra parte, la resolución en tierra se obtiene a partir de la proyección de r_{sl} sobre la superficie mediante la división por el seno del ángulo de incidencia, como se indica en la ecuación 7

Ecuación 7. Rango en tierra.

$$r_{gr} = \frac{r_{sl}}{\sin \theta i}, \quad (7)$$

El ángulo de incidencia aumenta desde el rango cercano hacia el lejano y por lo tanto al dividir por el seno del mismo, la resolución en tierra resulta mejor en el rango lejano que en el cercano (Panozzo, 2013).

2.4.1.7 Adquisición en Acimut.

Según Panozzo (2013), a medida que la plataforma avanza, un blanco es iluminado por una gran cantidad de pulsos. Al ser los ecos de la señal guardados en manera *coherente*¹ es posible realizar el seguimiento de la historia de fase de un retrodispersor a lo largo de todo el tiempo durante el que fue iluminado. La explotación de la fase de la señal por el subsiguiente proceso de formación de la imagen puede ser pensado como la síntesis de una antena con una gran extensión en acimut (Bamler & Schättler, 1993).

La figura 14 esquematiza lo mencionado en el párrafo anterior. Un blanco es iluminado desde el momento t_1 repetidas veces hasta el momento t_2 que es cuando queda fuera de la pisada de la antena. El estudio de los cambios de fase en la señal permite obtener una resolución tan fina como si el blanco hubiera sido adquirido con una antena cuyo tamaño de apertura real fuera el de la distancia entre los puntos correspondientes a los tiempos t_1 y t_2 . Esta distancia se denomina apertura sintética de la antena (Curlander & McDonough, 1991) y en la figura se indica como L_{AS} . La dimensión de la apertura sintética que se calcula según la ecuación 8 (Olmsted, 1993):

1 En el caso del SAR el término coherencia es utilizado para describir sistemas que preservan la fase de la señal recibida respecto de la emitida (ESA, 2017).

Ecuación 8. Ecuación de la dimensión de la apertura sintética.

$$L_{AS} = \frac{\lambda R_0}{L_a}, \quad (8)$$

donde λ es la longitud de onda, R_0 el rango cercano y L_a el tamaño de la antena en dirección de acimut.

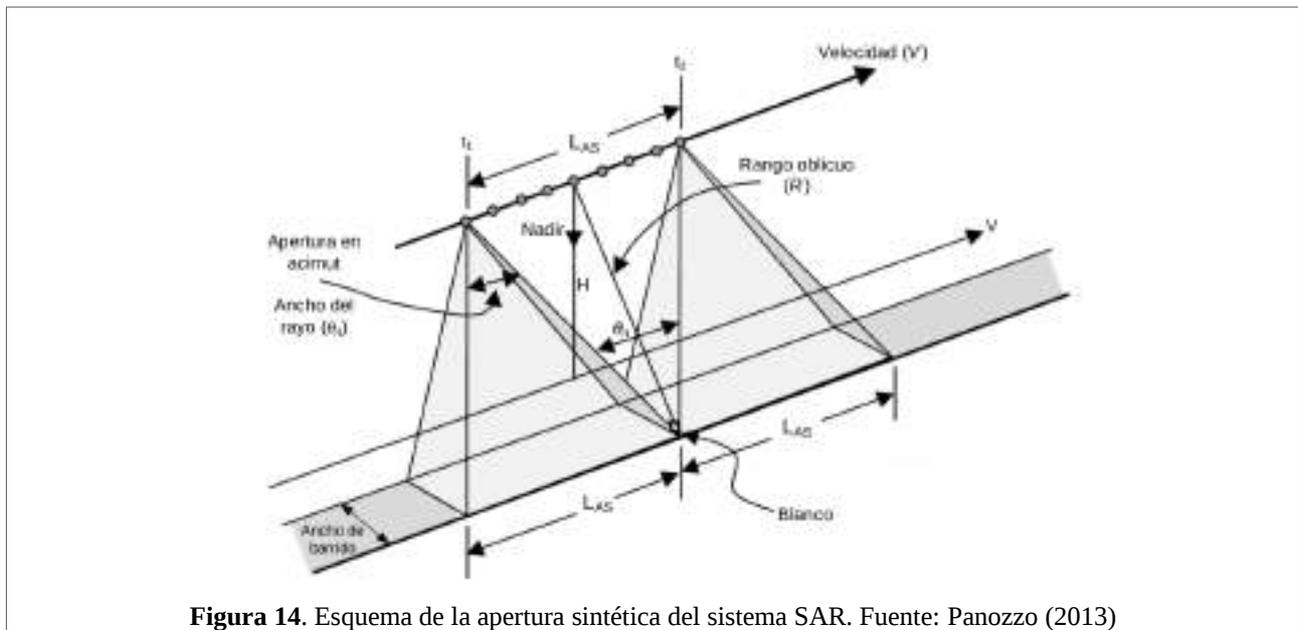


Figura 14. Esquema de la apertura sintética del sistema SAR. Fuente: Panozzo (2013)

2.4.1.8 Frecuencia Doppler y Resolución en acimut.

Según (Panozzo, 2013), el tiempo durante el cual un blanco es iluminado por la antena, y que de acuerdo a la figura 14 transcurre entre los tiempos t_1 y t_2 , es denominado tiempo de integración y se denota con T_i . Durante este tiempo la señal reflejada retorna hacia la antena con un cambio de frecuencia debido al efecto Doppler². Esta frecuencia es denominada frecuencia Doppler. Cuando el radar se aproxima al blanco la frecuencia Doppler es positiva, y cuando se aleja es negativa.

Una característica importante de la frecuencia Doppler es que su variación es aproximadamente lineal con respecto al tiempo y por lo tanto puede ser pensada como un *chirp en acimut* (Curlander & McDonough, 1991). Al igual que para el caso del chirp, este *chirp Doppler* está determinado por un tiempo de duración, en este caso T_i , una frecuencia central conocida como Doppler Centroide f_{Dc} y una tasa de cambio de la frecuencia llamada Tasa Doppler f_R (Curlander & McDonough, 1991). Estos dos últimos parámetros deben ser calculados a partir de datos tales como la velocidad relativa entre el sensor y el blanco, la distancia entre ambos y la longitud de onda.

El chirp Doppler tiene un ancho de banda B_D que se incrementa a medida que el tiempo de integración es mayor y, al igual que en el caso del rango, la resolución en acimut mejora cuando

² El efecto Doppler es el cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador (Panozzo, 2013).

mayor es el ancho de banda de la señal. Así, la resolución en acimut es (Cumming & Wong, 2005).

Ecuación 9. Resolución en Acimut, expresado con la banda Doppler.

$$\rho_a = \frac{0,886 V_{st}}{B_D}, \quad (9)$$

donde V_{st} es la velocidad relativa sensor-blanco y el ancho de banda Doppler B_D se obtiene mediante la ecuación 10

Ecuación 10. Banda Doppler.

$$B_D = \frac{0,8862 V_{st}}{L_a}, \quad (10)$$

donde L_a es la longitud de la antena en dirección de acimut.

A menudo el valor 0,886 es ignorado y el ancho de banda Doppler se aproxima como $B_D = 2V_{st} / L_a$, mientras que la resolución como $\rho_a = V_{st} / B_D$

Combinando las ecuaciones 9 y 10 se deduce que la resolución óptima en acimut es la mitad de la longitud de la antena en tal dirección como se define en la ecuación 11.

Ecuación 11. Resolución en Acimut.

$$\rho_a = \frac{L_a}{2} \quad (11)$$

En consecuencia, la resolución en acimut sólo depende de la longitud de la antena y es independiente de la altura de la órbita de la plataforma del sensor (Lillesand *et al.*, 2004). Así en condiciones ideales no depende de la distancia a la que se encuentre el sensor respecto de la superficie iluminada, ni tampoco de la longitud de onda λ (Panozzo, 2013). Así mismo, la resolución en acimut en un SAR, es independiente del rango y es constante a través de todo el ancho de barrido. Adicionalmente, las antenas SAR más cortas producen mejores resoluciones en acimut (Lusch, 1999).

2.4.1.8.1 Resolución Espacial.

A continuación se puede observar la resolución espacial de las celdas o píxeles, definidas por las resoluciones de rango y acimut del sistema como se muestra en la figura 15. El número de celdas a través de la franja y el número de líneas de distancia registradas para una región determinada establecen el tamaño de una imagen de radar en píxeles (Richards, 2009).

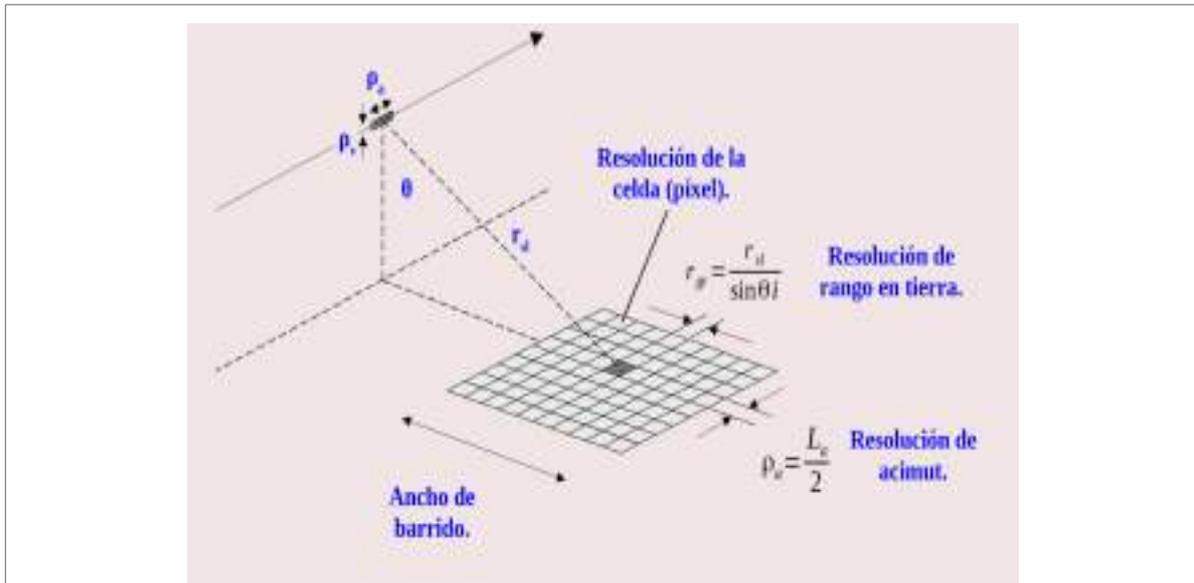


Figura 15. Resolución de la imagen SAR en celdas de resolución, definidas por el rango del suelo y resolución de acimut para una sola imagen. Fuente: Richards (2009), modificado.

2.4.1.9 Calibración de las imágenes SAR.

Las correcciones radiométricas en imágenes SAR solo incluyen la calibración a magnitudes con sentido físico, en este caso el coeficiente de retrodispersión.

El SAR es un sistema que emite un pulso electromagnético y mide el tiempo y la intensidad del eco reflejado (medición de amplitud y fase). Muchos de los sistemas SAR actuales son capaces también de controlar la dirección del campo eléctrico emitido (polarización) y del recibido. La relación entre la energía retrodispersada (captada por el radar) y la incidente (emitida por el radar) constituyen el coeficiente de retrodispersión (ver sección 2.4.1.1.1). En general, el coeficiente de retrodispersión es distinto para cada polarización. Para expresar este hecho, se define la matriz compleja S , llamada matriz de *scattering*, la cual relaciona el campo eléctrico incidente E^i y el reflejado E^s por medio de la ecuación 12.

Ecuación 12. Coeficiente de retrodispersión definida la matriz de scattering.

$$\begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \frac{e^{ik_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} \quad (12)$$

en la que r es la distancia entre el radar y el blanco, y k_0 es el llamado vector de propagación y s_{ij} es la amplitud de *scattering* del blanco cuando se incide con una onda polarizada i y se mide la onda retrodispersada con polarización j ($i, j = h, v$). Para calcular el coeficiente de retrodispersión a una polarización dada, se procede como se indica en la ecuación 13.

Ecuación 13. Coeficiente de retrodispersión de una polarización dada.

$$\sigma_{ij}^0 = 4 \pi |S_{ij}|^2 \quad (13)$$

Y para obtener el coeficiente de retrodispersión a partir de la ecuación 13.

Ecuación 14. Coeficiente de retrodispersión.

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{\sigma_{ij}}{\delta_a \delta_r}, \quad (14)$$

donde δ_a y δ_r son las resoluciones del sistema SAR en acimut y en rango respectivamente.

Entonces, la matriz **S** incluye todas las magnitudes medidas por un radar polarimétrico para una celda de resolución y contiene toda la información necesaria para caracterizar un blanco como dispersor electromagnético a una frecuencia dada.

En general, dos conjuntos de factores determinan el coeficiente de *backscattering* de un blanco: factores geométricos determinados por la estructura y orientación del blanco y factores eléctricos determinados por las constantes dieléctricas de los constituyentes del blanco. En el caso de los sistemas terrestres, el valor del coeficiente de *backscattering* está gobernado por las propiedades dieléctricas de suelo y vegetación y por la orientación de los elementos dispersores que integran el blanco con respecto a la dirección y polarización de la onda incidente (Salvia, 2010).

2.4.1.10 Correcciones Geométricas.

Las correcciones geométricas tienen por objeto lograr que cada píxel esté en la ubicación planimétrica que corresponde. La correcta ubicación de los píxeles de una imagen con respecto a un sistema de coordenadas reconocido, determina la posibilidad de que los datos satelitales puedan ser relacionados correctamente con los objetos de la superficie terrestre, para aplicaciones tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. Asimismo, define la posibilidad de utilizar los datos satelitales para monitoreo de los procesos que ocurren en los ecosistemas y detección de los cambios ocurridos en los mismos.

Desde un punto de vista operacional es posible agrupar los tipos de errores geométricos en **sistemáticos** y **no sistemáticos**.

- **Los errores sistemáticos** incluyen la esfericidad y rotación de la tierra y la inclinación de la órbita del satélite. Usualmente las agencias espaciales corrigen estos errores antes de entregar las imágenes a los usuarios.
- **Los errores no sistemáticos** incluyen los efectos del relieve y los movimientos de la plataforma satelital. La información para corregir estos errores no siempre está disponible. Por lo tanto es necesario tomar puntos de control en el terreno y remuestrear la imagen para eliminarlos.

Existen dos procedimientos para deshacerse de los errores no sistemáticos: **rectificación** y **registración**.

- La **rectificación** (corregir imagen a mapa) es el proceso por el cual se convierte la geometría de la imagen en planimétrica, es decir, cada punto de la imagen está ubicado en un sistema de coordenadas reconocido. Este procedimiento es esencial cuando es necesario realizar

mediciones de área, distancia o dirección.

- La **registración** (corregistración imagen a imagen) es el proceso de alineamiento por el cual dos imágenes de la misma área geográfica y de geometría similar son posicionadas para que coincidan entre sí, de manera de que los elementos de la superficie terrestre aparezcan en el mismo lugar en las imágenes registradas. Este procedimiento es usado cuando se quiere comparar dos imágenes de distintas fechas para analizar los posibles cambios ocurridos, pero no es importante la ubicación espacial de los píxeles. Cuando además es necesario conocer la ubicación espacial, es común la realización de un enfoque híbrido registración - rectificación.

Para ambos procesos se utilizan los mismos principios de procesamiento de imágenes, la diferencia es que en la rectificación, los datos de referencia poseen coordenadas de mapa (ya sea una imagen o puntos tomados a campo con GPS), y en la registración los datos de referencia poseen coordenadas de fila y columna. Los procesos necesarios son: interpolación espacial e interpolación de los valores radiométricos (Jensen, 1996).

2.4.1.10.1 Corrección a partir de puntos de control

Los orígenes de los errores de la posición de los puntos de control, pueden modelarse a partir de ajustar unas ecuaciones empíricas a un conjunto de puntos, de los que se conoce tanto las coordenadas de la imágenes a corregir como las del mapa o imagen de referencia (Chuvienco, 2007). Para ello, se utiliza un conjunto de pares de puntos de control (GCP, ground control points) para modelar matemáticamente la distorsión geométrica. Esto permite obtener una ecuación de transformación mediante la cual se obtiene la posición de los píxeles de la imagen de salida. El método de transformación más usado son las ecuaciones polinómicas (Salvia, 2010).

En distorsiones moderadas o en un área reducida, se utiliza una transformación de *primer orden*. Este tipo de transformación puede corregir efectos de translación en x e y , cambios de escala, rotaciones. Las ecuaciones para esta transformación son:

Ecuación 15. Ecuaciones de transformación de polinomios de primer grado. (15)

$$x = a_0 + a_1x' + a_2y' ; y = b_0 + b_1x' + b_2y' ,$$

donde x e y son las posiciones en la imagen de salida, x' e y' son las posiciones en la imagen de entrada.

En distorsiones más importantes o en un área extensa, es necesario utilizar una transformación (polinomio) de *segundo orden*. Este tipo de transformación puede corregir efectos de translación en x e y , cambios de escala, rotaciones y deformaciones locales. Las ecuaciones en este caso son

Ecuación 16. Ecuaciones de transformación de polinomios de segundo grado. (16)

$$x = a_0 + a_1x' + a_2y' + a_3y'^2 + a_4x'^2 ; y = b_0 + b_1x' + b_2y' + b_3y'^2 + b_4x'^2$$

Para evaluar la calidad del algoritmo de interpolación espacial y de los GCPs seleccionados se

calcula el error cuadrático medio (*ECM*), expresado en la ecuación 17, que resulta muy útil para determinar si es necesario ampliar el número de puntos de control.

Ecuación 17. Error cuadrático medio.

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x' - x)^2 + (y' - y)^2}{n}}, \quad (17)$$

donde x' e y' : Son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control; x e y : Son las coordenadas reales; n : Número de puntos de control.

Según Chuvieco (2007), indica que como norma general el *ECM* debería ser inferior al tamaño del píxel. Cada punto de control va a tener su propio error cuadrático y su cálculo se puede observar en la ecuación 18.

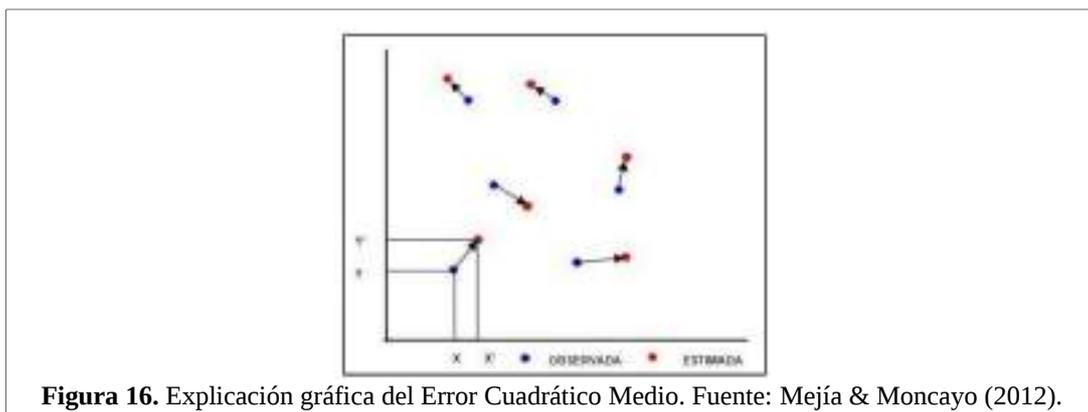
Ecuación 18. Error cuadrático medio para cada punto de control.

$$ECM = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}, \quad (18)$$

donde: x' e y' : Son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control; x e y : Son las coordenadas reales.

La ecuación 18, permite determinar si existe algún punto erróneo que sea necesario eliminar.

Se aplican las ecuaciones anteriores, con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final. En la siguiente figura se puede observar la explicación gráfica del *ECM*, donde se observan en azul los puntos observados y en rojo los puntos calculados de la transformación.



2.4.1.10.2 Interpolación de los valores radiométricos (remuestreo).

Una vez realizada la interpolación espacial los píxeles de la imagen no se corresponden, por lo

general, con un punto fila-columna. Cuando esto ocurre es necesario establecer un mecanismo para determinar el valor de intensidad de la imagen de salida. Este proceso se denomina remuestreo (Salvia, 2010). Los métodos más utilizados con este propósito son: vecino más cercano (nearest neighbour), interpolación bilineal (bilinear interpolation) y convolución cúbica (cubic convolution) (Chuvieco, 2007).

- **Vecino más próximo:** Se basa en situar en cada celdilla de la imagen corregida el nivel digital (ND) del píxel más cercano en la imagen original. Ésta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los ND originales (ver figura 17). Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen (fallas, carreteras o caminos, que pueden aparecer en la imagen corregida como líneas quebradas.). Según Chuvieco (2007) este método es el único que preserva los valores radiométricos al no introducir promedios pesados (es decir mezclar la información de los píxeles originales).

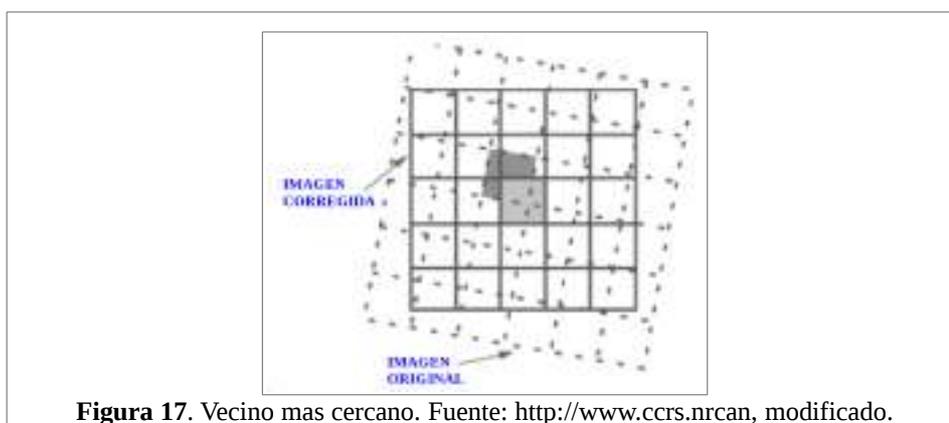


Figura 17. Vecino mas cercano. Fuente: <http://www.ccrs.nrcan>, modificado.

- **Interpolación bilineal:** Supone promediar los ND de los cuatro píxeles más cercanos en la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido, el corregido tiene una mayor influencia aquellos píxeles que se encuentran más cercanos en la imagen inicial, lo cual reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original (ver figura 18).

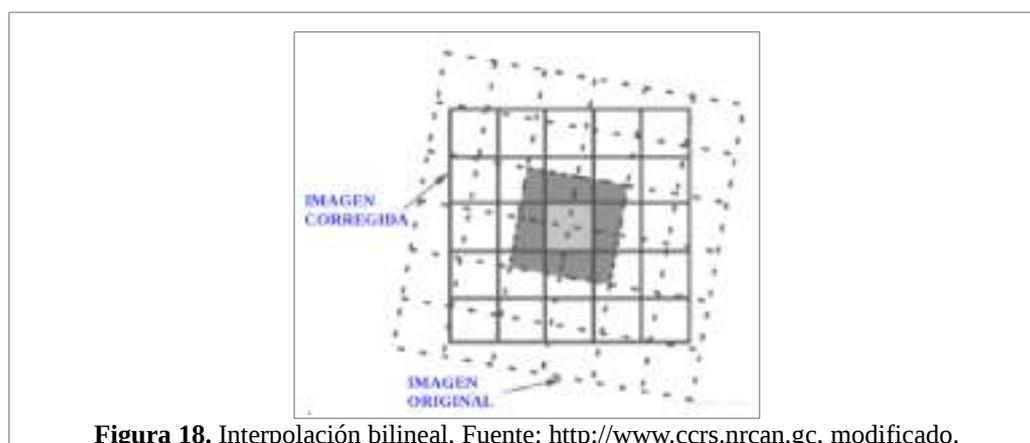


Figura 18. Interpolación bilineal. Fuente: <http://www.ccrs.nrcan.gc>, modificado.

- **Convolución cúbica:** Considera los ND de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es

más correcto, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado (ver figura 19). Según Salvia (2010), es una práctica común remuestrear las imágenes SAR con el método de convolución cúbica. Esto se debe a que ya que las imágenes SAR se ven afectadas por el ruido speckle (como es explicado en la sección 2.4.1.11) y el valor de σ^0 de un píxel no es confiable. En general, se utiliza el valor medio de un área de cobertura uniforme, el cual se asocia al valor de σ^0 . Por ende la modificación del valor radiométrico del píxel no es importante, siempre y cuando se mantenga el valor medio de las muestras.

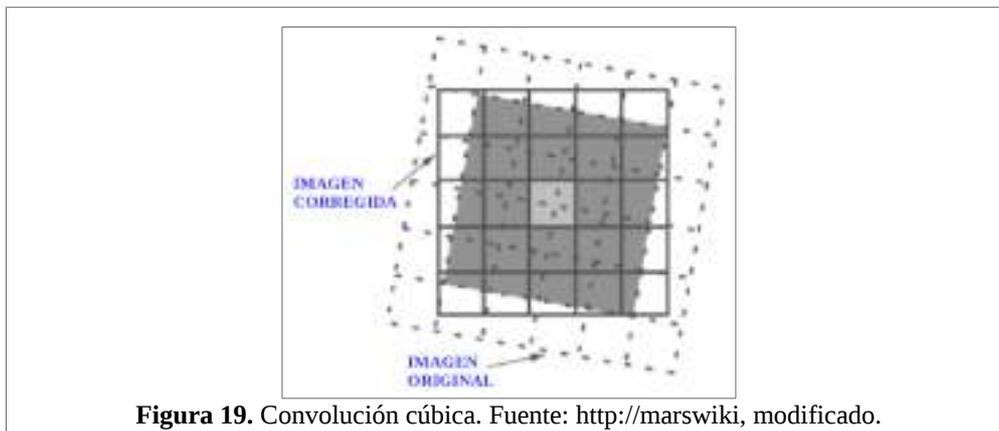


Figura 19. Convolución cúbica. Fuente: <http://marswiki>, modificado.

2.4.1.11 Moteado.

El término de moteado (en inglés conocido como *speckle*) se refiere a una señal intrínseca en los datos SAR y que por su apariencia de granulado es denominado ruido speckle o “sal y pimienta” debido a la secuencia aleatoria de píxeles blancos y negros. En los SAR, a medida que se van moviendo en su órbita, su antena transmite pulsos muy rápidamente obteniendo muchas respuestas del blanco (alrededor de 1000 respuestas de un objeto), sus procesadores utilizan entre otras cosas, todas estas respuestas para obtener la sección eficaz del radar, pero la señal medida contiene speckle. Éste, puede generarse por la suma coherente de varias respuestas (centros dispersores presentes en un píxel) que se suman de manera aleatoria. Debido a que los objetos reflectores se encuentran en una superficie irregular, los rayos emitidos por el radar regresan al sensor habiendo recorrido distintas distancias y acumulando diferencias de fase. Dependiendo de estas diferencias, las ondas interferirán constructiva, parcial o destructivamente (Edrosa, 2011). En la figura 20, se indica un esquema del moteado.

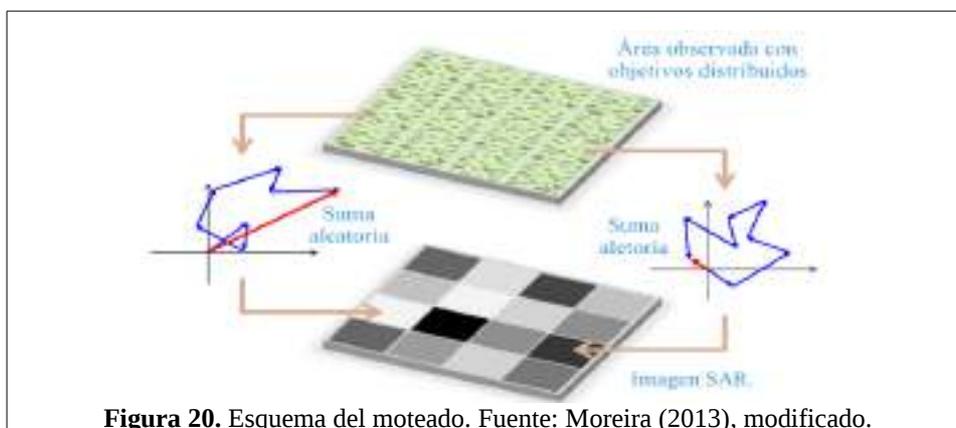


Figura 20. Esquema del moteado. Fuente: Moreira (2013), modificado.

Las imágenes producidas por un SAR pueden ser de un look con datos complejos (Single Look Complex, SLC) o de varios looks y datos reales. Estos últimos consisten en la amplitud de los datos complejos correspondientes con su cuadrado (Salvia, 2010).

Desde el enlace lineal entre la frecuencia doppler, y el tiempo lento (dirección en acimut), es posible obtener muestras independientes extrayendo L porciones (sin superposición de frecuencias con el fin de garantizar la independencia de estas muestras) de todo el espectro de la señal en acimut. A la relación entre la frecuencia y el ángulo de dichas porciones de bandas se las llama look. Uno de los métodos de reducción de speckle, se basa en el promedio incoherente de la señal en acimut del SAR contenida en L looks, este método es llamado multilooking (Lopinto, 2010), otra técnica puede ser mediante la utilización de filtros adaptativos³ por ejemplo el de Lee (Lee, 1980; Lee, 1981).

2.4.1.11.1 Incerteza radiométrica debido al moteado.

En una zona homogénea se esperaría un valor constante de retrodispersión, pero el resultado es un efecto de moteado (ruido). Para las imágenes SLC la relación señal-ruido (SNR) suele ser baja, dificultando su análisis. El SNR puede ser definido como el margen que existe entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que la altera. El ruido speckle reduce la capacidad de distinguir bordes, segmentar la imagen, reconocer y clasificar blancos, en hidrología (detección de cuerpos de agua); generando incerteza en los valores del coeficiente de retrodispersión medidos y en consecuencia en la inversión de parámetros biofísicos. Debido a esto, es necesario reducirlo (Edrosa, 2011). Realizado el procesamiento multilooking para disminuir la incidencia del ruido moteado, falta determinar cual es la incerteza radiométrica de la imagen procesada multilooking. Para esto, debido a que el ruido speckle no modifica el valor medio del coeficiente de retrodispersión ya que es un ruido multiplicativo, en cambio sí modifica la varianza, una medida de la incerteza radiométrica es a través del número equivalente de vistas (*ENL*, equivalent number of looks) (Barber, 2013). Otra técnica para mejorar la relación señal-ruido es mediante la utilización de filtros espaciales, con estos es posible conservar el valor promedio de la imagen reduciendo su desvío estándar (se busca disminuir la incerteza radiométrica de la imagen aumentando el número de looks) (Edrosa, 2011).

El *ENL* es un parámetro de imágenes SAR, que describe el grado de promedio aplicado a las mediciones del SAR durante la formación de los datos. Se aplica a menudo no solo para describir los datos originales, sino también para caracterizar los efectos del suavizado de las operaciones de post-procesamiento de tal filtrado de imágenes (Oliver & Quegan, 2004).

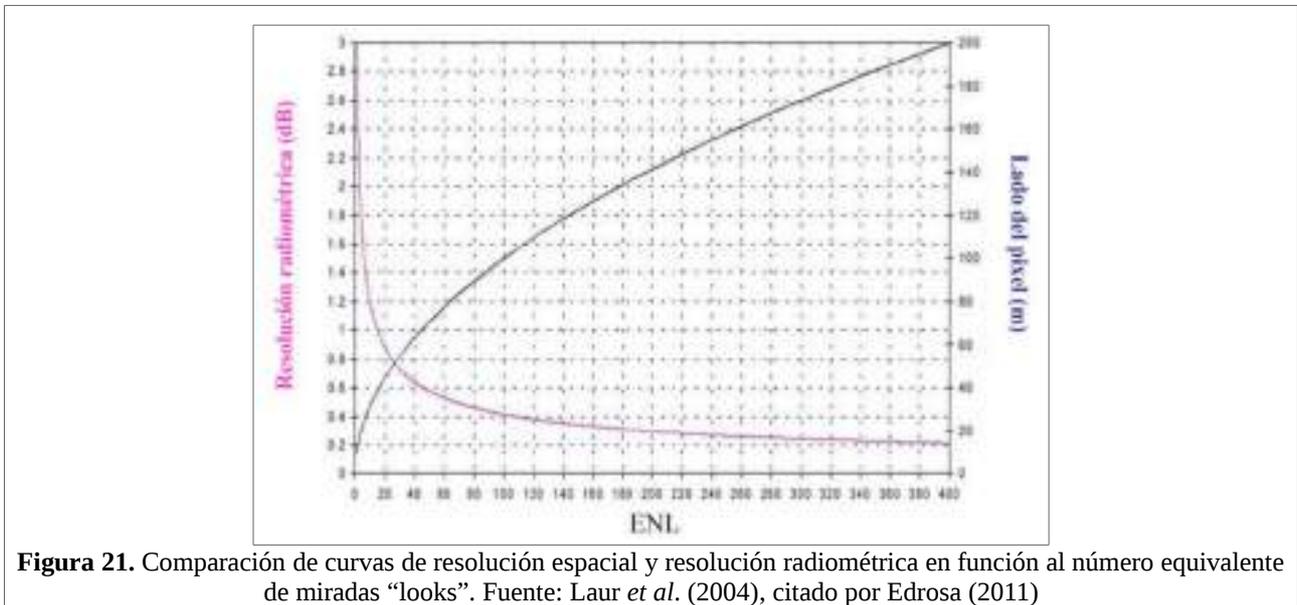
La incerteza radiométrica de una imagen SAR puede ser calculada conociendo el número equivalente de looks (*ENL*). Una de las técnicas para calcularlo es a través del cuadrado del cociente de la media, sobre el desvío estándar de áreas homogéneas de energía retrodispersada (Edrosa, 2011), se calcula siguiendo la ecuación 19.

Ecuación 19. Número Equivalente de vistas (*ENL*).

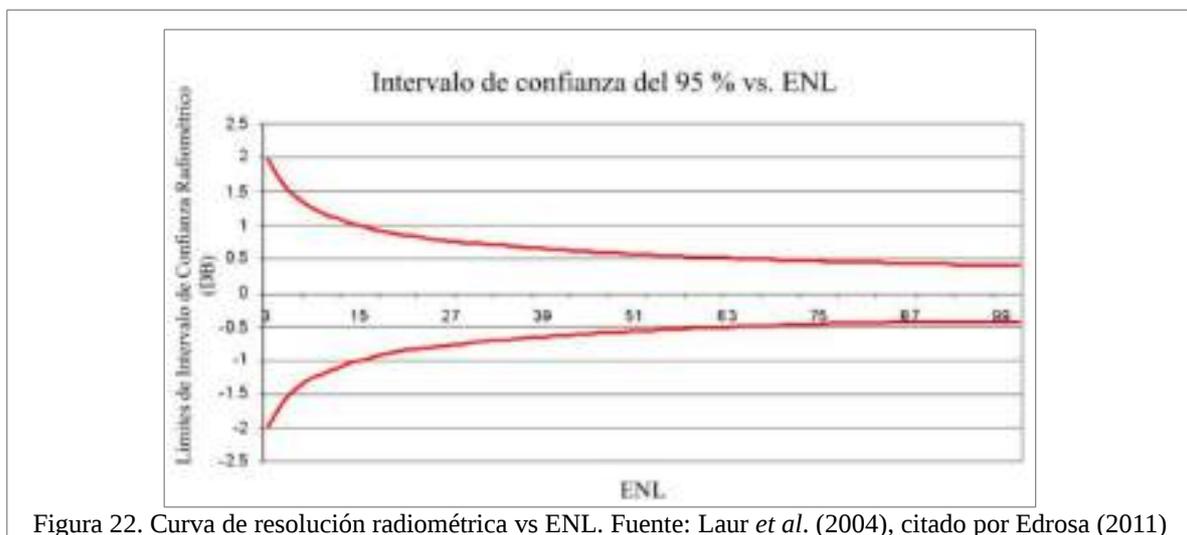
$$ENL = \left(\frac{\text{media}}{DS} \right)^2 \quad (19)$$

³ Los filtros adaptativos son aquellos que buscan disminuir el ruido preservando los bordes y los detalles. (Buemi, 2012).

Mientras más grande sea ENL , mayor calidad radiométrica poseerá la imagen (Barber, 2013). El uso de filtros espaciales puede reducir la incerteza radiométrica, pero se sacrifica resolución espacial, como se indica en la figura 21.



Cuanto mayor sea el ENL , la incerteza de los valores radiométricos relacionados a una determinada cobertura será menor, la figura 22 muestra la relación de los intervalos de confianza (en dB) a un 95% de exactitud versus el número de looks de la imagen. En dicha figura se observa que al incrementar el número de looks, se reduce el intervalo de confianza, mejorando esto la precisión radiométrica, pero como se menciono anteriormente se sacrifica resolución espacial (Edrosa, 2011).



2.4.1.12 Distorsiones en imágenes radar.

Debido a la geometría de visualización de visión lateral, las imágenes de radar sufren de graves

distorsiones geométricas y radiométricas (ITC, 2004), especialmente en regiones montañosas y estos efectos dependen principalmente de la relación entre la pendiente del terreno y el ángulo de incidencia (Martinis, 2010).

2.4.1.12.1 Distorsiones Geométricas.

En las imágenes de radar, se encuentra con variaciones en escala (causada por la conversión de rango oblicuo a rango de tierra), así como distorsiones generadas por el terreno (el acortamiento, la inversión por relieve y las sombras generados por la elevación del terreno (ver sección 2.4.1.12.1.2 y figura 23) (Henderson & Lewis, 1998). Así mismo, todas las distorsiones geométricas tienen efectos en las características radiométricas (CCRS, 2001). En la figura 23, se observa un esquema de las diferentes distorsiones geométricas en imágenes radar.

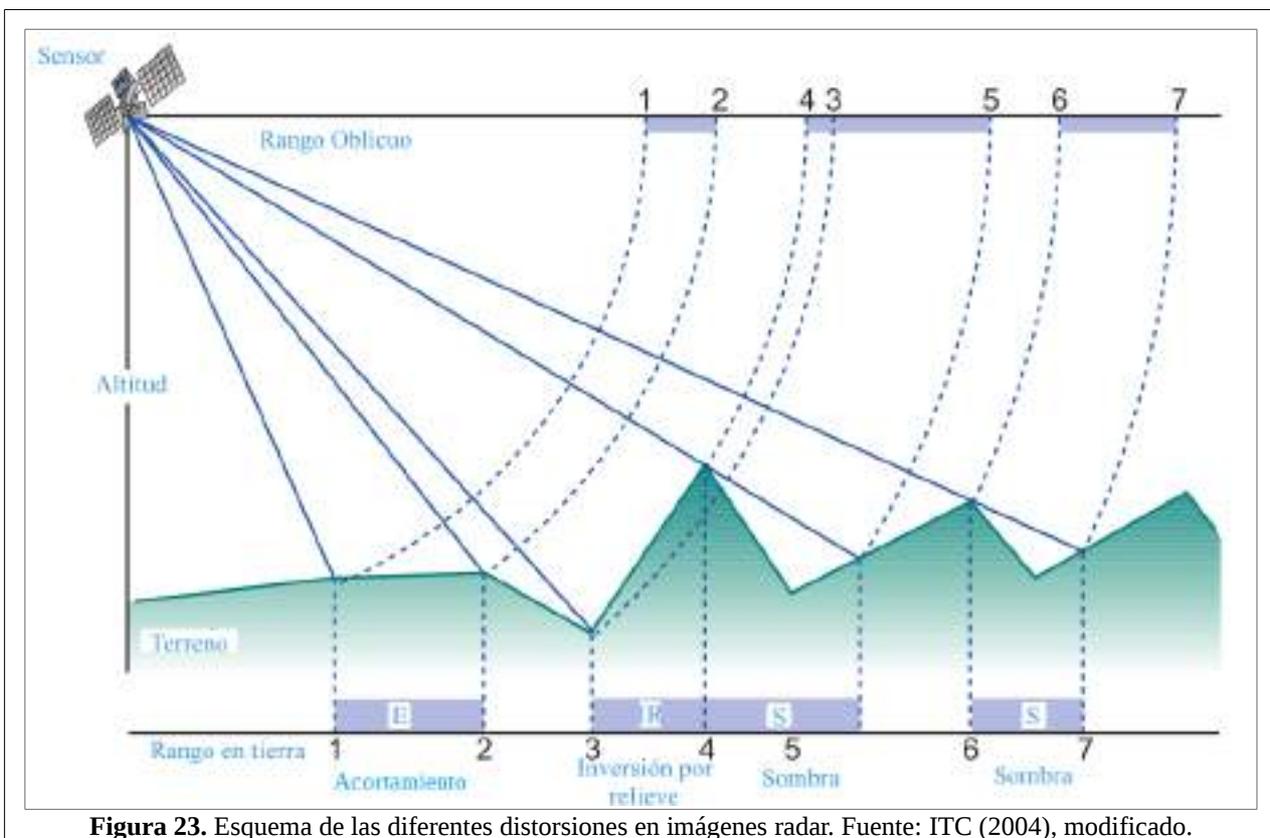


Figura 23. Esquema de las diferentes distorsiones en imágenes radar. Fuente: ITC (2004), modificado.

2.4.1.12.1.1 Distorsión en escala.

El radar mide distancia de los objetos en el rango oblicuo en lugar de la verdadera distancia horizontal a lo largo del rango de tierra. Por lo tanto, la imagen tiene diferentes escalas que se mueven desde el rango cercano hasta el rango lejano (ver figura 12). Esto significa que los objetos de rango lejano, se comprimen con respecto a los objetos en el rango cercano. Para su correcta interpretación, la imagen tiene que ser corregida y se transforma en la geometría del rango en tierra (ITC, 2004).

2.4.1.12.1.2 Distorsiones generadas por el terreno.

Las imágenes de radar están sujetas a desplazamientos debido al relieve. Estas distorsiones pueden ser graves. Hay tres efectos que son típicos para el radar: acortamiento, inversión por relieve y sombras (ver figura 23) (ITC, 2004).

El acortamiento: consiste en la apariencia de compresión de aquellas características de la escena que están inclinadas hacia el radar (Henderson & Lewis, 1998).

La inversión por Relieve sucede cuando el haz del radar alcanza la parte superior de la pendiente antes de la parte inferior, por ejemplo la pendiente se forma en la imagen al revés. Las áreas en la imagen en este tipo de caso se presentan muy brillantes (ITC, 2004).

Las sombras indican áreas en el terreno que no son iluminadas debido a la geometría de visualización y el relieve de la escena. Puesto que el radar no recibe ninguna señal reflejada, el sombreado aparece como regiones muy oscuras en la imagen. Son más comunes cuando el terreno presenta pendientes pronunciadas, si la imagen se adquiere con ángulos de incidencia relativamente grandes (CCRS, 2001). Las imágenes en ángulos de incidencia más grandes también generan un aumento en la ocurrencia del sombreado de la imagen radar (Lewis, 1998). Las sombras de radar se exageran en superficies montañosa (Danklmayer *et al.*, 2009).

2.4.1.12.2 Distorsiones Radiométricas.

Las distorsiones geométricas mencionadas anteriormente (ver sección 2.4.1.12.1), también tienen una influencia en la energía recibida. Puesto que la energía retrodispersada se recoge en el r_{sl} la energía recibida procedente de una pendiente frente al sensor se almacena en una reducida área de la imagen, es decir, que se comprimen menos píxeles en la imagen, que debe ser el caso si se obtiene en la geometría del r_{gr} . Esto resulta en altos números digitales porque la energía colectada de diferentes objetos es combinada. Las caras de las pendientes aparecen en el radar muy brillantes. Desafortunadamente, este efecto no puede ser corregido, esto es porque la inversión por relieve y áreas de sombra en imágenes radar no pueden ser usadas para interpretación. Sin embargo, son útiles en que contribuyen a un aspecto tridimensional de la imagen y por lo tanto ayudan a la comprensión de la estructura del terreno y la topografía (ITC, 2004).

2.4.1.13 Factores que influyen en la característica de la señal.

Algunos factores ligados a la naturaleza de la superficie indagada, o dependientes del sistema tecnológico empleado, influyen la capacidad del objeto de reflejar energía hacia el sensor y, por lo tanto, determinan diferencias en el valor de retrodispersión registrado con la consecuente variación de las características de la imagen producida (Lanfri, 2011).

Los factores que influyen en las características de la señal incluyen parámetros del sistema (ver 2.4.1.13.1) así como parámetros del terreno (ver 2.4.1.13.2) (Martinis, 2010).

2.4.1.13.1 Parámetros del sistema.

Los parámetros del sistema son parámetros derivados de las características de construcción y operación del SAR (Buemi, 2012), tales como la polarización de la onda (ver sección 2.3.2), la frecuencia del pulso, el ángulo de incidencia (ver sección 2.4.1.4), la dirección de mirada (ver sección 2.4.1.4) y la resolución espacial (ver sección 2.4.1.8.1) (Henderson & Lewis, 1998)

2.4.1.13.2 Parámetros del terreno.

Los parámetros del terreno son parámetros que afectan los elementos de identificación de la imagen y el análisis de imágenes (especialmente tono y textura) son fundamentales para el proceso de interpretación tanto para la interpretación manual como la asistida por computadora (Henderson & Lewis, 1998), se cuenta en estos parámetros con la rugosidad de la superficie (ver sección 2.4.1.13.2.2), así como la forma y orientación de las estructuras (ver sección 2.4.1.13.2.3).

2.4.1.13.2.1 Mecanismos de Interacción onda - superficie.

De acuerdo a las características de la onda incidente y las correspondientes a los objetos presentes en el terreno será el modo particular en que éstas interactúen. Según Martinis (2010), se pueden presentar los siguientes tipos de reflexiones y dispersiones (ver figura 24):

- Reflexión especular: Cuando la señal del radar interactúa con una superficie lisa, esta superficie se comporta como un espejo, es decir la señal incidente y la señal dispersada tienen direcciones opuestas. La señal que vuelve al radar es nula y por lo tanto se visualiza con tonos negros en la imagen (Monela, 2014). La reflexión especular puede convertirse en una reflexión de esquina y esto ocurre en una situación natural. Se observa a menudo si la intersección entre el lado de un iceberg y la superficie del mar, o la combinación de árboles al lado de una superficie reflectante especular, se observa un tono blanco en la imagen del radar, ya que la señal retrodispersada es muy fuerte (Henderson & Lewis, 1998).
- Dispersión difusa de superficie: Este tipo de interacción se produce cuando la superficie que se observa es rugosa. El grado de rugosidad va a influir en la intensidad de la señal de retorno. En la imagen se visualiza en diferentes tonos de grises (Monela, 2014).
- Dispersión de doble rebote: Es el resultado de la interacción de una señal radar con dos superficies lisas y perpendiculares entre sí. Cuando se produce dicho mecanismo, se observa un tono blanco en la imagen del radar, ya que la señal retrodispersada es muy fuerte. Algunos ejemplos de elementos que generan doble rebote son: áreas urbanas, barcos en el agua, tronco de árboles sobre superficies inundadas, etc (Monela, 2014).
- Dispersión en volumen: Está relacionada a procesos de reflexión múltiple dentro de un medio físico denso y homogéneo, tal como la parte superior de la vegetación en un maizal o las copas de los árboles de un bosque. Este tipo de reflexión también puede ocurrir por capas de suelo muy seco, capas de arena o de hielo. La intensidad de la reflexión por volumen depende de las propiedades físicas del medio reflector (particularmente de las variaciones de la constante dieléctrica) y de las características del radar (longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia) (CCRS, 2001).
- Dispersión de Bragg: Es la retroreflexión difusa intensificada debido a la combinación coherente de señales reflejadas desde una superficie rugosa que presenta una distribución periódica en la dirección de la propagación de onda y cuyo espaciado es igual a la mitad de la longitud de onda proyectada en la superficie (CCRS, 2001).

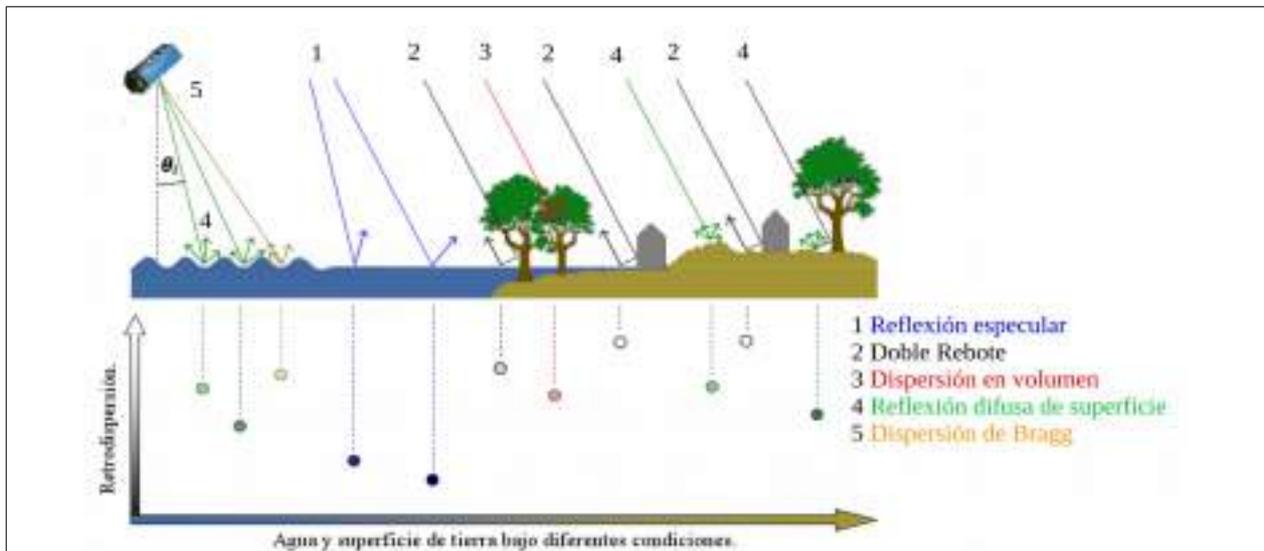


Figura 24. Tipos de reflexiones y dispersiones. Mecanismos de dispersión del agua con la superficie de la tierra bajo diferentes condiciones así como componentes especulares y difusos de superficie de radiación dispersada como una función del ángulo de incidencia y la rugosidad de la superficie. Fuente: Martinis (2010), modificado

2.4.1.13.2.2 Rugosidad de la superficie.

La rugosidad de la superficie se considera el principal factor que afecta la retrodispersión de radar ya que determina la distribución angular de la dispersión de superficie (ver sección 2.4.1.13.2.1). Superficies lisas (Ulaby *et al.*, 1982), actúan como reflectores especulares (figura 25a). En este caso, el ángulo emergente (θ_e) es igual al ángulo de incidencia (θ_i), lo que se traduce en un retorno de señal muy baja, resultando en píxeles oscuros en los datos del radar. Con un aumento de la rugosidad, la fracción de la dispersión difusa es más grande y, por lo tanto, la componente especular se reduce (Ulaby *et al.*, 1982). En estos casos, la dispersión de la energía incidente ocurre en todas las direcciones, aunque con distinta intensidad y regresa una porción significativa de la energía transmitida de nuevo al sensor (figura 25b). En el caso extremo en que la superficie es muy rugosa, la energía es dispersada por igual en todas las direcciones (figura 25c) (Ulaby *et al.*, 1982; Elachi, 1988).

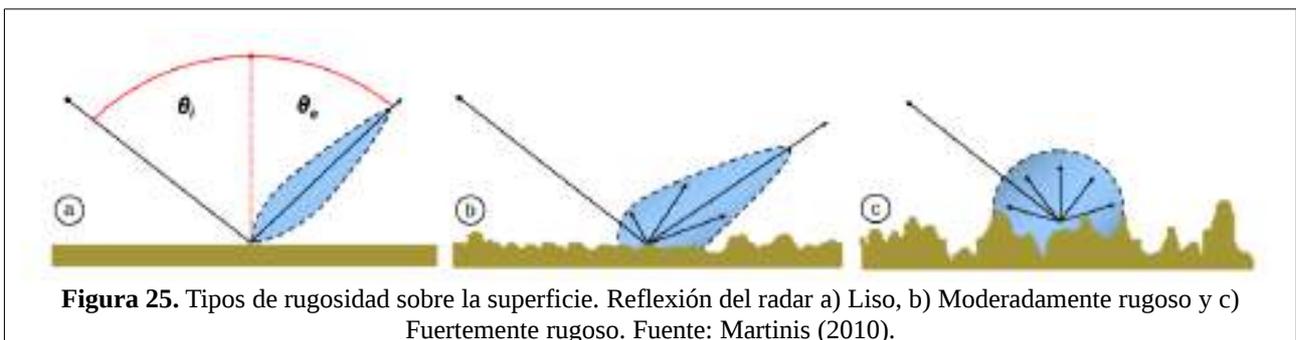


Figura 25. Tipos de rugosidad sobre la superficie. Reflexión del radar a) Liso, b) Moderadamente rugoso y c) Fuertemente rugoso. Fuente: Martinis (2010).

Según Henderson & Lewis (1998) para definir una superficie rugosa se utiliza el criterio de Rayleigh, donde irregularidades en la superficie son expresadas como el promedio de la altura (h_{rms}) y dependen de la longitud de onda (λ) y el ángulo de iluminación (θ) se define en la ecuación 20.

Ecuación 20. Criterio de Rayleigh.

$$h_{rms} > \lambda / 8 \cos \phi \quad (20)$$

Por ejemplo, para una superficie para que aparezca rugosa en una imagen radar con los siguientes parámetros: $\lambda = 23.5$ cm y $\phi = 21^\circ$, debe presentar una rugosidad media mayor que 3.2 cm.

2.4.1.13.2.3 Forma y orientación de las estructuras del terreno.

Además de la rugosidad de la superficie de los objetos (ver 2.4.1.13.2.2), su forma y orientación influyen aún más en la señal del radar, por ejemplo, superficies lisas perpendiculares pueden actuar como dispersión de doble rebote (ver sección 2.4.1.13.2.1), que suelen cubrir solo pequeñas áreas de los datos SAR y suelen aparecer como puntos brillantes en la imagen (Raney, 1998).

2.4.1.14 Constante dieléctrica.

Conceptualmente expresa el comportamiento eléctrico del medio: en cierto sentido, es la medición del grado de permeabilidad del material al campo eléctrico en el que se encuentra sumergido. Influye en la capacidad del material para absorber, reflejar y transmitir la energía de las microondas (CCRS, 2001; Hecht, 2000). Los valores de constante dieléctrica del suelo aumentan de modo casi lineal con el aumento del contenido de agua, por lo que aumenta la reflectividad del radar de la superficie. Es dependiente de la frecuencia utilizada por el sensor, y en los elementos más comunes presentes en la superficie terrestre, en microondas el valor de la constante dieléctrica varía de 3 a 8 en superficies secas y puede ser de 80 para el agua (Henderson & Lewis, 1998).

Una de las leyes fundamentales del electromagnetismo recibe su nombre del matemático alemán Karl Friedrich Gauss. En ella relaciona el flujo de la intensidad de campo eléctrico a través de una superficie cerrada S con la carga total encerrada. Se expresa en la ecuación 21.

Ecuación 21. La ley de Gauss-eléctrica.

$$\Phi_E = \oiint_A E \cdot dS \quad (21)$$

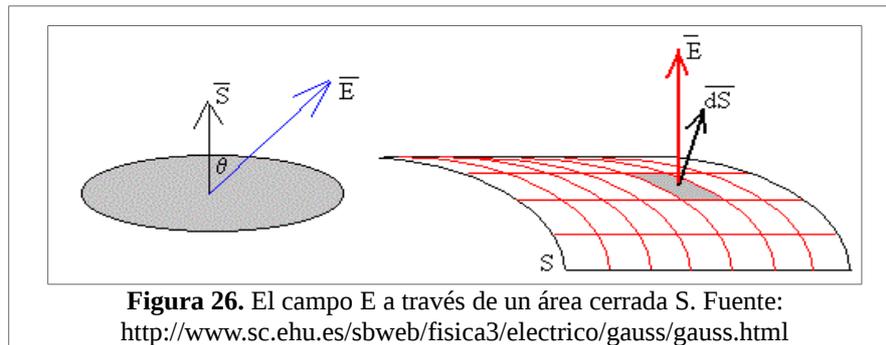
La integral doble lleva un círculo como recordatorio de que la superficie está cerrada. El vector dS está en la dirección de una *normal hacia afuera*, como se muestra en en la figura 26. Si el volumen encerrado por S es V, y si dentro de ella hay una distribución continua de carga de densidad ρ , la ley de Gauss se expresa como se indica en la ecuación 22.

Ecuación 22. La ley de Gauss-eléctrica, expresada con la constante dieléctrica.

$$\Phi_E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \rho dV \quad (22)$$

La integral a la izquierda es la diferencia entre la cantidad de flujo que entra y que sale de cualquier superficie cerrada S. Si hay una diferencia, será debida a la presencia de fuentes o sumideros del campo eléctrico dentro de S. Claramente entonces, la integral debe ser proporcional a la carga total encerrada, ya que las cargas son las fuentes (+) y los sumideros (-) del campo eléctrico. La constante ϵ se conoce como constante dieléctrica del medio. Para el caso especial del vacío, la

permitividad del espacio libre está dada por $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ (Hecht, 2000).



2.4.1.15 Interacción entre la señal del SAR y los cuerpos de agua.

Según Martinis (2010), la detección de agua en los datos SAR depende del contraste entre las áreas de agua y las tierras circundantes, que está muy influenciado por las características de rugosidad de la superficie del agua, y parámetros específicos del sistema, como la longitud de onda, el ángulo de incidencia, la polarización, características que en su conjunto determinan el mecanismo de interacción entre la onda y la superficie del agua, como ya fue descrito anteriormente.

Debido a su alta constante dieléctrica, no hay penetración de las microondas en el agua, por lo cual la retrodispersión depende de la rugosidad superficial del agua. La reflexión difusa de superficie es un mecanismo importante. En un caso ideal, un cuerpo de agua abierto puede ser modelado como una superficie perfectamente lisa con un alta constante dieléctrica, que actúa como un reflector especular (ver figura 24) que dirige la radiación de microondas incidente lejos de un sensor SAR de visión lateral, por lo cual la retrodispersión sería baja o nula y se vería de color oscuro en la imagen (por ejemplo, Smith, 1997; Sarti *et al.*, 2001; Horritt *et al.*, 2003; Mason *et al.*, 2007). Estas áreas contrastan con las intensidades intermedias a brillantes de áreas circundantes más rugosas, que se caracteriza por un aumento en la reflexión difusa de superficie.

También la polarización juega un papel importante en la detección de zonas de aguas abiertas. En general, la polarización HH proporciona la discriminación más evidente entre el agua y otros tipos de clases de cobertura del suelo, ya que ofrece el mejor rango dinámico radiométrico (por ejemplo Sarti *et al.*, 2001; Malnes *et al.*, 2002; Ahtonen *et al.*, 2004; Henry *et al.*, 2006; Schumann *et al.*, 2007). Esto es causado por una baja dispersión de la componente horizontal de la señal desde la superficie de aguas abiertas.

2.4.1.16 Interacción entre la señal SAR y la vegetación no inundada.

En el caso de la vegetación, el tipo de interacción que se presenta entre ésta y la señal depende a primer orden principalmente de la longitud de la onda transmitida en relación con el tamaño de las estructuras (hojas, tallos, troncos, etc.) de la vegetación y también de la orientación de estos elementos, en relación con la polarización de la onda incidente, así como de la penetración de la onda que juega un papel importante, la misma es influenciada por la humedad (a menor humedad mayor penetración y viceversa). De esta manera, longitudes de onda menores interactúan con los estratos superficiales de la vegetación y las longitudes de onda más largas con los estratos inferiores de la vegetación, pudiendo en algunos casos hasta interactuar con el suelo o inclusive con el

subsuelo (Ulaby *et al.*, 1981a).

En la figura 27A, se da un ejemplo de la penetración de la onda en bosque y cultivo de trigo, donde influye claramente el ángulo de incidencia y en la figura 27B se presenta esquemas de penetración en bosque para longitudes de onda en banda L y X a través del dosel.

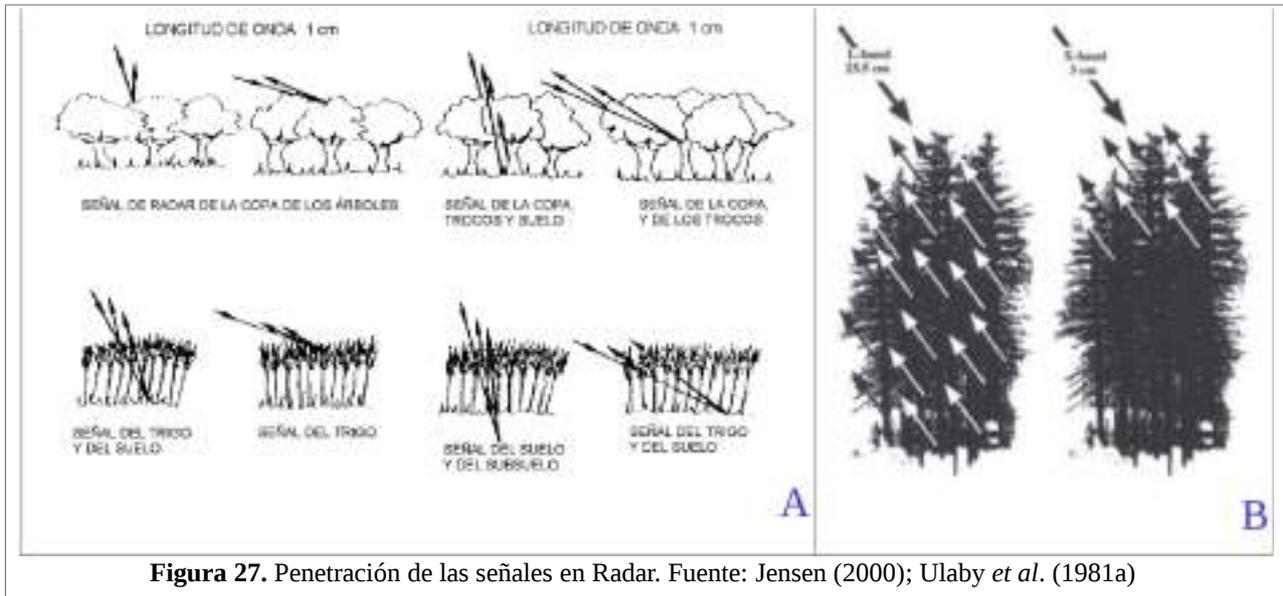


Figura 27. Penetración de las señales en Radar. Fuente: Jensen (2000); Ulaby *et al.* (1981a)

La banda X no puede penetrar en el dosel de la vegetación forestal. es dispersada por las hojas y superficie del dosel, lo cual es factible para obtener acceso a la información de las capas superiores de los árboles. Mecanismo de interacción dominante: dispersión difusa del tope de la vegetación. Mientras que la banda L puede atravesar el dosel de la vegetación forestal. Posee mayor interacción con el tronco y ramas, siendo menos influenciada por las condiciones ambientales y obteniendo mejor información de los componentes estructurales del bosque. (Espinosa, 2016)

2.4.1.17 Interacción entre la señal SAR y la vegetación inundada.

Las microondas, con su capacidad potencial para atravesar el dosel, ofrece la oportunidad de mapear las inundaciones por debajo de la vegetación. Esto es habilitado por el aumento del doble rebote o a que la vegetación sea cubierta de agua y se tenga reflexión especular (por ejemplo, Richards *et al.*, 1987; Townsend, 2001; Hong *et al.*, 2010), que es mayor que en condiciones no inundadas (ver figura 24).

El retorno de la señal de la vegetación inundada es muy variable según la condición de inundación particular y fuertemente dependiente de la longitud de onda del sistema, y la estructura y densidad del dosel. También depende del ángulo de incidencia y la polarización (por ejemplo Ormsby *et al.*, 1985; Richards *et al.*, 1987; Wang *et al.*, 1995; Kasischke & Bourgeau-Chavez, 1997).

Según (Salvia, 2010), existen evidencias de que el σ° de la vegetación en humedales puede modelarse en primer orden considerando tres mecanismos de interacción básicos: (1) retrodispersión del dosel, (2) retrodispersión del suelo y (3) doble rebote suelo-tronco. Es entonces

necesario analizar los efectos que se observarían sobre los mecanismos de interacción dominantes, en distintos escenarios de inundación y para distintas estructuras de vegetación herbácea y arbórea para las bandas X y L (ver figura 28).

En la figura 28 se da una ilustración conceptual de las principales fuentes de retrodispersión de la vegetación y el efecto de la vegetación inundada adaptado para la bandas X y L.

Juncales.

En el caso de vegetación herbácea con estructura vertical o casi vertical, que normalmente posee al menos unos centímetros de agua sobre el suelo, como ocurre en los juncales (ver figura 28 superior), el mecanismo de interacción dominante es el doble rebote agua-tallo para ambas frecuencias (Grings *et al.*, 2005).

Al aumentar la altura del agua dentro del juncal se reduce la altura emergida de la vegetación, provocando primero un aumento de la señal retrodispersada por una disminución de la atenuación por la vegetación. Esto ocurre hasta que la altura del agua es tal que se empieza a equiparar el doble rebote agua-tallo con la reflexión especular de la superficie del agua, punto a partir del cual una mayor altura del agua provoca un descenso de la señal retrodispersada por el aumento relativo de la reflexión especular sobre el doble rebote (Banda X). En Banda L en cambio, la atenuación por la vegetación herbácea es muy poca, por lo tanto, un aumento en la altura del agua dentro de ambientes como el juncal provoca directamente una disminución en la retrodispersión por el aumento en la reflexión especular en desmedro del doble rebote agua-tallo.

Pajonales de cortadera.

En el caso de vegetación herbácea formada por especies estructuralmente similares a *Scirpus giganteus* o *Panicum prionites*, para ambas frecuencias el mecanismo de interacción dominante en situaciones de no inundación es la dispersión en volumen (ver figura 28 medio).

En Banda X, al aumentar la altura del agua sobre el suelo, se observa un efecto similar al que ocurre en los juncales, en principio disminuye la atenuación de la vegetación, y aumenta la señal debido a un aumento del doble rebote⁴. Al aumentar aún más la altura del agua, disminuye la biomasa emergida y empezaría a tener más importancia la reflexión especular de la superficie del agua, disminuyendo la magnitud de la señal retrodispersada.

En Banda L, en cambio, y al igual que ocurre con los juncales, al aumentar la altura del agua, la señal retrodispersada no aumenta, sino que disminuye por un aumento de la reflexión especular de la superficie del agua (Salvia, 2010).

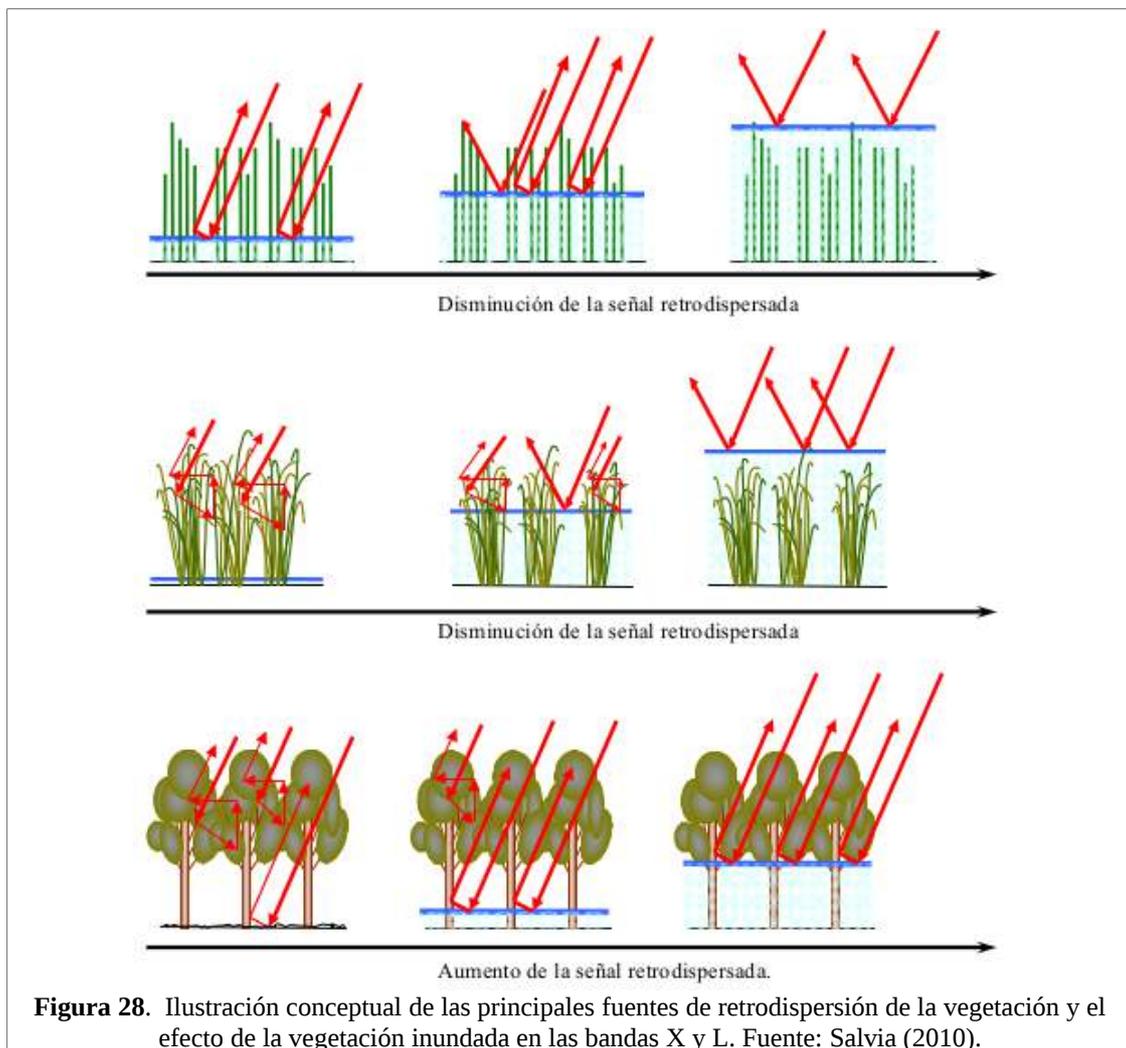
Bosques.

En el caso de la vegetación arbórea (ver figura 28 bajo), normalmente con suelo no anegado, el mecanismo de interacción dominante en condiciones de no inundación es la dispersión en volumen del dosel. En Banda X, si el bosque es denso, como el de una selva tropical, las ondas emitidas por el radar no logran atravesar el dosel, y no se observan diferencias al cambiar la condición de inundación. Si el bosque no es tan denso, al cubrirse el suelo con una película de agua, las ondas

⁴ a su vez, por el aumento de la altura del agua, las hojas se orientarían más verticalmente, favoreciendo el doble rebote agua-hoja.

emitidas por el radar que logran atravesar el dosel interactúan con los elementos de la superficie mediante el doble rebote agua-tronco, aumentando la magnitud de la señal retrodispersada. Este mecanismo de interacción es dominante hasta el momento en que la altura del agua sea tal que tape completamente los árboles.

Las ondas emitidas por los radares de Banda L, dada su mayor longitud de onda, tienen una mayor penetración en el dosel, con lo cual lo atraviesan aunque el bosque sea más denso. Por lo tanto, al aparecer una película de agua sobre el suelo, el mecanismo de interacción dominante cambia de dispersión en volumen a doble rebote agua-tronco para un rango más amplio de densidades del bosque. Sin embargo, si el bosque es muy denso (como la selva tropical de Amazonas), las ondas de radar en Banda L no logran atravesar el dosel, con lo cual el mecanismo de interacción no cambia aunque el bosque se inunde (Salvia, 2010).



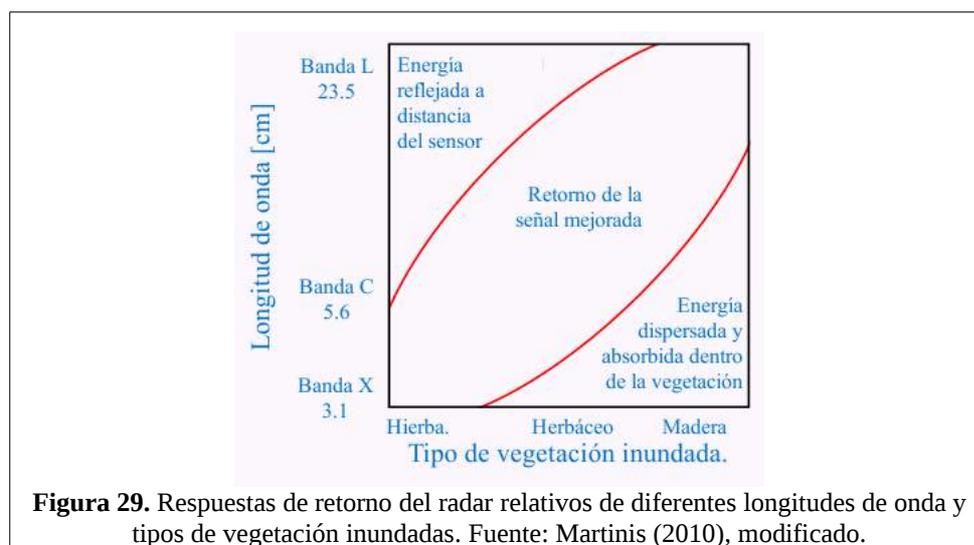
En la tabla 4, se presenta algunas diferencias encontradas entre las bandas X y L dependiendo de la longitud de onda del radar en vegetación forestal, humedal inundado, pasto y aguas abiertas.

Tabla 4. Diferencias encontradas entre las bandas X y L dependiendo de la longitud de onda del radar en vegetación forestal inundada, humedal inundado, pasto inundado y aguas abiertas. Fuente: Leckie (1998).

Tipos de cobertura.	Banda X	Banda L
Vegetación forestal inundada.	La banda X no puede penetrar en el dosel de la vegetación forestal. Mecanismo de interacción dominante: dispersión difusa del tope de la vegetación.	La banda L puede atravesar el dosel de la vegetación forestal. A continuación, se refleja en la superficie del agua y los troncos de los árboles y vuelve como una señal fuertemente retrodispersada. Mecanismo de interacción dominante: dispersión de doble rebote
En humedal herbáceo inundado.	La señal es capaz de penetrar en el dosel, se reflejan en el agua, luego se refleja en los tallos verticales de la vegetación y, finalmente, vuelven al receptor del radar. Mecanismo de interacción dominante: dispersión de doble rebote. Si la vegetación es cubierta por el agua se comporta como un cuerpo de aguas abiertas.	De acuerdo a la altura emergida de la vegetación, se combinan los mecanismos de interacción dispersión de doble rebote (vegetación vertical – agua) y reflexión especular (de la superficie del agua)
En pastizales inundados.	La señal es capaz de atravesar el dosel del pasto, se refleja en el agua, luego se reflejan en los tallos verticales del pasto (si los tuviera) y, finalmente, vuelven al receptor del radar. Mecanismo de interacción dominante: doble rebote	Atraviesa el dosel de pasto corto, se refleja en la superficie del agua, pasa a través del dosel del pasto, y se dirige hacia fuera del sensor. Mecanismo de interacción dominante: reflexión especular de la superficie del agua.
Aguas abiertas.	Se refleja en aguas abiertas donde presenta poco o ningún cambio en la dispersión de la señal.	Se refleja en aguas abiertas donde presenta poco o ningún cambio en la dispersión de la señal.

En general, cuanto más larga es la onda emitida por el sistema, mayor es la capacidad de la señal para penetrar y atravesar el dosel de la vegetación (ver figura 29). Este es particularmente el caso cuando la longitud de onda es sustancialmente más larga que el tamaño de la hoja (Pope *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1995). Por lo tanto, los sensores SAR en banda L han demostrado ser eficaces para mapear las inundaciones incluso en entornos forestales (por ejemplo Ormsby *et al.*, 1985; Richards *et al.*, 1987; Hess *et al.*, 1990; Hess & Melack, 1994; Hess *et al.*, 1995; Townsend & Walsh, 1998; Melack & Wang, 1998; Saatchi *et al.*, 2000; Hess *et al.*, 2003), ya que en estas longitudes de onda, las interacciones de doble rebote de la señal tronco-agua generan una firma brillante en los datos SAR (Richards *et al.*, 1987). Por el contrario, en la banda X, la atenuación del dosel, la dispersión en volumen y la dispersión de la superficie de la cubierta forestal puede ser mayor (Richards *et al.*, 1987).

En la vegetación más corta o más escasa con ramas finas y troncos de pequeño diámetro, efectos más brillantes de retrodispersión pueden ocurrir con la disminución de longitud de onda. Resultados dados en Ormsby *et al.* (1985) y Ramsey (1995) indican un aumento en la retrodispersión en las zonas de humedales herbáceos en banda X.



El ángulo de incidencia tiene un impacto importante en la capacidad de detectar la inundación por debajo de la vegetación. Varios estudios indican que ángulos de incidencia más empinados son preferibles para distinguir bosque inundado de no inundado (por ejemplo, Richards *et al.*, 1987; Hess *et al.*, 1990; Wang & Imhoff, 1993; Wang *et al.*, 1995; Bourgeau-Chavez *et al.*, 2001; Lang *et al.*, 2008). Por el contrario, con ángulos de incidencia más rasantes aumenta la probabilidad de una pérdida en la identificación de los cuerpos de agua, delimitados por árboles altos (Henderson, 1987). Esta generalización se puede atribuir a una longitud de recorrido más corta a través del dosel, aumentando la transmisividad en el dosel y dejando más energía de microondas para la interacciones de la base de los troncos. Las señales de ángulo de incidencia más rasantes interactúan más con el dosel, lo que da como resultado una mayor dispersión de volumen (Hess *et al.*, 1990; Lang *et al.*, 2008). Según Lang *et al.* (2008), la mejor discriminación entre bosques inundables y no inundables es factible utilizando los datos recogidos de ángulos de incidencia de 27,5° y 33,5°.

Para la identificación de cuerpos de agua es conveniente utilizar la polarización HH, en zonas donde el agua haya cubierto todo tipo de vegetación. Dicha polarización, genera el fenómeno de reflexión especular siendo menos sensible a la rugosidad del agua originada posiblemente por el viento (Edrosa, 2011).

Varios estudios indican una preferencia hacia una polarización simple (HH o VV) para la separación de los bosques inundables y no inundables (por ejemplo, Wu, 1984; Evans *et al.*, 1986; Wu & Sader, 1987). De acuerdo con Wang *et al.* (1995) y Townsend (2002), la proporción de retrodispersión de bosque inundado y de bosque no inundado, es superior en la polarización HH que en la polarización VV. La retrodispersión es generalmente muy débil para la polarización cruzada (HV o VH) ya que la depolarización no se produce para reflectores de esquina ideal (Leckie, 1998).

2.5 Estudios multitemporales.

Imágenes en estudios multitemporales de detección de cambios es el proceso de reconocer regiones de cambio en imágenes de la misma escena tomada en diferentes tiempos (Gong *et al.*, 2012). Durante la cartografía de inundaciones, la detección de cambios se realiza generalmente mediante la comparación de los datos de referencia antes y después de las inundaciones mediante la

comparación de clasificación de imágenes (Martinis, 2010).

2.5.1 Detección de cambios en imágenes multitemporales SAR.

Es posible identificar el cambio entre dos imágenes simplemente mediante operaciones matemáticas básicas como división o resta de la misma banda en dos imágenes que previamente fueron corregistradas o rectificadas a una proyección común (Green *et al.*, 1994).

La diferencia y cociente entre imágenes, son técnicas bien conocidas para detección de cambios (Singh, 1989). En la diferencia de imágenes SAR, los cambios en la retrodispersión del radar se obtienen restando los valores de intensidad, píxel por píxel, entre dos fechas; en el cociente, los cambios se obtienen dividiendo los valores de intensidad, píxel por píxel (Rignot & Van Zyl, 1993), estos procedimientos suelen llevarse a cabo sobre imágenes calibradas a coeficiente de retrodispersión en decibeles (dB), ya que la magnitud de los cambios encontrados es más sencillamente analizable en esa magnitud física (Salvia, 2010). La diferencia entre imágenes puede expresarse matemáticamente como se indica en la ecuación 23 y el cociente entre imágenes se indica en la ecuación 24.

Ecuación 23. Operación matemática de diferencia para la detección de cambios en imágenes SAR. (23)

$$D_{ij} = D_{ij}^0(2) - D_{ij}^0(1)$$

Donde, D_{ij} es el valor de cambio, $\sigma_{ij}^0(2)$ es el coeficiente de retrodispersión en dB en la fecha 2 (post-cambio), $\sigma_{ij}^0(1)$ es el coeficiente de retrodispersión en dB en la fecha 1 (pre-cambio), i es el número de línea, j es el número de columna.

Ecuación 24. Operación matemática de cociente para la detección de cambios en imágenes SAR. (24)

$$D_{ij} = 10 * \log(\sigma_1^0 / \sigma_2^0)$$

Donde, D_{ij} es el valor de cambio, σ_1^0 es el coeficiente de retrodispersión en potencia en la fecha 1 (pre-cambio), σ_2^0 es el coeficiente de retrodispersión en potencia en la fecha 2 (post-cambio).

Con estas expresiones puede verse que la imagen diferencia tendrá valores nulos en zonas sin cambio, valores mayores a cero cuando el cambio haya provocado un aumento en el coeficiente de retrodispersión, y valores menores a cero cuando el cambio haya provocado un descenso en el coeficiente de retrodispersión.

Un elemento crítico en la detección de cambios mediante diferencia de imágenes es la decisión de dónde ubicar el umbral entre las situaciones de cambio y no cambio en la imagen diferencia. En la detección de cambios de imágenes SAR, esta decisión está ligada a la incerteza radiométrica de las imágenes, producida por la presencia inherente de ruido *speckle* (ver 2.4.1.11.1). Por ende los criterios para definir los umbrales de cambio/no cambio deben estar basados en la estadística de la imagen SAR, más específicamente, en el número equivalente de *looks* de la misma (Salvia, 2010).

2.5.1.1 Intervalos de confianza radiométricos. Cálculo de umbrales en la detección de cambios.

Según Laur *et al.* (2004), una medición de la resolución radiométrica viene dada por los intervalos de confianza, utilizando la *probabilidad de intensidad de la imagen* (P) de un blanco homogéneo que se encuentre entre los límites de error.

Para todos los píxeles en la imagen de un objetivo homogéneo y para un nivel de confianza dado 'P (%)', los límites del intervalo de confianza son iguales a +/- Error_{dB}, y siguen los siguientes criterios:

- Si la probabilidad (“ σ° generado +/- Error_{dB} < σ° esperado, dB”)
- es mayor o igual a P (%).

Los límites del intervalo de confianza P (%) se calculan integrando la función de densidad de probabilidad Gamma normalizada sobre el rango de valores de intensidad que proporcionan confianza P (%). Donde P (%) +/- Error_{dB} son los límites de error de resolución radiométrica.

La función de densidad de probabilidad Gamma normalizada es una función de un parámetro. El parámetro es el *ENL* de la imagen de intensidad. El nivel de confianza, P (%), se obtiene integrando la función de densidad de probabilidad Gamma normalizada sobre un intervalo de valores de intensidad (Δ) correspondientes a +/- Error_{dB}, los errores de resolución radiométrica están en unidades dB.

Ecuación 25. Fórmula matemática para los límites del umbral de cambio/no cambio en imágenes SAR.

$$P = \int_{\Delta} \text{Gamma}(I) dI, \quad (25)$$

donde Δ son los límites de la integral. $\Delta = [10^{-\text{Error}_{dB}/10}; 10^{+\text{Error}_{dB}/10}]$. Los límites del intervalo de confianza radiométrica P (%) son +/- Error_{dB}.

El nivel de confianza es una función creciente de la anchura del intervalo Δ . Cuanto más redujera los límites de error, menor será el nivel de confianza relacionado. Además, para un nivel de confianza dado, cuanto mayor sea el *ENL*, menores serán los límites de error. En el ANEXO F en la tabla 55 se puede consultar los niveles de confianza versus número equivalente de looks.

2.5.1.2 Post-procesamiento a la detección de cambios.

Luego de realizada la detección de cambios, pueden producirse un picoteo en el cual se encuentre un píxel de cambio rodeado de píxeles de no cambio esto es debido al ruido *speckle* presente en ambas imágenes usadas, aún si estas fueron filtradas; esto es poco probable en la realidad. Para evitar esto se aplica un filtro de mayoría (Salvia, 2010).

2.6 Evaluación de la exactitud en datos SAR.

Una manera de expresar la exactitud de los mapas que se obtienen a partir de información satelital es estableciendo qué porcentaje del mapa ha sido correctamente clasificado cuando se lo compara con la verdad del terreno. En general no sólo se procede a obtener la evaluación de exactitud del mapa en su conjunto, sino que se determina la exactitud de cada clase en particular. Se calcula para

ello la matriz de error de clasificación o también conocida como matriz de confusión (Story & Congalton, 1986).

2.6.1 Matriz de confusión.

La matriz de confusión representa los conflictos que se presentan entre las diferentes categorías de un mapa temático; las columnas representan la información de referencia (verdad sobre el terreno) y las filas indican el resultado de la clasificación que se evalúa. La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación; la relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en columna indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa (errores de omisión), mientras los residuales en filas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad (errores de comisión) (Aronoff, 1982; Story & Congalton, 1986).

El interés de estas matrices de confusión proviene de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías; de esta forma, se conoce la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas.

En la tabla 5 se indica la estructura de una matriz de confusión.

Tabla 5. Estructura de una matriz de confusión. Fuente: Chuvieco (2007).

	Clase 1	Clase 2	Clase n	Total	Exactitud del usuario.	Error de comisión
Clase 1	X_{11}	X_{12}	X_{1n}	X_{1+}	X_{11}/X_{1+}	$1-X_{11}/X_{1+}$
Clase 2	X_{21}	X_{22}	X_{2n}	X_{2+}	X_{22}/X_{2+}	$1-X_{22}/X_{2+}$
Clase n	X_{n1}	X_{n2}	X_{nn}	X_{n+}	X_{nn}/X_{n+}	$1-X_{nn}/X_{n+}$
Total	X_{+1}	X_{+2}	X_{+n}	$\sum X_{ij}$		
Exactitud del productor.	X_{11}/X_{+1}	X_{22}/X_{+2}	X_{nn}/X_{+n}			
Error de omisión	$1-X_{11}/X_{+1}$	$1-X_{22}/X_{+2}$	$1-X_{nn}/X_{+n}$			

Donde X_{+i} es la sumatoria de las categorías de referencia y X_{i+} es la sumatoria de las categorías del mapa temático.

A partir de la matriz de confusión pueden generarse medidas estadísticas que permitan validar numéricamente los resultados de distintas técnicas de clasificación. La medida más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados la cual se indica en la ecuación 26.

Ecuación 26. Fiabilidad global del mapa.

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}} \quad (26)$$

Conviene tener en cuenta que la fiabilidad global puede ocultar importantes diferencias entre categorías, que esconden niveles de exactitud muy diversos. Por ello, un análisis riguroso debe poder también considerar la celdas marginales de la matriz de confusión. Para ello otras medidas estadísticas son los errores de omisión y comisión que expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a no asignación a una categoría, mientras los segundos a una delimitación excesivamente amplia. Desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud para el usuario y para el productor (Aronoff, 1982; Story & Congalton, 1986). La primera está en relación inversa con los errores de comisión, mientras la segunda lo está con los de omisión para cada una de las n categorías de la clasificación. En las ecuaciones 27 y 28 se indican dichos errores.

Ecuación 27. Exactitud del productor.

$$E_{p,i} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}}, \quad (27)$$

donde X_{ii} representa la diagonal de dicha columna y X_{+i} indica el marginal de la columna i . Si se quiere expresar en porcentaje se debe multiplicar por 100.

Ecuación 28. Exactitud del usuario.

$$E_{u,i} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}}, \quad (28)$$

donde X_{ij} representa la diagonal de dicha columna y X_{i+} indica el marginal de la fila i . Si se quiere expresar en porcentaje se debe multiplicar por 100.

Los errores de omisión (E_o), es definido como [100 (%) - “exactitud para el usuario (%)”]. En el caso de las columnas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. De forma similar, se indican los errores de comisión (E_c) en donde las celdas no diagonales de las filas expresan lo definido como [100 (%) - “exactitud del productor (%)”] (Janssen & Van Der Wel, 1994).

2.6.1.1 El estadístico Kappa.

El índice estadístico Kappa, sirve para comprobar la fiabilidad de una clasificación y en donde se debe analizar las relaciones entre las diferentes clases (Hudson & Ramn, 1987). Permite obtener una medida de la exactitud de la clasificación (expresada como la concordancia entre el mapa obtenido y la verdad del terreno) extrayendo la contribución obtenida por azar (Cohen, 1960; Hudson & Ramn, 1987; Congalton, 1988). El índice Kappa se define como se indica en la ecuación 29.

Ecuación 29. Definición del índice Kappa.

$$K = \frac{P(a) - P(e)}{1 - P(e)}, \quad (29)$$

donde: $P(a)$ es la proporción observada de píxeles bien clasificados y $P(e)$ es la probabilidad hipotética de clasificaciones correctas por azar. Por lo tanto, si la proporción observada de píxeles bien clasificados es 1, $K = 1$; si esta proporción es igual a la esperada por azar, $K = 0$.

Este estadístico tiene la ventaja de representar completamente la matriz de confusión (Gong & Howart, 1990). El índice Kappa se calcula como se indica en la ecuación 30.

Ecuación 30. Fórmula para calcular el índice Kappa.

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^l n_{ii} - \sum_{i=1}^l (n_{i+} \cdot n_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^l (n_{i+} \cdot n_{+i})}, \quad (30)$$

donde: l es el número de coberturas de la matriz de confusión; n es número total de observaciones de la matriz; n_{ii} número de observaciones en la línea i y columna j en la diagonal principal; n_{i+} es la sumatoria de los valores de una categoría en una fila; n_{+j} es la sumatoria de los valores de una categoría en una columna.

Este índice no tiene una interpretación directa intuitiva, sin embargo, Landis & Koch (1977) generaron una interpretación del índice Kappa que se indica en la tabla 6.

Tabla 6. Intervalo de aceptación de los resultados del índice Kappa. Fuentes: Landis & Koch (1977).

CALIDAD	VALOR DE KAPPA
Pésima	≤ 0.00
Mala	0.00 – 0.20
Razonable	0.20 – 0.40
Buena	0.40 – 0.60
Muy buena	0.60 – 0.80
Excelente	0.80 – 1.00

2.7 Microondas Pasivas.

Los radiómetros de microondas miden la emisión que irradia de los objetos naturales (Ulaby et al., 1981; Woodhouse, 2006). Se detecta la radiación emitida como temperatura de brillo (T_b) por la superficie de la tierra o de la atmósfera y se convierte a un valor de brillo a partir de la cual se forma una imagen (Richards, 2009). Los sensores pasivos no requieren transmisor, son solo de recepción. Como resultado, los radiómetros requieren menos energía para funcionar que los radares (Long, 2009). Trabajan en diferentes rangos de frecuencias de 5 a 100 GHz (Sharma, 2006); las más bajas, por ejemplo 6.93 GHz, 10.65 GHz y 18.7 GHz son más adecuadas para aplicaciones terrestres, mientras las más altas, como las de 23.8 GHz, 36.5 GHz y 89.0 GHz, entre otras, se ven

influenciados por la atmósfera vapor de agua y nubes (Salvia *et al.*, 2010).

En la figura 30, se indica los elementos que intervienen en la medición de microondas pasivas.

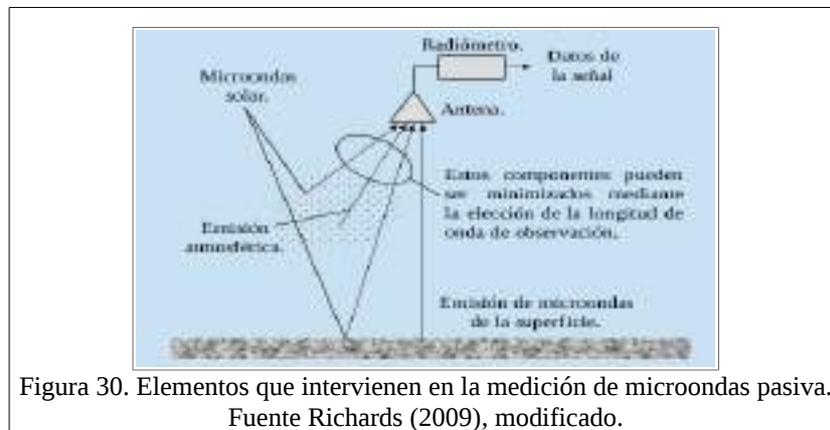


Figura 30. Elementos que intervienen en la medición de microondas pasiva.
Fuente Richards (2009), modificado.

2.7.1 Principios físicos utilizados en Microondas Pasivas.

Todos los cuerpos con una temperatura por encima del cero absoluto ($T = 0 \text{ [K]} = -273.15 \text{ [}^\circ\text{C]}$) emiten radiación electromagnética sobre un amplio rango de longitudes de onda (Chor, 1986) y es detectado por la gran mayoría de sistemas pasivos de sensores remotos (Rees, 2005), este fenómeno se conoce como *radiación térmica*, y ésta es la temperatura del cuerpo negro equivalente que daría la misma radiancia⁵ a la longitud de onda considerada (Clementi, 2013; Rees, 2005). Robert Kirchhoff en el siglo XIX, definió las habilidades que tiene un cuerpo para emitir y absorber energía electromagnética con un coeficiente de emisión ($\epsilon\lambda$) y un coeficiente de absorción ($\alpha\lambda$). Epsilon es la energía por unidad de área y unidad de tiempo, emitida en un pequeño rango de longitud de onda en torno a λ y está expresada en unidades de vatios por metro cuadrado y λ en micrómetros ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$) (Hecht, 2000).

2.7.1.1 Cuerpo negro.

La noción de *cuerpo negro* es de importancia primordial en el estudio de la radiación térmica (Sharkov, 2003). Se define como un emisor ideal, que radia el máximo de energía por unidad de superficie en cada longitud de onda y para una temperatura dada, así mismo un cuerpo negro también absorbe toda la energía que sobre él incide (Chuvienco, 2010). En consecuencia, es utilizado como un estándar para la comparación con la radiación de los cuerpos físicos reales (Sharkov, 2003).

2.7.1.2 Ley de Stefan-Boltzmann.

Según Chor (1986) al considerar un cuerpo negro como un emisor perfecto, la cantidad total de radiación emitida se conoce como la emisión radiante (M_n), la cual se encuentra proporcional a la

⁵ *Radiancia*: Es el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estereoradián ($\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$). El *ángulo sólido* es un ángulo tridimensional, que se refiere a la sección completa de la energía transmitida, y se mide en estereoradián (W sr^{-1}) (Chuvienco, 2010).

cuarta potencia de la temperatura absoluta (T en K) del cuerpo como se expresa en la ecuación 31.

Ecuación 31. Emisión radiante.

$$M_n = \sigma T^4, \quad (31)$$

donde M_n es la energía radiada por segundo por unidad de área de la superficie del cuerpo, y σ es la *constante de Stefan-Boltzmann* ($5.669 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$).

Por lo tanto, a medida que la temperatura aumenta, la energía radiante emitida por un objeto aumenta muy rápidamente. Esto se conoce como la *ley de Stefan-Boltzmann*. Pero para un cuerpo real, se indica en la ecuación 32.

Ecuación 32. Emisión radiante para un cuerpo.

$$M_n = \varepsilon \sigma T^4, \quad (32)$$

donde ε es la emisividad del cuerpo (ver sección 2.7.3).

2.7.1.3 Ley de desplazamiento de Wiew.

Cada curva de un cuerpo negro alcanza su altitud máxima a un valor de longitud de onda (λ_{\max}) que es típico suyo y, por lo tanto, de la temperatura absoluta (T). A esa longitud de onda, el cuerpo negro radia la máxima energía (Hecht, 2000), como se indica en la ecuación 33 .

Ecuación 33. Longitud de onda dominante.

$$\lambda_{\max} = \frac{\delta}{T}, \quad (33)$$

donde δ es una constante igual a $2.898 \mu\text{m K}$, conocida como *constante de Wiew*.

Al aumentar la temperatura, la radiación térmica se desplazará hacia longitudes de onda más cortas y frecuencias más elevadas. La longitud de onda máxima es inversamente proporcional a la temperatura, esto es conocido como la *ley de desplazamiento de Wiew* (Hecht, 2000). Por ejemplo, el Sol es una buena aproximación a un cuerpo negro para una temperatura de 5800 K, por lo que el pico de radiancia espectral⁶ se produce a $\lambda_{\max} \approx 0.50 \mu\text{m}$, en el centro del espectro del visible donde se espera que ocurra. Si, por otro lado, se considera un cuerpo negro a una temperatura de 280 K, lo que es bastante típico de las temperaturas en la superficie de la Tierra, que se encuentra $\lambda_{\max} \approx 10,3 \mu\text{m}$, en la región infrarroja térmico del espectro electromagnético (Rees, 2005). En la figura 31, se indica curvas de emitancia⁷ para fuentes de cuerpo negro para diferentes temperaturas con énfasis en los 6000 K y 300 K (Chor, 1986).

6 *Radiancia espectral*: Es el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida (Chuvieco, 2010).

7 *Emitancia (M)*: Es el total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W m^{-2}) (Chuvieco, 2010).

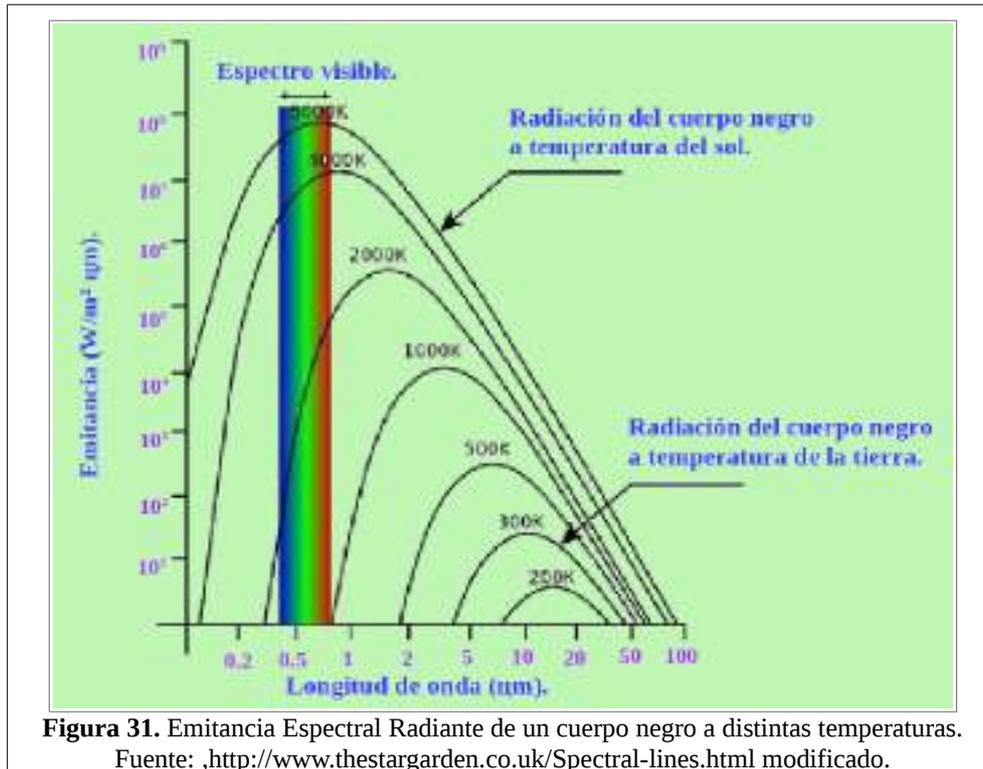


Figura 31. Emitancia Espectral Radiante de un cuerpo negro a distintas temperaturas.
Fuente: <http://www.thestargarden.co.uk/Spectral-lines.html> modificado.

2.7.1.4 Ley de Planck.

Las leyes de Stefan-Boltzman (ver sección 2.7.1.2) y la de desplazamiento de Wiew (ver sección 2.7.1.3), se combinan en una ley más general definida a partir de la teoría cuántica conocida como *ley de Planck*, que expresa la cantidad de energía $M_n(\lambda)d\lambda$ presente en la radiación de un emisor perfecto y que tiene una longitud de onda en el rango de λ a $\lambda + d\lambda$ (Chor, 1986), indicado en la ecuación 34 (Hecht, 2000).

Ecuación 34. Ecuación de la ley de Planck.

$$M_n \lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda\sigma T}} - 1} \right], \quad (34)$$

donde: c es la velocidad de la luz; σ es la *constante de Stefan-Boltzmann* ($5.669 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$); h es la constante de Planck ($6.6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$); λ es la longitud de onda; T es la temperatura. Describen la radiación que emerge de cualquier cuerpo negro a la temperatura T (Rees, 2005).

La fórmula computacional más usada se expresa en la ecuación 35 (Chor, 1986).

Ecuación 35. Emitancia Espectral.

$$M_n \lambda = \frac{3.74151 \times 10^8}{\lambda^5 [\exp\{(1.43879 \times 10^4)/\lambda T\} - 1]}, \quad (35)$$

donde $M_n(\lambda)$ está en $W m^{-2} \mu m^{-1}$ y λ en μm . Por lo tanto, el calculado de $M_n(\lambda)$ es la energía radiante dada en vatios, dentro de un intervalo espectral de $1 \mu m$, emitido desde un cuerpo negro con un área de $1 m^2$ (Slater, 1980). La forma de esta curva se muestra en la figura 31.

El área bajo la curva que se muestra en la figura 31 se puede evaluar como se indica en la ecuación 36 y el resultado corresponde al que da la ley de Stefan – Boltzmann (Chor, 1986).

Ecuación 36. Integral para evaluar la Emitancia Espectral Radiante de las curvas de un Cuerpo Negro.

$$\int_0^{\infty} \sum (\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad (36)$$

2.7.1.5 Aproximación de Rayleigh- Jeans.

A longitudes de onda suficientemente largas, ver ecuación 34, puede ser aproximado como se indica en la ecuación 37 (Rees, 2005).

Ecuación 37. Aproximación de Rayleigh – Jeans.

$$M_{n,f} = 2 \sigma \frac{T}{\lambda^2}, \quad (37)$$

donde: M_n , es la energía radiada por segundo por unidad de área de la superficie del cuerpo, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T es la temperatura en Kelvin y λ es la longitud de onda.

Esto se llama la aproximación de *Rayleigh - Jeans*. La condición para que esta aproximación sea válida se indica en la ecuación 38 o su equivalente en la ecuación 39.

Ecuación 38. Condición de Rayleigh – Jeans para que la aproximación sea válida.

$$\frac{hc}{\lambda \sigma T} \ll 1 \quad (38)$$

Ecuación 39. Condición equivalente de Rayleigh – Jeans para que la aproximación sea válida.

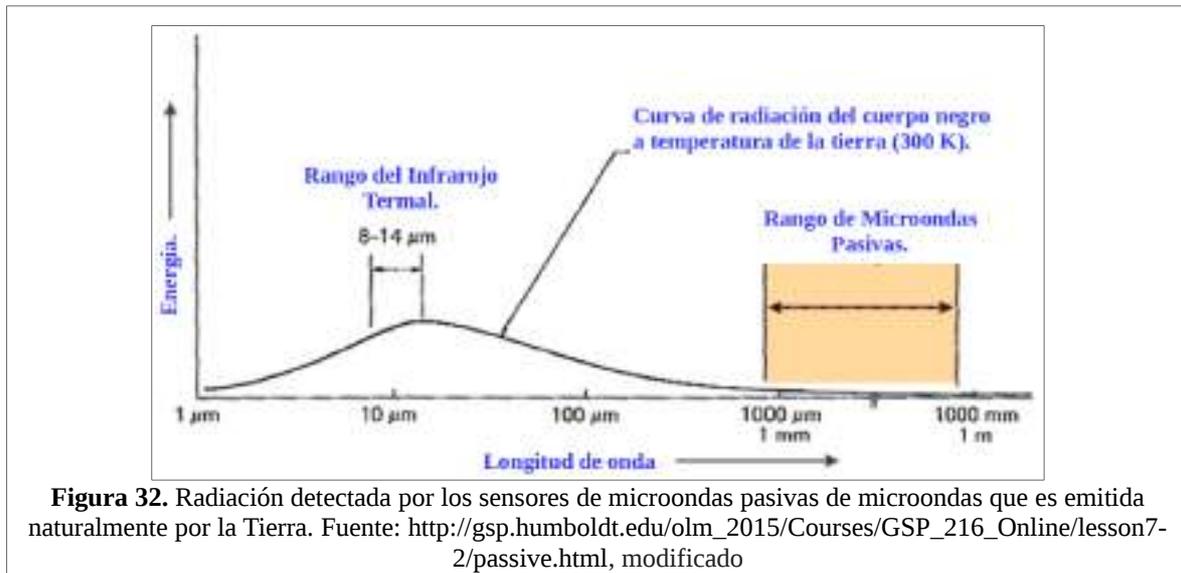
$$\frac{hf}{\sigma T} \ll 1 \quad (39)$$

Para $T = 280 K$, esto da $f \ll 6000 GHz$ o $\lambda \gg 50 \mu m$, por lo que la aproximación es válida para microondas para objetos a temperaturas terrestres típicas (Rees, 2005).

2.7.2 Emisión en el Microondas

La radiación máxima de la Tierra ocurre en la porción infrarroja térmica del espectro, alrededor de $9-10 \mu m$, pero también emite una pequeña cantidad de radiación de microondas, aunque a niveles relativamente bajos (Chuvienco, 2010; Rees, 2005). Las propiedades de Absorción y Emisión tienen las mismas características espectrales de acuerdo con la ley de Kirchhoff (Njoku & Farr, 2013). En

la figura 32 se da un ejemplo de la radiación detectada por los sensores de microondas pasivas que es emitida naturalmente por la Tierra.



2.7.3 Emisividad.

En lo que respecta a la capacidad de los cuerpos reales para emitir radiación, se caracterizan por su emisividad espectral (Ormeño, 2006) que expresa la relación entre la emitancia de una superficie (M), y la que ofrecería un cuerpo negro, a la misma temperatura (M_n) (Chuvienco, 2010).

La emisividad depende de la longitud de onda, por lo que en general es escrita como $\epsilon(\lambda)$, y puede ser definida a través de la ecuación 40.

Ecuación 40. Emitancia Espectral.

$$M_{n\lambda} = \epsilon_{(\lambda)} M_{n\lambda,p}, \quad (40)$$

donde: $M_{n\lambda,p}$, para el brillo del cuerpo negro a sido definido por la ecuación 34 (donde el «p» significa «Planck»).

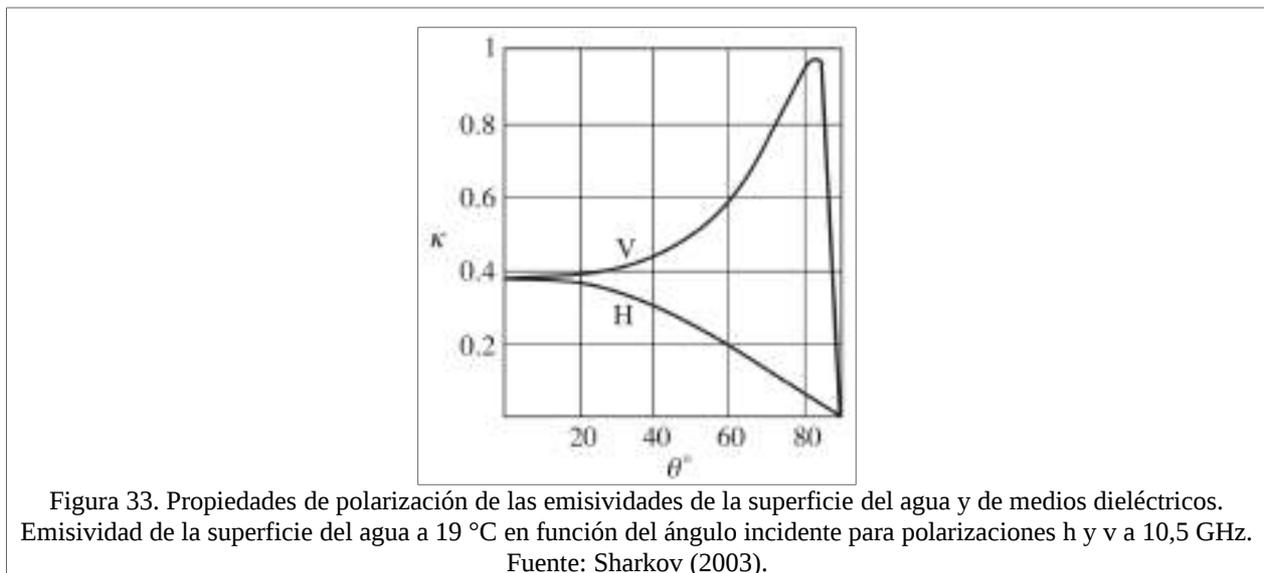
Un simple argumento termodinámico demuestra que un cuerpo que es un buen emisor (alta ϵ) debe ser también un buen absorbente de radiación, de hecho los dos factores deben ser iguales, esta es la *ley de radiación de Kirchoff* (ver sección 2.7.1). Se puede ver esto al darse cuenta de que cualquier cuerpo a la temperatura T debe estar en equilibrio con la radiación del cuerpo negro cuyo espectro corresponde a la misma temperatura. Si, por ejemplo, el cuerpo absorbe mejor de lo que emite, se calentará y, por lo tanto, no podrá estar en equilibrio. Así, la reflectividad viene dada por $1 - \epsilon$ (Rees, 2005). La emisividad varía entre 0 y 1 (Hecht, 2000).

La medición de emisividad se hace tomando tres aspectos:

En primer lugar la observación de microondas se hace rutinariamente a un número de frecuencias de aproximadamente 4 A 40 GHz, por lo tanto, es necesario considerar la variación de emisividad con

frecuencia. En segundo lugar, las observaciones de microondas se hacen a menudo en ángulos alejados de la superficie normal, por lo que es importante considerar la dependencia de la emisividad en la dirección de incidencia. Por último, las emisividades son a menudo significativamente distintos para diferentes estados de polarización, por lo que también debe considerarse la dependencia de la polarización (Rees, 2005).

En la figura 33 se presenta un ejemplo de la diferencia en las polarizaciones h y v en donde se presenta los valores calculados de emisividades para la superficie del agua y medios dieléctricos, que se utilizan para modelar suelos con diferente contenidos de humedad. Se observa la diferencia en el comportamiento de una dependencia angular para la polarización h y v . Mientras que el comportamiento de la emisividad polarizada h disminuye a medida que aumenta el ángulo de incidencia, la emisión con polarización v aumenta hasta un máximo cercano a 1 a aproximadamente 80° (Sharkov, 2003). La razón de que la emisividad no alcanza por completo el valor 1 es porque la constante dieléctrica no es un número real sino complejo. También se puede indicar que la constante dieléctrica, y por lo tanto la emisividad, de una superficie del agua depende de la temperatura (Rees, 2005).



La emisividad de microondas de una superficie desnuda del suelo está dominada por la rugosidad superficial y por el contenido de humedad del suelo. La constante dieléctrica del agua en la región de microondas es mucho mayor que la del suelo (típicamente 3), por lo que el aumento del contenido de humedad aumentará la reflectancia y, por tanto, disminuirá la emisividad. Las emisividades típicas para las superficies del suelo se encuentran en el intervalo de 0,5 a 0,95 (Rees, 2005).

2.7.4 Variables físicas de sistemas satelitales en microondas pasivas.

La Temperatura de brillo T_b es una característica de la superficie y es proporcional al producto de su temperatura real y la emisividad del medio (Sippel *et al.*, 1994). Para definir la temperatura de brillo de un cuerpo que está emitiendo radiación térmica, ésta es la temperatura del cuerpo negro equivalente que daría la misma radiancia a la longitud de onda considerada. Mediante la

combinación de las ecuaciones 34 y 40, se puede ver que a la longitud de onda λ , un cuerpo con temperatura T y emisividad ε tiene una temperatura de brillo Tb (Rees, 2005), viene dada por la siguiente expresión.

Ecuación 41. Aproximación a la ecuación para temperatura de brillo.

$$\varepsilon \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\frac{hc}{\lambda \sigma T} - 1} \right] = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\frac{hc}{\lambda \sigma T} - 1} \right] \quad (41)$$

La solución a la ecuación 41 para Tb es la indicada en la ecuación 42.

Ecuación 42. Temperatura de brillo.

$$Tb = \frac{hc}{\lambda \sigma \ln\left(1 + \frac{1}{\varepsilon} (e^{\frac{hc}{\lambda \sigma T}} - 1)\right)} \quad (42)$$

Pero a longitudes de onda suficientemente largas (altas frecuencias) esto se puede aproximar, usando la aproximación de Rayleigh-Jeans (Rees, 2005), como se indica en la ecuación 43.

Ecuación 43. Temperatura de brillo expresado con emisividad.

$$Tb_{\lambda, \rho} = T * \varepsilon_{\lambda, \rho}, \quad (43)$$

donde:

Tb es la temperatura de brillo del terreno para una longitud de onda λ y una polarización horizontal o vertical, $p=(h, v)$; ε es la emisividad, y T la temperatura real del terreno.

Despejando la ecuación 43 en función de la ε , se obtiene la ecuación 44.

Ecuación 44. Emisividad.

$$\varepsilon_{\lambda, \rho} = \frac{Tb_{\lambda, \rho}}{T} \quad (44)$$

La temperatura de brillo es igual a la temperatura real del objeto sólo para el caso de un cuerpo negro ideal, y es en general menor para el caso de un cuerpo real. Por lo tanto, la emisividad es siempre menor que 1. La emisividad en distintas polarizaciones es necesariamente igual únicamente para el caso de incidencia normal, donde la dirección del campo eléctrico en horizontal (h) y en vertical (v) es siempre paralela a la superficie. Para todos los demás casos, se observa en general valores distintos de ε_h y ε_v , para casi todos los elementos del terreno. Más aún, se observan cambios en la diferencia $\varepsilon_v - \varepsilon_h$ (ΔT) que dependen de la cobertura del terreno (tipo y condición de la vegetación, tipo y condición del suelo, estado de inundación, etc) (Choudhury, 1989), definido en la ecuación 45.

Ecuación 45. Delta T.

$$\Delta T = Tb_{\lambda, v} - Tb_{\lambda, h} \quad (45)$$

2.7.5 Índices en microondas pasivas.

Con el doble objetivo de explotar esta diferencia e independizarse de la temperatura real del objeto se define el índice de polarización PI para una frecuencia λ , definido en la ecuación 46.

Ecuación 46. Índice de polarización.

$$PI_{\lambda} = \frac{Tb_{\lambda,v} - Tb_{\lambda,h}}{0.5(Tb_{\lambda,v} + Tb_{\lambda,h})} \quad (46)$$

Este es un indicador robusto del estado del terreno, frecuentemente utilizado para monitorear cambios en la condición del terreno (Choudhury, 1989).

2.7.6 Estimación del área inundada utilizando datos satelitales en microondas.

Debido a su muy baja resolución, casi por definición todos los píxeles de los sistemas orbitales que miden emisión en microondas de la superficie terrestre contienen más de un tipo de cobertura. Esto es lo que se denomina píxeles heterogéneos o mixtos. En general, la Tb observada de un píxel puede modelarse como la suma de las Tb de los distintos componentes del terreno pesados por el área que ocupan dentro del píxel. Para el caso de una planicie de inundación, es posible postular tres componentes del terreno (agua, planicie no inundada y planicie inundada), que en combinación son responsables de los valores observados de todos los píxeles de la cuenca (Hamilton *et al.*, 2002). El mismo razonamiento puede aplicarse al índice de polarización (PI). Entonces, el PI observado de cada píxel puede modelarse como indica la ecuación 47.

Ecuación 47. Índice de polarización observado.

$$PI_{obs,\lambda} = f_w PI_{w,\lambda} + f_{nf} PI_{nf,\lambda} + f_f PI_{f,\lambda}, \quad (47)$$

donde PI_w , PI_{nf} y PI_f corresponden al PI de cuerpos de agua permanentes, de planicie no inundada y de planicie inundada respectivamente, y f_w , f_{nf} y f_f corresponden a la fracción del área de píxel ocupada por cada una de estos componentes del terreno. Por definición, la suma de las 3 fracciones de área deben ser igual al total del píxel (ver ecuación 48).

Ecuación 48. Fracción del área de píxel ocupada por cada uno de los componentes del terreno.

$$1 = f_w + f_{nf} + f_f \quad (48)$$

Así es posible estimar el área inundada despejando de la ecuación 47 y ecuación 48.

Ecuación 49. Fracción de área inundada.

$$f_f = \frac{PI_{obs,\lambda} - f_w PI_w - PI_{nf,\lambda} + f_w PI_{nf,\lambda}}{PI_{f,\lambda} - PI_{nf,\lambda}} \quad (49)$$

Este esquema fue planteado inicialmente por Hamilton *et al.* (2002) para estimar área inundada en

grandes planicies de inundación utilizado el radiómetro pasivo *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR) (Gloersen & Hardis, 1979). Este esquema cuenta con la información en una única frecuencia (36 GHz) y dos polarizaciones (h y v) y requiere poder estimar por medios externos los siguientes parámetros para cada píxel.

a. f_w (Fracción del píxel correspondiente a cuerpos de agua). Este parámetro es estimado en Sippel *et al.* (1998) con imágenes ópticas, a través de una clasificación que incluye bandas en el infrarrojo; con imágenes de un sistema SAR Banda X en Hamilton *et al.* (2002), utilizando el hecho de que los cuerpos de agua tienen asociados coeficientes de *backscattering* muy bajos.

b. PI_w (PI de un cuerpo de agua). Este valor puede calcularse teóricamente para un cuerpo de agua calma y pura dado el ángulo de incidencia. También es posible estimarlo del valor de píxeles homogéneos (totalmente inundados) o utilizando una metodología desarrollada por Hamilton *et al.* (2002) análoga a la obtención de alturas hidrométricas a partir de altímetro de radar.

c. PI_{nf} (PI de la planicie no inundada). Este valor puede determinarse empíricamente de zonas no inundadas (Hamilton *et al.*, 2002) o puede simularse utilizando modelos de emisión. En esta última opción permite entender en detalle el comportamiento de PI_{nf} , pero requiere de un conocimiento importante del terreno, ya que el modelo de interacción requiere como entrada las características geométricas y dieléctricas del terreno (suelo y vegetación). Para calcular empíricamente este parámetro, se requiere conocer donde no hay nada de inundación, para esto se despeja la ecuación 47, sin tomar en cuenta los parámetros PI_f y f_f , como se indica en la ecuación 50.

Ecuación 50. Índice de polarización de área no inundada.

$$PI_{nf,\lambda} = \frac{PI_{obs,\lambda} - f_w PI_w}{f_{nf,\lambda}} \quad (50)$$

d. PI_f (PI de la planicie inundada). Al igual que el anterior, este parámetro puede determinarse empíricamente o puede simularse. La primera opción es la utilizada por Sippel *et al.* (1998); Hamilton *et al.* (2002) y puede implementarse como para el PI_{nf} . Para calcular este parámetro, se despeja la ecuación 47, como se indica en la ecuación 51. La segunda opción implica el uso de modelos de emisión.

Ecuación 51. Índice de polarización de área inundada.

$$PI_{f,\lambda} = \frac{PI_{obs,\lambda} - f_w PI_w - f_{nf,\lambda} PI_{nf,\lambda}}{f_f} \quad (51)$$

Este parámetro es crítico para obtener un buen desempeño del algoritmo. En Sippel *et al.* (1994, 1998) y Hamilton *et al.* (2002) se asume que este parámetro es independiente de la altura del agua dentro de la planicie, ya que las planicies de inundación están completamente dominadas por bosques. En el área de estudio de este trabajo esto no es así, dada la predominancia de vegetación herbácea. Según Salvia *et al.* (2010) Para la vegetación arbórea, PI_f puede considerarse independiente de la altura del agua, ya que el dosel, casi nunca está cubierto por el agua, y es el principal responsable de la emisión de la vegetación la emisión de troncos es muy baja (Ferrazzoli

& Guerriero ,1996). Para la vegetación herbácea, sin embargo, un aumento en el nivel del agua implica una disminución en la biomasa emergida, lo que implica una disminución en la emisión de vegetación, pero un aumento en PI_f . Esta última afirmación es apoyada por simulaciones de un modelo teórico de emisión (Ferrazzoli & Guerriero, 1996) de vegetación de pantano.

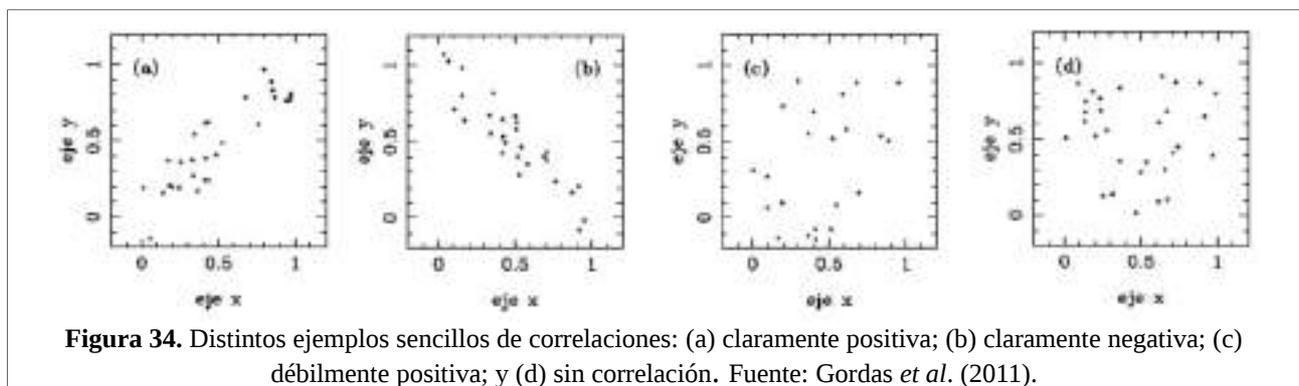
2.8 Correlación en los datos de microondas pasivas con información externa para evaluación.

La correlación estudia el grado de asociación o dependencia entre dos variables. Es decir, estudiar la correlación significa analizar hasta qué punto es significativa la dependencia de una variable con otra. Cuando exista una dependencia funcional entre ambas variables se tendrá una correlación perfecta (ej. radio y área de un círculo). Cuando por el contrario, no exista ninguna dependencia entre las variables no existirá correlación. El caso más interesante es el intermedio, cuando es posible que exista alguna correlación, aunque no perfecta, que habrá que cuantificar (Gordas *et al.*, 2011).

2.8.1 Análisis Gráfico de asociación.

Según Aparicio *et al.* (2004), el primer paso a dar cuando se pretende modelizar un banco de datos es llevar a cabo una inspección gráfica de los mismos, con el fin de descubrir de que tipo son las relaciones entre las variables disponibles, si las hay. Básicamente, los gráficos de asociación son de dos tipos:

a) *Diagramas de dispersión*: Sirven para visualizar relaciones entre un par de variables continuas. En la figura 34, se indica ejemplos de correlación con diagramas de dispersión.

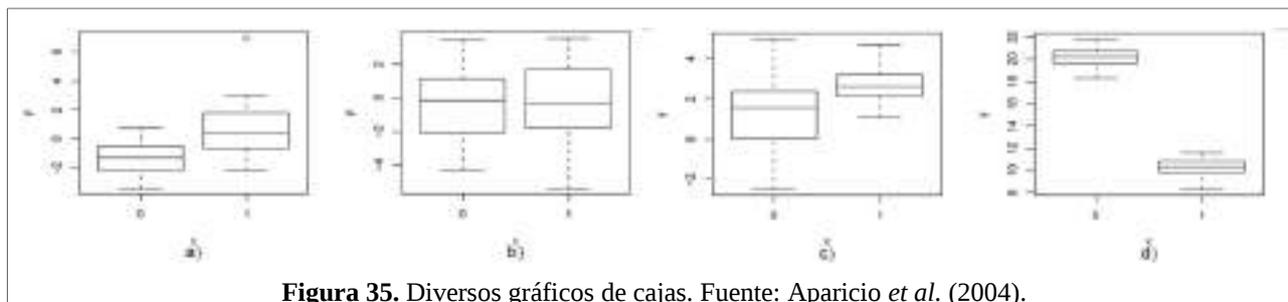


La simple observación del diagrama de dispersión proporciona una idea cualitativa del grado de correlación. Sin embargo, es claramente más útil disponer de una medida cuantitativa de dicha correlación (ver 2.8.3) (Gordas *et al.*, 2011).

b) *Gráficos de cajas*: Sirven para visualizar relaciones entre una variable continua y un factor (que está categorizada). Estos gráficos dan información sobre la *dispersión de los datos respuesta* (amplitud de la caja con bigotes, de la caja sola, de los bigotes solos), sobre la *simetría* (en función de que la mediana divida a la caja con bigotes en dos mitades iguales o no, de la desigualdad de las partes de la caja separadas por la mediana, de la desigualdad de los bigotes). Cuando se representa una caja para cada uno de los grupos identificados por una variable factor, se tendrá información sobre la diferencia entre dichos grupos en función de que las cajas queden encajadas en un mismo

rango de valores, o aparezcan desencajadas a distintas alturas (Aparicio *et al.*, 2004).

En la figura 35, se indica ejemplos de diversos gráficos de cajas, donde se tiene representadas diversas variables respuesta clasificadas en dos grupos (factor explicativo con dos niveles de clasificación), y se encuentran situaciones de clara diferencia entre los grupos (d), hasta semejanzas manifiestas (b) entre ambos. Los gráficos a) y c) no muestran grupos explícitamente diferentes; de hecho, el solapamiento de las cajas-bigotes en a) y la inclusión de la caja 1 en los bigotes⁸ de la caja 0, cuyos datos son mucho mas dispersos⁹, hacen intuir diferencias no significativas. Los bigotes



2.8.2 Fórmulas estadísticas utilizadas en la tesis.

Ecuación 52. Fórmula para calcular la media.

$$u = \frac{\sum x_i}{N} \quad (52)$$

Donde N : es el número total de observaciones; $\sum x_i$: es la suma de todas las mediciones de x .

Ecuación 53. Fórmula para calcular la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - u)^2}{N}} \quad (53)$$

Donde N : es el número total de observaciones; $\sum (x_i - u)^2$: es el cuadrados de las desviaciones de las mediciones alrededor de su media u .

Ecuación 54. Fórmula equivalente para calcular la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - u^2} \quad (54)$$

8 **Bigotes:** Son líneas que salen a los costados de la caja y que sirven como referencia para ubicar las observaciones que están por fuera del 50 % central de la distribución (Palladino, 2011).

9 **Dispersión de los datos:** Indican la variabilidad del conjunto de datos, cómo se distribuyen los datos de estudio. Una dispersión grande indica un conjunto de datos heterogéneos e implica poca utilidad de una medida de tendencia central únicamente para describir la distribución (Di Rienzo *et al.*, 2009).

Donde N : es el número total de observaciones; $\sum x_i^2$: es la sumatoria de las observaciones al cuadrado; u : es la media.

Ecuación 55. Fórmula para interpolación lineal.

$$y = y_o + (x - x_o) \frac{y_1 - y_o}{x_1 - x_o} \quad (55)$$

Donde y : es la incógnita; x : valor conocido; x_o : límite inferior en x ; x_1 : límite superior en x ; y_o : límite inferior en y ; y_1 : límite superior en y .

2.8.3 Análisis de correlación lineal.

Si dos variables x e y son las variables en cuestión, se estudia el grado en que la nube de puntos representados en un *diagrama de dispersión* muestra la localización de los puntos (x , y) sobre un sistema rectangular de coordenadas. Cuanto mejor se aproxime dicha nube a una recta, mayor será el grado de correlación lineal (Spiegel, 1991; Gordas *et al.*, 2011).

Se define el coeficiente de correlación lineal de Pearson (ρ) entre las variables aleatorias x e y (Di Rienzo *et al.*, 2009b) como:

Ecuación 56. Coeficiente de correlación lineal de Pearson.

$$\rho = \frac{Cov(x, y)}{\sqrt{Var(x)Var(y)}}, \quad (56)$$

donde $Var(x)$ y $Var(y)$ denotan las varianzas de x e y respectivamente que se define en la ecuación 57 y $Cov(x, y)$ denotan la covarianza entre x e y que se define como indica la ecuación 58

Se define la varianza (Mendenhall *et al.*, 2010).

Ecuación 57. Fórmula para calcular la varianza.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}, \quad (57)$$

donde se tiene la sumatoria de los cuadrados de las desviaciones de las mediciones alrededor de su media; y N es el número total de observaciones.

Se define la covarianza de una muestra bidimensional (Gordas *et al.*, 2011).

Ecuación 58. Covarianza

$$Cov = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N - 1}, \quad (58)$$

donde se tiene la sumatoria de los cuadrados de las desviaciones de las mediciones alrededor de su media para las variables x_i e y_i ; N es el número total de observaciones.

Es importante observar que de la definición surge que el coeficiente de correlación es independiente de las unidades de medida de las variables. También debe notarse que el coeficiente de correlación lineal vive en el intervalo $[-1, 1]$, además es un indicador de la densidad alrededor de la recta de regresión para la distribución condicional de y dado x y viceversa (Di Rienzo et al., 2009b).

Dada una muestra $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ de dos variables x e y , se calcula el coeficiente de correlación lineal simple (r) de Pearson como:

Ecuación 59. Correlación lineal simple (r) de Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (59)$$

Cuando existe correlación lineal entre dos variables, este coeficiente es útil para cuantificar el grado de asociación entre ellas (Aparicio et al., 2004).

Tabla 7. Interpretación a los valores de la correlación lineal simple de Pearson. Fuente: Aparicio et al. (2004).

Probables valores de r .	Características
$r = 0$	Nada de asociación (lineal)
$r = 1$ o -1	Asociación lineal perfecta
$r < 0$	Correlación negativa: $\uparrow x$ entonces $\downarrow y$, cuando una aumenta de valor la otra disminuye.
$r > 0$	Correlación positiva: $\uparrow x$ entonces $\uparrow y$, cuando una aumenta de valor la otra también.

Tabla 8. Intervalo de aceptación de los resultados del coeficiente de correlación de Pearson. Fuentes: Martínez et al. (2009).

CALIDAD	VALOR DE r
Mala	$r < 0.5$
Regular	$r = 0.5 \leq r < 0.8$
Buena	$r = 0.8 \leq r < 0.9$
Excelente	$r = 0.9 \leq r < 1$
Perfecta	$r = 1$

2.8.3.1 Contraste de hipótesis sobre ρ .

Cuando se quiere contrastar si dos variables x e y están relacionadas linealmente, se plantea pruebas de contraste de hipótesis. (Hipótesis Nula) $H_0: \rho = 0$ versus (Hipótesis alternativa) $H_1: \rho \neq 0$. Para resolver dicho contraste se puede proceder como en cualquier contraste de hipótesis para la aceptación o rechazo de H_0 , pero generalmente se usa un test t denominado de correlación del producto de los momentos de Pearson empleado en esta tesis como se indica en la ecuación 60 (Aparicio et al., 2004; Di Rienzo et al., 2009).

Para utilizar el coeficiente de correlación muestral " r ", para probar la independencia entre x e y probando la hipótesis $H_0: \rho = 0$, se requiere que se tenga una muestra aleatoria de n pares de valores

(x, y) y se satisfagan las suposiciones de normalidad bivariada (Di Rienzo et al., 2009). En las pruebas de normalidad las hipótesis de la prueba son H_0 : las observaciones tienen distribución normal; versus H_1 : las observaciones no tienen distribución normal (Balzarini et al., 2008).

Para validar la normalidad hay varias alternativas, se puede realizar gráficos de probabilidad normal (qqplots), generar histogramas o a su vez gráficos de cajas (ver 2.8.1) y probar tests de normalidad por ejemplo, el test de Shapiro-Wilks¹⁰ o el test de Kolmogorov-Smirnov¹¹ y ver que ambos conjuntos de datos pasan las comprobaciones (Szretter, 2013).

Ecuación 60. Correlación del producto de los momentos de Pearson.

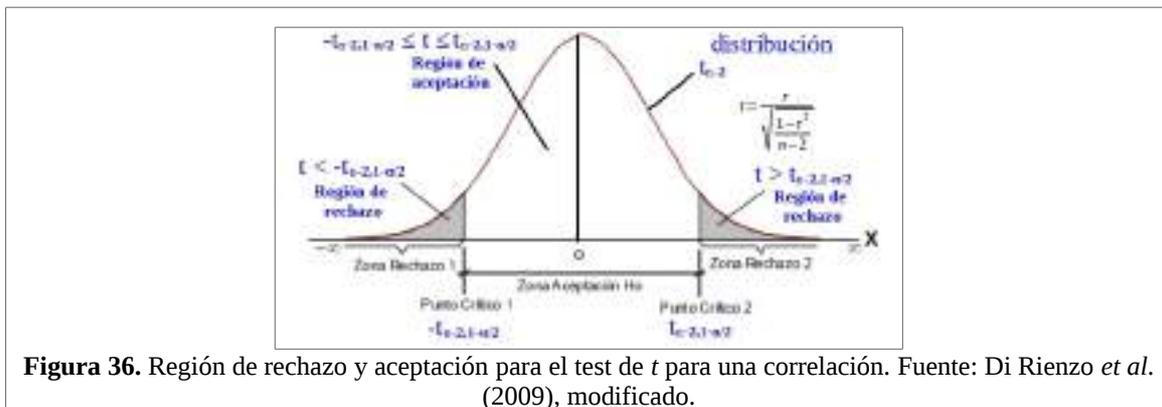
$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \tag{60}$$

que se distribuye como una distribución t de Student con $n-2$ grados de libertad¹², donde n es el número de pares (x, y) (Di Rienzo et al., 2009b).

Si H_0 fuera cierto, ρ sería cero y su estimado r debería tomar valores muy cercanos a cero. Lo mismo debería pasar con t . Por lo tanto se rechaza la H_0 cuando t tome valores muy alejados de 0, tanto positivos como negativos. El test rechaza H_0 cuando t toma valores muy grandes o muy pequeños, es decir, se rechaza la hipótesis nula con nivel $1 - \alpha$ cuando:

$$t \geq t_{n-2, 1-\alpha/2} \text{ ó } t \leq t_{n-2, \alpha/2} ,$$

donde $t_{n-2, 1-\alpha/2}$ es el percentil $1 - \alpha/2$ de una distribución t_{n-2} , o sea el valor que deja a la izquierda un área de $1 - \alpha/2$. Es un test bilateral (Szretter, 2013). La región de rechazo aparece dibujada en la figura 36.



- 10 **Test de Shapiro-Wilkss:** Está esencialmente basado en el cuadrado de la correlación entre las observaciones ordenadas y sus valores esperados bajo normalidad (Szretter, 2013).
- 11 **Test de Kolmogorov-Smirnov:** Calcula las diferencias entre la función de distribución empírica y la teórica en los puntos observados, toma valor absoluto y da como estadístico el máximo de estos valores. Es decir, valora la máxima distancia entre la distribución propuesta y la distribución empírica obtenida sin ninguna hipótesis paramétrica solo a partir de los datos (Aparicio et al., 2004).
- 12 **Grados de libertad:** Se define como el tamaño de la muestra menos el número de parámetros de la población. (Spiegel, 1991).

A continuación se dan algunas conceptos importantes para entender los análisis estadísticos (tomado de Di Rienzo et al., 2009).

- **Establecer el nivel de significación del contraste.**
 - *Nivel de significación:* Se define como la máxima probabilidad de rechazar H_0 cuando ésta es verdadera. Será denotado por la letra griega α . El nivel de significación representa la máxima probabilidad de equivocarse en el sentido de concluir que H_0 es falsa cuando en realidad no lo es. Una vez que se han establecido H_0 y H_1 debe fijarse el nivel de significación. En general se fija en 0.05 (5%) o en 0.01 (1%), que son niveles usualmente aceptados, aunque no hay razón alguna para no seleccionar algún otro.
- **Establecer los eventos que conducen al rechazo y no rechazo de la Hipótesis Nula.**
 - *La región o zona de rechazo:* La región o zona de rechazo de H_0 es uno o más intervalos de la recta real que describen al evento que conduce al rechazo de H_0 y cuya probabilidad, cuando H_0 es verdadera, es α .
 - *Región o zona de no rechazo:* La región de no rechazo de H_0 es un intervalo de la recta real que describe al evento que conduce al no rechazo de H_0 con probabilidad $1-\alpha$, cuando H_0 es cierta.
 - *La zona de rechazo* puede estar a la izquierda o a la derecha de la distribución del estadístico bajo H_0 , Cuando la zona de rechazo está repartida a izquierda y derecha se dice que el contraste es bilateral.
 - *Puntos críticos:* Los valores de la recta real que separan la zona de no rechazo de la de rechazo.
- **Valor p para el contraste de hipótesis.**

El valor p o p-valor, es una medida de la “credibilidad” de la hipótesis nula. Cuanto más pequeño es el valor p, menos probable es que la hipótesis nula sea verdadera y por ello si es menor que el nivel de significación la hipótesis se rechaza. La regla de decisión para rechazar H_0 , con el enfoque del valor p es:

- a) Si el valor p es mayor o igual que α , la hipótesis nula no se rechaza.
- b) Si el valor p es menor que α , la hipótesis nula se rechaza.

Puede calcularse como se indica en la ecuación 61.

Ecuación 61. p-valor. (61)

$$p\text{-valor} = P(|t| \geq |t_{obs}|)$$

- **Intervalo de confianza para ρ**

Según Szretter (2013), puede resultar de interés disponer de un intervalo de confianza para el verdadero coeficiente de correlación poblacional, ρ , que dé indicios de qué parámetros poblacionales pueden describir apropiadamente a los datos. Para construirlo se recurre a la transformación z de Fisher, que se presenta en la ecuación 62.

Ecuación 62. Transformación z de Fisher.

$$z = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right) \quad (62)$$

Luego se utiliza la distribución normal para encontrar los percentiles adecuados para describir el comportamiento del z estandarizado, y finalmente se aplica la inversa de la transformación z para obtener un intervalo de confianza para ρ . Finalmente el intervalo de confianza de nivel $1 - \alpha$ para ρ está dado por $[\rho_i, \rho_D]$ donde

Ecuación 63. Transformación z_{obs} de Fisher.

$$z_{obs} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right) \quad (63)$$

Ecuación 64. Límite inferior del Intervalo de confianza para ρ .

$$\rho_I = \frac{e^{2\left(z_{obs} - z_1 - \frac{\alpha}{2} * \frac{1}{\sqrt{n-3}}\right)} - 1}{e^{2\left(z_{obs} - z_1 - \frac{\alpha}{2} * \frac{1}{\sqrt{n-3}}\right)} + 1} \quad (64)$$

Ecuación 65. Límite superior del Intervalo de confianza para ρ .

$$\rho_D = \frac{e^{2\left(z_{obs} + z_1 - \frac{\alpha}{2} * \frac{1}{\sqrt{n-3}}\right)} - 1}{e^{2\left(z_{obs} + z_1 - \frac{\alpha}{2} * \frac{1}{\sqrt{n-3}}\right)} + 1} \quad (65)$$

2.8.3.2 Coeficiente de correlación para datos que no cumplen una distribución normal.

Cuando las dos variables bajo estudio de correlación no tienen distribución normal se procederá con los rangos de mediciones para cada variable (Badii *et al.*, 2014). Existen otras medidas de asociación entre dos variables que no son tan sensibles a observaciones atípicas como el coeficiente de correlación de Pearson, ni necesitan el supuesto de normalidad para testarse. La más difundida de ellas es el coeficiente de correlación de Spearman (Szretter, 2013).

El coeficiente de correlación de Spearman se encuadra entre las técnicas estadísticas no paramétricas, que resultan robustas bajo la presencia de outliers ya que reemplazan los valores observados por los rangos o ranking de las variables (Szretter, 2013). Después de dar los rangos a cada medición de la variable se usará la ecuación 66 para proceder con la operación. Al coeficiente de Spearman se lo denota con r_s .

Ecuación 66. Coeficiente de correlación de Spearman.

$$r_s = 1 - \left[6 \sum d_i^2 / (n^3 - n)\right], \quad (66)$$

donde d_i es la diferencia entre rangos x e y; el valor de r_s varía de “-1” hasta “+1” y no tiene unidad,

sin embargo, este valor es diferente del valor r calculado por el método de Pearson (Badii *et al.*, 2014).

Otro test para $\rho = 0$. Puede testarse las mismas hipótesis de la sección 2.8.3.1, es decir $H_0: \rho = 0$, o, $H_0: \rho \neq 0$; pero usando el coeficiente de correlación de Spearman, rechazando para valores de valor absoluto grandes de r_s . El p-valor puede calcularse de manera exacta si $n < 10$ y no hay empates en la muestra, y de manera aproximada para n mayores. Si n es muy grande, se utiliza la misma distribución t explicada anteriormente (ver 2.8.3.1).

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y METODOLOGÍA.

3.1 Materiales utilizados.

Como materiales se cuenta con el Mapa de Ambiente (ver sección 2.1.4), Datos hidrológico de las alturas hidrométricas (ver sección 3.1.1), Sistemas SAR (ver sección 3.1.2.1) y Sistemas de microondas pasivas (ver sección 3.1.3).

3.1.1 Datos hidrológicos de las alturas hidrométricas.

Estos datos fueron consultados en la página de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (UNL, 2016a), y posteriormente solicitados mediante memorándum al señor decano de la Facultad. La información pertenece a las estaciones de Esquina, Paraná y Santa Fe desde 2002 hasta 2015, que se encuentran en el área de estudio y se utilizan para seleccionar las imágenes procesadas para época inundada y no inundada, así como para hacer una comparación entre las mismas. Luego de un análisis de esta información se seleccionaron las estaciones Esquina y Santa Fe. La ubicación de las estaciones se encuentran en las ciudades de donde toman su nombre y su ubicación referencial se puede ver en la figura 2. Estos datos tienen una frecuencia diaria.

3.1.2 Sistemas satelitales utilizados.

3.1.2.1 Sistemas SAR.

3.1.2.2 ALOS.

El satélite ALOS (**A**dvanced **L**and **O**bserving **S**atellite), construido por la agencia espacial Japonesa (JAXA, *Japan Aerospace Exploration Agency*) y la organización de sistemas de observación de recursos de Japón (JAROS, *Japan Resources Observation System Organization*) fue lanzado el 24 de enero de 2006 y estuvo en funcionamiento hasta el 12 de mayo de 2012 (JAXA, 2012), y es el sucesor del satélite japonés de recursos terrestres (JERS-1), que estuvo en funcionamiento desde 1992 hasta 1998 (Rosenqvist *et al.*, 2004).

ALOS trabajaba con tres instrumentos Rosenqvist *et al.* (2004):

- PRISM es un instrumento Pancromático para el Mapeo Estereoscópico cuyo objetivo principal es la cartografía digital de elevación.
- AVNIR-2 es un Radiómetro Avanzado Visible e Infrarrojo Cercano tipo 2 cuyo objetivo principal es la observación precisa de la cobertura de la tierra.
- PALSAR es un Radar polarimétrico de Apertura Sintética de banda L, que tiene orientada su antena de acuerdo a una dirección de mirada hacia la derecha.

Poseía una órbita heliosincrónica a 691.65 kilómetros de altura y 98.16 grados de inclinación, con un período de aproximadamente 100 minutos (14 revoluciones orbitales por día), con tiempo de revisita de 46 días (JAXA, 2012).

3.1.2.2.1 Objetivos de la misión.

Según JAXA (2008), ALOS se diseño con los siguientes objetivos:

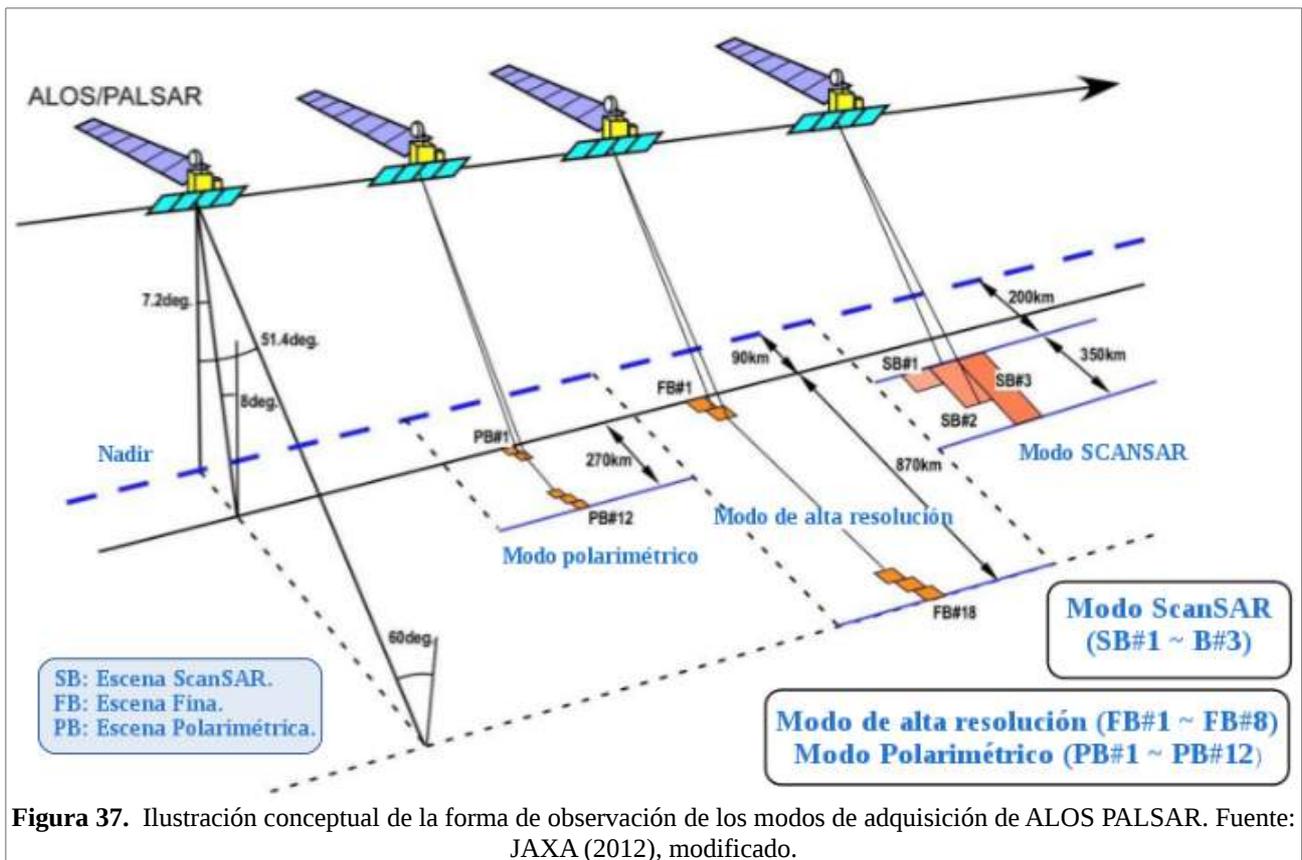
- La producción y la renovación de los mapas topográficos a escala global (infraestructura de datos espaciales).
- El apoyo al desarrollo sostenible en varias partes del mundo a través de observaciones regionales.
- Monitoreo de desastres a gran escala en todo el mundo.
- Topografía de los recursos naturales en todo el mundo.
- Desarrollo de las tecnologías necesarias para futuras observaciones de la Tierra.

3.1.2.2.2 ALOS PALSAR.

Según Rosenqvist *et al.* (2004), el sensor PALSAR es una versión mejorada del radar de apertura sintética JERS-1 (banda L; polarización-HH). No solo proporcionaría el rendimiento de un sensor avanzado, incluyendo polarización completa y modo ScanSAR, sino también contaba con un concepto totalmente nuevo de adquisición, obteniendo consistencia espacial y temporal de la cobertura mundial en una forma repetitiva.

3.1.2.2.2.1 Modos de adquisición en ALOS PALSAR.

ALOS PALSAR era un instrumento de polarización completa, que operaba en tres modos de adquisición: modo de alta resolución (con polarización simple y con polarización dual), modo de polarización completa y modo ScanSAR de barrido ancho (Rosenqvist *et al.*, 2004). En la figura 37, se muestra de manera conceptual los modos de adquisición de ALOS PALSAR.



3.1.2.2.2 Características de ALOS PALSAR.

En la tabla 9, se indican las principales características de las imágenes ALOS PALSAR.

Tabla 9. Principales características de las imágenes ALOS PALSAR. Fuente: JAXA (2008), JAXA (2011).

Modo de observación.		Alta resolución.		ScanSAR	Polarimétrico
Frecuencia.		Banda L (longitud de onda 23.6 cm). Centro de Frecuencia: 1270MHz			
Polarización.		HH or VV	HH+HV o VV+VH	HH o VV	HH+HV+ VV+VH
Ángulo de incidencia.		8 – 60 grados.	8 – 60 grados.	18 – 36 grados. (3 escaneos) 18 – 40 grados. (4 escaneos) 18 – 43 grados. (5 escaneos)	8 – 30 grados.
Resolución.	Rango.	7 a 44 m	14 a 88 m	100 m (8 looks)	24 a 89 m
	Acimut.	10 m (2 miradas) 20 m (4 miradas)	10 m (2 miradas) 20 m (4 miradas)	100 m (8 looks)	10 m (2 miradas) 20 m (4 miradas)
Ancho de barrido.		40 a 70 km	40 a 70 km	250 km (3 escaneos) 300 km (4 escaneos) 350 km (5 escaneos)	20 a 65 km

3.1.2.3 COSMO Skymed.

COSMO Skymed (CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation) es una constelación de pequeños satélites para la observación de la Tierra. Consiste en cuatro satélites de tamaño medio, de órbita baja, cada uno equipado con un radar de apertura sintética multi-modo de alta resolución que opera en banda X. Es la mayor inversión italiana en sistemas espaciales para la observación terrestre, encargado y financiado por la Agencia Espacial Italiana (ASI) y el Ministerio italiano de Defensa (MoD), y fue concebido tanto para uso civil como militar. El lanzamiento del primer satélite de la constelación fue el 8 de junio de 2007 (ASI 2007b).

Posee una órbita heliosincrónica a 619.6 kilómetros de altura y con 97,86 grados de inclinación, con un tiempo de revisita de 16 días para cada satélite por separado, llevando a 4 el tiempo de revisita combinado en la constelación, con capacidad de adquisición a derecha e izquierda (ASI, 2007b).

3.1.2.3.1 Objetivos de la misión.

Según ASI (2007b), los objetivos de la misión COSMO SkyMed tienen una naturaleza dual, capaz de satisfacer a los clientes civiles y de defensa, y están en condiciones de proporcionar información y servicios a un número de actividades y aplicaciones como la gestión de riesgos, la planificación y aplicaciones de cartografía, agricultura, bosques, hidrología, geología, dominio marino, arqueología, etc.

El conjunto de aplicaciones impone los siguientes requisitos:

- Gran cantidad de imágenes adquiridas a diario.

- Accesibilidad de los satélites en todo el mundo.
- Capacidades de adquisición todo el tiempo, de día y de noche.
- Rápido tiempo de respuesta al usuario.
- Muy alta calidad de la imagen (por ejemplo, la resolución espacial y radiométrica).
- Capacidad para ser cooperante, interoperable y ampliable a otras misiones de observación de la Tierra.
- Posee elementos multimisión transmitidas por la prestación de servicios integrados a grandes comunidades de usuarios en todo el mundo.

3.1.2.3.2 Modos de adquisición de COSMO SkyMed.

COSMO SkyMed es un instrumento de polarización dual, que opera en tres modos de adquisición (ASI, 2007b).

- Modo Spotlight: Son las imágenes de mayor resolución geométrica (ASI, 2007b).
- Modos Stripmap: Posee dos sub modos de operación: sub modo Himage que trabaja en polarización simple y sub modo Pingpong que trabaja en polarización dual (ASI, 2007a).
- Modos ScanSAR: Trabaja con resoluciones geométricas medianas a gruesas, las cuales cubren un amplia área. Tiene dos sub modos de operación, el Wide Region y el Huge Region, que poseen polarización simple (ASI, 2007a).

En la figura 38, se indica los Modos de Adquisición de las imágenes COSMO SkyMed.

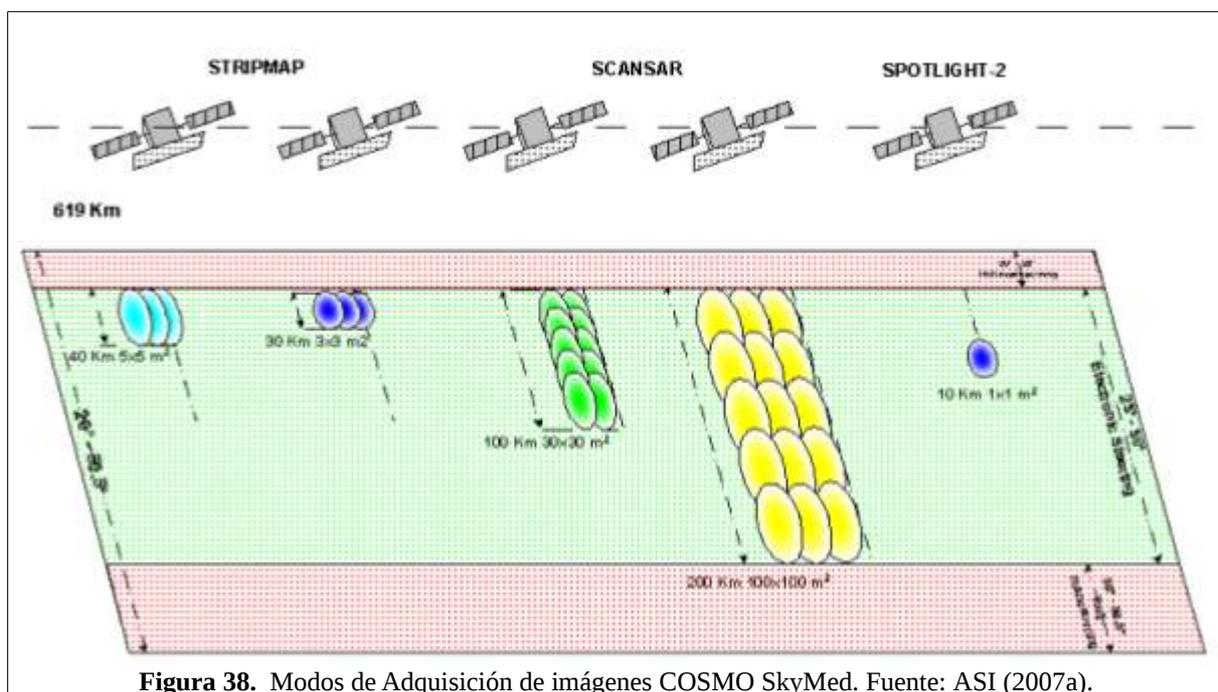


Figura 38. Modos de Adquisición de imágenes COSMO SkyMed. Fuente: ASI (2007a).

3.1.2.3.3 Características de COSMO SkyMed.

En la tabla 10, se indica de manera resumida las características de los modos de adquisición para imágenes COSMO SkyMed.

Tabla 10. Características de los modos de medición de SAR, adquisición para imágenes COSMO SkyMed. Fuente: ASI (2007a), ASI & TELESPIAZIO COMPANY (2016).

Modos	Spotlight	Stripmap		ScanSAR	
Sub modos		Himage	Pingpong	Wide Region	Huge Region
Tamaño de la escena [km x km]	10 × 10	40 × 40	30 × 30	100 × 100	200 × 200
Ángulo de incidencia. [grados]	~20° a ~60°	~20° a ~60°	~20° a ~60°	~20° a ~60°	~20° a ~60°
Polarización.	Simple HH o VV	Simple HH o HV o VH o VV	Dual HH,VV o HH,HV o VV,VH	Simple HH o HV o VH o VV	Simple HH o HV o VH o VV
Resolución espacial (m).	1 m	3 m	15 m	30 m	100 m
Tamaño del píxel (m).	0.5 m	2.5 m	10 m	15 m	50 m

3.1.3 Sistemas de Microondas Pasivas

3.1.3.1 AMSRE y AMSR2

El sensor AMSRE (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS), fue lanzado el 2 de mayo del 2002 y funcionó hasta el 4 de octubre de 2011. Fue construido por la agencia espacial Japonesa en cooperación con la NASA. Estaba a bordo del satélite Aqua. Era un radiómetro de microondas que funcionaba en seis bandas de frecuencia (NSIDC, 2016).

El sensor AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) fue lanzado el 18 de mayo del 2012 y es la continuación del sensor AMSRE. Fue construido por la agencia espacial Japonesa. Está a bordo del satélite GCOM-W1. Es un radiómetro de microondas que funciona en siete bandas de frecuencia (JAXA, 2013).

3.1.3.1.1 Objetivos de las misiones.

AMSRE y AMSR2 tienen los siguientes objetivos (Long, 2009; JAXA, 2006).

- Proveer mediciones de la cobertura terrestre y océanos.
- Proporcionar parámetros atmosféricos para la investigación global del agua y ciclos de energía.

3.1.3.1.2 Características de AMSRE y AMSR2.

Los sensores AMSRE y AMSR2 comparten las siguientes características: a) son radiómetros en microondas, b) miden temperatura de brillo (T_b), c) poseen cobertura global, d) poseen un ancho de barrido de 1450 km, e) presentan una órbita heliosincrónica, f) presentan un escaneo cónico a 55° para garantizar la comparabilidad de las mediciones, g) su período de revisita es de 16 días, h) el formato de entrega de sus productos es en HDF¹³.

Como productos que pueden derivarse de los datos adquiridos por estos sensores se indican los

¹³ HDF: Formato de datos jerárquicos, que es compatible con el estándar de la NASA HDF-EOS (JAXA, 2013).

siguientes:

- velocidad del viento superficial del mar, temperatura superficial del mar.
- Integración del agua líquida en las nubes.
- Precipitación.
- Concentración de hielo en el mar.
- Vapor de agua.
- Espesor de la nieve.
- Humedad del suelo.

En la tabla 11 se enumeran las diferencias entre AMSRE y AMSR2.

Tabla 11. Diferencias en las características de AMSRE y AMSR2. **Fuentes:** Long, (2009); Wentz *et al.* (2014a); Wentz *et al.* (2014b).

Características.	AMSRE.			AMSR2.		
Satélite portador	Aqua			GCOM-W1		
Tiempo de la misión.	2 de mayo del 2002 - 4 de diciembre 2011.			18 de mayo del 2012 - presente		
Altitud.	705 km.			700 km.		
Nombre de la banda.	Banda [GHz]	Polarizaciones	Resolución espacial. [km x km]	Banda [GHz]	Polarizaciones	Resolución espacial. [km x km]
C*	6.93	h,v	75 x 43	6.93	h,v	62 x 35
C	----	----	----	7.3	h,v	62 x 35
X*	10.65	h,v	51 x 29	10.65	h,v	42 x 24
Ku*	18.7	h,v	27 x 16	18.7	h,v	22 x 14
K	23.8	v	32 x 18	23.8	h,v	19 x 11
Ka*	36.5	h,v	14 x 8	36.5	h,v	12 x 7
W	89.0	h,v	6 x 4	89.0	h,v	5 x 3
*: Bandas utilizadas en la tesis.						

3.1.3.2 SMOS.

La misión SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity), desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) en cooperación con las agencias espaciales de Francia (CNES) y España (CDTI), fue lanzado en 2009. Mide la radiación de microondas emitida por la superficie de la Tierra en banda L (1,4 Ghz, 21 cm), utilizando un radiómetro interferométrico de 2 dimensiones (CEC-OS, 2016). Tiene polarizaciones *h* y *v*, mide Temperatura de brillo, tiene una cobertura global, posee un ancho de barrido de 1500 km, la forma del área de toma es de tipo elíptico, su tipo de órbita es sincrónica son el sol, a una altitud de 763 km y posee una resolución espacial de 35 km, con un período de revisita de 3 días (CEC-OS, 2016 y Long, 2009).

SMOS realiza observaciones globales de la humedad del suelo y de la salinidad de la superficie de

los océanos (Font *et al.*, 2000; Kerr *et al.*, 2001). La humedad y la salinidad disminuyen la emisividad del suelo y el agua de mar respectivamente, y por lo tanto afectan a la radiación de microondas emitida por la superficie de la Tierra (CEC-OS, 2016). Las observaciones que se realizan en banda L, se ven menos afectadas por la cubierta vegetal, la meteorología y la atmósfera que otras frecuencias (ESA, 2009a). Con dichos datos se profundiza en el conocimiento del ciclo del agua y, en particular, de los procesos de intercambio entre la superficie de la Tierra y la atmósfera.

3.1.3.2.1 Objetivos de la misión.

SMOS tienen los siguientes objetivos (CEC-OS, 2016; Long, 2009).

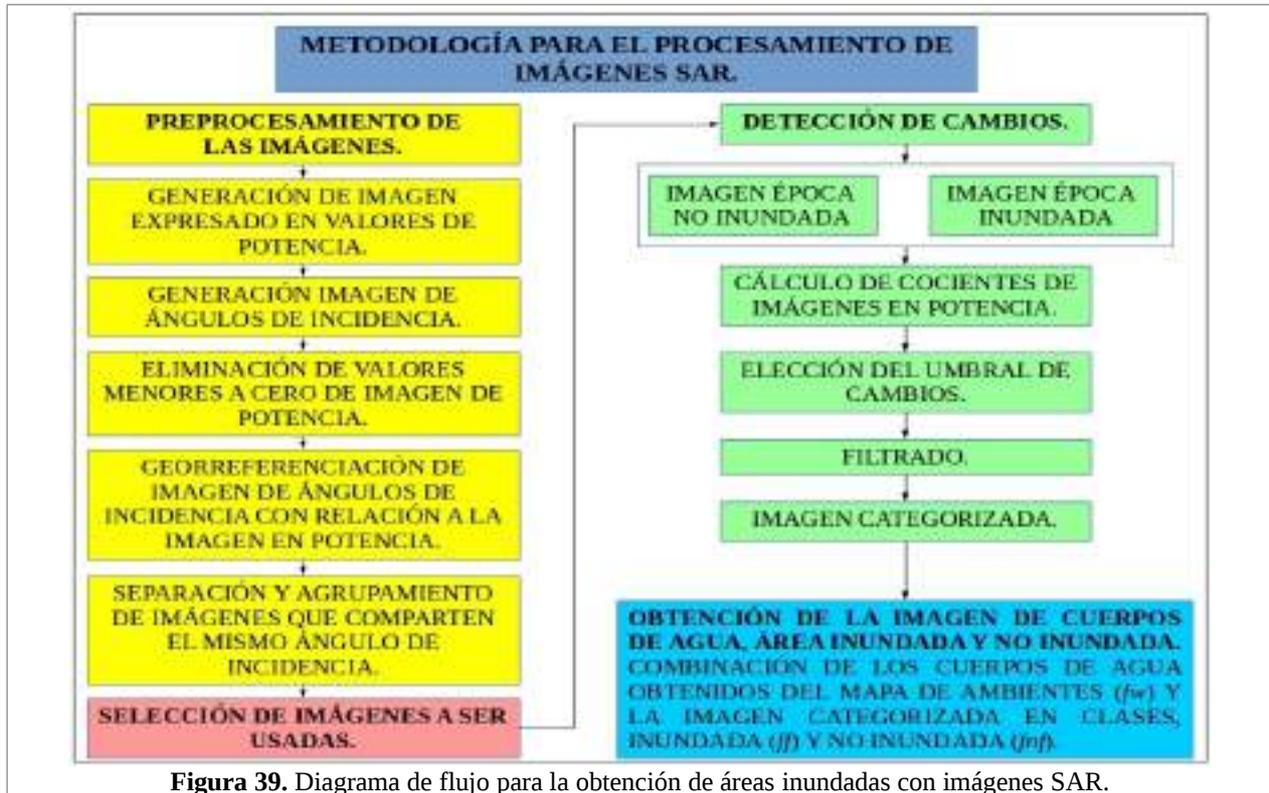
- Mejorar los modelos meteorológicos y climatológicos.
- Medir humedad del suelo y salinidad en los océanos.
- Aplicación práctica en agricultura y la administración de los recursos hídricos.

3.1.3.2.2 SMOS MIRAS

El radiómetro MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), es el único instrumento llevado a bordo de SMOS (ESA, 2009b). Puede operar en dos modos de medición: de doble polarización o polarimétrico. En el modo de doble polarización, la antena permite medir alternadamente las componentes horizontales y verticales de las microondas que se reciben. Por otra parte, se ha implementado el modo polarimétrico para adquirir ambas polarizaciones a la vez. Lo positivo de ese modo mejorado es que proporciona ventajas científicas añadidas, sin embargo, se dobla la cantidad de datos que se deben transmitir a tierra (ESA, 2009a).

3.2 Metodología aplicada en el procesamiento de imágenes de Microondas Activas.

Para la obtención de mapas de área inundada a partir de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR), se siguió y aplicó la metodología indicada en la figura 39. Primeramente se realizó un preprocesamiento de las imágenes este paso es importante para calibrar las imágenes SAR para poder darles un sentido físico a los datos, adicionalmente se generó las imágenes de ángulos de incidencia para poder conocer que imágenes son comparables entre sí y para agrupar y separar las imágenes como se indica en la figura en los rectángulos de color amarillo; luego se hizo una selección de las imágenes que fueron utilizadas en la tesis como se indica en la figura en el rectángulo de color rosado; una vez seleccionadas las imágenes se realizó la detección de cambios aplicando los pasos que se indican en los rectángulos de color verde; para finalmente obtener la imágenes de cuerpos de agua, área inundada y no inundada como se indica en la figura en el rectángulo de color celeste. Las secuencias de los pasos se puede saber siguiendo las flechas que unen cada uno de los procesos indicados dentro de los rectángulos del flujograma.

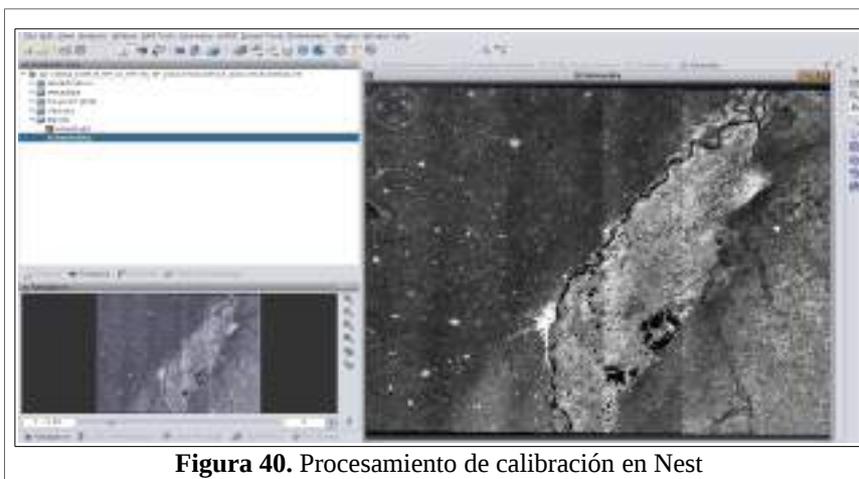


3.2.1 Preprocesamiento con imágenes SAR.

Se procede a realizar el procesamiento de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO SkyMed. Para esto, se utilizaron los programas Envi 4.7, Nest 4C (perteneciente a la ESA disponible en <https://earth.esa.int/web/nest/downloads>) y ERDAS 9.2.

3.2.1.1 Calibración de imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed.

La calibración de imágenes radar en Nest, es el proceso por el cual se convierten los niveles digitales (ND) de las imágenes en valores de coeficiente de retrodispersión (σ^0), que poseen sentido físico (ver tabla 3). Se procedió a ir a Nest 4C y a continuación se seleccionó *File* → *Product Reader* → *Open* (ALOS PALSAR o COSMO SkyMed), buscar la imagen e importar. A continuación se abre la imagen (ver figura 40).



Luego, para generar el coeficiente de retrodispersión en valores de potencia (σ^0), ir a *SAR Tools* → *Radiometric correction* → *Calibrate/*.

En la Figura 41 se indica los pasos para generar la imagen calibrada en valores de potencia.

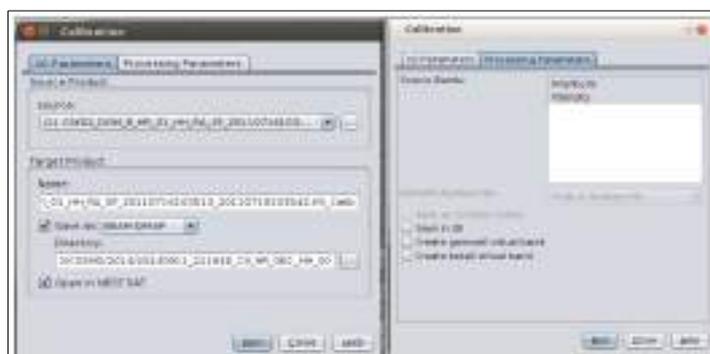


Figura 41. Izq: Pestaña I/O Parameter en SarTools Radiometric Correction Calibration y Der: Pestaña Processing Parameters.

En la pestaña *I/O Parameters*:

En *Source Product*: Se selecciona la imagen a calibrar

En *Target Product*: Se nombra la imagen de salida.

En *Save as*: Se seleccionan diferentes formatos de salida, para este caso se trabajó en el formato nativo de Nest (BEAM-DIMAP).

En *Directory*: Se indica el directorio donde se guardará la imagen calibrada.

En la pestaña *Processing Parameters*:

Se selecciona la imagen Intensity, que es la imagen que tiene sus niveles digitales en valores de potencia. A continuación se ejecuta la calibración con el botón *Run*.

3.2.1.2 Generación de imágenes de ángulos de incidencia para las imágenes COSMO Skymed.

Dado que la detección de cambios se hará píxel a píxel, es necesario asegurarse que los datos a comparar hayan sido adquiridos con el mismo ángulo de incidencia ya que el coeficiente de retrodispersión varía en función de dicho ángulo. Para esto, es necesario comparar las imágenes de ángulos de incidencia que se generan a partir de los datos presentes en el archivo correspondiente a las imágenes COSMO. Los ángulos de incidencia (definidos en 2.4.1.4) sirven para conocer que imágenes adquiridas pueden ser comparables entre sí para analizar la detección de cambios. Este proceso se realizó sólo para las imágenes COSMO Skymed obtenidas para el proyecto (ver tabla 14). En el caso de las imágenes ALOS PALSAR obtenidas (ver tabla 13), no fue necesario debido a que todas poseen el mismo rango de ángulos de incidencia en toda el área de estudio por lo que son comparable entre sí. Para esto Ir a: *Utilities* → *Band Maths/*.

En la figura 42, se indica los pasos para generar la imagen de ángulos de incidencia a partir de los Tie point grids (grilla de puntos de referencia).

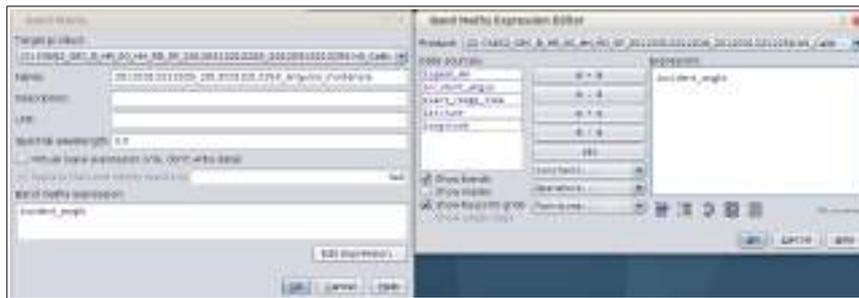


Figura 42. Izq: Band Math y Der: En pestaña Edit Expression donde se ingresa para generar imagen del ángulo de incidencia.

En el recuadro *Band Maths*:

En *Target Product*: Se pone la imagen de salida calibrada del paso 3.2.1.1.

En *Name*: Se pone un nombre de salida.

En la opción *Virtual (save expression only, don't write data)*: No seleccionar.

En *Band Math Expression*: Poner un nombre, por ejemplo *incident_angle*

Seleccionar la pestaña *Edit Expression*:

Activar las opciones *Show bands* y *Show tie-points grid*.

En la ventana *Data Source* aparece *incident_angle*. Seleccionar *incident_angle* y aparecerá en la ventana *Expression*. Seleccionar y pulsar *OK* y luego en el recuadro *Band Maths* poner *OK*. A continuación se ejecuta la calibración con el botón *Run*.

Finalmente para trabajar en otros programas como por ejemplo ENVI, se debe exportar la imagen. Para esto ir a *File* → *Export Raster Data* → Escoger un formato de salida, por ejemplo GeoTIFF.

3.2.1.3 Reproyección de imágenes.

Las imágenes calibradas ALOS PALSAR y COSMO Skymed (ver sección 3.2.1.1) requieren ser reproyectadas de la proyección Universal Transversal de Mercator, zona 20 sur al sistema de referencia Gauss Kruger, proyección Posgar 94, zona 5. Este proceso se realizó para que todas las imágenes tengan la misma ubicación espacial y así poder tener consistencia espacial para todos los análisis. Para esto se procedió ir a Envi y abrir la imagen calibrada. Ir a: *Map* → *Convert Map Projection*/ Buscar la imagen.

En la figura 43 se indica el módulo *Convert Map Projection Parameters* con los parámetros ingresados.



Figura 43. Módulo en Envi para reproyección de imágenes.

En la pestaña *change Proj*: Se selecciona la proyección Argentina (POSGAR 94) – zona 5, Datum WGS 84.

En *X Pixel Size* y *Y Pixel Size*: Poner 50 metros en el caso de imágenes COSMO y 100 en el caso de las imágenes ALOS, manteniendo el tamaño de píxel con el que son producidas las imágenes.

En *Method*: Seleccionar Rigorous. Este método calcula para cada píxel la reproyección de sus coordenadas.

En *Resampling*: Cubic Convolution. Este es el método óptimo para los datos SAR.

En *Output Result*: File.

En *Enter Output Filename*: Guardar en un directorio.

3.2.1.4 Obtención de estadísticas de la imagen calibrada.

El método de convolución cúbica consiste en un promedio pesado por distancia de aquellos píxeles en una ventana de 16 x 16 píxeles. Esto genera la aparición de algunos “artifacts” o píxeles con valores sin sentido físico, como σ^0 menores a 0. Para eliminar estos valores espurios es necesario reemplazarlos por valores mayores a cero, pero sin inventar un dato que no se conoce. Para esto se elige un valor cercano o menor al nivel de ruido del instrumento. En este caso se eligió el valor 0,00001 (-50 dB).

Una vez reproyectada la imagen (ver sección 3.2.1.3), se obtiene estadísticas de la misma, para verificar que no posea valores menores a cero. Primeramente desplegar la imagen, para esto ir a *File* → *Open Image File* → buscar el directorio y seleccionar la imagen reproyectada (ver sección 3.2.1.3). A continuación aparece la ventana *Available Bands List*, seleccionar la imagen y hacer clic en *Load Band*. Una vez desplegada la imagen, hacer clic derecho sobre la imagen reproyectada y seleccionar *Quick stats* (ver figura 44).

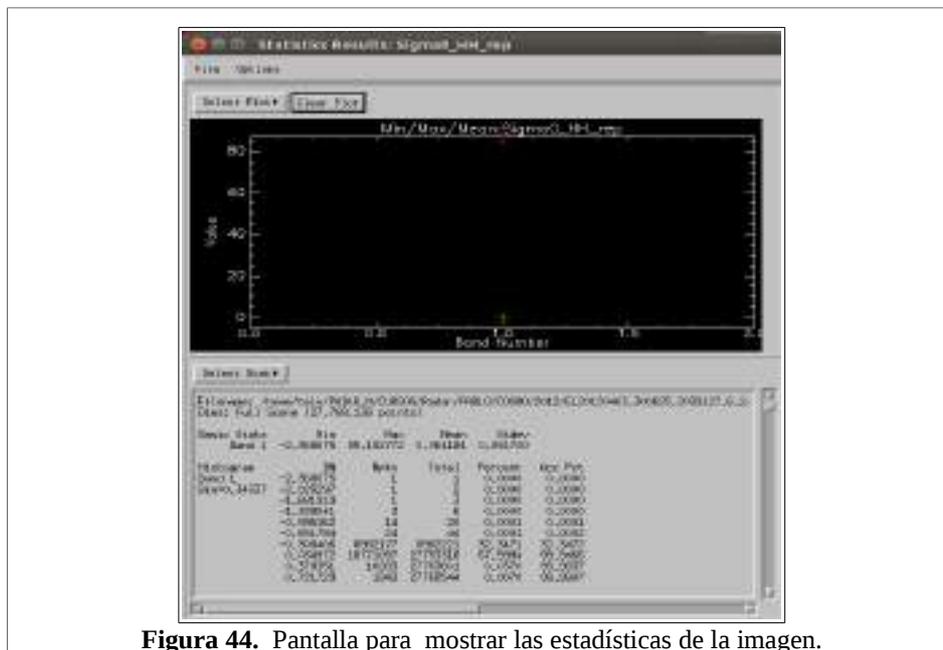


Figura 44. Pantalla para mostrar las estadísticas de la imagen.

Ahora para reemplazar los píxeles con valores de potencia menor a cero por un valor muy pequeño pero mayor a cero, correspondiente al valor de σ^0 equivalente al ruido instrumental, se utiliza la ecuación 67.

Ecuación 67. Fórmula para quitar valores menores que cero en la imagen de potencia.

(67)

$$(banda\ 1 < 0.0) * (0.00001) + (banda\ 1 \geq 0.0) * banda\ 1$$

En ENVI, ir a *Basic Tools* → *Band Math*. En la figura 45, se indica el módulo *Band Math* (matemática de bandas), en donde se ingresa la ecuación 67.



Figura 45. Matemática de Bandas en ENVI.

En el recuadro *Enter an expression:* Ingresar la ecuación 67 de la siguiente manera $(b1\ lt\ 0.0) * (0.00001) + (b1\ ge\ 0.0) * b1$. Hacer clic en *Add to List* y a continuación ir a *save* y guardar la imagen en un directorio.

3.2.1.5 Georreferenciación de la imagen de ángulos de incidencia.

Una vez generada la nueva imagen sin valores menores a cero, se procede a georreferenciar la imagen de ángulo de incidencia con la imagen generada a partir del paso anterior, esto con el fin de saber con esta información que imágenes COSMO Skymed disponibles en el proyecto son comparables entre sí para la posterior etapa de detección de cambios. En la figura 46 se puede ver como en una nueva pantalla de despliegue, se carga la imagen de ángulo incidencia.

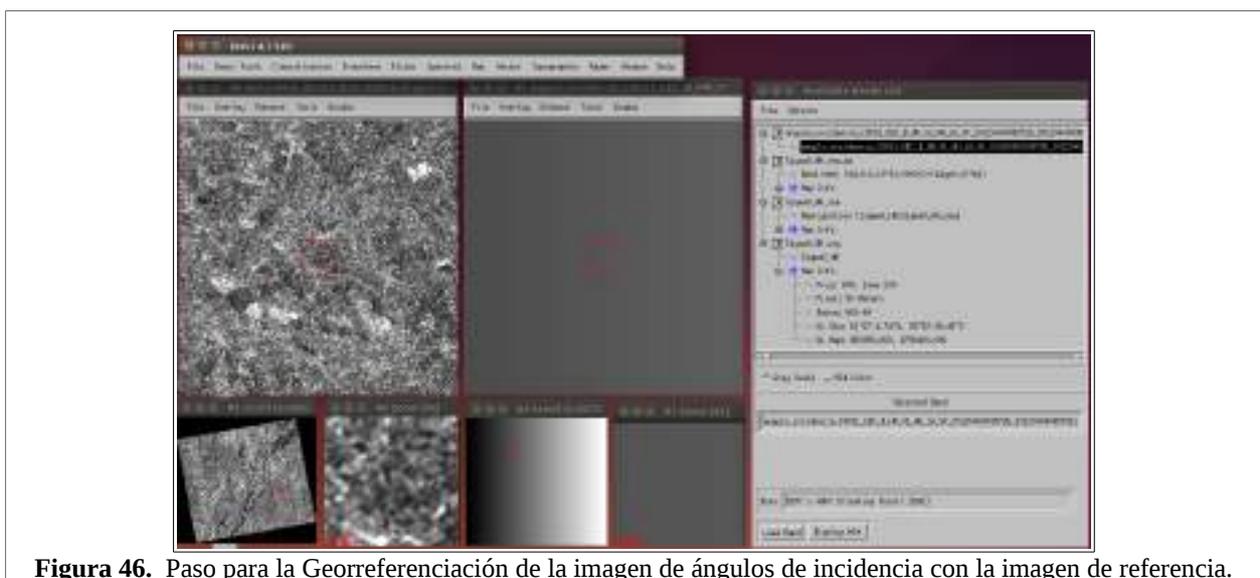


Figura 46. Paso para la Georreferenciación de la imagen de ángulos de incidencia con la imagen de referencia.

A continuación ir a *Map* → *Registration* → *Image to Image*.

Seleccionar la Imagen Base (imagen calibrada sin valores menores a cero) y la imagen a ser georreferenciada (imagen de ángulos de incidencia). En la figura 47, se indica la ventana *Image to Image Registration*.



Figura 47. Selección de la imagen de referencia con la imagen de ángulos de incidencia.

En *Base Image*: Seleccionar la imagen calibrada.

En *Warp Image*: Seleccionar la imagen de ángulos de incidencia.

Poner *OK*.

Como siguiente paso se despliega la ventana *Ground Control Points Selection* y se activa la opción para tomar los puntos de georreferenciación.

En la figura 48, se indican los módulos para realizar la georreferenciación en ENVI.

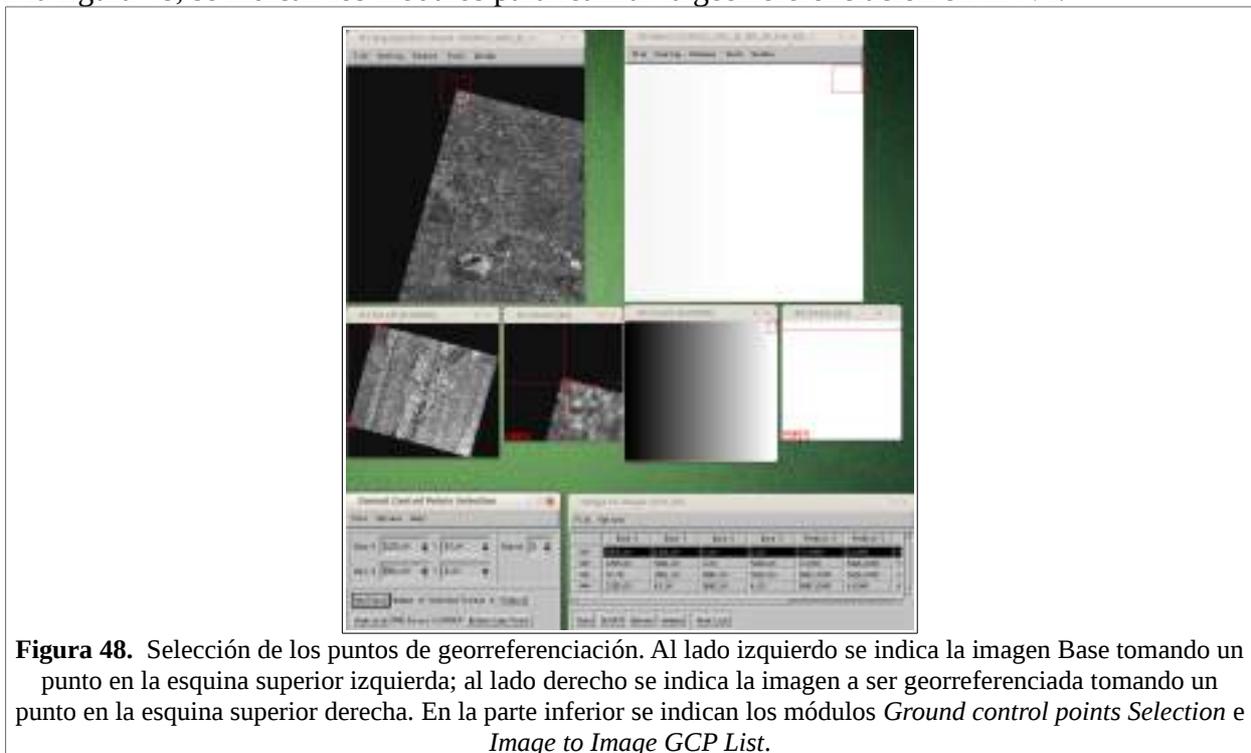


Figura 48. Selección de los puntos de georreferenciación. Al lado izquierdo se indica la imagen Base tomando un punto en la esquina superior izquierda; al lado derecho se indica la imagen a ser georreferenciada tomando un punto en la esquina superior derecha. En la parte inferior se indican los módulos *Ground control points Selection* e *Image to Image GCP List*.

En el módulo *Ground control points Selection* poner *Add Points* y, se abre el módulo *Image to Image GCP*, se deben tomar puntos para la georreferenciación en las cuatro esquinas de la imagen Base (imagen calibrada) con respecto a la imagen a ser georreferenciada (imagen de ángulos de incidencia), como se indica en la tabla 12.

La inversión de los puntos de control en sus coordenadas de píxel entre la imagen de σ^0 y la imagen de ángulo de incidencia está relacionada con la dirección de pasada con que fueron adquiridas las imágenes (descendente) y la orientación de la antena (mirada a la derecha).

Tabla 12. Ubicación de los puntos para la georreferenciación en la imagen calibrada e imagen de ángulos de incidencia.

Ubicación de punto para georreferenciación con la Imagen de Base (imagen calibrada).	Ubicación de punto para la imagen a ser georreferenciada (ángulos de incidencia).
Esquina superior derecha.	Esquina superior izquierda.
Esquina inferior derecha.	Esquina inferior izquierda.
Esquina superior izquierda.	Esquina superior derecha.
Esquina inferior izquierda.	Esquina inferior derecha.

Luego de tomados los cuatro puntos para la georreferenciación, en el módulo *Ground control points Selection*, proceder a guardar la imagen de ángulos de incidencia georreferenciada, para esto ir a *File* → *Save GCPs to ASCII*, guardar este archivo en un directorio. Luego seleccionar *Options* → *Warp displayed Band* y se desplegará el módulo *Registration Parameters* (como se puede ver en la figura 49).



Figura 49. Módulo para registro de parámetros en ENVI para georreferenciar imágenes.

En *Method*: Polynomial.

En *Degree*: 1.

Resampling: Nearest Neighbor (en este caso lo que se está corrigiendo no son datos SAR sino datos de ángulo de incidencia, por lo tanto no es necesario ni recomendable el uso un método de remuestreo que promedia valores).

Seleccionar *File* y, guardar en un directorio.

En la figura 50, se presenta un ejemplo de una imagen de ángulos de incidencia georreferenciada, con su par la imagen calibrada. En el rectángulo en rojo, se indica la misma zona en ambas imágenes.

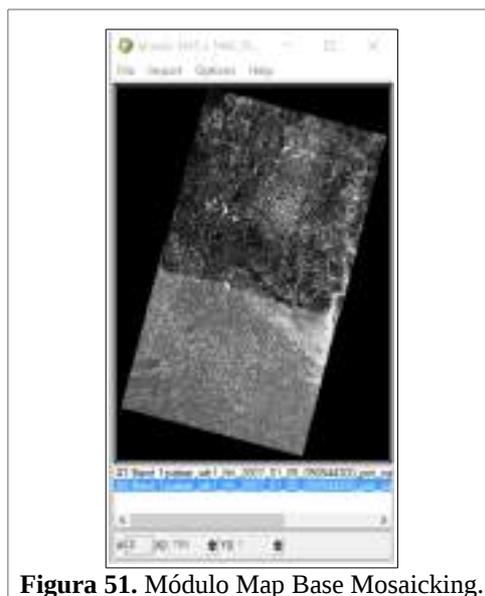


3.2.1.6 Generación de Mosaicos de imágenes ALOS PALSAR para cubrir el área de estudio.

El área de estudio de esta tesis no se encuentra observada en una sola imagen ALOS, sino que está dividida en 2 imágenes contiguas adquiridas una a continuación de la otra (2 rows del mismo path). Esto hace necesario la generación de mosaicos de ambas imágenes para obtener, para cada fecha de adquisición, una única imagen de la totalidad del área de estudio. Para esto se utilizó el programa ENVI.

Ir a ENVI → *Basic Tools* → *Mosaicking* → *Georeferenced*.

Aparece el módulo *Map Base Mosaicking* → *Import* → *Import Files* → Seleccionar las imágenes para generar el mosaico. En la figura 51 se observa el módulo *Map Base Mosaicking*.



Para quitar el fondo negro, hacer clic derecho sobre el nombre de las imágenes, aparece la opción *Edit Entry* → en *Background See Through* → *Data Value to Ignore* → poner el valor de 0.

Luego ir a *File* → *Apply*.

En *X Pixel Size* y *Y Pixel Size*: Poner 100 metros (tamaño del píxel original)

En *Resampling*: Cubic Convolution.

En *Output Result*: File.

En *Enter Output Filename*: Elegir el directorio donde se guardará la imagen resultante.

3.2.2 Imágenes ALOS PALSAR procesadas.

Para las escenas ALOS PALSAR se procesaron 8 imágenes derivadas del proceso anterior (ver sección 3.2.1.6), correspondientes a los años 2007 al 2010.

En la tabla 13, se indica el listado de imágenes ALOS PALSAR procesadas.

Tabla 13. Listado de imágenes ALOS PALSAR.

Fechas de adquisición			
05/01/2007	23/05/2007	08/07/2007	23/08/2007
23/11/2007	10/01/2009	13/10/2009	16/10/2010

3.2.3 Imágenes COSMO SkyMed procesadas.

Luego de realizado el procesamiento descrito en los enunciados anteriormente, se trabajó con 72 imágenes COSMO SkyMed, las cuales se procedió a agrupar tomando en cuenta la pasada de vuelo de las imágenes (si son de tipo ascendente o descendente) y que tengan un ángulo de incidencia cercano esto para poder hacer comparaciones adecuadas para la detección de cambios (ver 3.2.4).

En la tabla 14, se indica el listado de imágenes COSMO SkyMed procesadas según su agrupamiento de acuerdo al ángulo de incidencia.

Tabla 14. Listado de imágenes COSMO SkyMed.

Código Imagen					Agrupamiento de imágenes
CSKS4_18082014 _211138	CSKS3_16092014 _211133	CSKS1_10112014 _211125	CSKS1_12122014 _211115	CSKS2_27062014 _211153	Grupo 1
CSKS2_13072014 _211149	CSKS1_19062014 _211155				
CSKS1_08012015 _211632	CSKS2_08072014 _211708	CSKS4_13082014 _211656	CSKS2_12032012 _212259	CSKS2_22062014 _211712	Grupo 2
CSKS2_12102014 _211647	CSKS1_16072014 _211705				
CSKS2_29072014 _211103	CSKS4_02082014 _211105	CSKS1_19062014 _211113			Grupo 3
CSKS2_16012015 _211652	CSKS3_11092014 _211717	CSKS4_28072014 _211728	CSKS2_13112014 _211704	CSKS2_13042012 _212304	Grupo 4
CSKS3_25072014	CSKS3_13102014				

MATERIALES Y METODOLOGÍA.

_211723	_211708				
CSKS4_25072013 _102935	CSKS1_20122013 _102841	CSKS2_12122013 _102843	CSKS2_26112013 _102852	CSKS4_14112013 _102855	Grupo 5
CSKS1_15092013 _102918	CSKS4_10082013 _102927	CSKS2_05072013 _102943	CSKS1_30082013 _102920		
CSKS4_08102013 _103502	CSKS2_05112013 _103456				Grupo 6
CSKS1_05052012 _095738	CSKS1_03042012 _095756				Grupo 7
CSKS1_18112013 _102932	CSKS1_04122013 _102928	CSKS1_02112013 _102938	CSKS1_17102013 _102942	CSKS2_09102013 _102946	Grupo 8
CSKS4_27092013 _102953	CSKS2_07092013 _103001	CSKS1_14082013 _103005	CSKS2_21072013 _103016		
CSKS4_09072013 _103002	CSKS1_04092013 _102341	CSKS2_26072013 _102356	CSKS2_28122013 _102857	CSKS4_30112013 _102908	Grupo 9
CSKS2_04102013 _103527	CSKS1_28102013 _103521				Grupo 10

Donde:
CSKS: Satélite COSMO SkyMed, acompañado del número del satélite; luego la fecha dd/mm/aa; finalmente el tiempo de toma de la escena en hh/mm/ss.

En la figura 52, se observa el área de estudio como un polígono en color rojo y ejemplos de la ubicación de las imágenes de ángulos de incidencia separadas en grupos, para la selección de las imágenes que cubran de mejor manera la información para el área de estudio y que tengan imágenes que compartan ángulos de incidencia cercanos para poder realizar una adecuada detección de cambios (3.2.4).

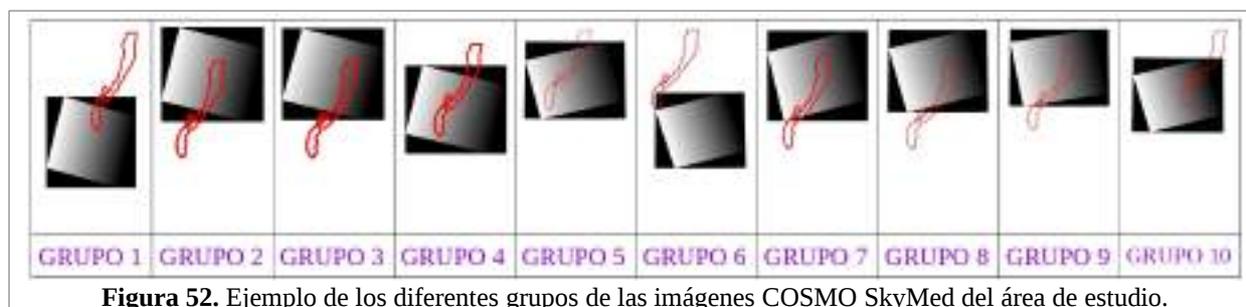


Figura 52. Ejemplo de los diferentes grupos de las imágenes COSMO SkyMed del área de estudio.

Luego de realizado el análisis se seleccionaron las imágenes correspondientes a los grupos 2 y 4. (ver tabla 14). El grupo 2 pasará a ser la zona Norte y el grupo 4 será la zona Sur. En la figura 53, se indica el área de estudio dividida en zonas Norte y Sur.

Otra alternativa metodológica para la selección de imágenes es mediante el uso de quicklooks en los que se puede comparar la cobertura de las imágenes con el área de estudio y para la selección de las imágenes se puede consultar en los metadatos la información del ángulo de incidencia.

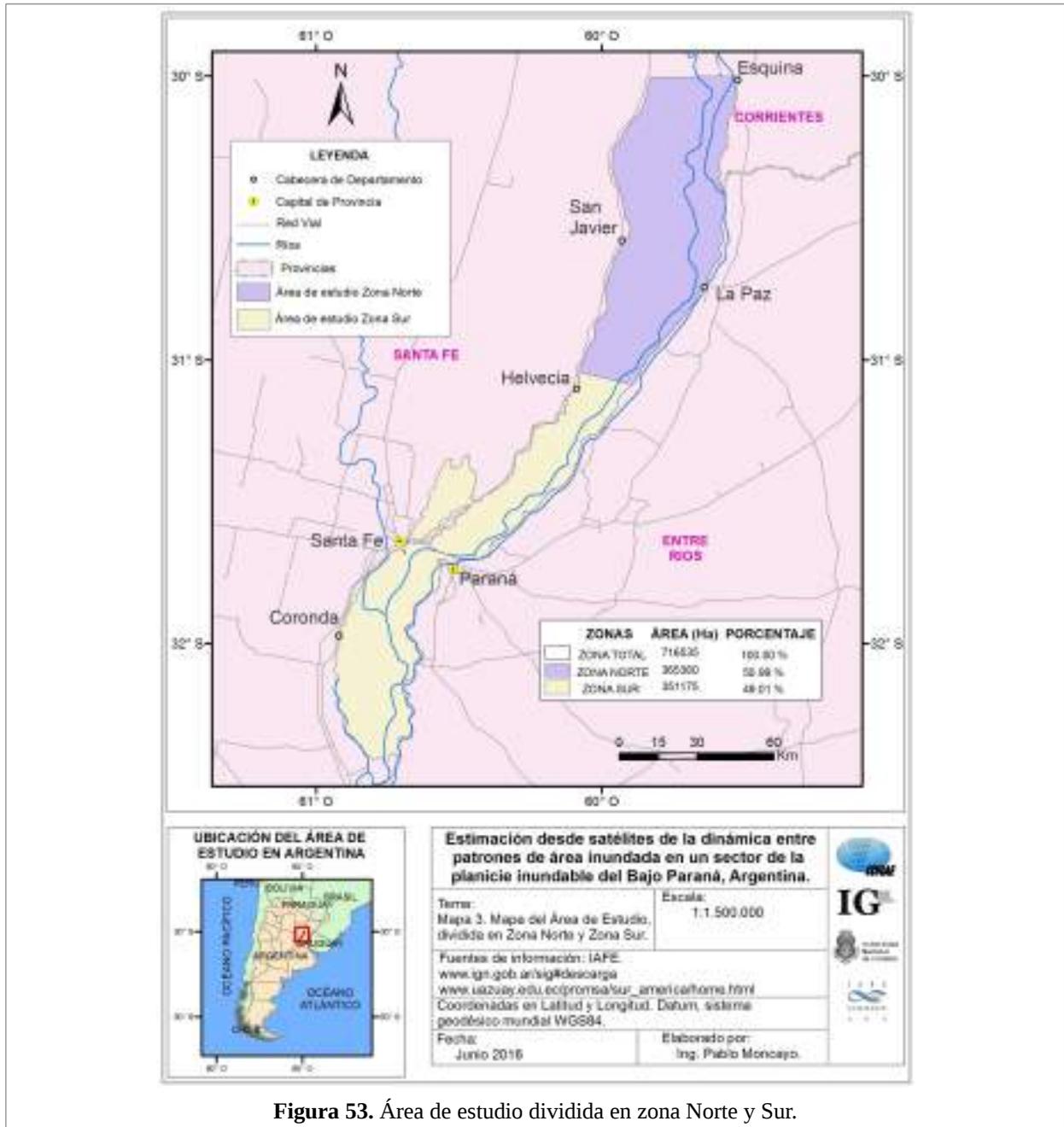


Figura 53. Área de estudio dividida en zona Norte y Sur.

3.2.4 Detección de Cambios.

Luego de realizar el agrupamiento de las imágenes explicado en la sección 3.2.3, para las imágenes COSMO Skymed, a continuación con ayuda de los datos de las estaciones meteorológicas Esquina y Santa Fe, se determinó que imágenes se utilizarían de referencia para época no inundada y cuales para inundada, tanto para imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed, para poder realizar una detección de cambios de las mismas (ver tabla 15).

Tabla 15. Listado de imágenes ALOS PALSAR y COSMO SkyMed seleccionadas para realizar la detección de cambios.

Imagen	Período	Fecha de la Imagen		Nombre Grupo.	Época de inundación.
ALOS PALSAR	Primera	05/01/2007		zona Total	No Inundada
		23/05/2007	23/08/2007		Inundada.
		08/07/2007	23/11/2007		
	Segunda	10/01/2009		zona Total	No Inundada
		13/10/2009	16/10/2010		Inundada.
	Primera	05/01/2007		zona Norte	No Inundada
		23/05/2007	23/08/2007		Inundada.
		08/07/2007	23/11/2007		
	Segunda	10/01/2009		zona Norte	No Inundada
		13/10/2009	16/10/2010		Inundada.
	Primera	05/01/2007		zona Sur	No Inundada
		23/05/2007	23/08/2007		Inundada.
08/07/2007		23/11/2007			
Segunda	10/01/2009		zona Sur	No Inundada	
	13/10/2009	16/10/2010		Inundada.	
COSMO SkyMed	Tercera	12/03/2012		zona Norte	No inundada
		22/06/2014	13/08/2014		Inundada.
		08/07/2014	12/10/2014		
		16/07/2014	08/01/2015		
	Tercera	13/04/2012		zona Sur	No inundada.
		25/07/2014	13/10/2014		Inundada.
		28/07/2014	13/11/2014		
11/09/2014		16/01/2015			

3.2.4.1 Módulo División de cocientes.

Con las imágenes seleccionadas (ver tabla 15), se procede a realizar un cociente de imágenes expresadas en potencia para poder encontrar diferencias entre la época no inundada e inundada. Utilizando el programa Erdas Image 9.2, se utilizó un modelo para generar una imagen del cociente entre dos imágenes donde la imagen de salida se encuentra en valores en Decibeles.

En la figura 54, se puede observar el modelo utilizado donde se ingresa la imagen de época no inundada, la imagen de época inundada, se realiza el cálculo del cocientes entre imágenes, aplicando la ecuación 24 y se guarda la imagen resultante.

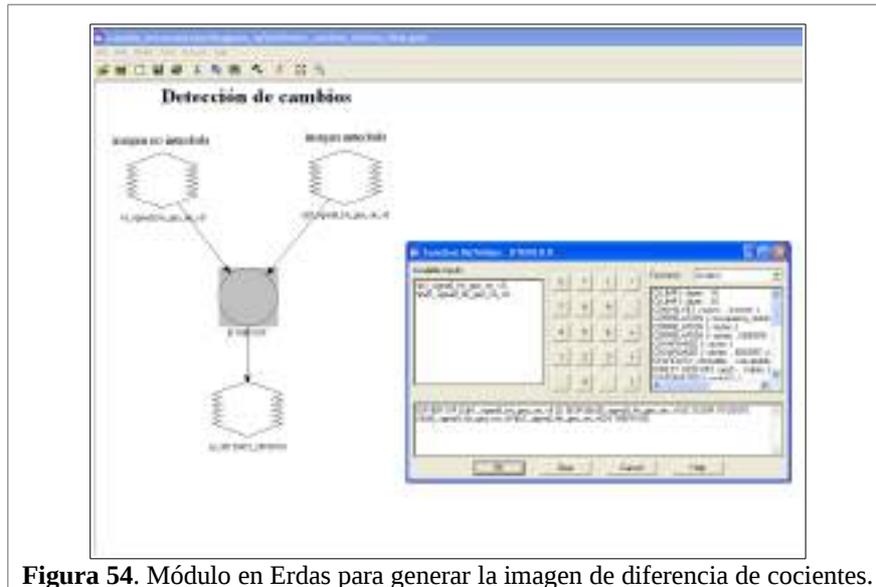


Figura 54. Módulo en Erdas para generar la imagen de diferencia de cocientes.

3.2.4.2 Elección del Umbral de Cambio.

Para poder conocer el umbral en que se considera cambio y no cambio se realizó lo siguiente:

Para las imágenes ALOS PALSAR (ver tabla 15) de modo de observación ScanSAR de amplia área, para calcular el número equivalente de looks se tomó muestras sobre áreas homogéneas y se aplicó la ecuación 19 y se obtuvo un valor de 8 ENL. A continuación se procedió a calcular el intervalo de no cambio (aplicando la ecuación para cálculo del umbral del ENL, ver ecuación 25). Se obtuvo un intervalo de no cambio de ± 2.3 a un 85.5% de confianza.

Del mismo modo para las imágenes COSMO Skymed (ver tabla 15) de modo de observación ScanSAR Huge Region, se tomó muestras sobre áreas homogéneas y se aplicó la ecuación 19 y se obtuvo un valor de 15 ENL. A continuación se procedió a calcular el intervalo de no cambio (aplicando la ecuación para cálculo del umbral del ENL, ver ecuación 25). Se obtuvo un intervalo de no cambio de ± 2.3 a un 95% de confianza.

3.2.4.3 División en intervalos de valores de las imágenes de detección de cambios.

A continuación en el programa Erdas, se procedió a desplegar las imágenes y a calcular las estadísticas de las mismas, tanto su valor mínimo, como máximo y así poder realizar una clasificación de los valores del cociente de potencia en diferentes intervalos. Los valores máximo y mínimos se pueden consultar en los mapas de inundación generados (ver ANEXO A).

3.2.4.4 Módulo de segmentación de las imágenes de cambio.

Calculados los valores mínimos y máximos, se realizó una categorización de los valores de las imágenes para las zonas Total, Norte y Sur en 14 rangos. En la figura 55, se indica el módulo de detección de cambios en Erdas 9.2.

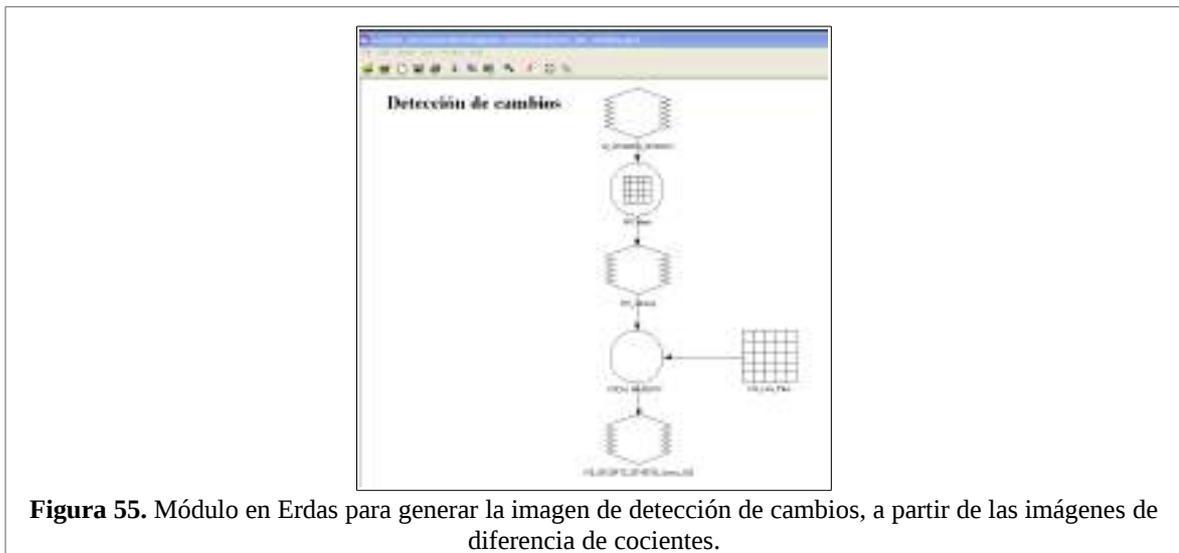


Figura 55. Módulo en Erdas para generar la imagen de detección de cambios, a partir de las imágenes de diferencia de cocientes.

En este módulo, como dato de entrada, se procede a ingresar una de las imágenes generadas en el módulo de división de cocientes. En el siguiente paso, se ingresan los rangos para clasificar la imagen y se procedió a dividir en 14 clases o rangos las imágenes. El número de división de clases fue realizado de forma empírica por parte del autor de esta tesis debido a que se realizó una extensa búsqueda bibliográfica y no se encontró bibliografía que expliquen en cuantas clases se debe hacer la división. Para la primera clase se tomó en cuenta el umbral de no cambios explicado en la sección 3.2.4.2, para las demás clases que corresponden a aumento o disminución de la señal se hizo de manera empírica.

En la figura 56, se indica como ejemplo, la clasificación en rangos realizada a la imagen 13042012_08012015 perteneciente a la zona Sur en el programa Erdas. El mismo procedimiento se realizó para el resto de imágenes.

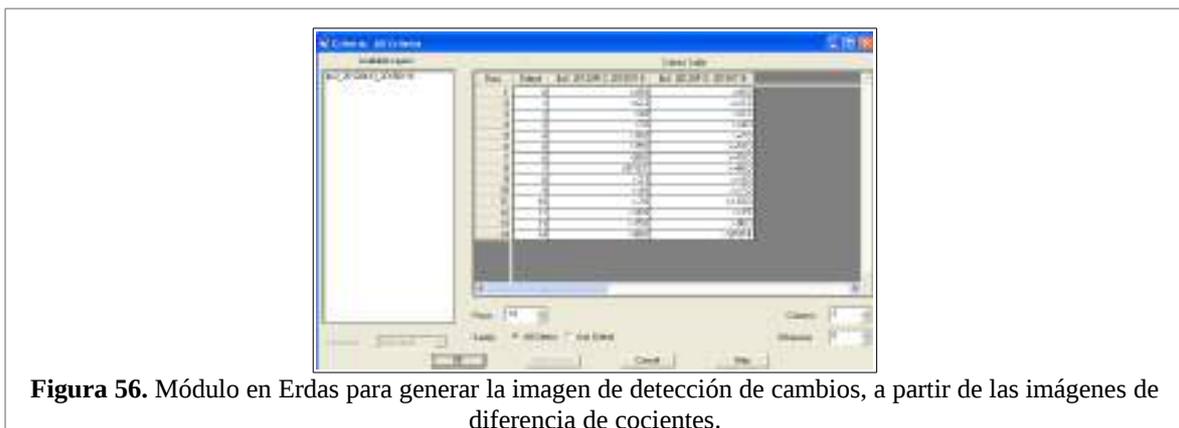


Figura 56. Módulo en Erdas para generar la imagen de detección de cambios, a partir de las imágenes de diferencia de cocientes.

A continuación, se aplicó un filtro de mayoría con una ventana de 3 x 3, para eliminar píxeles aislados y finalmente se guarda la imagen resultante. Los mapas resultantes de la detección de cambios se puede ver en el ANEXO A.

3.2.5 Determinación de cuerpos de agua, áreas inundadas y no inundadas.

Para obtener la combinación de cuerpos de agua, con áreas inundadas y no inundadas, se procede a realizar una intersección entre los cuerpos de agua, que se obtiene del Mapa de Ambiente (ver figura 2) y la imagen de detección de cambios, explicado en la sección 3.2.4.4. Para realizar la intersección, se utilizó la función Overlay en Erdas, obteniendo como resultado una imagen que cuenta con 3 clases, zonas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua. Los mapas resultantes se pueden ver en el ANEXO A.

3.3 Evaluación de la exactitud en mapas generados con imágenes SAR.

Para obtener la información con la cual se validó algunos de los mapas generados y poder hacer los cálculos de la evaluación de la exactitud (ver 2.6), se accedió a la página del Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA) a la dirección electrónica <http://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?alerta=1>, y se descargó los productos de máscara de agua los cuales tienen información desde el año 1997 hasta el 2011. Luego se hizo una comparación de las fechas de los productos generados por el INA con los mapas generados en la tesis y se determinó que solamente se pueden validar los mapas del 23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007, correspondiente al período 1 y del 13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009 correspondiente al período 2 (ver tabla 16). Para los mapas del período 3 no es posible realizar ningún tipo de validación, debido a que son mapas generados para fechas desde el 2014 y no se dispone de ninguna información. En la figura 57 se presenta un esquema de los archivos de máscara de agua generados con imágenes Landsat 5 que cubren el área de estudio.

Si bien esta evaluación es lo mejor que se pudo realizar, por no contar con datos de campo, es necesario recalcar que dado el carácter dinámico de los eventos de inundación, la diferencia entre fechas de los mapas SAR evaluados y los datos del INA implicará una subestimación de la exactitud de los mapas obtenidos en esta tesis.

A su vez, es necesario considerar las diferentes características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso (datos de microondas en esta tesis versus datos ópticos utilizados por el INA). Las ondas correspondiente a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo no son capaces de atravesar el dosel de la vegetación arbórea o herbácea densa, mientras que las microondas son capaces de atravesar la vegetación y detectar el agua debajo de ella.

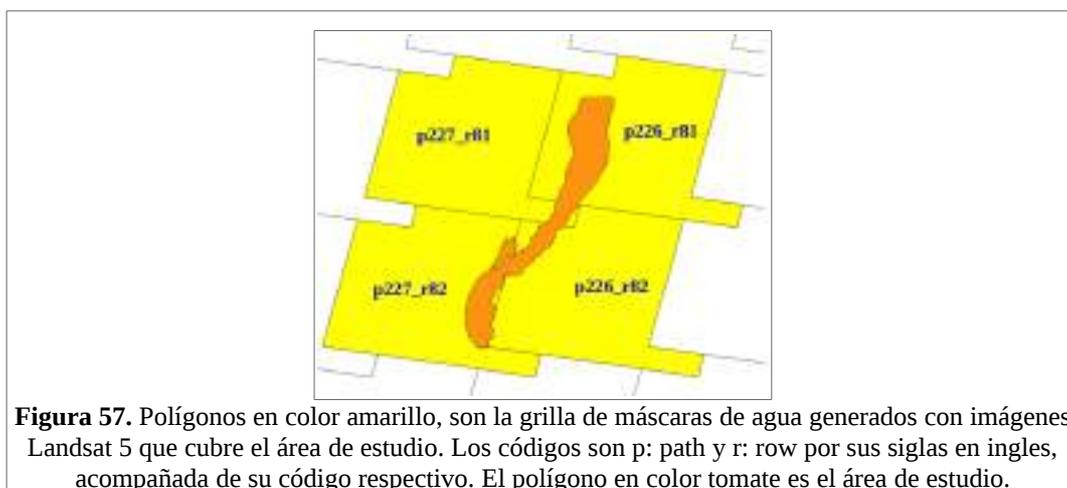


Tabla 16. Códigos de las imágenes de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua generadas en la tesis y los archivos de máscara de agua del INA con sus respectivas fechas que sirvieron para la validación.

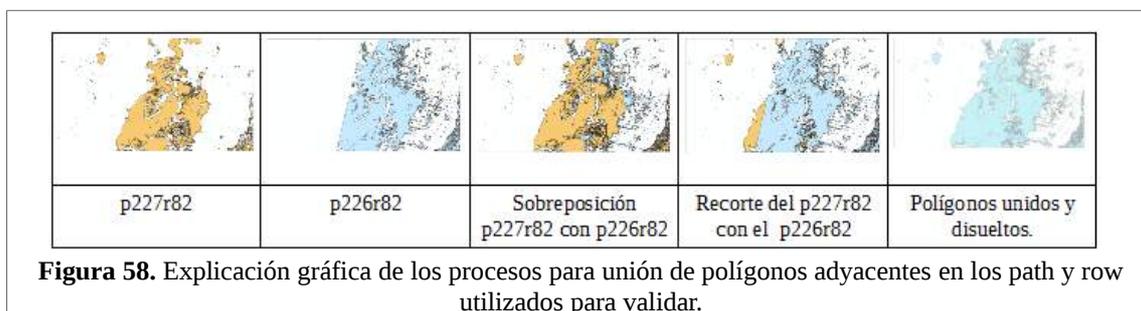
Fecha imágenes de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua	Fecha máscara de agua del INA, archivo p226r81 y p226r82	Fecha máscara de agua del INA, archivo p227r81 y p227r82
23/05/2007	27/04/2007	13/02/2007
13/10/2009	09/10/2009	01/11/2009

3.3.1 Metodología usada para la obtención de las estadísticas para el cálculo de la matriz de confusión para la evaluación de la exactitud.

Para obtener las estadísticas con las cuales se pudo calcular la matriz de confusión (ver 2.6.1), se utilizó el programa ArcGis 10.2 como sistema de información geográfico (SIG), realizando operaciones SIG a la información obtenida del INA, así como los archivos de áreas no inundadas, inundadas y cuerpos de agua generados en la tesis (ver figuras 73, 132, 156, 128, 140 y 164), se procedió hacer lo siguiente:

Paso 1, se cargo los archivos de las máscaras de agua del INA para los path y row (p226r81, p226r82 y p227r82) que cubren el área de estudio.

Paso 2, se realizó recortes de los polígonos entre path y row usando el comando *erase* (para que no haya duplicación de polígonos), luego se unió los polígonos usando el comando *merge* y después para eliminar líneas que se observan en los límites de unión de los polígonos se utilizó el comando *dissolve*. En la figura 58 se observa un ejemplo de estos procesos.



Paso 3, se cargó el límite del área de estudio. *Paso 4*, se recortó el mosaico de los tres path y row obtenido en el paso 2 con el límites del área de estudio empleando el comando *clip*, y se obtuvo una máscara de agua del INA del área de estudio. En la figura 59 se indica de forma gráfica los pasos realizados.

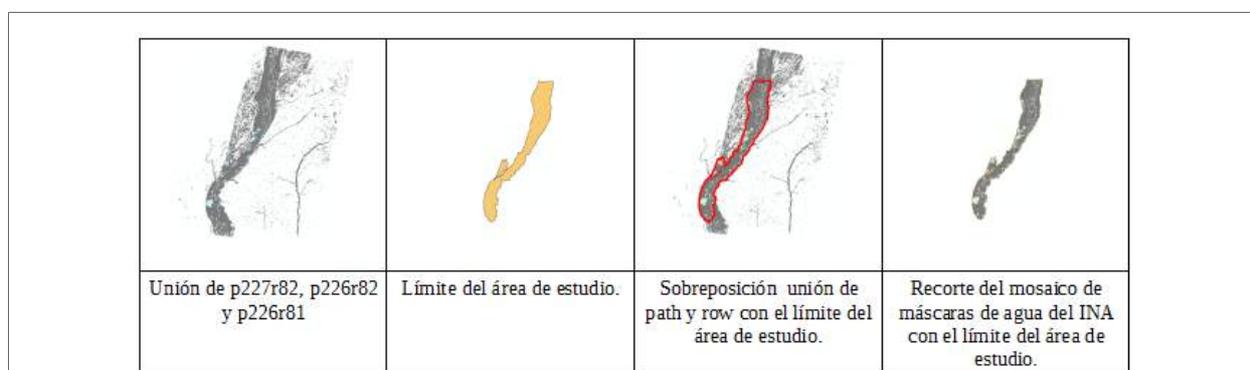


Figura 59. Explicación gráfica de los procesos para la obtención de máscara de agua del INA en el área de estudio.

Paso 5, se cargó los cuerpos de agua permanentes obtenidos el mapa de ambientes. *Paso 6*, al archivo máscara de agua del INA del área de estudio obtenida en el paso 4, se le recortó los cuerpos de agua permanente del mapa de ambiente, usando el comando *erase*, y se obtuvo una máscara de zonas inundadas sin los cuerpos de agua permanentes. En la figura 60 se indica de forma gráfica los pasos realizados.

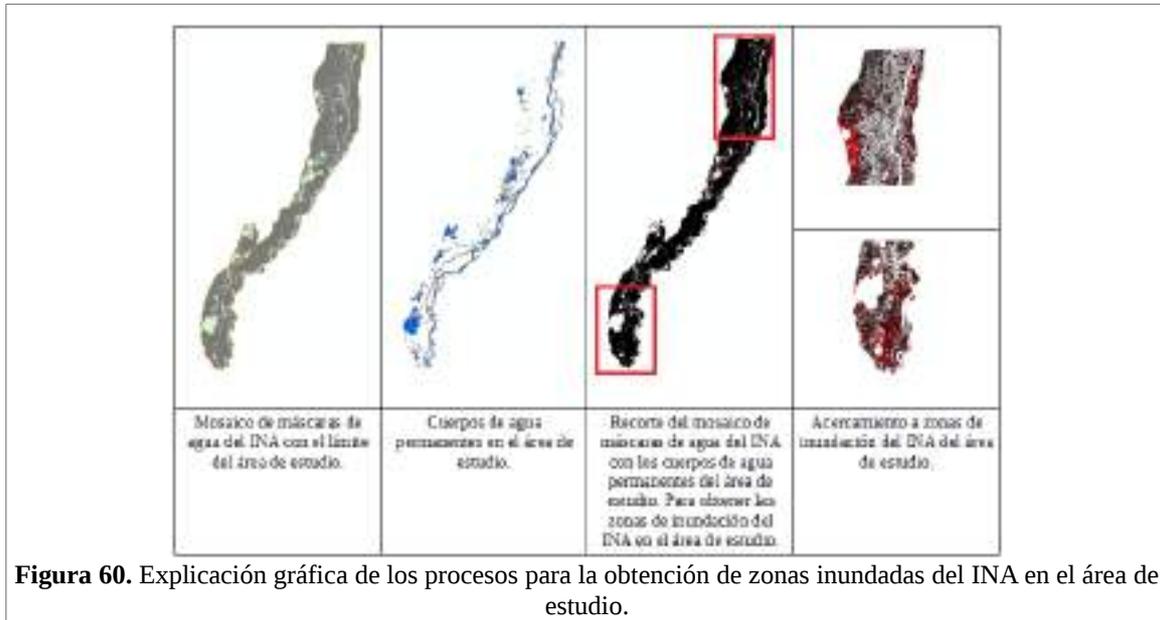


Figura 60. Explicación gráfica de los procesos para la obtención de zonas inundadas del INA en el área de estudio.

Paso 7, al límite del área de estudio se le recortó los cuerpos de agua permanentes usando el comando *erase*, y se obtuvo una máscara de posibles áreas no inundadas e inundadas del INA dentro del área de estudio. *Paso 8*, se hizo una extracción de la máscara obtenida en el paso 6 con la máscara obtenida en el paso 7 usando el comando *erase*, y se obtuvo una máscara de áreas no inundadas del INA del área de estudio. *Paso 9*, se realizó una unión de la máscara de áreas no inundadas del INA del área de estudio obtenida en el paso 8 con la máscara de áreas inundadas del INA del área de estudio obtenida en el paso 6 usando el comando *merge*, y se obtuvo una máscara de áreas no inundadas e inundadas del INA del área de estudio sin cuerpos de agua permanentes. En la figura 61 se indica el resultado después del paso 9.

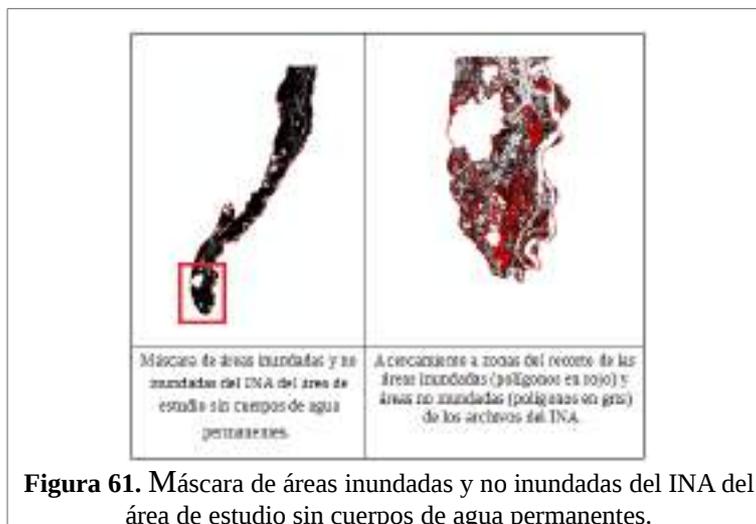


Figura 61. Máscara de áreas inundadas y no inundadas del INA del área de estudio sin cuerpos de agua permanentes.

Paso 10, se realizó una asignación a la base de datos del archivo del INA, los polígonos correspondientes a no inundados e inundados.

Paso 11 se cargó el archivo raster de áreas no inundadas, inundadas y cuerpos de agua de la tesis (por ejemplo el raster del 23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007 de la zona Total) y se convirtió el raster a polígonos usando el comando *raster to polygon*. Luego a este archivo se le retiró los polígonos de cuerpos de agua permanentes y a la base de datos del archivo se le asignó las clases correspondiente a no inundados e inundados. En la figura 62 se indica de forma gráfica los pasos realizados.

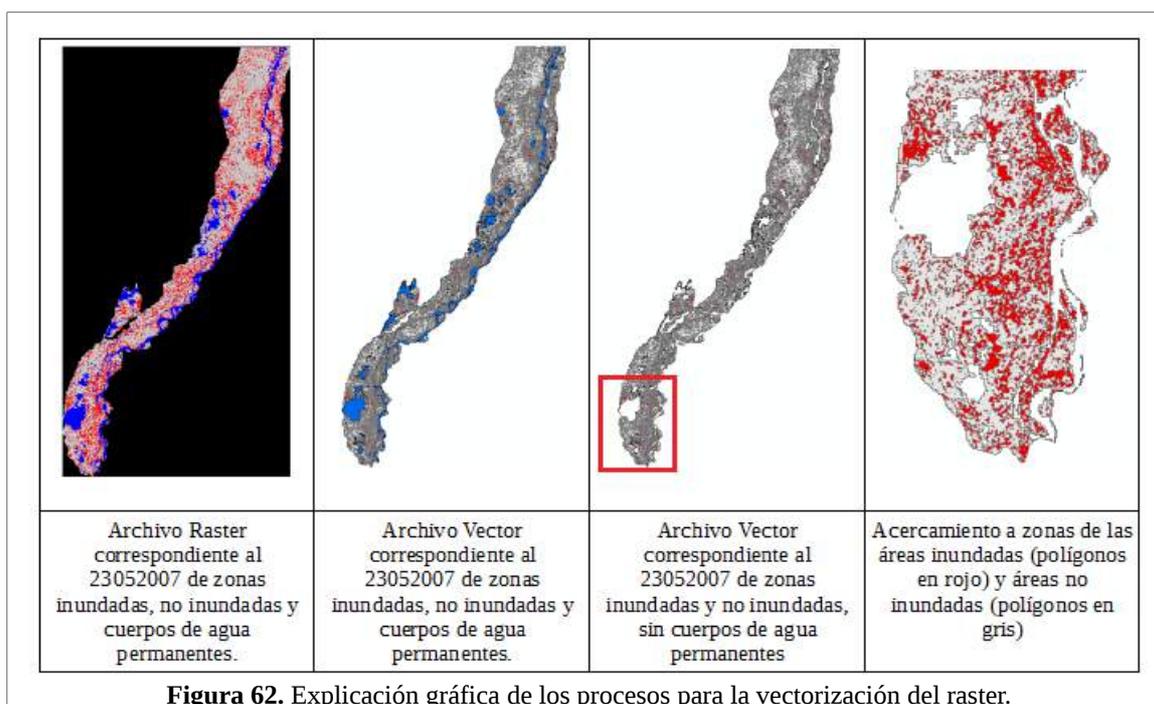


Figura 62. Explicación gráfica de los procesos para la vectorización del raster.

Paso 12, se realizó una asignación a la base de datos del archivo de la tesis (por ejemplo el vector del 23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007 de la zona Total), los polígonos correspondientes a no inundados e inundados.

Paso 13, se generó las estadísticas para calcular la matriz de confusión (ver 2.6.1), para poder comparar y validar los archivos de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua generados en la tesis con los archivos de máscaras de agua del INA; para esto se generaron 1000 puntos aleatorios sobre el archivo de áreas no inundadas e inundadas de la tesis de los archivos SAR, usando la herramienta *Hawth's Analysis tools* (disponible en la dirección electrónica: <http://www.spatial ecology.com/htools>). Para saber cuantos puntos de los 1000 se le asignan a cada área (no inundadas e inundadas), se calculó el porcentaje de recubrimiento de cada una. Tomando como ejemplo el archivo del 23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007 de la zona Total (ver figura 11), se conoce que el porcentaje de área no inundada es del 59.6%, del área inundada es del 24.4% y de los cuerpos de agua permanentes es del 16.0%; sin tomar en cuenta el porcentaje de cuerpos de agua para el cálculo de números de puntos, el nuevo porcentaje para el área no inundada es de 70.9% y para el área inundada es de 29.1% por lo que al área no inundada le correspondieron 709 puntos de los 1000 y al área inundada le correspondieron 291 puntos de los 1000. En la figura 63 se indica la herramienta *Hawth's Analysis tools*.



Figura 63. Herramienta Hawth Analysis Tools, para generar puntos aleatorios.

Para generar los puntos aleatorios sobre un polígono, se seleccionó la herramienta *Hawth's Analysis Tools* → *Sampling Tools* → *Generate Random Points*.

En *Reference layer* seleccionar *Polygon layer*; en *Generate this number of random points* poner número de puntos requeridos (para este ejercicio se puso 1000); y finalmente se guardó el resultado en la opción *Output shapefile*.

Este proceso se hizo por separado para las zonas no inundadas donde se le generó los 709 puntos y para las zonas inundadas donde se generaron 291 puntos por lo indicado anteriormente; luego se unió los puntos aleatorios en un solo archivo usando el comando *merge*.

En la figura 64 se indica un ejemplo de los puntos generados aleatoriamente sobre un sector del área de estudio.

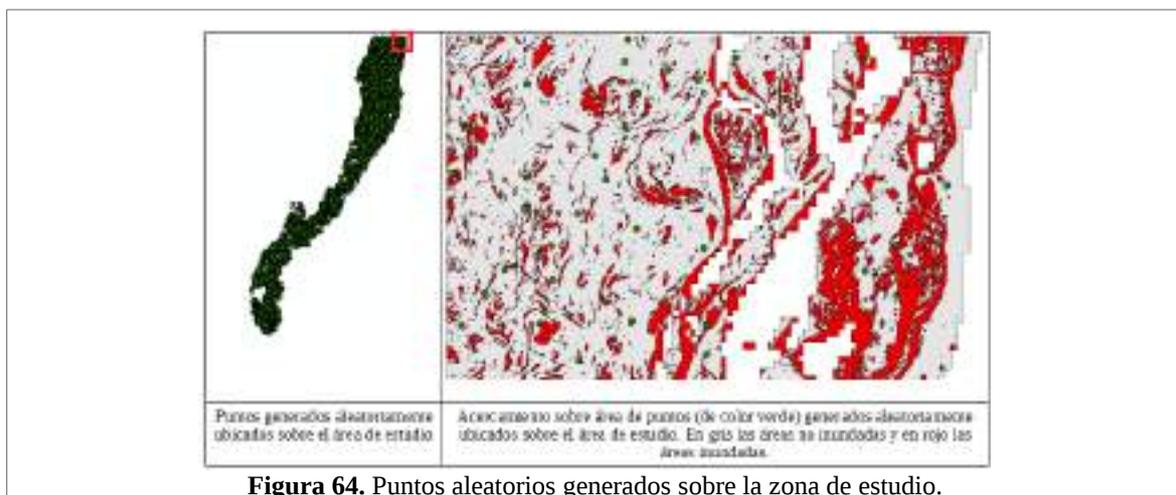


Figura 64. Puntos aleatorios generados sobre la zona de estudio.

Paso 14, a continuación con el archivo de puntos aleatorios generado en el paso 13, se realizó una unión espacial con el vector de áreas no inundadas e inundadas del INA para poder obtener las estadísticas para la matriz de confusión entre la referencia (vector no inundado e inundado de la

tesis) con el archivo de validación (vector no inundado e inundado del INA). Para esto se uso la opción *join spatial* (ver figura 65).



Figura 65. Opción unión espacial.

Haciendo clic derecho sobre el vector de puntos aleatorios se seleccionó *Join and Relates* → *Join*. Ir a *Join data from another layer based on spatial location*. Se escogió el archivo que se hizo la unión espacial y finalmente se guardó en un directorio. Con los pasos realizados (del 1 al 14) se pudo obtener un archivo de puntos que cuenta en su base de datos con la información del archivo de áreas no inundadas e inundadas de la comparación de datos SAR y con información de los datos generados por el INA.

Paso 15, finalmente para obtener las estadísticas para el cálculo de la matriz de confusión se realizó consultas dentro de la tabla de base de datos de los puntos obtenidos de la unión espacial como se indica en la tabla 17 y en la figura 66 se da un ejemplo de una consulta espacial.

Tabla 17. Combinaciones de consultas espaciales para el llenado de la matriz de confusión de áreas no inundadas e inundadas.

Archivo Tesis	Conector lógico	Archivo INA
No Inundado	y	No Inundado
No Inundado	y	Inundado
Inundado	y	No Inundado
Inundado	y	Inundado

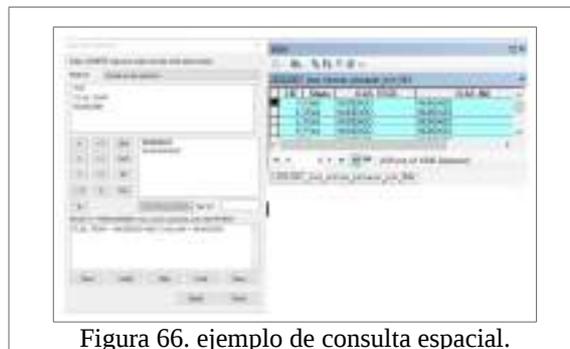
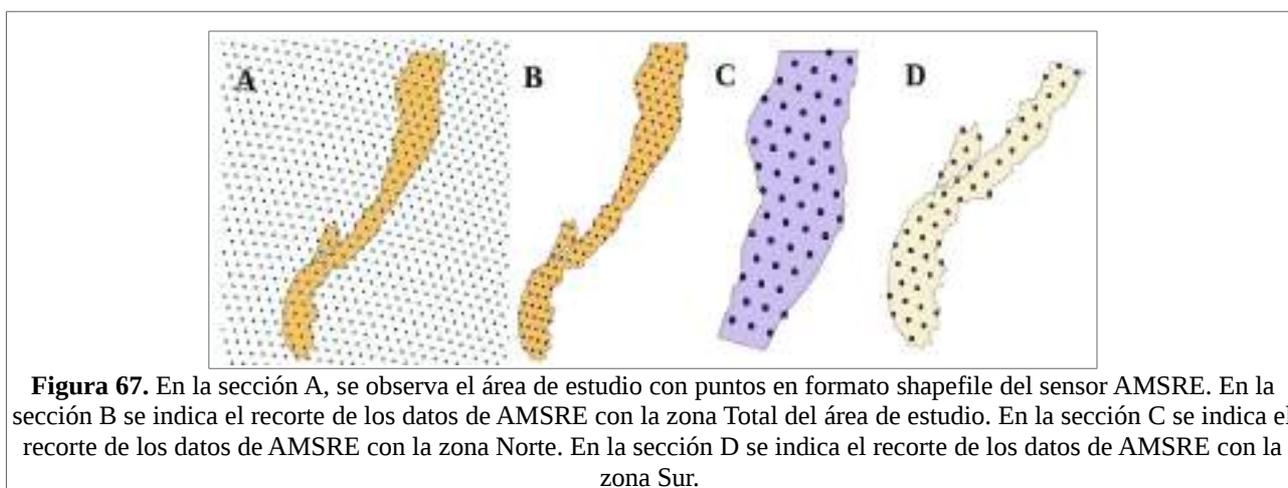


Figura 66. ejemplo de consulta espacial.

3.4 Metodología aplicada en el procesamiento de Microondas Pasivas.

Para obtener los parámetros en microondas pasivas requeridos, se utilizó el procedimiento “drop-in-the-bucket” (Kawanishi *et al.*, 2003). Para esto se procedió a recortar datos pre procesados en formato shapefile¹⁴ representados como puntos, que corresponden a los centros de cada una de las observaciones de las imágenes AMSRE de fechas entre 2002 al 2011, AMSR2 entre 2012 al 2015 y SMOS para las fechas 2010 al 2015; con el límites del área de estudio.

En la figura 67, se indica un esquema gráfico del procesamiento para recortar los puntos en formato shapefile de los datos de las imágenes para sacar estadísticas de los datos, para el presente ejemplo de imágenes AMSRE.



Una vez obtenidos los puntos recortados con el límite del área de estudio de las correspondientes imágenes, se calculan PI_{λ} y ΔT y se calculó la media (Mendenhall *et al.*, 2010) indicado en la ecuación 52 y la desviación estándar (Mendenhall *et al.*, 2010) indicado en la ecuación 53; para realizar el cálculo computacional de la desviación estándar generado en el ANEXO E, se utilizó una ecuación equivalente (Drakos, 1998) indicado en la ecuación 54, de las frecuencias disponibles de las diferentes imágenes; para AMSR-E (bandas C, X, Ku y Ka), para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y para SMOS (banda L), que permiten calcular la fracción de área inundada de la planicie de inundación.

Debido a la gran cantidad de conjunto de datos de los sensores para AMSRE (4165 para las tres zonas), AMSR2 (1097 para la zona Norte y sur) y SMOS (927 para la zona Norte y sur); se automatizó el procesamiento para cada uno de los sensores y para las diferentes zonas de estudio. Para esto, se procedió a generar códigos de programación en herramientas libres en Linux tales como Bash, OGR y awk. En el ANEXO E se puede consultar el código de los programas.

3.5 Estimación de la fracción de área Inundada mediante combinación de datos SAR y de Microondas pasivas.

a) Se calculó la proporción de área inundada, área no inundada y cuerpos de agua para cada uno de

¹⁴ Formato Shapefile: Formato estándar para el intercambio de información geográfica entre Sistemas de Información Geográfica (www.iges.org/grads/gadoc/shapefiles.html, 2016).

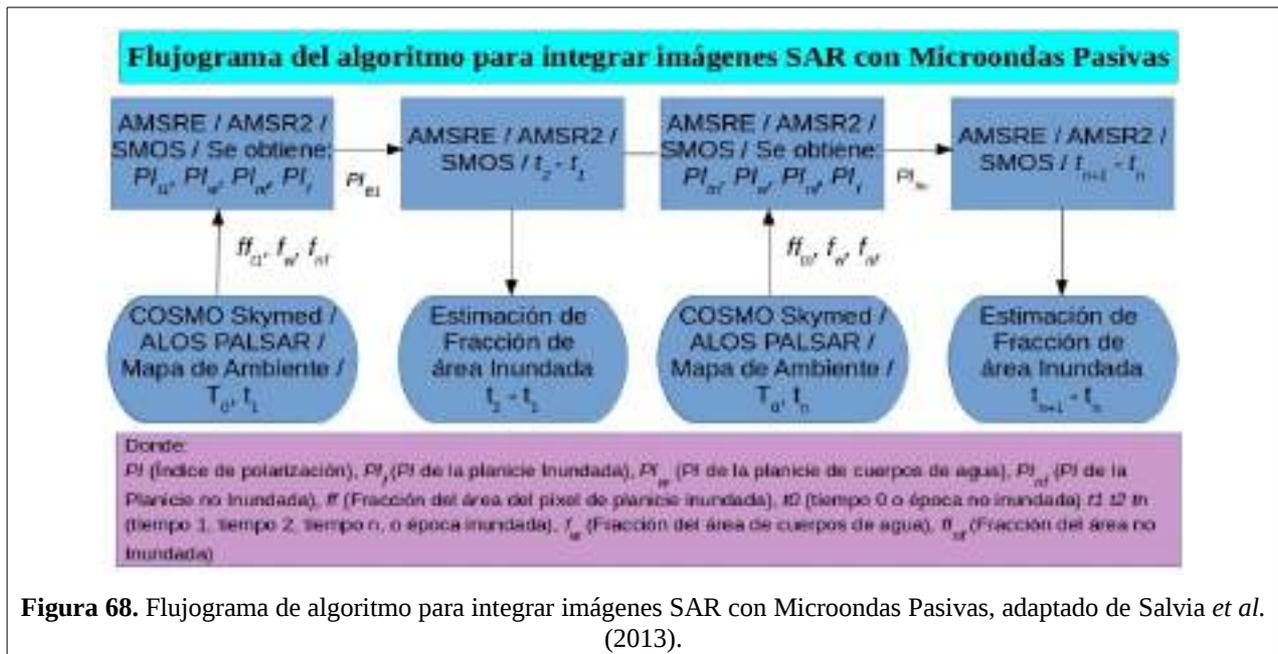
los mapas obtenidos con los datos ALOS PALSAR y COSMO Skymed (ver ANEXO A), en combinación con el Mapa de Ambientes (ver figura 2). La proporción de área inundada y área no inundada varían para cada fecha, la proporción de cuerpos de agua se mantiene, y siempre la suma de las 3 debe ser 1.

b) Para las fechas de los mapas de inundación obtenidos con datos SAR se calcula el PI_f según la ecuación 51, usando las fracciones calculadas en el paso anterior.

c) Para las fechas entre un mapa de inundación y el siguiente, se calcula f_f usando la ecuación 49, teniendo en cuenta que f_w , PI_{nf} , PI_w y PI_f se mantienen constantes.

d) En un segundo escenario para las fechas entre un mapa de inundación y el siguiente, se calcula f_f usando la ecuación 49, teniendo en cuenta que f_w , PI_{nf} , y PI_w se mantienen constantes y PI_f se interpola linealmente de un período 1 a un período 2. Para la interpolación lineal (Mathews & Fink, 2000) se utiliza la ecuación 55.

En la figura 68, se muestra lo explicado en los párrafos anteriores mediante un diagrama de flujo (adaptado de Salvia *et al.*, 2013).



3.6 Análisis de la correlación en los datos de microondas pasivas con información externa.

Para obtener la información con la cual se realizó la evaluación de la correlación de algunos de los datos de fracción de área inundada de los cálculos de microondas pasivas generados con información externa a modo de validación (ver 2.8), se accedió a la página del Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA) a la dirección electrónica <http://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?alerta=1>, y se descargó los productos de máscara de agua los cuales tienen información desde el año 1997 hasta el 2011. Luego se hizo una comparación de las fechas de los productos generados por el INA con los datos de fracción de área inundada generados en la tesis y se determinó que solamente

MATERIALES Y METODOLOGÍA.

se podían validar los datos de fracción de área inundada del período 2 (ver tabla 19). Para los datos del período 1 no fue posible realizar ningún tipo de correlación para la validación debido a que sólo se pudo obtener una fecha con lo cual no se pudo hacer ningún análisis estadístico (ver tabla 19). Para el período 3 tampoco fue posible realizar ningún tipo de correlación para la validación, debido a que es información para fechas desde el 2014 y no se dispone de ninguna información por parte del INA para estas fechas. En la tabla 18 se presenta un esquema de los archivos de máscara de agua generados con imágenes Landsat 5 y 7 que cubren las zonas de estudio de la tesis.

Tabla 18. Esquema del recubrimiento de los path y row de las mascararas del agua del INA con la zona Total, Norte y Sur.

		<p>Para la zona Total (Polígono color rojo). Los path 226 row 81 y 82 cubren aproximadamente el 65% del área, mientras que los path 227 row 81 y 82 cubre el 81.79% del área.</p> <p>Por el porcentaje de cobertura se seleccionó los path 227.</p>
		<p>Para la zona Norte (Polígono color azul). Los path 226 row 81 y 82 cubren el 100% del área, mientras que los path 227 row 81 y 82 cubre menos del 50% del área.</p> <p>Por el porcentaje de cobertura se seleccionó los path 226.</p>
		<p>Para la zona Sur (Polígono color violeta). Los path 226 row 81 y 82 cubren menos del 50% del área, mientras que los path 227 row 81 y 82 cubre cerca del 100% del área.</p> <p>Por el porcentaje de cobertura se seleccionó los path 227.</p>

En la tabla 19, se indica la información disponible del INA para diferentes fechas para los períodos de análisis y el porcentaje de recubrimiento en las zonas de estudio. Para el período 1, solo existe una fecha de las cuatro disponibles con datos que sirven para el análisis por lo que no fue posible calcular estadísticas de validación para los datos de microondas pasivas en este período. Para la zona Total tiene un porcentaje del 81.79% de recubrimiento, mientras que para la zona Norte y Sur

tienen un porcentaje de recubrimiento total. Para el período 2, se obtuvieron 26 fechas, realizando un análisis de la información para la zona Total se seleccionaron las máscaras de agua que cubren el 81.79%, dando un total de 9 fechas que se pudieron analizar; para la zona Sur sirvió la misma información que la zona Total por el análisis indicado en la tabla 18 y para la zona Norte se seleccionaron 9 fechas.

Tabla 19. Fechas de los datos de fracción de área inundada generadas en la tesis y los archivos de máscara de agua del INA con información del recubrimiento de los path y row que los conforman. para la validación de los datos de microondas pasivas.

Período	Fecha	Información INA.			Información Tesis.		
		Path	Row	Row	% Cobertura de la zona Total.	% Cobertura de la zona Norte.	% Cobertura de la zona Sur.
Primero	13/02/2007	227	81	82	81.79%	~ 30%	100%
	10/03/2007	226	-	82	< 50%	< 50%	< 50%
	18/04/2007	227	81	-	< 50%	< 50%	< 50%
	27/04/2007	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
Segundo	06/08/2009	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
	29/08/2009	227	81	82	81.79%	0%	100%
	09/10/2009	226	81	82	~ 65%	100%	< 50 %
	01/11/2009	227	81	82	81.79%	0%	100%
	20/01/2010	227	81	82	81.79%	0%	100%
	29/01/2010	226	81	82	~ 65 %	100%	< 50%
	25/03/2010	227	81	82	81.79%	0%	100%
	10/04/2010	227	81	82	81.79%	0%	100%
	26/09/2010	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
	03/10/2010	227	81	82	81.79%	0%	100%
	12/10/2010	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
	13/11/2010	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
	15/12/2010	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
	16/01/2011	226	81	82	~ 65%	100%	< 50%
	23/01/2011	227	81	82	81.79%	0%	100%
	01/02/2011	226	-	82	< 50%	0%	< 50%
	12/03/2011	227	81	82	< 50%	0%	< 50%
	28/03/2011	227	81	82	81.79%	0%	100%
	06/04/2011	226	81	82	< 50%	100%	< 50%
	13/04/2011	227	81	82	81.79%	< 50%	100%
08/05/2011	226	-	82	< 50%	< 50%	< 50%	

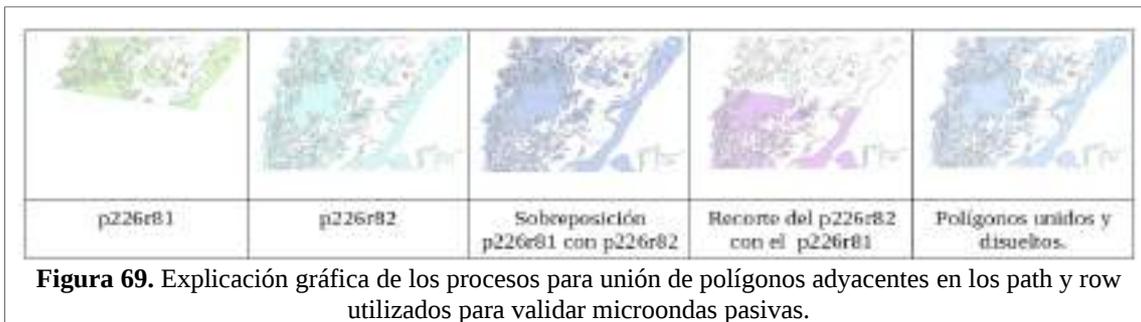
-: Significa que no existe en la información del INA.

3.6.1 Metodología usada para la evaluación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa.

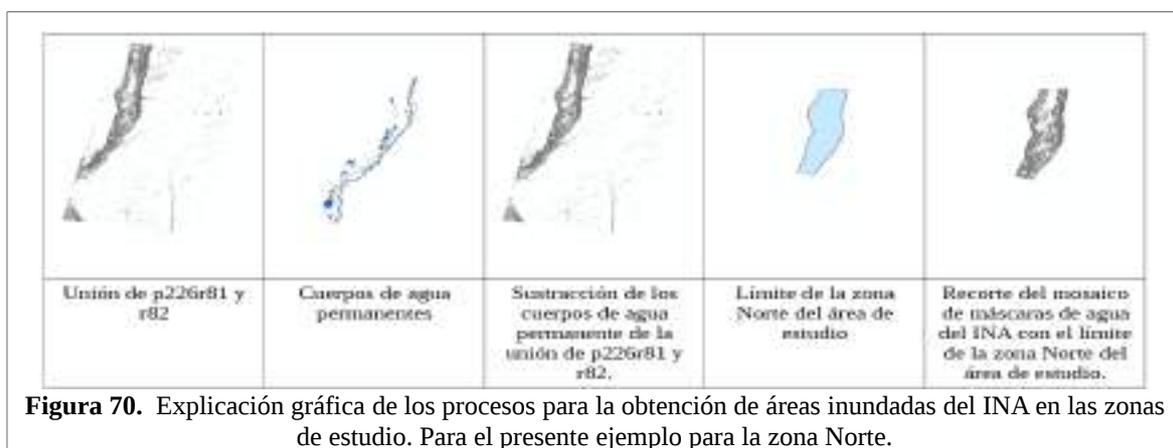
Para obtener las estadísticas con las cuales se pudo calcular la evaluación de la exactitud para microondas pasivas (ver 4.10), se utilizó el programa ArcGis 10.2 como sistema de información geográfico (SIG), realizando operaciones SIG a la información obtenida del INA, así como los valores de fracción de área inundada generados en la tesis, se procedió hacer lo siguiente:

Paso 1, se cargaron los archivos de las máscaras de agua del INA para la zona Total y Sur de los path y row (p227r81 y p227r82) y para la zona Norte (p226r81 y p226r82) que cubren las zonas de estudio (ver tabla 18).

Paso 2, se realizaron recortes de los polígonos entre path y row usando el comando *erase* (para que no haya duplicación de polígonos), luego se unió los polígonos usando el comando *merge* y después para eliminar líneas que se observan en los límites de unión de los polígonos se utilizó el comando *dissolve*. En la figura 69 se observa un ejemplo de estos procesos.



Paso 3, se cargo el límite de los cuerpos de agua permanente obtenidos del mapa de ambientes (ver figura 2) del área de estudio. *Paso 4*, se recortó el mosaico de los dos path y row obtenido en el paso 2 con el límites de los cuerpos de agua permanentes usando el comando *erase*. *Paso 5* con la información obtenida en el paso 4 se recorto con el límite de las zonas de estudio empleando el comando *clip*, y se obtuvo una máscara de áreas inundadas del INA de las zonas del área de estudio. En la figura 70 se indica de forma gráfica los pasos realizados.



Paso 6, se calculó el porcentaje de área inundada dentro de las zonas de estudio y con esto se obtuvo el valor de fracción de área inundada para las fechas seleccionadas que se indican en la tabla

19, que sirvió para los posteriores cálculos (ver 4.10).

Finalmente se escribió líneas de comando usando el programa R (ver ANEXO G) para calcular la estadística de correlación lineal explicado en el marco teórico (ver 2.8).

En la figura 71, se presenta la integración de la metodología para la evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de microondas pasivas con información externa para validación.

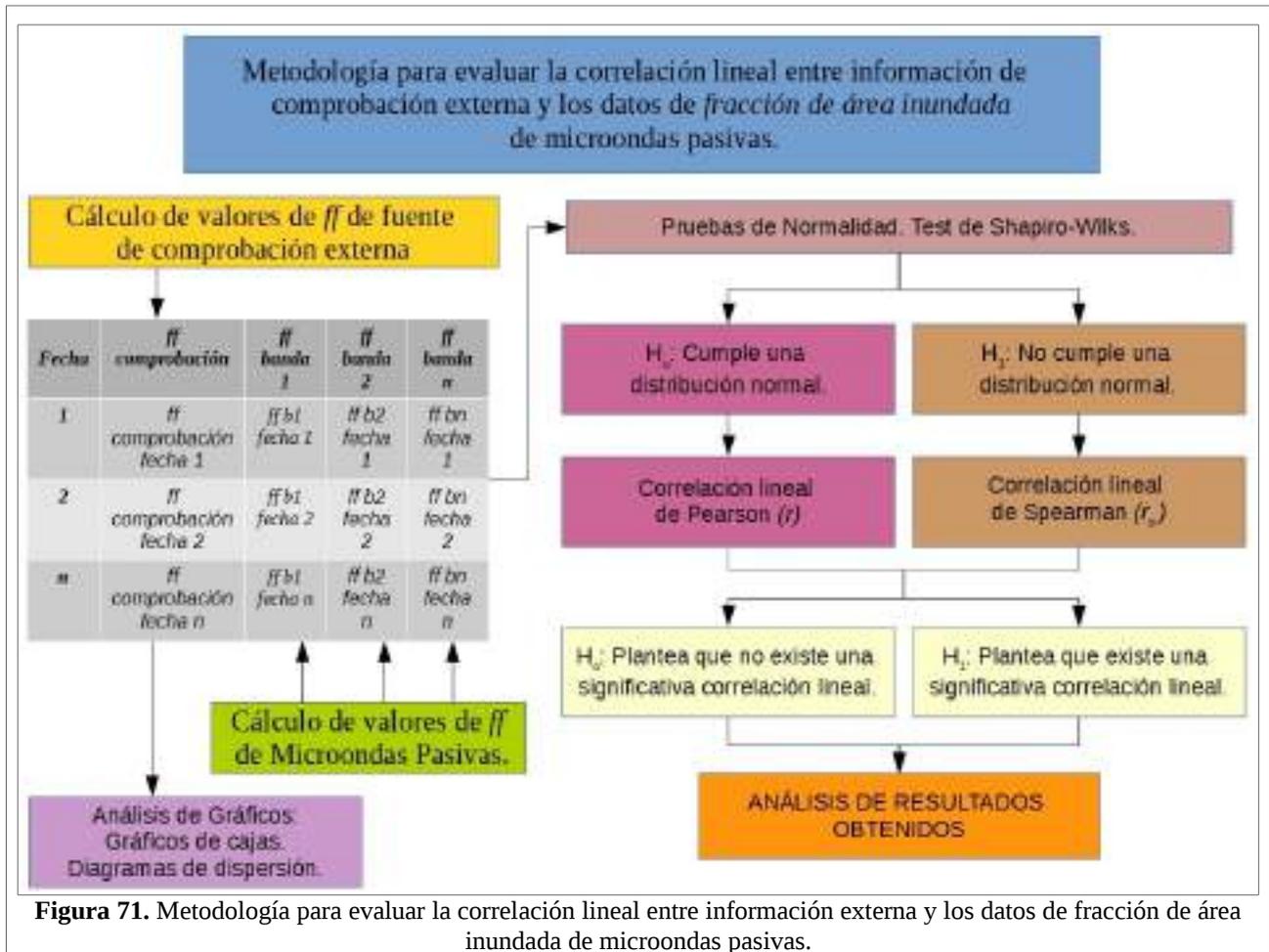


Figura 71. Metodología para evaluar la correlación lineal entre información externa y los datos de fracción de área inundada de microondas pasivas.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ZONA TOTAL.

4.1.1 Fracción de área inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.

Para la generación de los mapas de detección de cambios e inundación, se siguió la metodología explicada anteriormente (ver secciones 3.2.4 y 3.2.5), a continuación se indican dos ejemplos de mapas generados: en la figura 72 se indica el mapa de clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007, mientras que en la figura 73 se indica el mapa de inundación del 23/05/2007. Los mapas restantes se pueden observar en el ANEXO A.

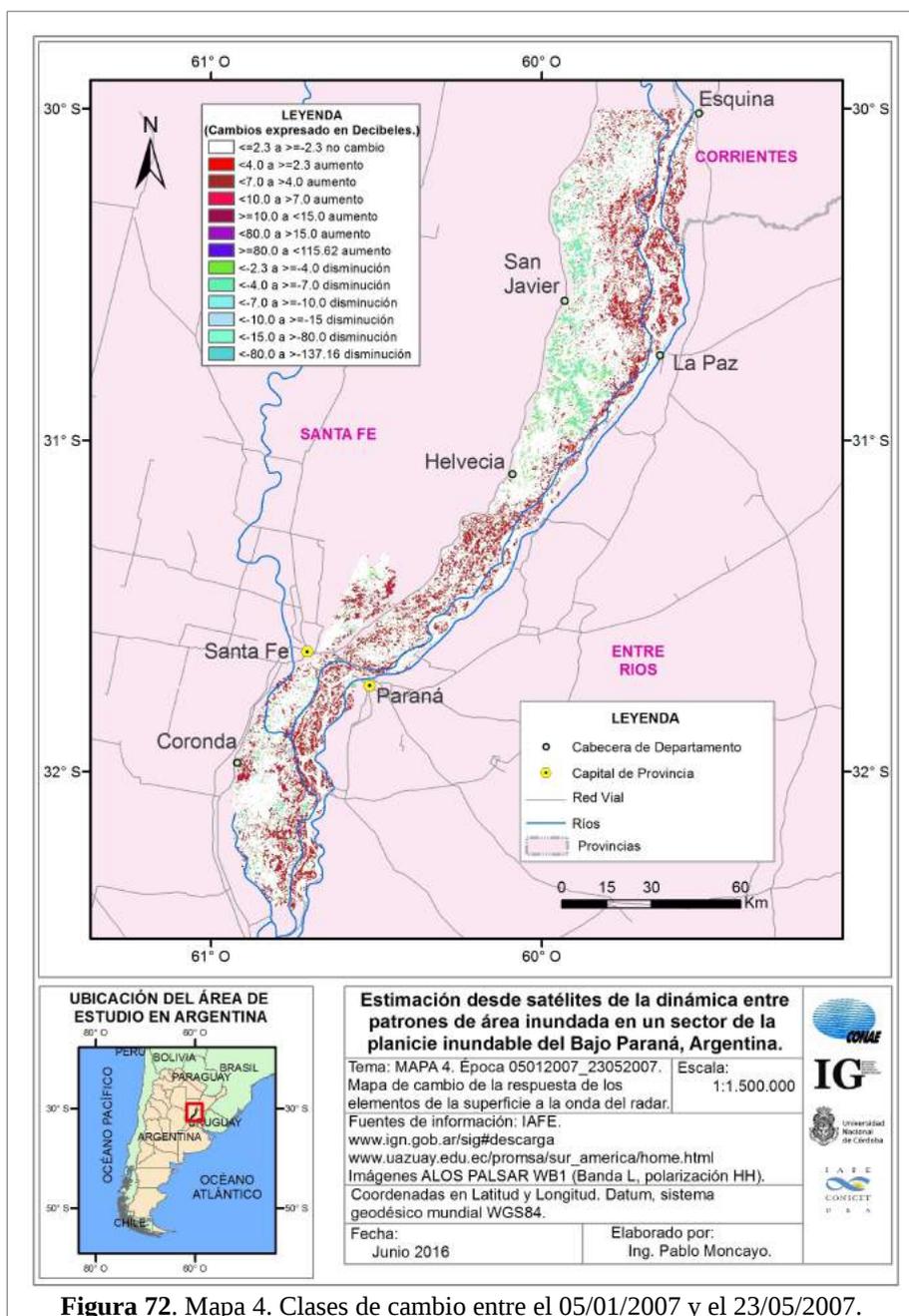


Figura 72. Mapa 4. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007.

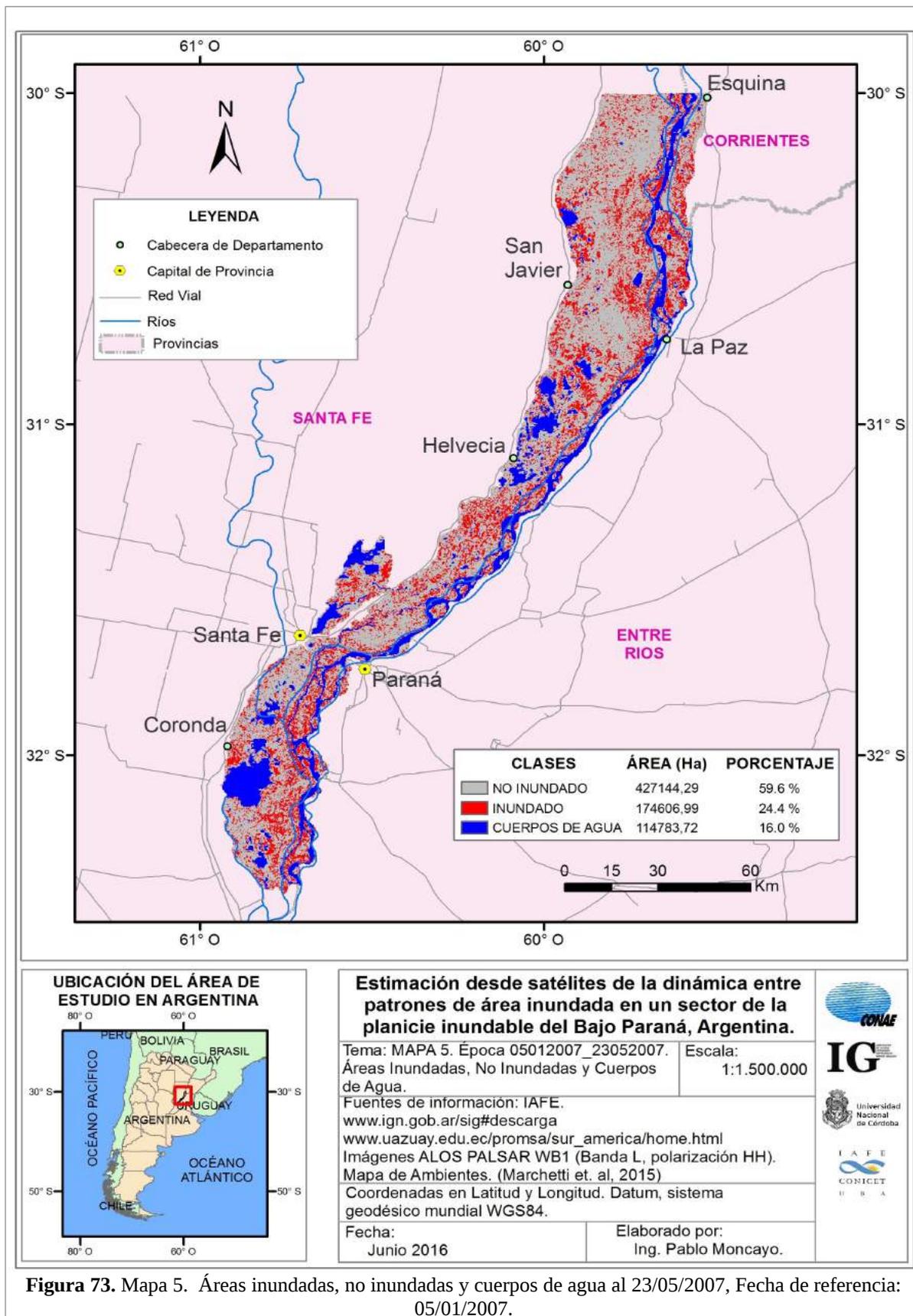


Figura 73. Mapa 5. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/05/2007, Fecha de referencia: 05/01/2007.

En la tabla 20, se indica un listado de los dos períodos analizados, con las fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR. El segundo período de análisis tiene porcentajes de fracción de área de cuerpos de agua ligeramente diferentes al primer período, esto se debe a que las imágenes ALOS para este período no cubre toda el área de estudio, 97.54% del área de estudio cubierta en la fecha 13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009 (ver mapa 13, figura 128) y 95.54% del área de estudio cubierta en la fecha 16/10/2010 con fecha de referencia 10/01/2009 (ver mapa 15, figura 130).

Tabla 20. Combinación de imágenes ALOS PALSAR utilizadas para la zona Total, con las respectivas fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada. En el código de combinación de imágenes, se indica la fecha de inicio de la época y luego la fecha final de la época dentro del período.

Imagen	Período	Código de combinación de imágenes.	Fracción de área de cuerpos de agua (<i>fw</i>)	Fracción de área no inundada (<i>fnf</i>)	Fracción de área inundada (<i>ff</i>)
ALOS PALSAR	Primero	05012007_23052007	0.160	0.596	0.244
		05012007_08072007	0.160	0.444	0.396
		05012007_23082007	0.160	0.600	0.240
		05012007_23112007	0.160	0.715	0.125
	Segundo	10012009_13102009	0.161	0.519	0.320
		10012009_16102010	0.163	0.597	0.240

En la figura 74, se indica los valores de *ff* calculados a través de detección de cambios en imágenes ALOS PALSAR (ver sección 3.2.4) para los diferentes períodos de estudio (ver tabla 20). Para el primer período, se observa que los datos de *ff* de las imágenes ALOS PALSAR siguen la tendencia del NDA del río con un retraso de aproximadamente 90 días medidos desde el 01/04/2007 que es la fecha en que se detecta el pico del NDA en la estación Santa Fe. en comparación al segundo valor de *ff* de las imágenes ALOS correspondiente del 08/07/2007 para este período (UNL, 2016b); mientras que en el período 01/06/2009 al 30/06/2011 debido a que solo se dispone de dos valores de *ff* obtenidos de la detección de cambios de imágenes SAR, no se puede afirmar que los datos de fracción de área inundada sigan la tendencia del NDA del río Paraná en la misma estación.



Figura 74. Valores de *ff* de la zona Total, usando imágenes ALOS PALSAR, correspondiente al período de imágenes ALOS PALSAR del 23/05/2007 al 16/10/2010.

4.1.2 Valores de PI para cuerpos de agua.

Los PI de los cuerpos de agua (ver tabla 21), fueron calculados como los valores del decil más bajo del PI de muestras del río de La Plata correspondientes a imágenes de 2007 de días con viento máximo en Aeroparque en la ciudad de Buenos Aires, con datos menores a 10 nudos. Estos valores (ver sección 2.7.6) sirven también para la zona Norte y Sur. La elección del río de la Plata para la extracción de muestras se debió a la posibilidad de tomar muestras puras de agua que contuvieran aproximadamente la misma carga de sedimentos que la correspondiente al río Paraná. La elección del decil más bajo en días de viento menor a 10 nudos se debió a la intención de minimizar las diferencias en el PI producido por el mayor oleaje del río de la Plata con respecto al río Paraná.

Tabla 21. Valores de PI_w de la zona Total, para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.

Banda	AMSRE Y AMSR2				SMOS
	C	X	Ku	Ka	L
PI_w medio	0.1925	0.3668	0.3909	0.31	0.1976
PI_w desviación estándar	0.0271	0.0141	0.0434	0.073	0.0198

4.1.3 Valores de PI de áreas no inundadas.

Se requiere conocer fechas donde no hay nada de inundación. Para esto se utilizó los datos de las tablas de alturas hidrométricas solicitadas a la Universidad Nacional del Litoral. Realizando una revisión de los datos de las estaciones hidrometeorológicas Esquina y Santa Fe en el área de estudio, se determina que la época seca para las imágenes AMSRE corresponden al período julio a diciembre del 2006, mientras que para las imágenes SMOS corresponde al período julio a diciembre del 2012. Como se puede ver en las figuras 75 y 76, en estas fechas se consideró que en el área de estudio solo había vegetación no inundada y cuerpos de agua, y así se realizaron los cálculos para cada fecha del período seco siguiendo la ecuación 50. A continuación, y con el objetivo de obtener un único valor de PI_{nf} por frecuencia de operación de los radiómetros utilizados, se hizo un promedio para calcular los valores de PI_{nf} para las imágenes AMSRE y SMOS, tanto para las pasadas ascendentes como descendentes (ver tabla 22).

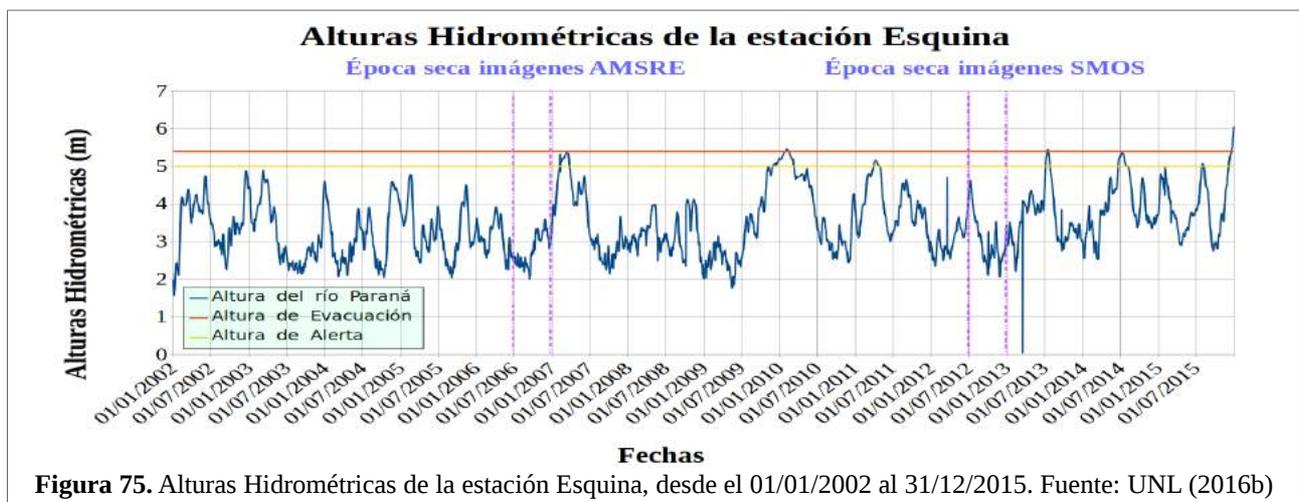


Figura 75. Alturas Hidrométricas de la estación Esquina, desde el 01/01/2002 al 31/12/2015. Fuente: UNL (2016b)



Tabla 22. Valores de PI_{nf} de la zona Total, para las bandas C, X, Ku, Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.

Banda	AMSRE y AMSR2				SMOS
	C	X	Ku	Ka	L
PI_{nf} medio	0.0717	0.0243	- 0.0035	0.0021	0.1277
PI_{nf} desviación estándar	0.0127	0.0098	0.0012	0.0060	0.0175

4.1.4 Valores de PI_f de áreas inundadas de la zona Total correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR.

En la tabla 23, se observa los valores de PI_f para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE; correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para los diferentes períodos de estudio. Estos datos fueron calculados aplicando la ecuación 51 y usando los valores de PI_w y PI_{nf} mostrados en las tablas 21 y 22, así como los datos de fw , fnf y ff mostrados en la tabla 20.

Tabla 23. Valores de PI_f de la zona Total, para las bandas C, X, Ku y Ka de la imagen AMSRE; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las diferentes épocas de estudio.

Fechas	Bandas de AMSRE.							
	PI_f C Asc	PI_f X Asc	PI_f Ku Asc	PI_f Ka Asc	PI_f C Desc	PI_f X Desc	PI_f Ku Desc	PI_f Ka Desc
23/05/2007	0.3478	0.2722	0.2138	0.1835	0.2312	0.2329	0.1871	0.1865
08/07/2007	0.1829	0.1257	0.0912	0.0771	0.1584	0.1239	0.0731	0.0456
23/08/2007	0.1081	0.0484	0.0244	0.0246	0.0990	0.0527	0.0387	0.0578
23/11/2007	0.1135	0.0704	0.0649	0.0688	0.0499	0.0794	-0.0023	0.0128
13/10/2009	0.2430	0.1757	0.0817	0.0459	0.3237	0.2540	0.2146	0.2025
16/10/2010	0.0900	0.0620	0.0430	0.0472	0.1736	0.1019	0.0545	0.0413

4.2 ZONA NORTE

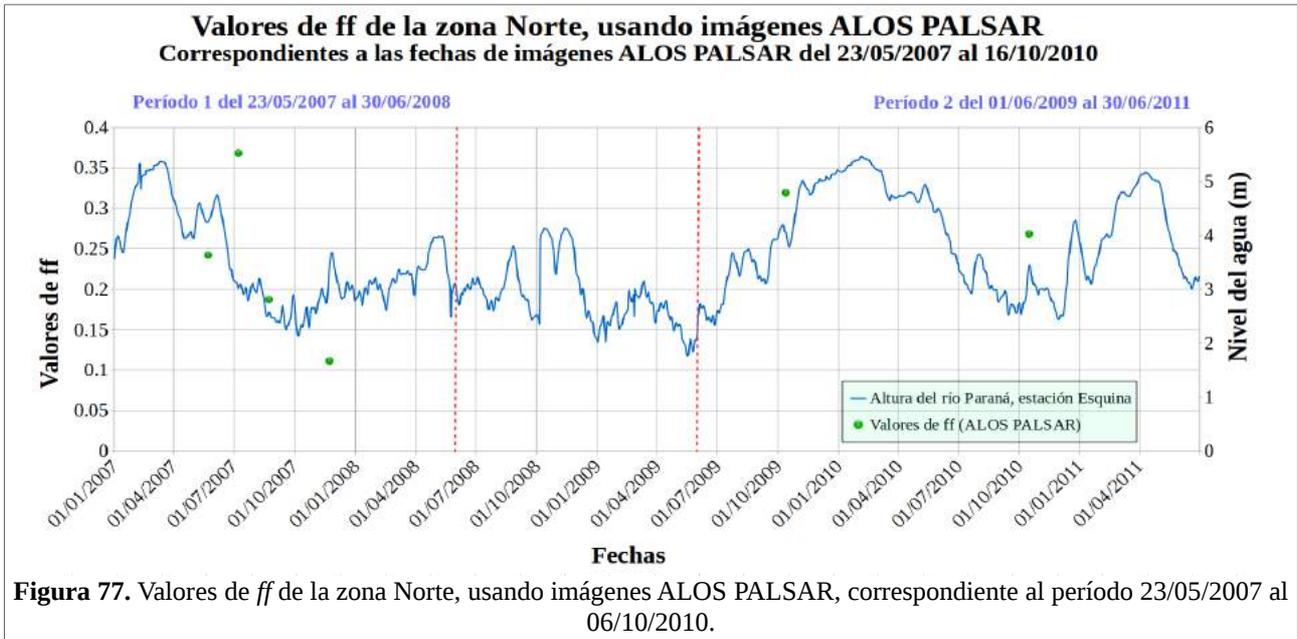
4.2.1 Fracción de área inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.

En la tabla 24, se indica un listado de los tres períodos analizados, con las fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR. El segundo período de análisis no presentó diferencias en los porcentajes de fracción de área de cuerpos de agua con respecto al primer y tercer período como fue en el caso de la Zona Total (ver sección 4.1.1).

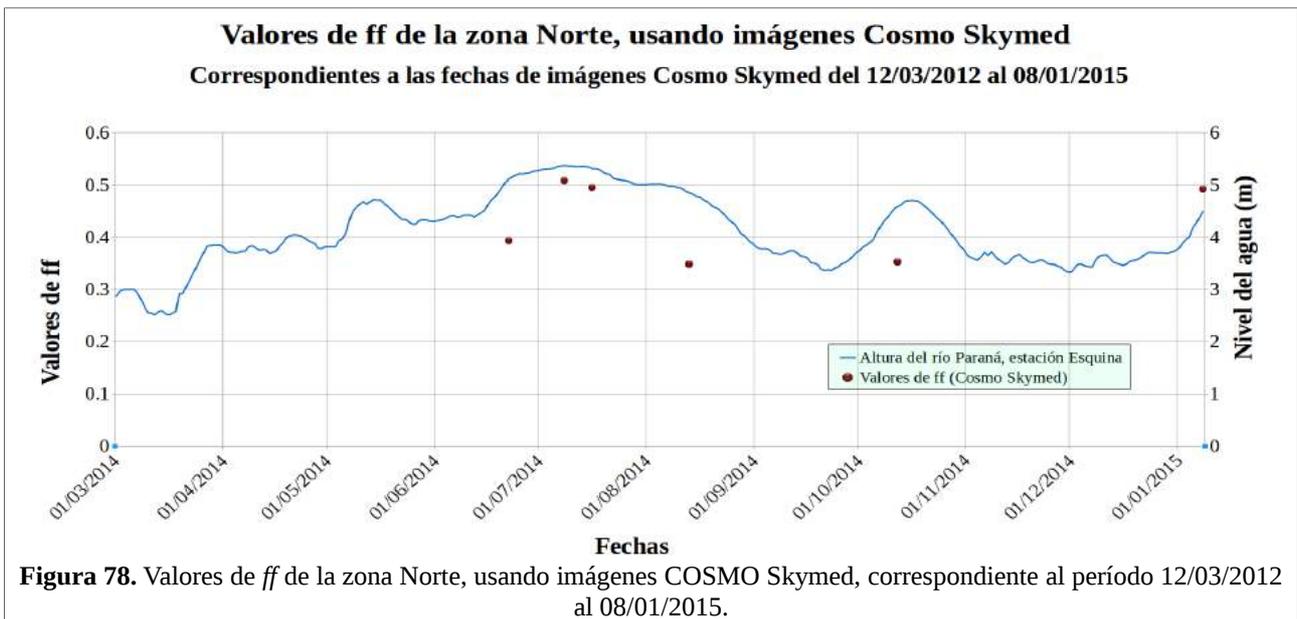
Tabla 24. Combinación de imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed utilizadas en la zona Norte, con las respectivas fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada. En el código de combinación de imágenes, se indica la fecha de inicio de la época y luego la fecha final de la época dentro del período.

Imagen	Período	Código de combinación de imágenes.	Porcentaje de cuerpos de agua (<i>fw</i>)	Porcentaje planicie no inundada (<i>fnf</i>)	Porcentaje planicie inundada (<i>ff</i>)
ALOS PALSAR	Primera	05012007_23052007	0.113	0.645	0.242
		05012007_08072007	0.113	0.519	0.368
		05012007_23082007	0.113	0.700	0.187
		05012007_23112007	0.113	0.776	0.111
	Segunda	10012009_13102009	0.113	0.568	0.319
		10012009_16102010	0.113	0.619	0.268
COSMO Skymed	Tercera	12032012_22062014	0.113	0.494	0.393
		12032012_08072014	0.113	0.379	0.508
		12032012_16072014	0.113	0.392	0.495
		12032012_13082014	0.113	0.539	0.348
		12032012_12102014	0.113	0.535	0.352
		12032012_08012015	0.113	0.395	0.492

En la figura 77, se indica los valores de *ff* calculados a través de detección de cambios en imágenes ALOS PALSAR para los períodos 1 y 2 de estudio. Del 01/01/2007 al 30/06/2008 se observa que los datos de fracción de área inundada siguen la tendencia del NDA del río Paraná en la estación Esquina, aunque con un retraso de aproximadamente 2 meses y 13 días por las razones explicadas en la figura 74; mientras que en el período 01/06/2009 al 30/06/2011 debido a que solo se dispone de 2 valores de *ff*, no se puede afirmar que los datos de fracción de área inundada sigan la tendencia del NDA del río Paraná en la misma estación.



En la figura 78, se indica los valores de ff calculados a través de detección de cambios en imágenes COSMO Skymed para el período 3 de estudio. Del 22/06/2014 al 08/01/2015 se observa que los datos de fracción de área inundada siguen la tendencia del NDA del río Paraná en la estación Esquina.



4.2.2 Valores de PI de áreas no inundadas.

Se requiere conocer fechas donde no hay nada de inundación. Para esto se utilizó los datos de las tablas de alturas hidrométricas solicitadas a la Universidad Nacional del Litoral. Realizando una

revisión de los datos de la estación hidrometeorológica Esquina en la zona Norte del área de estudio, se determina que la época seca para las imágenes AMSRE corresponden al período julio a diciembre del 2006, mientras que para las imágenes SMOS corresponde al período julio a diciembre del 2012. Como se puede ver en la figura 75, en estas fechas se consideró que en el área de estudio solo había vegetación no inundada y cuerpos de agua, y así se realizaron los cálculos para cada fecha siguiendo la ecuación 50. A continuación se hizo un promedio para calcular los valores de PI_{nf} de las fechas indicadas tanto para las imágenes AMSRE como SMOS para las pasadas ascendente y descendente (ver tabla 25).

Tabla 25. Valores de PI_{nf} en la zona Norte, para las bandas C, X, Ku, Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.

Banda	AMSRE Y AMSR2				SMOS
	C	X	Ku	Ka	L
PI_{nf} medio	0.0747	0.0384	0.0143	0.0162	0.1265
PI_{nf} desviación estándar	0.0060	0.0063	0.0010	0.0042	0.0117

4.2.3 Valores de PI_f de áreas inundadas de la zona Norte correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed.

En la tabla 26, se observa los valores de PI_f para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2, así como para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed para los diferentes períodos de estudio. Estos datos fueron calculados aplicando la ecuación 51 y usando los valores de PI_w y PI_{nf} mostrados en las tablas 21 y 25, así como los datos de fw , fnf y ff mostrados en la tabla 24.

Tabla 26. Valores de PI_f de la zona Norte, para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed para las diferentes épocas de estudio.

Fechas	Bandas de AMSRE.								Bandas SMOS.	
	PI_f C Asc	PI_f X Asc	PI_f Ku Asc	PI_f Ka Asc	PI_f C Desc	PI_f X Desc	PI_f Ku Desc	PI_f Ka Desc	PI_f L Asc	PI_f L Desc
23/05/2007	0.3239	0.2660	0.2220	0.1963	0.2501	0.2430	0.2100	0.2116		
08/07/2007	0.1920	0.1344	0.1093	0.0948	0.1671	0.1335	0.0881	0.0587		
23/08/2007	0.0903	0.0599	0.0368	0.0343	0.1062	0.0675	0.0526	0.0689		
23/11/2007	0.2264	0.1709	0.1464	0.1319	0.1570	0.1607	0.0643	0.0654		
13/10/2009	0.2398	0.1631	0.0551	0.0028	0.3345	0.2810	0.2411	0.2234		
16/10/2010	0.0863	0.0773	0.0669	0.0706	0.1703	0.1230	0.0848	0.0696		
22/06/2014	0.2757	0.2894	0.2553	0.2095	0.2696	0.2737	0.2661	0.2227	0.2519	0.2832
08/07/2014	0.4239	0.4826	0.5209	0.4584	0.3657	0.3951	0.4649	0.4237	0.2956	0.2818
16/07/2014	0.3433	0.3966	0.3777	0.2545	0.3795	0.3895	0.3644	0.2838	0.1925	0.2739
13/08/2014	0.3036	0.3533	0.5215	0.5371	0.3274	0.4033	0.5136	0.4671	0.2713	0.2268
12/10/2014	0.1340	0.1288	0.1408	0.1357	0.1433	0.1560	0.2111	0.2000	0.1829	0.2162
08/01/2015	0.2332	0.1587	0.0992	-0.0156	0.1784	0.1399	-0.0003	0.1196	0.2544	0.2328

4.3 ZONA SUR

4.3.1 Fracción de área inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.

En la tabla 27, se indica un listado de los tres períodos analizados, con las fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada obtenida mediante detección de cambios de imágenes SAR.

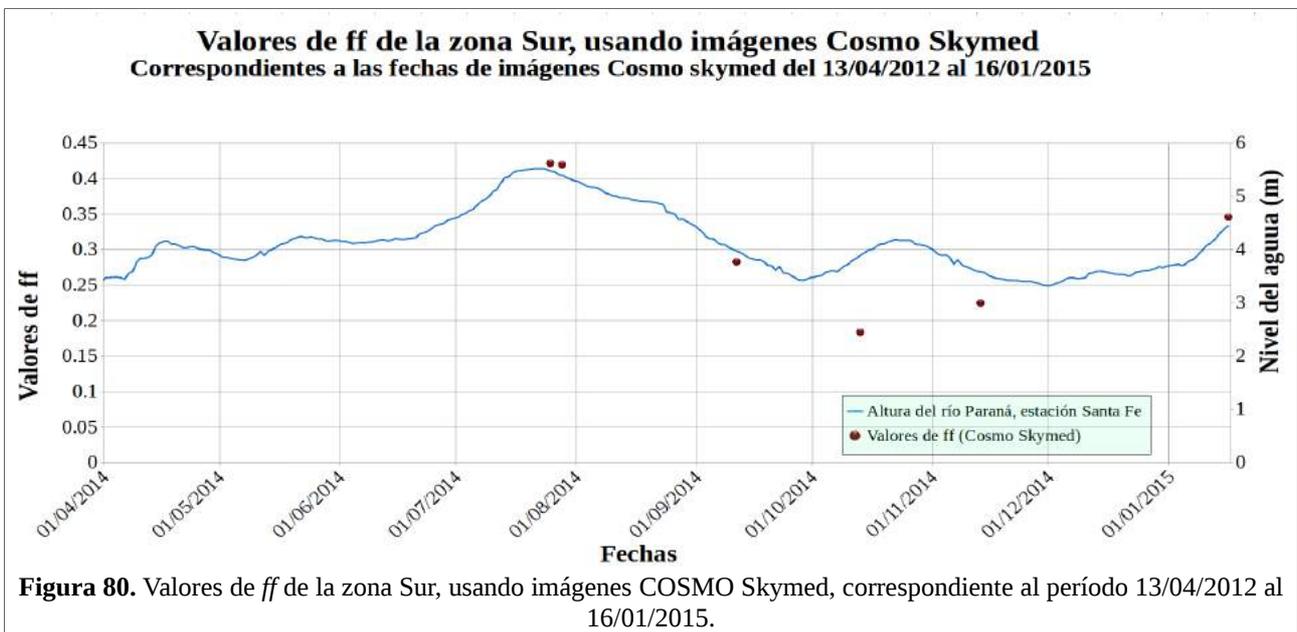
Tabla 27. Combinación de imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed utilizadas en la zona Sur, con las respectivas fracciones de cuerpos de agua, planicie no inundada y planicie inundada. En el código de combinación de imágenes, se indica la fecha de inicio de la época y luego la fecha final de la época dentro del período.

Imagen	Período	Código de combinación de imágenes.	Porcentaje de cuerpos de agua (<i>fw</i>)	Porcentaje planicie no inundada (<i>fnf</i>)	Porcentaje planicie inundada (<i>ff</i>)
ALOS PALSAR	Primera	05012007_23052007	0.209	0.546	0.245
		05012007_08072007	0.209	0.366	0.425
		05012007_23082007	0.209	0.495	0.296
		05012007_23112007	0.209	0.652	0.139
	Segunda	10012009_13102009	0.209	0.471	0.320
		10012009_16102010	0.209	0.577	0.214
COSMO Skymed	Tercera	13042012_25072014	0.209	0.370	0.421
		13042012_28072014	0.209	0.372	0.419
		13042012_11092014	0.209	0.509	0.282
		13042012_13102014	0.209	0.608	0.183
		13042012_13112014	0.209	0.567	0.224
		13042012_16012015	0.209	0.446	0.345

En la figura 79, se indica los valores de *ff* calculados a través de detección de cambios en imágenes ALOS PALSAR para los períodos 1 y 2 de estudio. Del 01/01/2007 al 30/06/2008 se observa que los datos de fracción de área inundada siguen la tendencia del NDA del río Paraná en la estación Santa Fe, aunque con un retraso de aproximadamente 2 meses y 13 días por las razones explicadas en la figura 74; mientras que en el período 01/06/2009 al 30/06/2011 debido a que solo se dispone de 2 valores de *ff*, no se puede afirmar que los datos de fracción de área inundada sigan la tendencia del NDA del río Paraná en la misma estación.



En la figura 80, se indica los valores de ff calculados a través de detección de cambios en imágenes COSMO Skymed para el período 3 de estudio. Del 25/07/2014 al 16/01/2015 se observa que los datos de fracción de área inundada siguen la tendencia del NDA del río Paraná en la estación Santa Fe.



4.3.2 Valores de PI de áreas no inundadas.

Se requiere conocer fechas donde no hay nada de inundación. Para esto se utilizó los datos de las tablas de alturas hidrométricas solicitadas a la Universidad Nacional del Litoral. Realizando una

revisión de los datos de las estación hidrometeorológica Santa Fe en el área de estudio, se determina que la época seca para las imágenes AMSRE corresponden al período julio a diciembre del 2006, mientras que para las imágenes SMOS corresponde al período julio a diciembre del 2012. Como se puede ver en la figura 76, en estas fechas se consideró que en el área de estudio solo había vegetación no inundada y cuerpos de agua, y así se realizaron los cálculos para cada fecha siguiendo la ecuación 50, a continuación se hizo un promedio para calcular los valores de PI_{nf} de las fechas indicadas tanto para las imágenes AMSRE y SMOS para las pasadas ascendente y descendente (ver tabla 28).

Tabla 28. Valores de PI_{nf} en la zona Sur, para las bandas C, X, Ka, Ku de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS.

Banda	AMSRE Y AMSR2				SMOS
	C	X	Ku	Ka	L
PI_{nf} medio	0.0684	0.0080	-0.0241	-0.0143	0.1297
PI_{nf} desviación estándar	0.0125	0.0081	0.0033	0.0120	0.0147

4.3.3 Valores de PI_f de áreas inundadas de la zona Sur correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed.

En la tabla 29, se observa los valores de PI_f para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed para los diferentes períodos de estudio. Estos datos fueron calculados aplicando la ecuación 51 y usando los valores de PI_w y PI_{nf} mostrados en las tablas 21 y 28 respectivamente así como los datos de fw , fnf y ff mostrados en la tabla 27.

Tabla 29. Valores de PI_f de la zona Sur, para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE y AMSR2; y para la banda L de SMOS, correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR y COSMO Skymed para las diferentes épocas de estudio.

Fechas	Bandas de AMSRE.								Bandas SMOS.	
	PI_f C Asc	PI_f X Asc	PI_f Ku Asc	PI_f Ka Asc	PI_f C Desc	PI_f X Desc	PI_f Ku Desc	PI_f Ka Desc	PI_f L Asc	PI_f L Desc
23/05/2007	0.3749	0.2793	0.2046	0.1696	0.3039	0.2200	0.1902	0.1907		
08/07/2007	0.1760	0.1190	0.0731	0.0590	0.1496	0.1114	0.0547	0.0300		
23/08/2007	0.1173	0.0329	0.0065	0.0105	0.0913	0.0340	0.0184	0.0415		
23/11/2007	0.0203	-0.0171	-0.0085	0.0122	-0.0439	0.0055	-0.0655	-0.0368		
13/10/2009	0.2473	0.1900	0.1100	0.0909	0.3142	0.2279	0.1890	0.1824		
16/10/2010	0.0974	0.0524	0.0242	0.0266	0.1786	0.0842	0.0279	0.0153		
25/07/2014	0.3893	0.4072	0.4798	0.4533	0.3261	0.3190	0.4516	0.4470	0.2970	0.2598
28/07/2014	0.2905	0.3010	0.3861	0.4011	0.2945	0.3585	0.4631	0.4463	0.2506	0.3358
11/09/2014	0.2227	0.2082	0.2963	0.3229	0.2351	0.2038	0.3324	0.3440	0.2472	0.2065
13/10/2014	0.1980	0.2324	0.4198	0.4907	0.2248	0.2304	0.4017	0.4138	0.2124	0.1775
13/11/2014	0.1263	0.1339	0.2409	0.2690	0.1315	0.1083	0.2482	0.2759	0.0169	0.0828
16/01/2015	0.1606	0.1790	0.0100	0.2135	0.2080	0.1735	-0.0014	0.1959	0.2517	0.2850

4.4 Tercera época de análisis de la zona Norte.

Para el análisis se comenzó con este período tanto para zona Norte, como para la zona Sur (ver 4.5), debido a que se disponía de mayor cantidad de datos derivados de imágenes SAR, para este caso derivado de imágenes COSMO Skymed (ver tablas 24 y 27), en comparación a los datos derivados de imágenes ALOS PALSAR (ver tabla 20). Otra razón fue que primeramente se quería conocer la respuesta derivada de la banda X (COSMO Skymed) generando los parámetros para la calibración de ff en combinación con los datos de microondas pasivas, para luego conocer la respuesta de banda L (ALOS PALSAR) generando los parámetros para la calibración de ff en combinación con los datos de microondas pasivas.

Se analizó el comportamiento temporal del $PIobs$ de cada uno de los sistemas de microondas pasivas en comparación con la fracción del área de inundación derivada de las imágenes COSMO Skymed correspondiente al período 01/03/2014 al 08/01/2015, y el nivel hidrométrico del río Paraná medido en la estación Esquina (ver figura 81).

4.4.1 Valores de $PIobs$ de la zona Norte.

La figura 81 muestra que los datos de AMSR2 y SMOS de $PIobs$ tienen un buen acuerdo con las estimaciones de ff de la imágenes de COSMO Skymed. Se observa que los datos de ff de las imágenes de microondas pasivas siguen la tendencia del NDA del río; en todo el período las bandas tienen un buen acuerdo con el NDA; se observa que la banda L sobresale de las demás bandas, a excepción del 21/06/2014 al 29/08/2014 en donde se entremezcla con el resto de bandas; del 03/12/2014 al 08/01/2015 se observa una mayor variabilidad en las bandas; y finalmente se observa que la banda Ka tanto ascendente como descendente es la que presenta menores valores en comparación con las demás bandas.

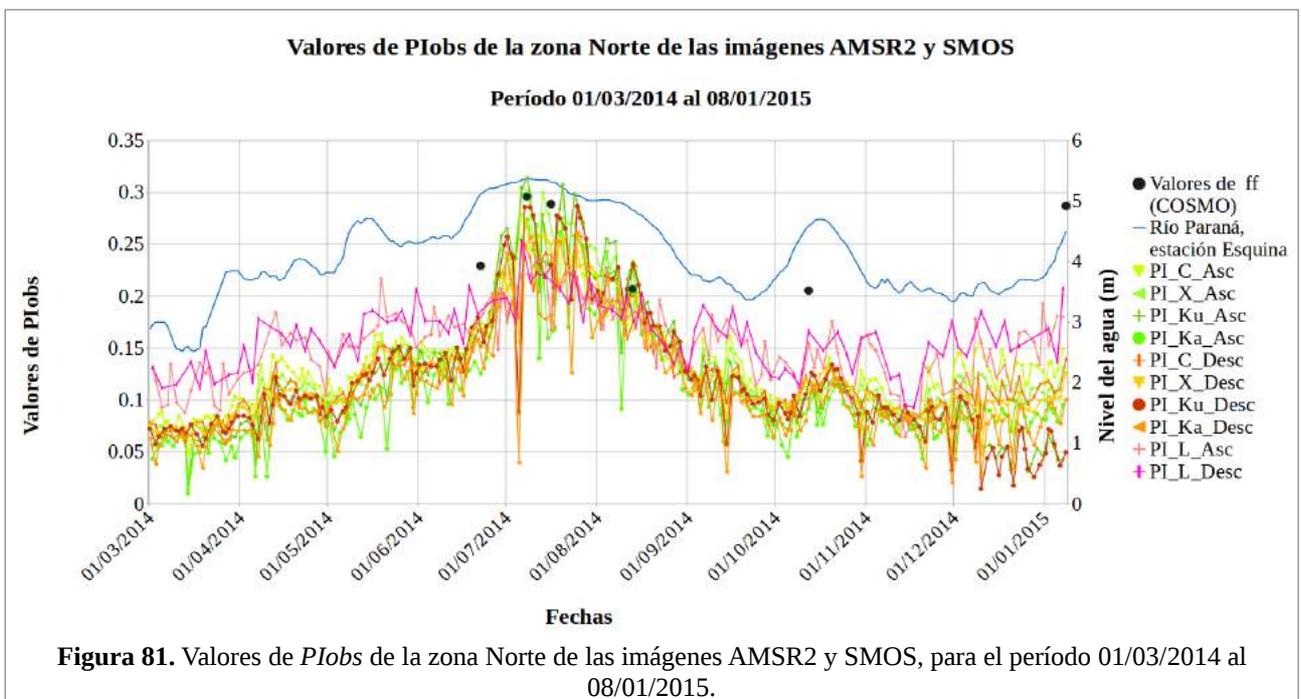


Figura 81. Valores de $PIobs$ de la zona Norte de las imágenes AMSR2 y SMOS, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.

4.4.2 Valores de *Pif* en el esquema de valor constante de la zona Norte.

En la figura 82, se observan los valores de *Pif* calculados para las fechas de adquisición de las imágenes COSMO Skymed y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSR2 ascendentes y descendentes y banda L de las imágenes SMOS ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 26. Esta figura puede ser comparada con la figura 86 para observar la diferencia entre los esquemas metodológicos estudiados.

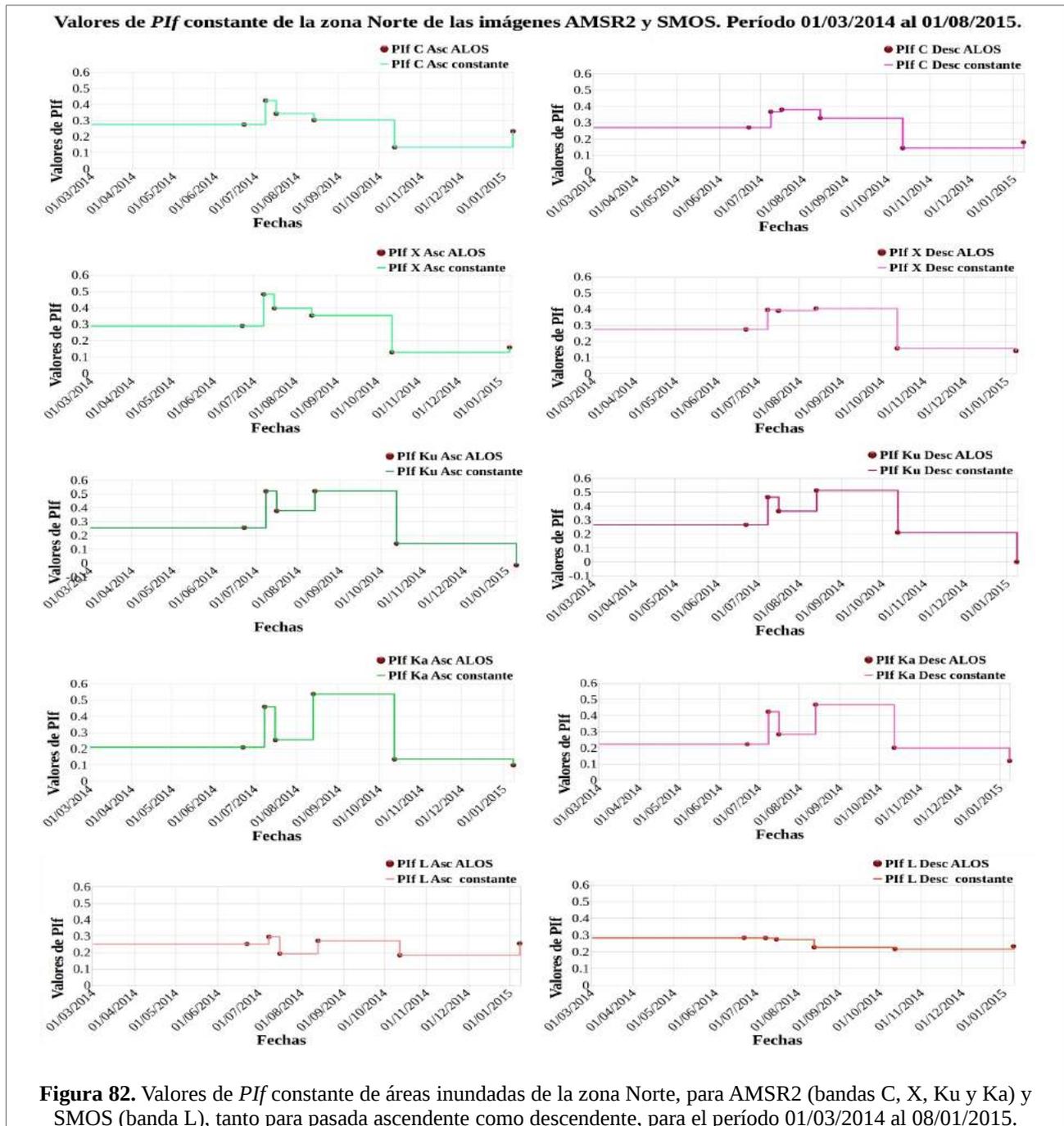


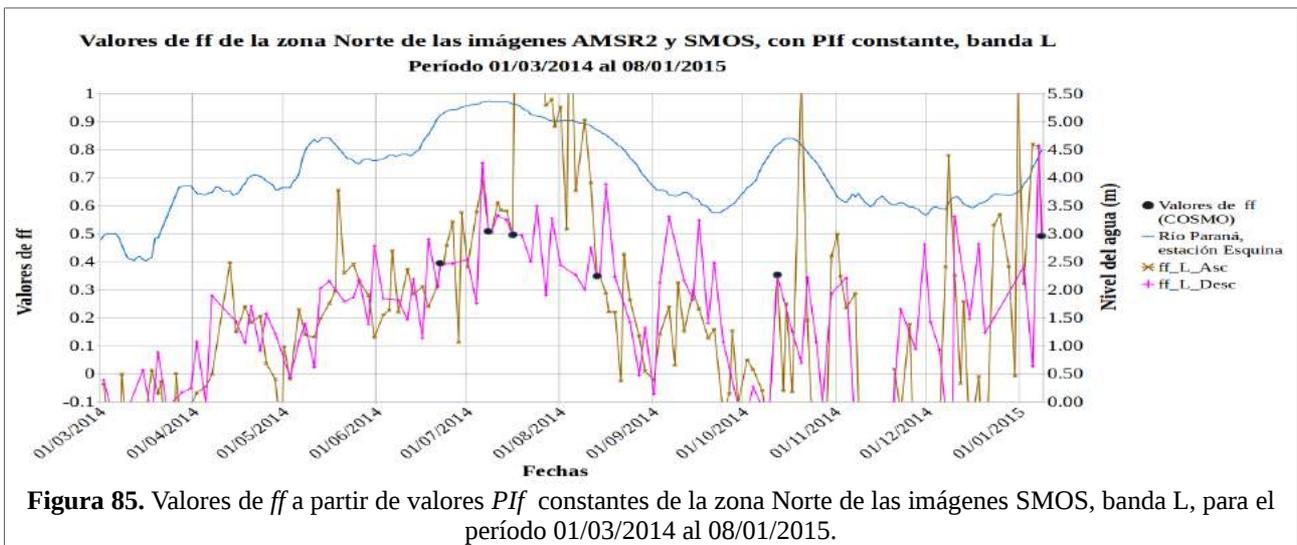
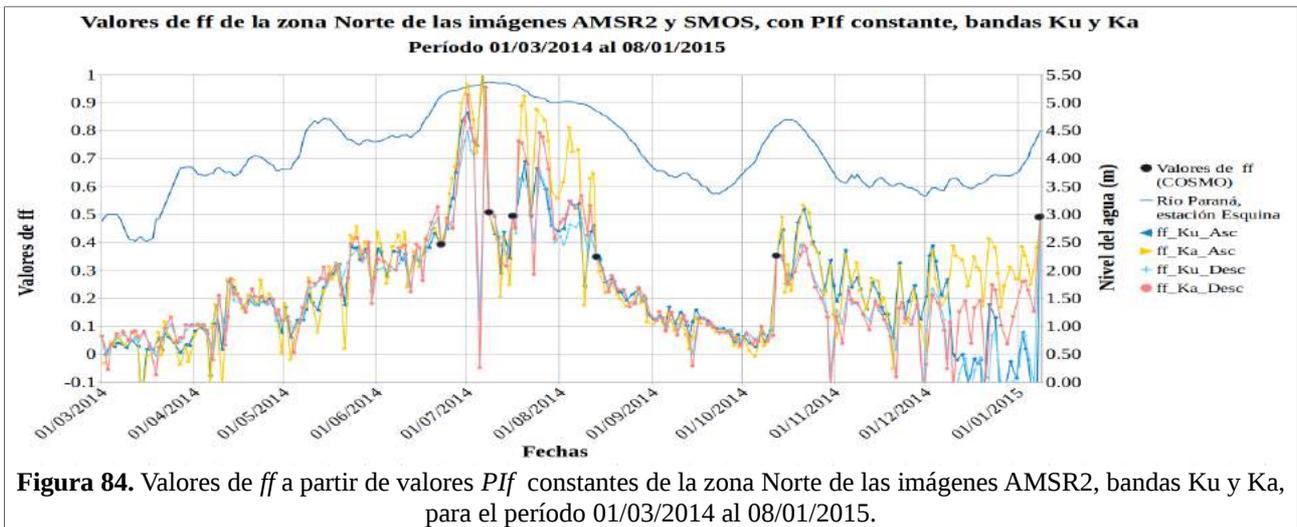
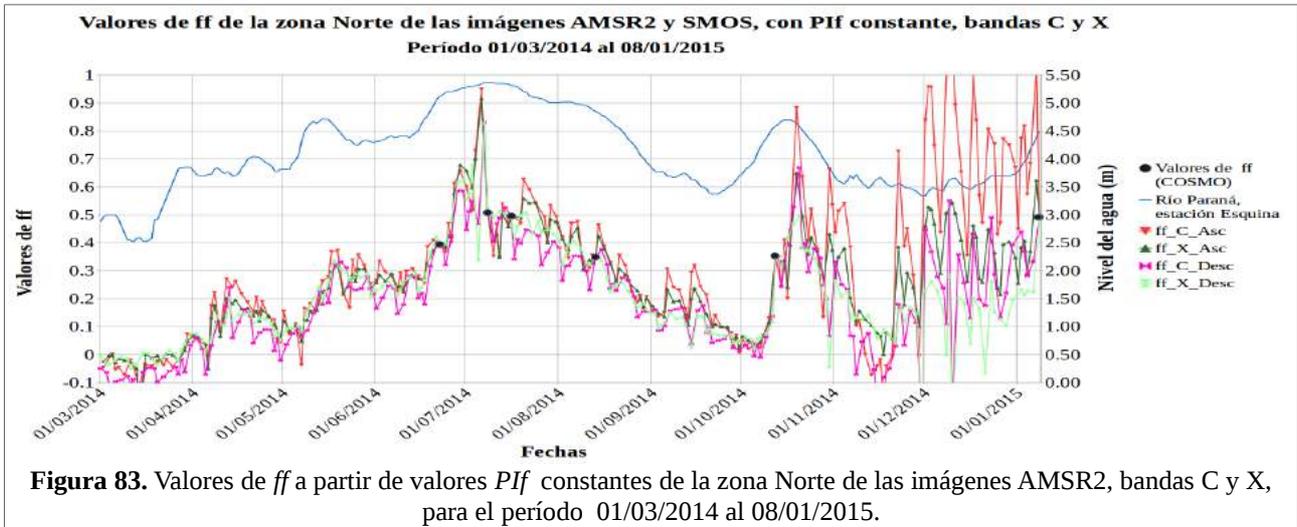
Figura 82. Valores de *Pif* constante de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L), tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.

4.4.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Norte, calculada con el esquema de PIf constante.

En las figuras 83, 84 y 85, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y PI_{inf} presentados en las tablas 21 y 25 respectivamente y los valores de PIf obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 82) para el cálculo.

Analizando los valores de ff de AMSR2 y SMOS se observa lo siguiente:

- En forma general para todo el período se observa que la banda L tanto ascendente y descendente presenta mayor variabilidad en comparación a las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes, esto es esperable debido a que tiene un período de revisita menor (3 días), su longitud de onda es mayor (~23 cm) y tiene menor cantidad de datos en este período (148 para ascendente y 102 para descendente) con respecto a los datos de AMSR2 (199 para ascendente y 198 para descendente).
- Del 01/03/2014 al 23/06/2014 todas las bandas siguen la tendencia del NDA y la banda L ascendente y descendente presenta mayor variabilidad.
- Del 23/06/2014 al 13/08/2014 las bandas C y X descendentes son las que mejor siguen la tendencia del NDA, las bandas C y X ascendentes presentan valores un poco superiores que las bandas C y X descendentes y presentan un pico de datos el 06/07/2014, las bandas Ku y Ka ascendentes y descendentes siguen la tendencia pero presentan muchos saltos en sus datos y las bandas Ku y Ka ascendentes presentan mayor variabilidad, en la banda L descendente se observa que sigue adecuadamente la tendencia con el NDA, mientras que la banda L ascendente presenta ruido.
- Del 13/08/2014 al 13/10/2014 las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes tiene un buen acuerdo con el NDA, la banda L ascendente y descendente también sigue la tendencia pero con mayor variabilidad en comparación a las demás bandas.
- Del 13/10/2014 al 08/12/2014 las bandas Ku y Ka son las que mejor acuerdo tiene con la tendencia del NDA, las bandas C y X ascendentes y descendentes siguen la tendencia pero con mucha variabilidad y la banda L presenta ruido y se observa que los valores de ff comienzan a tomar valores menores a 0.
- Del 08/12/2014 al final del período todas las bandas presentan muchos saltos en sus datos, pero las bandas que mejor siguen la tendencia del NDA son las bandas C y X descendentes, la banda Ka ascendente y descendente y la banda L ascendente y descendente presentan ruido.
- El período en el que ff presenta ruido coincide con el período en el cual PI_{obs} presenta valores ruidosos, que coincide con el período en el cual NDA está por debajo de los 3 m. Por lo tanto, la mala performance del algoritmo de obtención de fracción de área inundada puede explicarse por 2 causas no excluyentes: 1) la amplificación del ruido presente en PI_{obs} , que es la variable observacional al algoritmo y 2) la posibilidad, ya explicada, que con NDA menores a 3 m la planicie y el río posean dinámicas desacopladas.



4.4.4 Valores de *Pif* en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Norte.

En la figura 86, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de *Pif* correspondientes a las fechas de las imágenes COSMO Skymed para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSR2 ascendentes y descendentes y banda L de las imágenes SMOS ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 26.

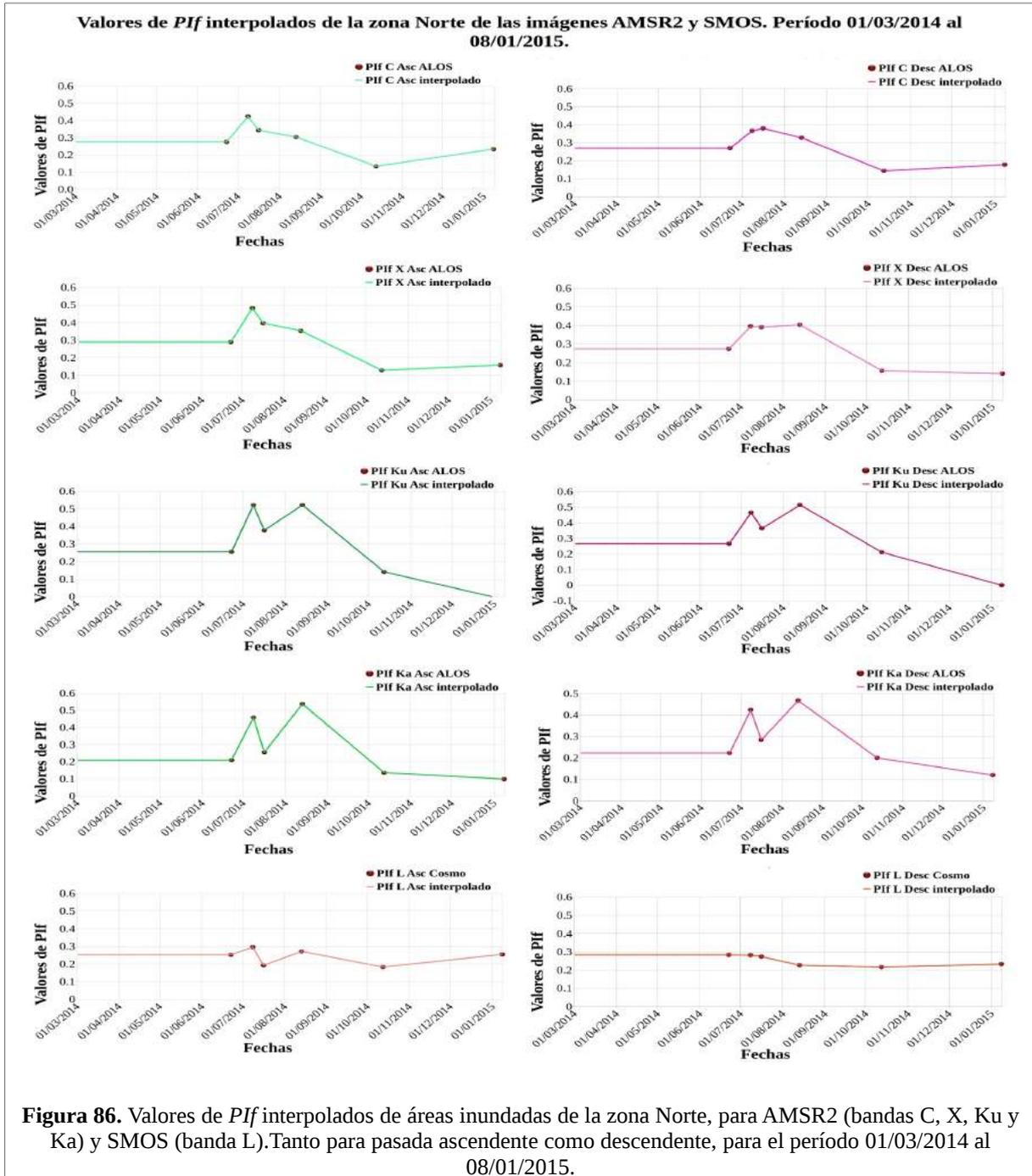


Figura 86. Valores de *Pif* interpolados de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.

4.4.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Norte, calculada con valores de *PIf* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 87, 88 y 89, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *PIf* interpolados (ver figura 86) para el cálculo.

Analizando los valores de *ff* de AMSR2 y SMOS se observa lo siguiente:

- En forma general para todo el período se observa que la banda L tanto ascendente y descendente presenta mayor variabilidad en comparación a las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes, esto es esperable debido a que tiene un período de revisita menor (3 días), su longitud de onda es mayor (~23 cm) y tiene menor cantidad de datos en este período (148 para ascendente y 102 para descendente) con respecto a los datos de AMSR2 (199 para ascendente y 198 para descendente).
- Del 01/03/2014 al 08/07/2014 todas las bandas tienen un buen acuerdo con el NDA, las bandas que presentan mayor variabilidad son las bandas Ku y Ka descendente y la banda L ascendente y descendente presentan mas variación en sus datos en comparación que el resto de bandas.
- Del 08/07/2014 al 12/10/2014 todas las bandas tienen un buen acuerdo con el NDA, las bandas que mejor acuerdo tiene son las bandas Ku y Ka tanto ascendente como descendente y las bandas C y X descendente, las bandas C y X ascendente presentan valores un poco superiores que las bandas indicadas anteriormente y la banda L ascendente y descendente presentan mucha mayor variabilidad y del 08/07/2014 al 27/07/2014 la banda L ascendente presenta ruido.
- Del 12/10/2014 al 13/11/2014 las bandas tiene un mediano acuerdo con el NDA y cerca del 13/11/2014 se observa que los valores de *ff* comienzan a tomar valores menores a 0.
- Del 13/11/2014 al final del período, las bandas C y X siguen el NDA pero con variabilidad con varios picos y bajadas en sus datos, las bandas Ka ascendente y descendente siguen la tendencia del NDA y la banda Ku ascendente y descendente presenta ruido, finalmente la banda L ascendente y descendente sigue el NDA pero con mucha mas variabilidad, esto debido a la menor cantidad de datos en comparación a las otras bandas y por el período de revisita del satélite SMOS de cada 3 días.

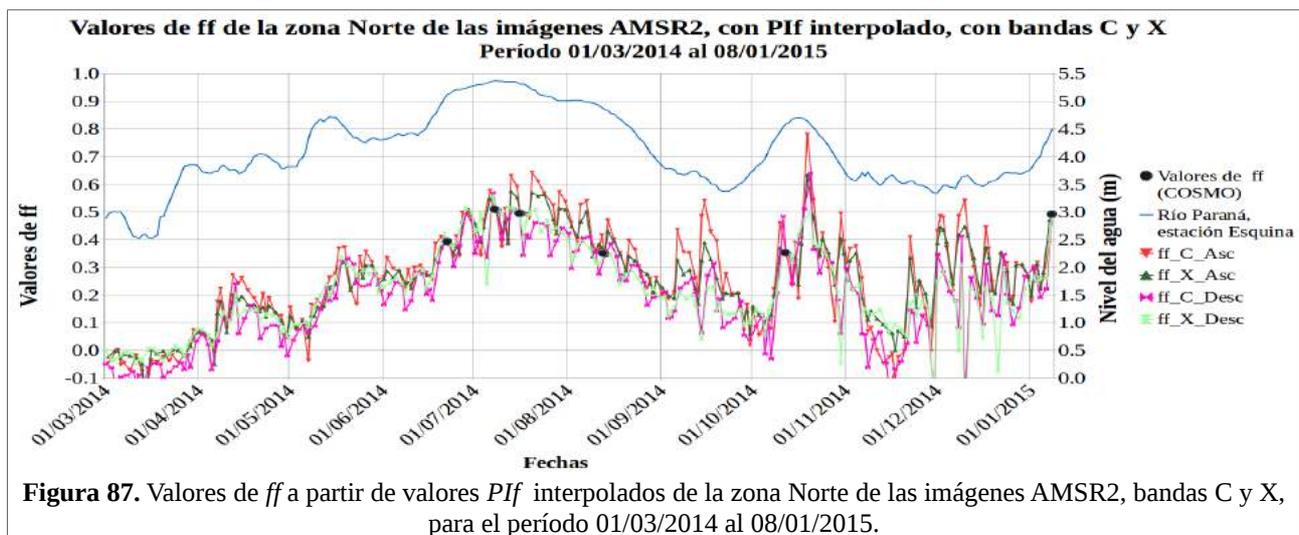
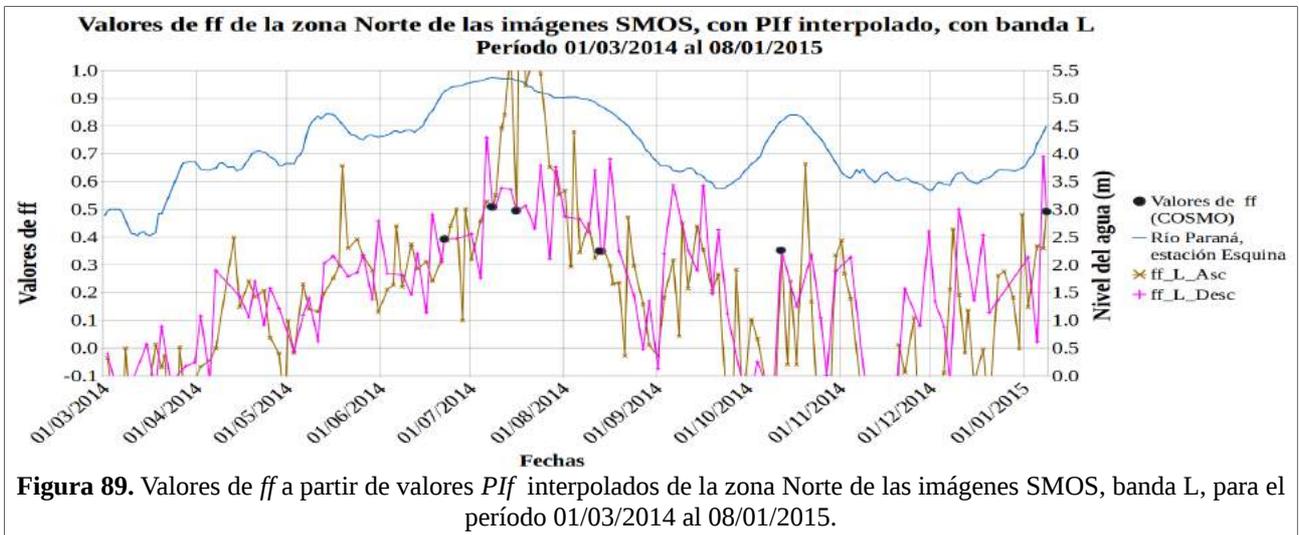
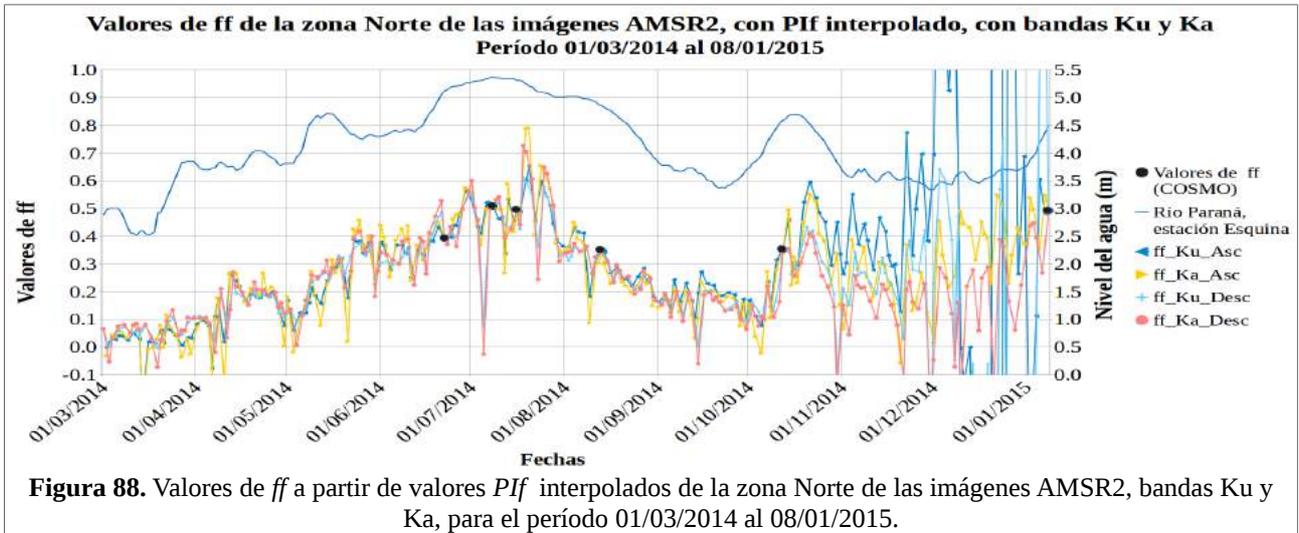


Figura 87. Valores de *ff* a partir de valores *PIf* interpolados de la zona Norte de las imágenes AMSR2, bandas C y X, para el período 01/03/2014 al 08/01/2015.



4.4.6 Comparación de los ff obtenidos mediante los distintos métodos de PIf , tanto constante como de interpolación.

Del 01/03/2014 al 22/06/2014 los dos métodos de ff no presentan diferencia esto es debido a que ambos métodos de interpolación usan los mismos datos para el cálculo de ff para este intervalo de tiempo como se puede ver en las figuras 82 y 86. En forma general se observa que el PIf interpolado sigue mejor la tendencia del NDA que el ff a partir del PIf constante.

Del 23/06/2014 al 09/07/2014 las bandas C y X ascendentes a partir del PIf constante presenta mayor variabilidad; del 16/07/2014 al 13/08/2014 la banda Ka ascendente y descendente a partir del PIf constante presenta mayor variación; del 12/10/2014 al 08/01/2015 Las bandas C y L ascendentes a partir del PIf constante presenta mayor variabilidad, mientras que la bandas Ku ascendente del PIf interpolado presenta mayor variación.

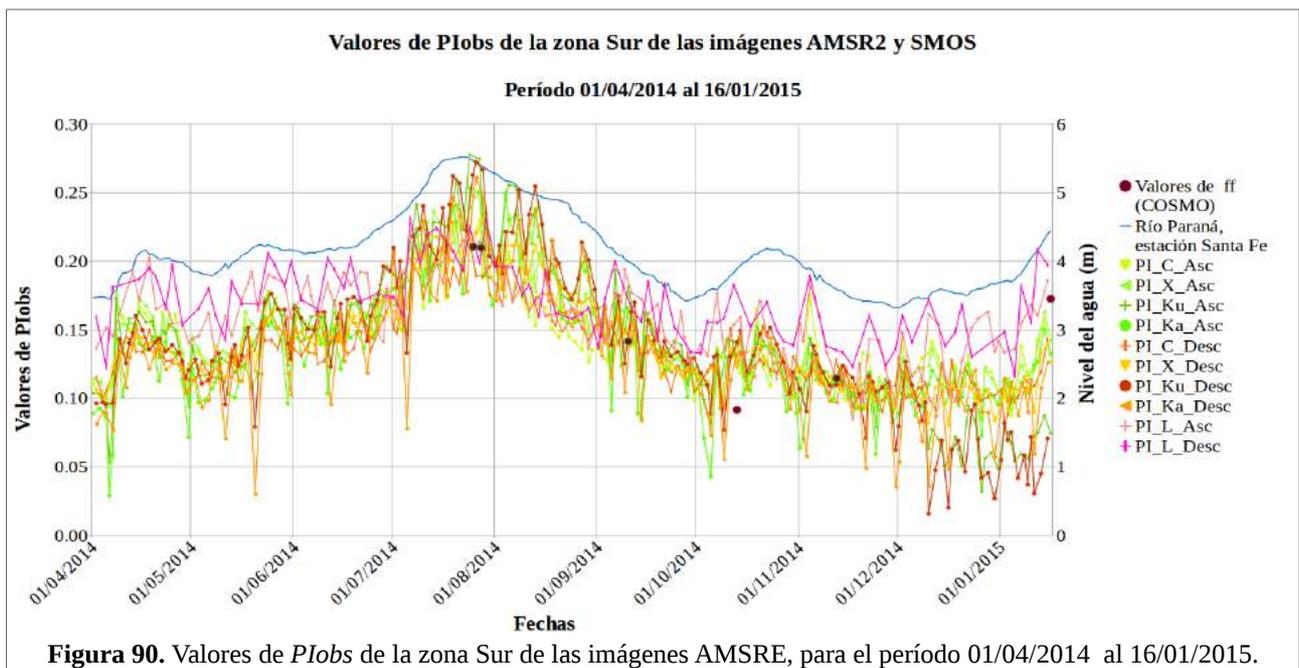
Este comportamiento es el esperado, ya que si bien ambos esquemas asumen un cierto comportamiento del PIf , que depende de la altura del agua dentro de la planicie, a priori, la suposición de un aumento gradual del PIf parecía más realista que un valor constante con saltos abruptos.

4.5 Tercera época de análisis de la zona Sur.

Se analizó el comportamiento temporal del $PIobs$ de cada uno de los sistemas de microondas pasivas en comparación con la fracción del área de inundación derivada de las imágenes COSMO Skymed correspondiente al período 01/04/2014 al 16/01/2015, y el nivel hidrométrico del río Paraná medido en la estación Santa Fe (ver figura 90).

4.5.1 Valores de $PIobs$ de la zona Sur.

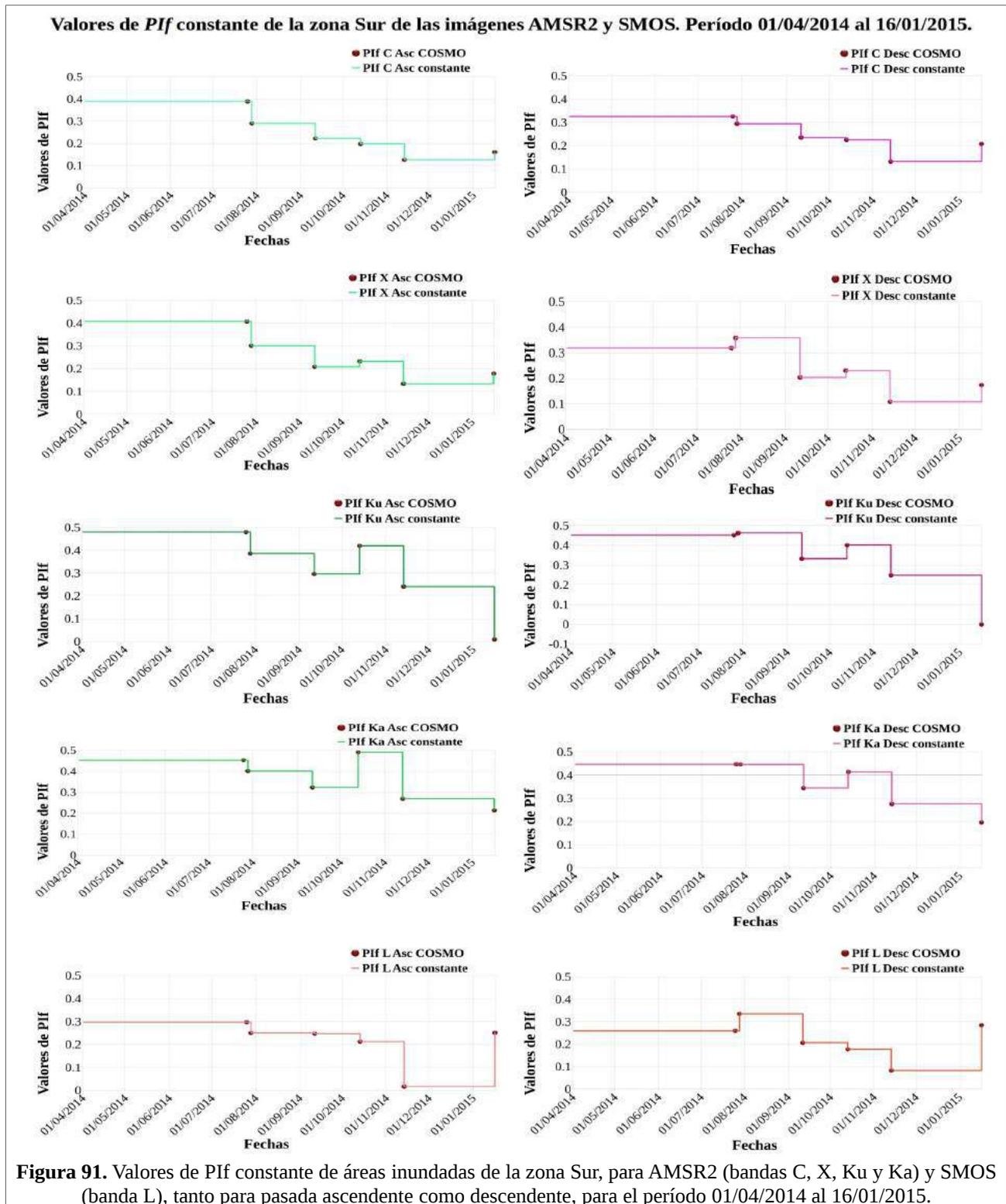
La figura 90 muestra que los datos de AMSR2 y SMOS de $PIobs$ tienen un buen acuerdo con las estimaciones de ff de las imágenes de COSMO Skymed. Se observa que los datos de ff de las imágenes de microondas pasivas siguen la tendencia del NDA del río; en todo el período las bandas tienen un buen acuerdo con el NDA a excepción del final del período del 09/12/2014 al 16/01/2015 en donde se observa una mayor variabilidad en las bandas y la banda Ku ascendente y descendente presenta menores valores; la banda L sobresale de las demás bandas, a excepción del 07/07/2014 al 03/09/2014 en donde se entremezcla con el resto de bandas.



4.5.2 Valores de PIf en el esquema de valor constante de la zona Sur.

En la figura 91, se observan los valores de PIf calculados para las fechas de adquisición de las imágenes COSMO Skymed y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSR2 ascendentes y descendentes y banda L de las imágenes SMOS ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los

valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 29. Esta figura puede ser comparada con la figura 95, para observar la diferencia entre los esquemas metodológicos estudiados.

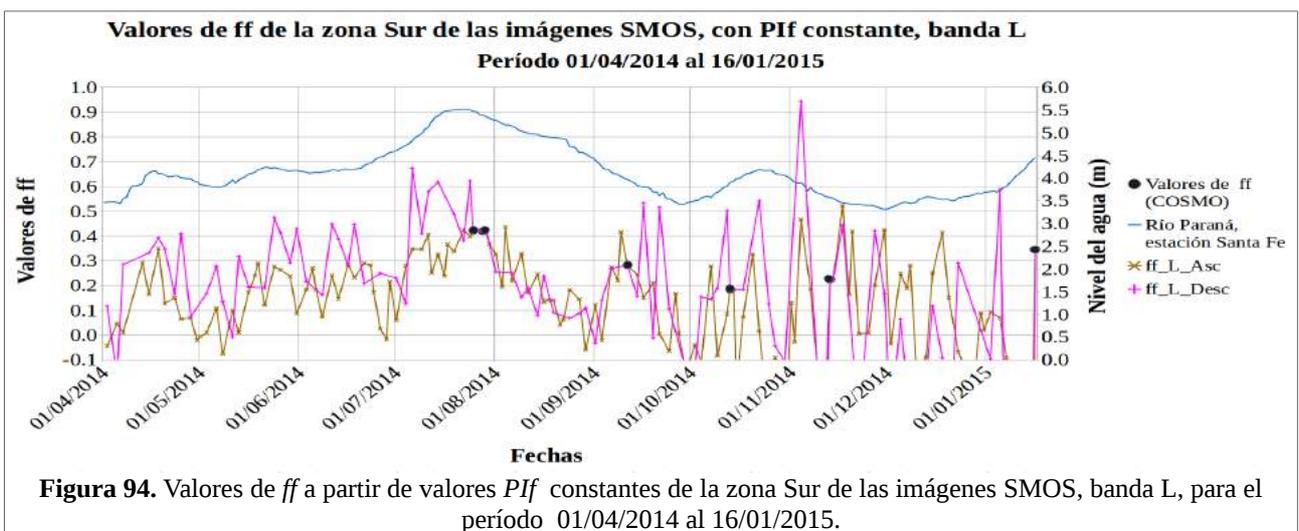
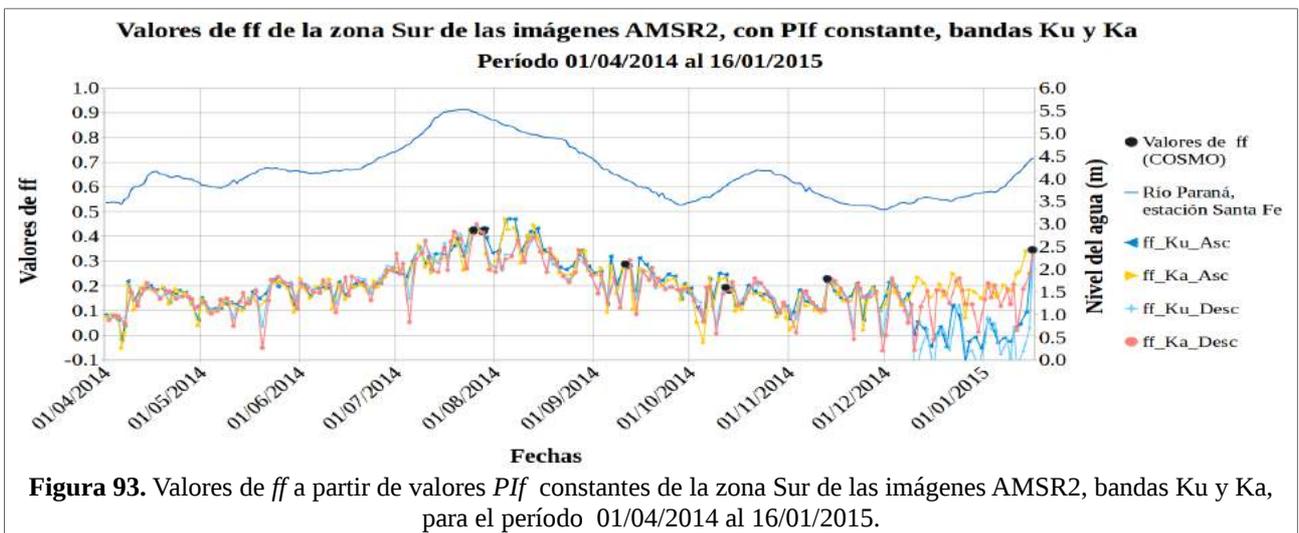
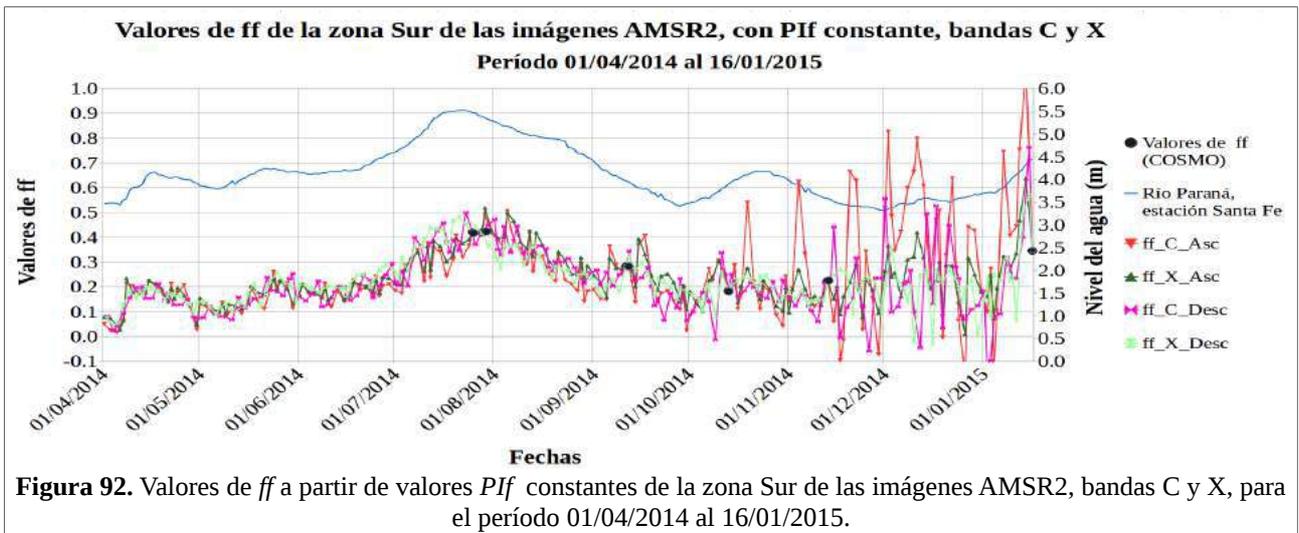


4.5.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Sur, calculada con el esquema de PIf constante.

En las figuras 92, 93 y 94, se muestran la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y PI_{inf} presentados en las tablas 21 y 28 respectivamente y los valores de PIf obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 91) para el cálculo.

Analizando los valores de ff de AMSR2 y SMOS se observa lo siguiente:

- En forma general para todo el período se observa que la banda L tanto ascendente y descendente presenta mayor variabilidad en comparación a las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes, esto es esperable debido a que tiene un período de revisita menor (3 días), su longitud de onda es mayor (~23 cm) y tiene menor cantidad de datos en este período (135 para ascendente y 95 para descendente) con respecto a los datos de AMSR2 (184 para ascendente y 183 para descendente).
- Del 01/04/2014 al 14/10/2014 todas las bandas siguen la tendencia del NDA, la banda L ascendente y descendente presenta la mayor variabilidad, esto podría deberse a su mayor longitud de onda que permite que la emisión del suelo atraviese la vegetación sin ser atenuada o siendo menos atenuada que las longitudes de onda más cortas; las bandas C y X ascendentes y descendentes presentan un poco de mayor variabilidad que las bandas Ku y Ka ascendentes y descendentes que son las que mejor siguen la tendencia del NDA.
- Del 14/10/2014 al 07/12/2014 las bandas Ku y Ka tienen un buen acuerdo con el NDA, las bandas C y X descendentes tienen un buena acuerdo con el NDA pero presentan mayor variabilidad, mientras que las bandas C y X ascendentes tienen mucha variabilidad hasta se podría en algunos intervalos de fecha considerarse ruido, la banda L ascendente sigue la tendencia del NDA pero con mucha variabilidad y la banda L descendente presenta la mayor variabilidad de todas las bandas.
- Del 07/12/2014 al 16/01/2016 las bandas Ku y Ka ascendentes y descendentes tienen un buen acuerdo con el NDA, pero la banda Ku presenta valores menores, la banda X ascendentes y descendentes tienen un mediano acuerdo con el NDA y presentan variabilidad en sus datos, mientras que la banda C ascendente y descendente presenta ruido.
- Finalmente la banda L ascendente y descendente presenta la mayor variabilidad de todas las bandas. El período en el que ff presenta ruido coincide con el período en el cual PI_{obs} presenta valores ruidosos, que coincide con el período en el cual NDA está por debajo de los 3 m. Por lo tanto, la mala performance del algoritmo de obtención de fracción de área inundada puede explicarse por 2 causas no excluyentes: 1) la amplificación del ruido presente en PI_{obs} , que es la variable observacional al algoritmo y 2) la posibilidad, ya explicada, que con NDA menores a 3 m la planicie y el río posean dinámicas desacopladas.



4.5.4 Valores de *Pif* en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Sur.

En la figura 95, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de *Pif* correspondientes a las fechas de las imágenes COSMO Skymed para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSR2 ascendentes y descendentes y banda L de las imágenes SMOS ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 29.

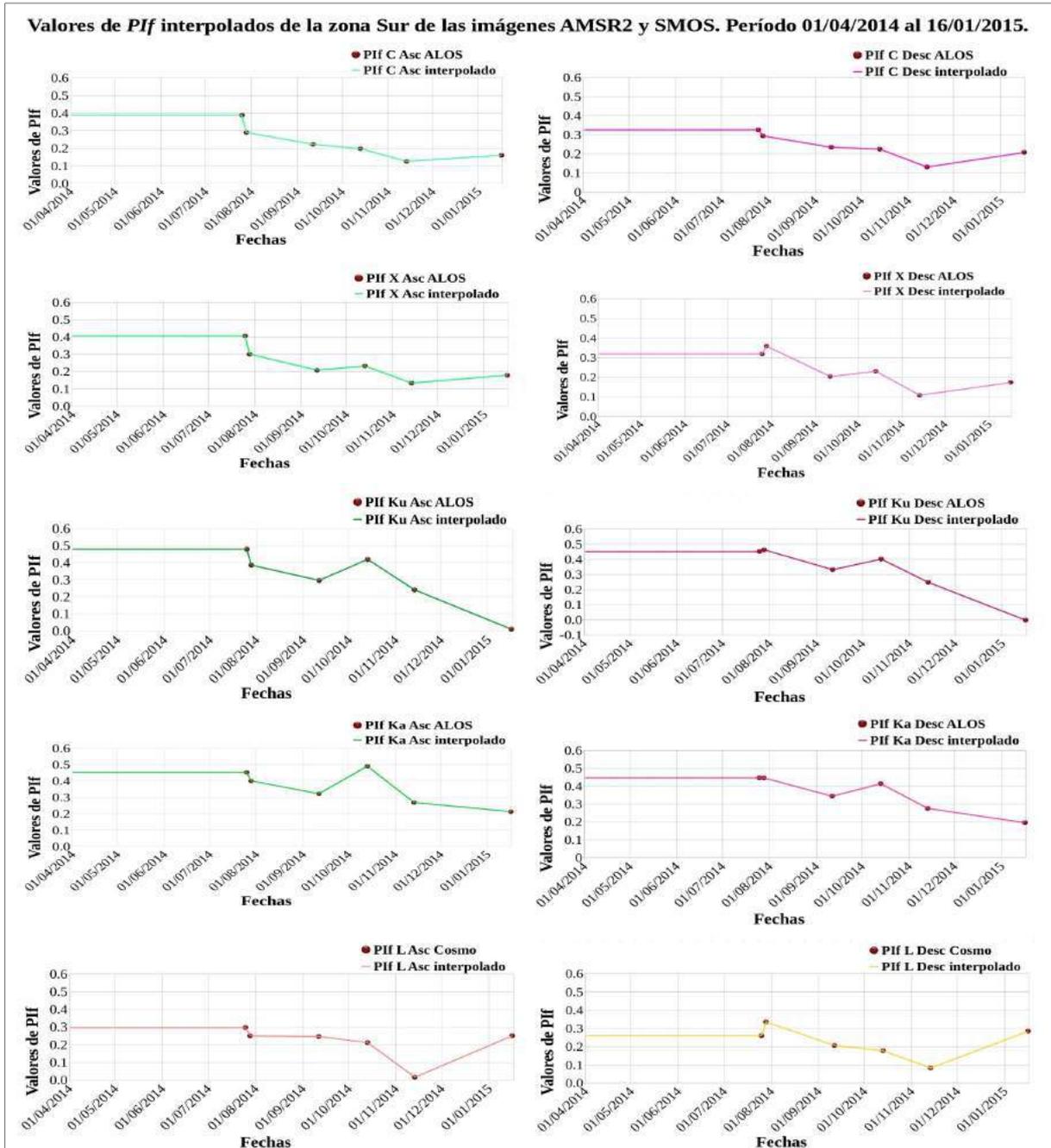


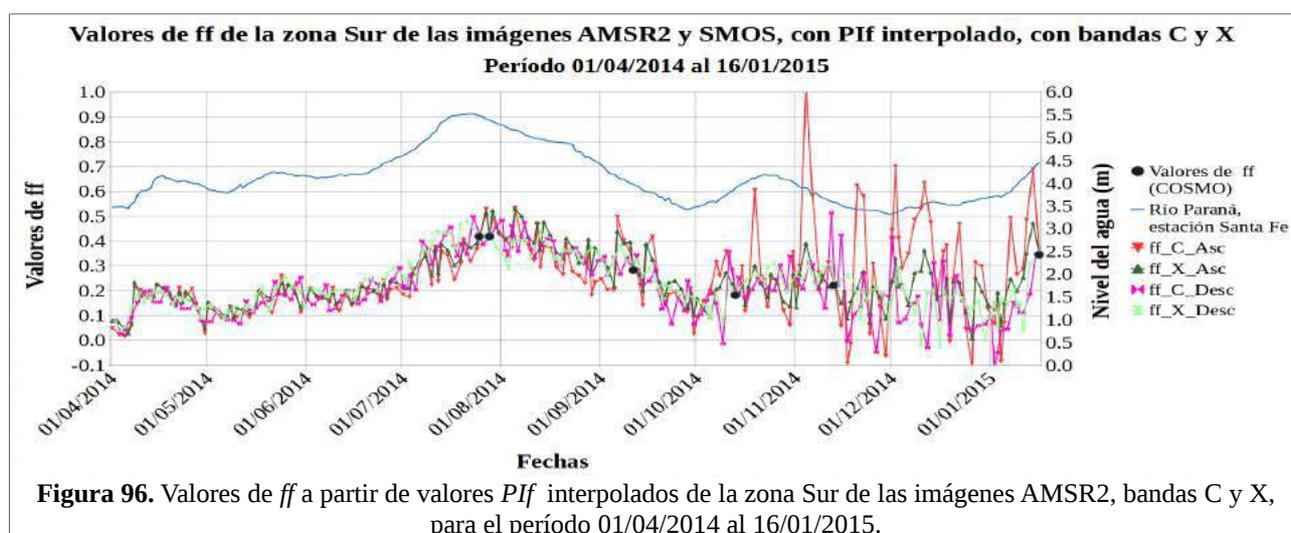
Figura 95. Valores de *Pif* interpolados de áreas inundadas de la zona Sur, para AMSR2 (bandas C, X, Ku y Ka) y SMOS (banda L). Tanto para pasada ascendente, como descendente, para el período 01/04/2014 al 16/01/2015.

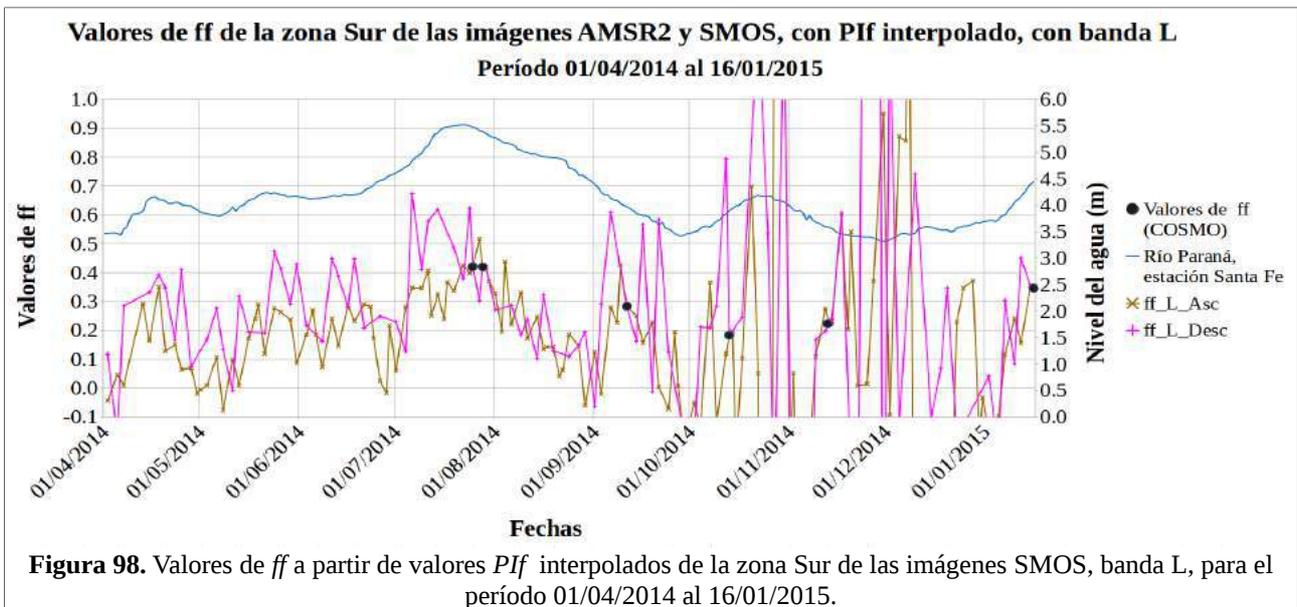
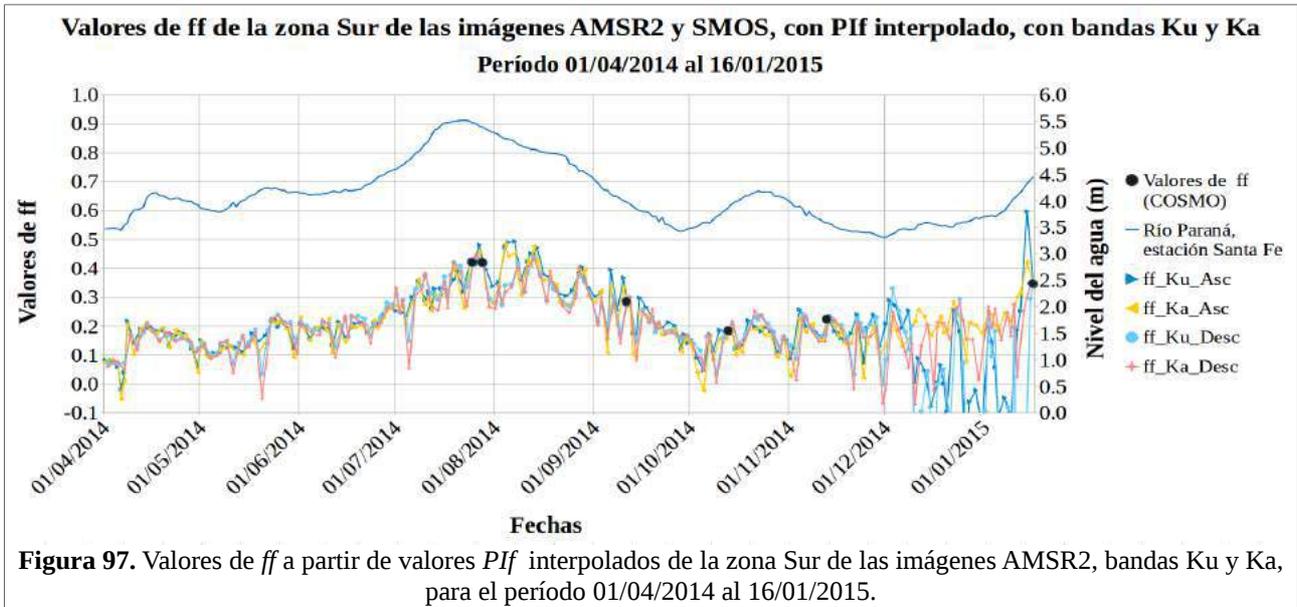
4.5.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Sur, calculada con valores de *PIf* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 96, 97 y 98, se muestran la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *PIf* interpolados (ver figura 95) para el cálculo.

Analizando los valores de *ff* de AMSR2 y SMOS se observa lo siguiente:

- En forma general para todo el período se observa que la banda L tanto ascendente y descendente presenta mayor variabilidad en comparación a las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes, esto es esperable debido a que tiene un período de revisita menor (3 días), su longitud de onda es mayor (~23 cm) y tiene menor cantidad de datos en este período (135 para ascendente y 95 para descendente) con respecto a los datos de AMSR2 (184 para ascendente y 183 para descendente).
- Del 01/04/2014 al 14/10/2014 todas las bandas siguen la tendencia del NDA, la banda L ascendente y descendente presenta la mayor variabilidad, esto podría deberse a su mayor longitud de onda que permite que la emisión del suelo atraviese la vegetación sin ser atenuada o siendo menos atenuada que las longitudes de onda más cortas; las bandas C y X ascendentes y descendentes presentan una mayor variabilidad que las bandas Ku y Ka ascendentes y descendentes que son las que mejor siguen la tendencia del NDA.
- Del 14/10/2014 al 07/12/2014 las bandas Ku y Ka tienen un buen acuerdo con el NDA, las bandas C y X descendentes tienen un buena acuerdo con el NDA pero presentan mayor variabilidad, mientras que las bandas C y X ascendentes tienen mucha variabilidad hasta se podría en algunos intervalos de fecha ser considerado ruido, la banda L ascendente y descendente presentan ruido.
- Del 07/12/2014 al 16/01/2016 las bandas Ku y Ka ascendentes y descendentes tienen un buen acuerdo con el NDA, pero la banda Ku presenta valores menores, la banda X ascendentes y descendentes tienen un mediano acuerdo con el NDA y presentan variabilidad en sus datos, mientras que la banda C ascendente y descendente presenta variabilidad en sus datos, finalmente la banda L ascendente y descendente presenta la mayor variabilidad de todas las bandas.





4.5.6 Comparación de los ff obtenidos mediante los distintos métodos de PIf , tanto constante como de interpolación.

Del 01/04/2014 al 25/07/2014 los dos métodos de ff no presentan diferencia esto es debido a que ambos métodos de interpolación usan los mismos datos para el cálculo de ff para este intervalo de tiempo como se puede ver en las figuras 91 y 95. En forma general para las bandas C, X, Ku y Ka no se observa diferencias significativas entre los métodos del PIf tanto constante como interpolado y en el caso de la banda L se observa más variación del 13/10/2014 al 16/01/2015 en el PIf interpolado que en el constante.

Este comportamiento es el inesperado, ya que si bien ambos esquemas asumen un cierto

comportamiento del PIf , que depende de la altura del agua dentro de la planicie, a priori, la suposición de un aumento gradual del PIf parecía más realista que un valor constante con saltos abruptos.

4.6 Segunda época de análisis de la zona Total.

Se analizó el comportamiento temporal del $PIobs$ de cada uno de los sistemas de microondas pasivas en comparación con la fracción del área inundada derivada de las imágenes ALOS PALSAR correspondiente al período 01/06/2009 al 30/06/2011, y el nivel hidrométrico del río Paraná medido en la estación Santa Fe (ver figura 99).

Debido a la poca cantidad de datos de las estimaciones de ff de la imágenes de ALOS PALSAR (dos combinaciones, ver tabla 20), no se puede determinar el grado de acuerdo entre los valores de $PIobs$ de los sistemas de microondas pasivas con las estimaciones de ff de la imágenes de ALOS PALSAR.

Nota: Para ver los gráficos de las zonas Norte y Sur correspondiente al período 2, se puede consultar en el ANEXO B.

4.6.1 Valores de $PIobs$ de la zona Total.

En la figura 99, se observa que los valores del $PIobs$ obtenidos del sistema de microondas pasivas AMSRE del 01/06/2009 al 29/12/2009 tienen un buen acuerdo con la tendencia del NDA del río; del 29/12/2009 al 16/10/2010, se observa un mediano acuerdo con la tendencia del NDA del río; mientras que del 16/10/2010 al 30/06/2011 se vuelve a observar un buen acuerdo con la tendencia del NDA del río.

La banda C ascendente y descendente tiene valores superiores a las demás bandas, mientras que la banda Ka ascendente es la que menores valores presenta y la banda X tanto ascendente como descendente tiene valores un poco superiores a las bandas Ku y Ka.

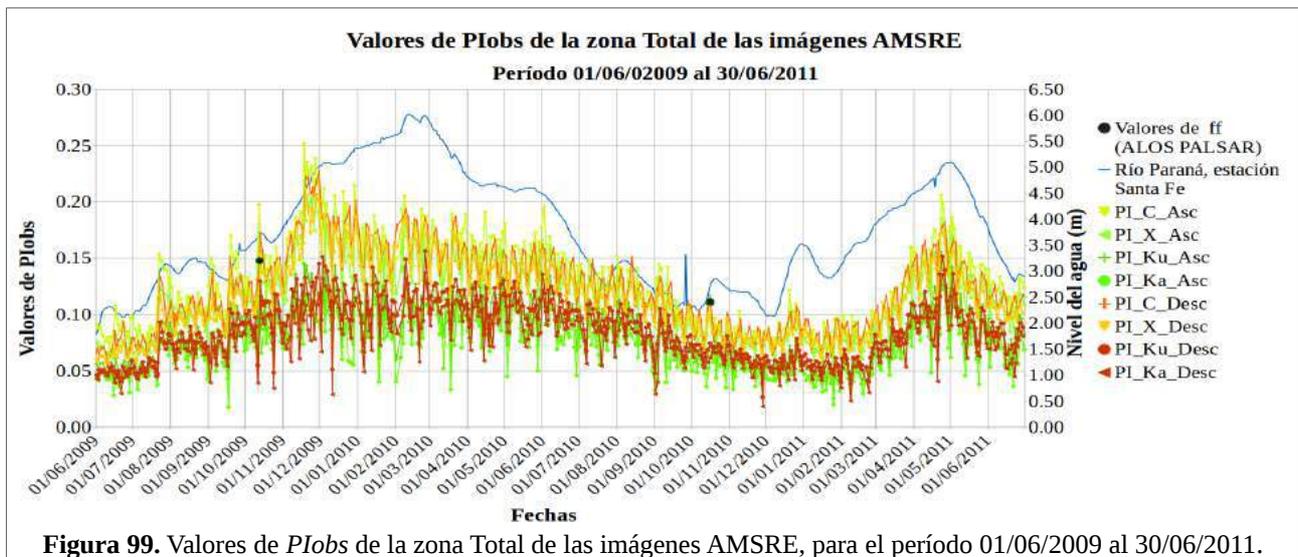


Figura 99. Valores de $PIobs$ de la zona Total de las imágenes AMSRE, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.

4.6.2 Valores de *Pif* según el esquema de valor constante de la zona Total.

En la figura 100, se observan los valores de *Pif* calculados para las fechas de adquisición de imágenes ALOS PALSAR y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente.

Estos datos fueron calculados usando los valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 23. Esta figura puede ser comparada con la figura 105 para observar la diferencia entre los esquemas metodológicos estudiados.

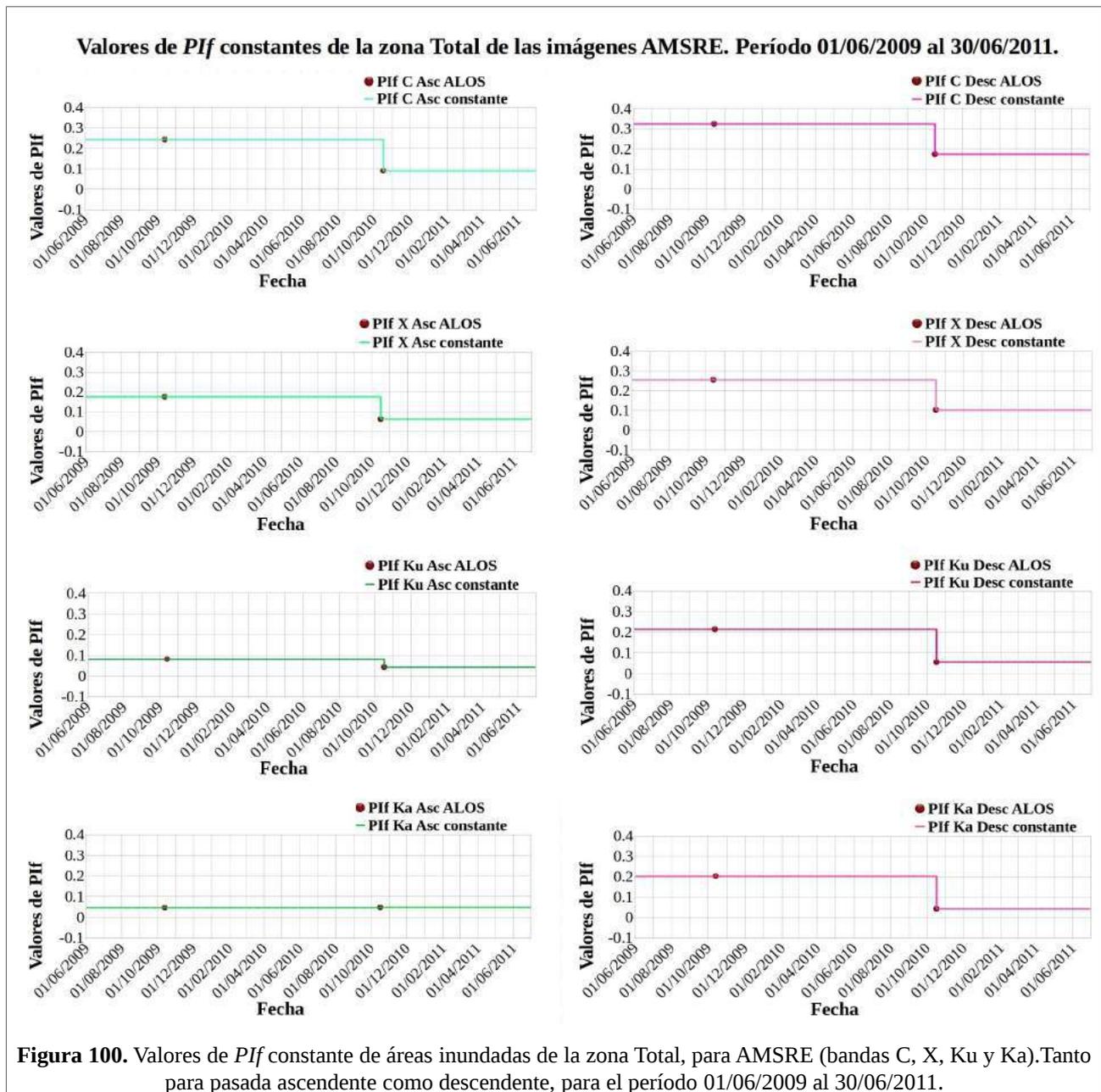


Figura 100. Valores de *Pif* constante de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.

4.6.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Total, calculada con el esquema de PIf constante.

En las figuras 101, 102, 103 y 104, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y PI_{inf} presentados en las tablas 21 y 22 respectivamente y los valores de PIf obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 100) para el cálculo.

Analizando los valores de ff de AMSRE se observa lo siguiente:

- Del 01/06/2009 al 13/10/2009, las bandas C y X tanto ascendentes como descendentes y las bandas Ku y Ka descendentes siguen la tendencia del NDA, pero con valores un poco superiores de las bandas ascendentes, mientras que del 22/07/2009 al final del período las bandas Ku y Ka ascendentes presentan ruido; del 01/06/2009 al 29/12/2009 los valores de ff de las bandas C ascendente y descendente, X ascendente y descendente, Ku descendente y Ka descendente de AMSRE siguen la tendencia del NDA y la banda X ascendente sobresale sobre el resto de bandas.
- Del 29/12/2009 al 08/02/2010 los valores de ff en las bandas C y X tienen un mal acuerdo con la tendencia del NDA, mientras que las bandas Ku y Ka descendentes tienen un mediano acuerdo con la tendencia del NDA.
- Del 08/02/2010 al 17/10/2010 las bandas C, X, Ku y Ka descendente presentan un buen acuerdo con el NDA; el 17/10/2010 los valores de ff comienzan a tomar valores negativos hasta el 10/03/2011, esto podría indicar, dados los bajos valores de NDA, que la planicie está desacoplada del río, y que los cuerpos de agua de área pequeña se están secando, y como no se está tomado en cuenta en el f_w , el algoritmo compensa dando valores de ff menores a 0 y el algoritmo para el cálculo de ff se puede volver errático, este problema fue observado en Sippel *et al.* (1994) para luego del 10/03/2011 comenzar a presentar ruido hasta el final del período.

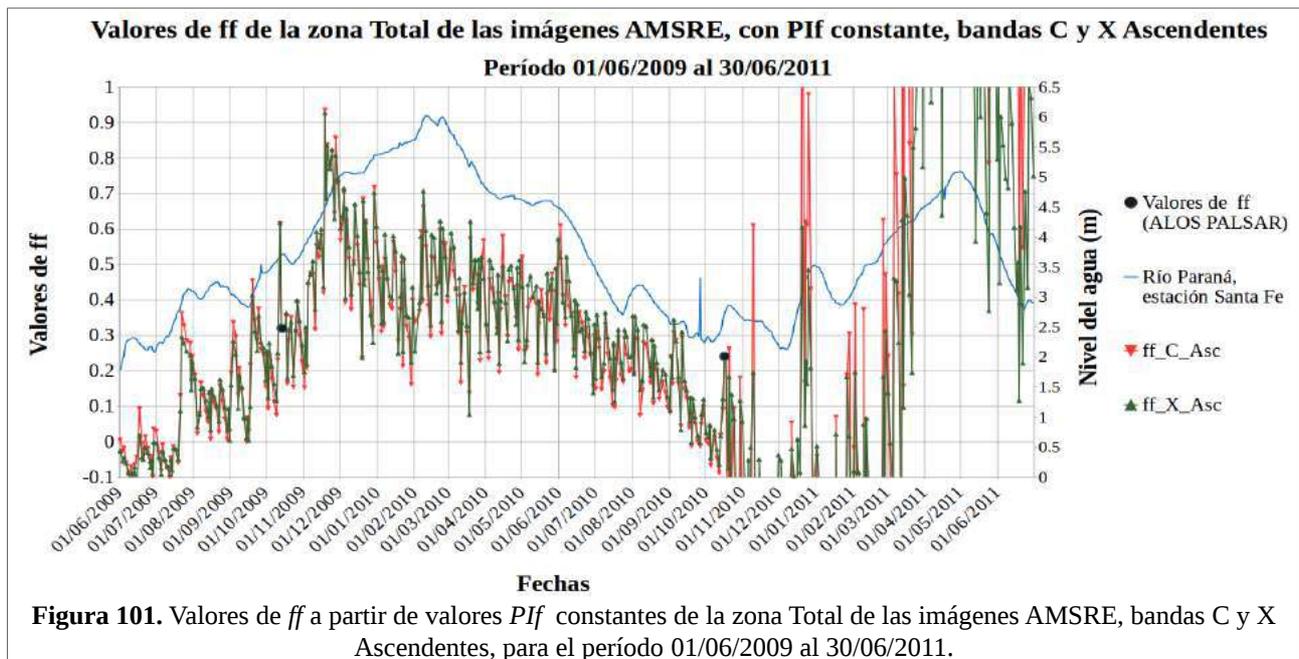
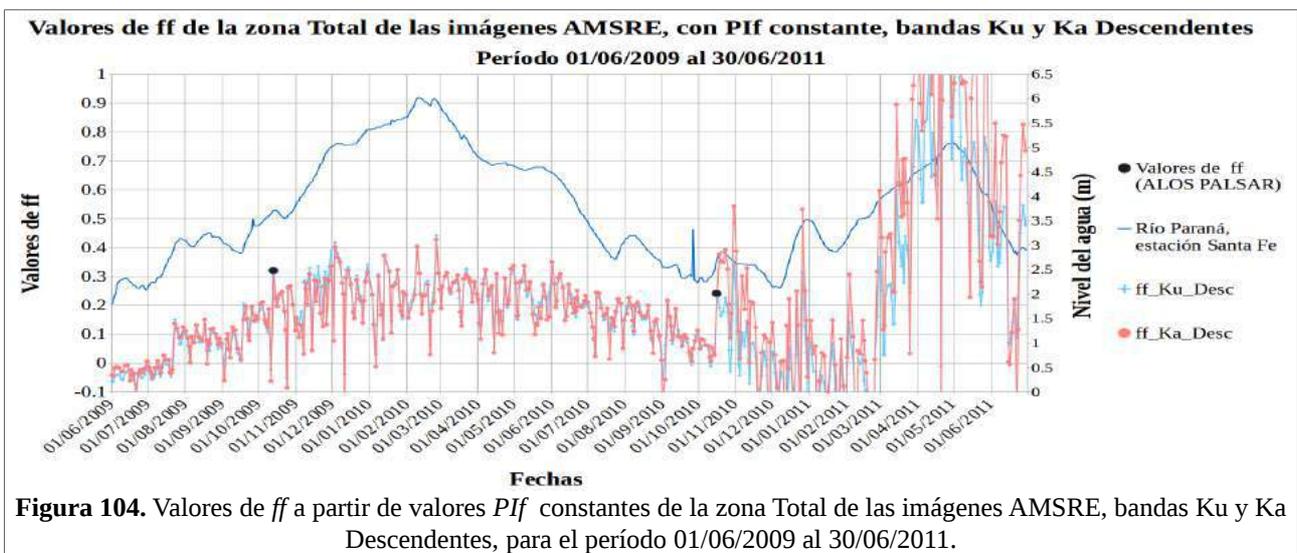
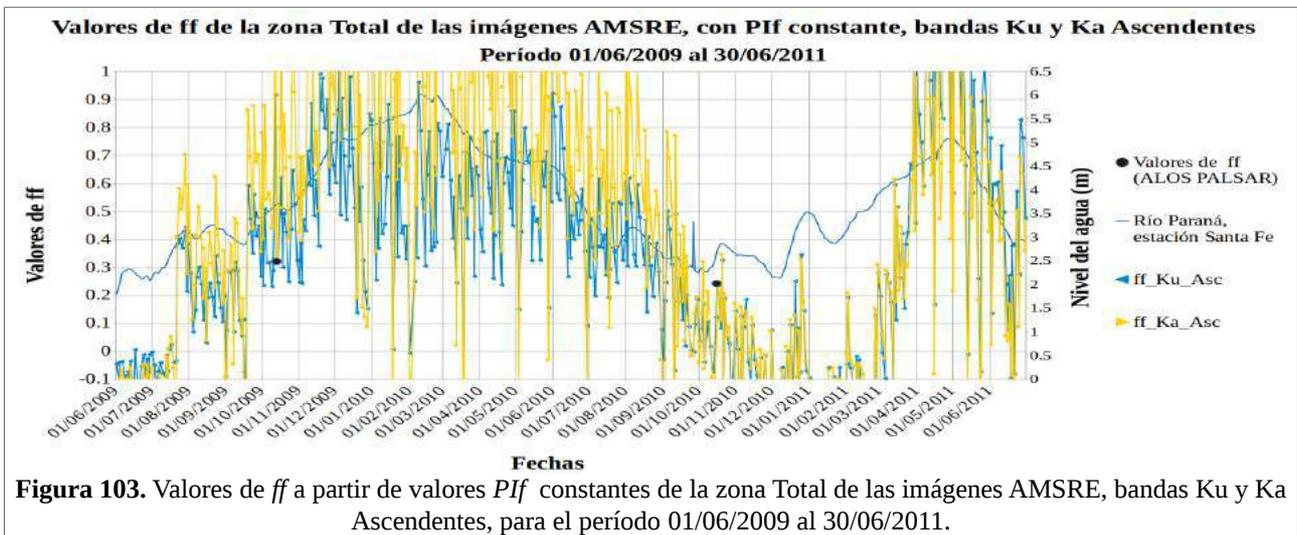
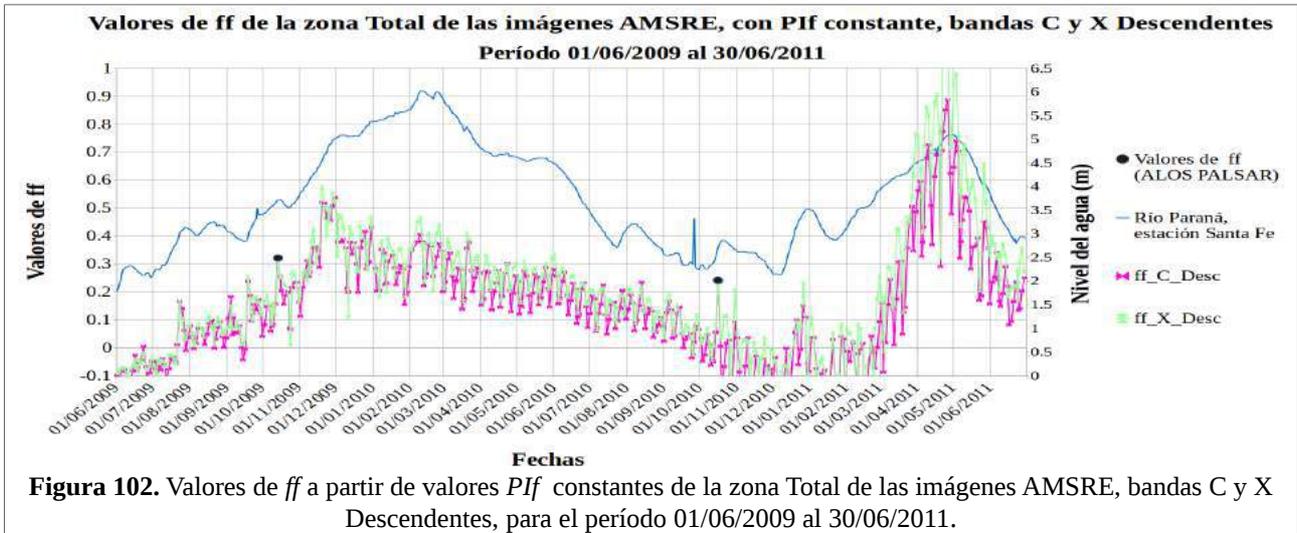


Figura 101. Valores de ff a partir de valores PIf constantes de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendentes, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.



4.6.4 Valores de *Pif* en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Total.

En la figura 105, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de *Pif* correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de las imágenes AMSRE. Estos datos fueron calculados usando los valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 23.

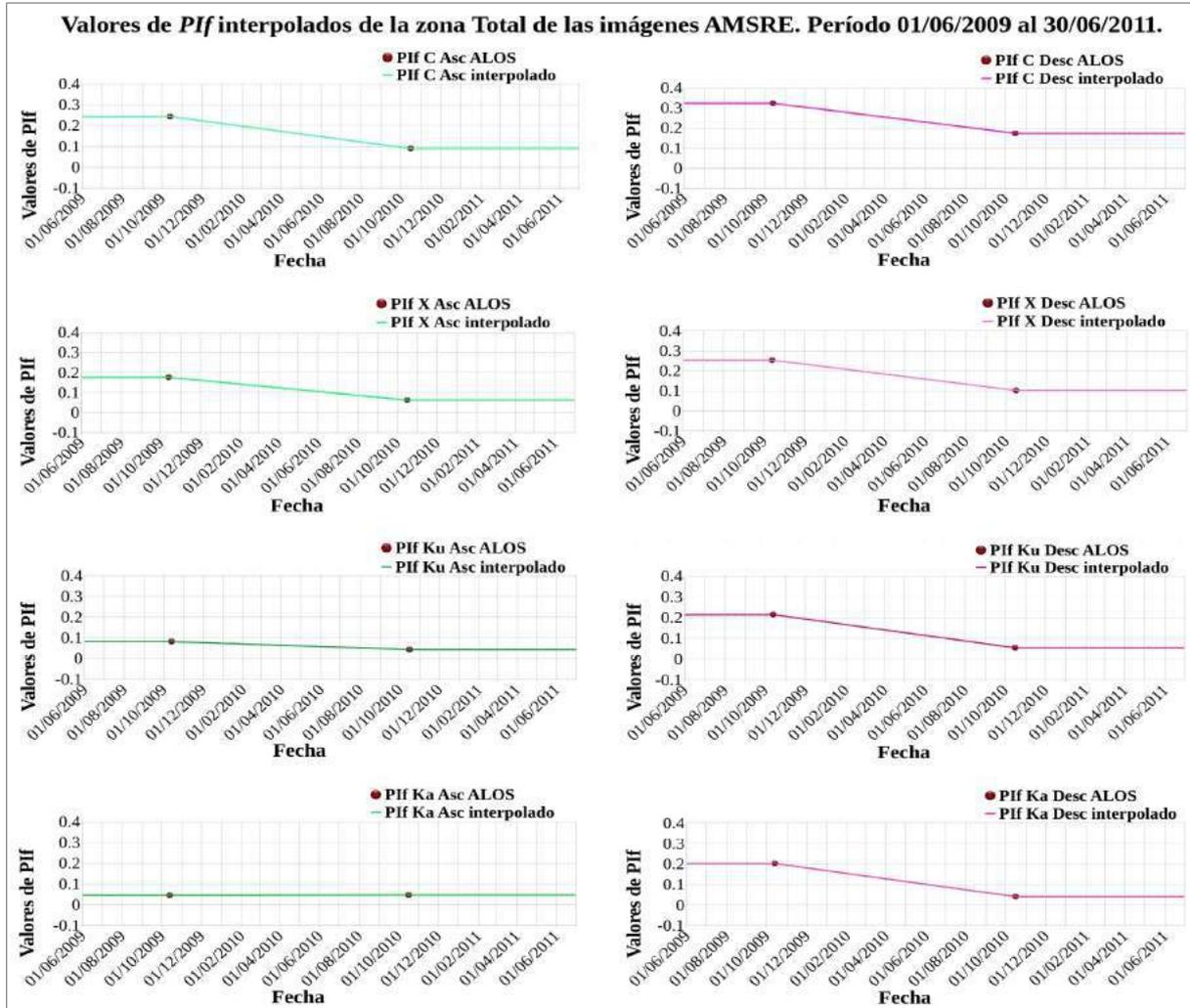


Figura 105. Valores de *Pif* interpolados de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.

4.6.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Total, calculada con valores de *Pif* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 106, 107, 108 y 109, se muestran la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *Pif* interpolados (ver figura 105) para el cálculo.

Analizando los valores de *ff* de AMSRE se observa lo siguiente:

- Del 01/06/2009 al 13/10/2009, las bandas C y X tanto ascendentes como descendentes y las

bandas Ku y Ka descendentes siguen la tendencia del NDA, pero con valores un poco superiores de las bandas C y X ascendentes, mientras que del 22/07/2009 al 13/10/2009 las bandas Ku y Ka ascendentes presentan ruido.

- Del 13/10/2009 al 16/10/2010 las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes presentan ruido, y las bandas C y X descendentes presentan una buena tendencia con el NDA, las bandas Ku y Ka descendentes presentan un buen acuerdo con la tendencia del NDA hasta el 01/06/2010 para luego tener un mediano acuerdo con el NDA hasta el 16/10/2010.
- Del 16/10/2010 al 14/02/2011 se observa un buen acuerdo entre la tendencia del NDA con todas las bandas, sin embargo se observa un poco de ruido en las bandas C y X ascendente y Ka descendente y los valores de ff comienzan a tomar valores menores a 0, esto podría indicar que los cuerpos de agua de áreas pequeñas se están secando, y como no se está tomado en cuenta en el fw , el algoritmo compensa dando valores de ff menores a 0 y el algoritmo para el cálculo de ff se puede volver errático, este problema fue observado en Sippel *et al.* (1994).
- Del 14/02/2011 hasta el final del período todas las bandas presentan ruido.

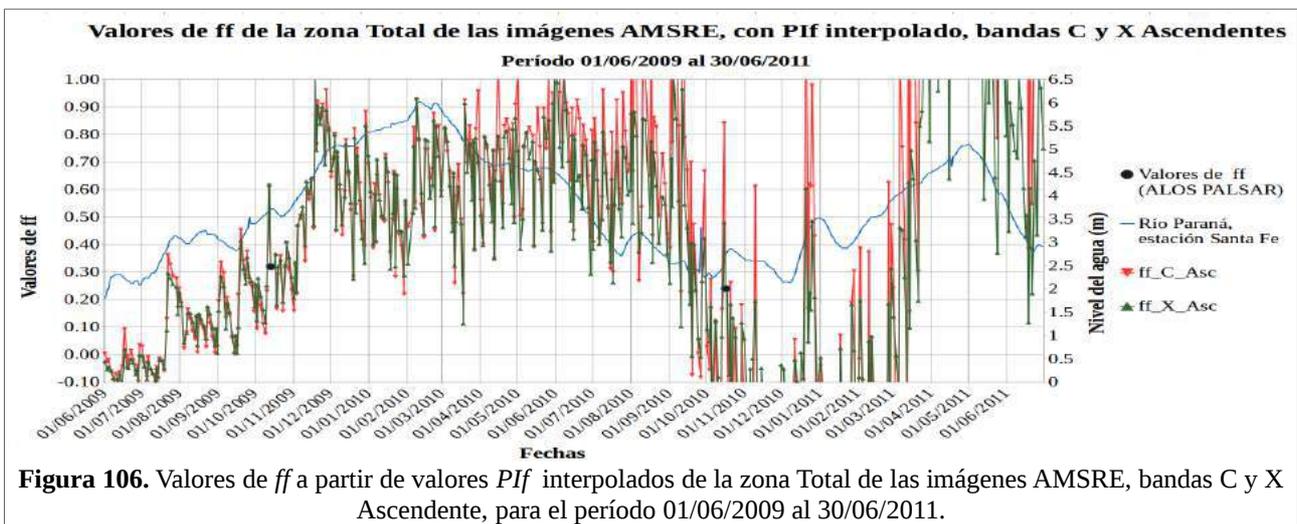


Figura 106. Valores de ff a partir de valores Pif interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Ascendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.

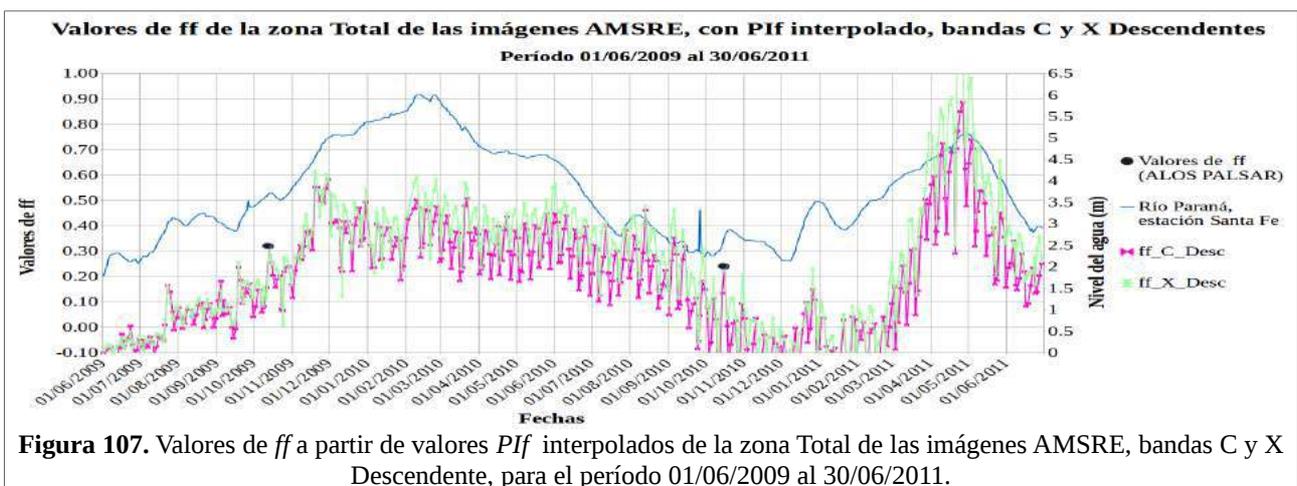
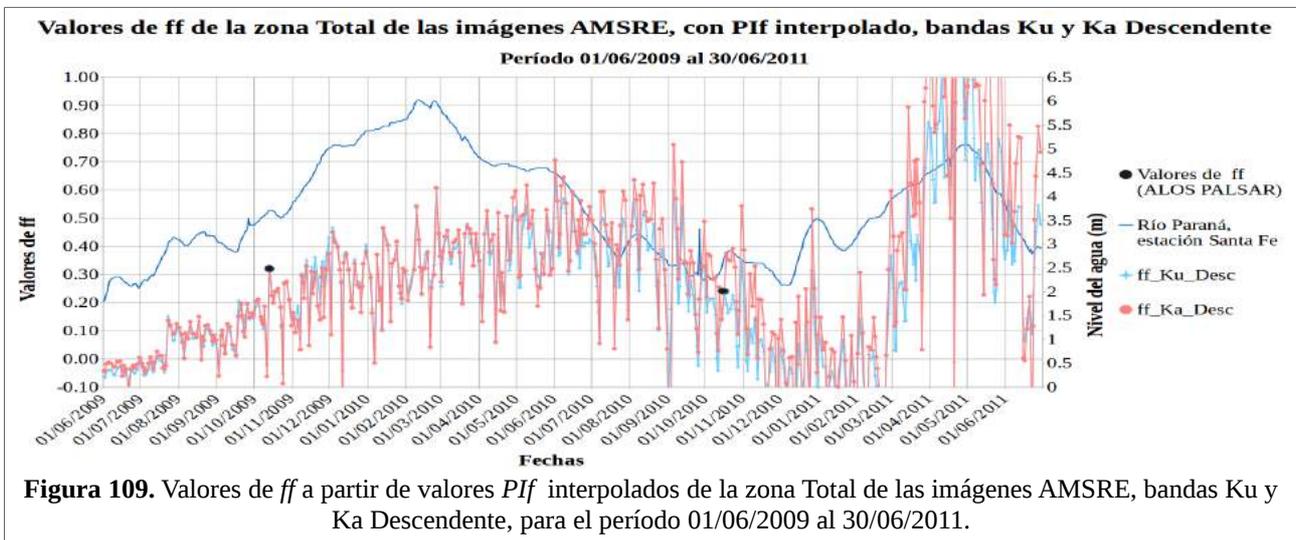
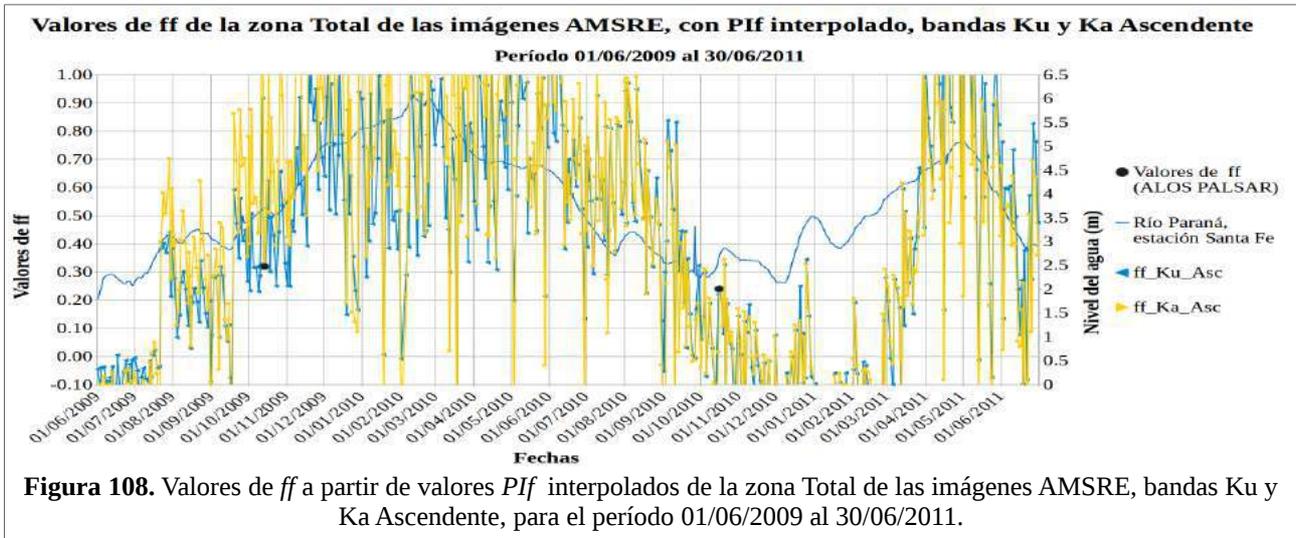


Figura 107. Valores de ff a partir de valores Pif interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.



4.6.6 Comparación de los ff obtenidos mediante los distintos métodos de Pif , tanto constante como de interpolación.

Del 01/06/2009 al 13/10/2009 y del 16/10/2010 al 30/06/2011 los dos métodos de ff no presentan diferencia esto es debido a que ambos métodos de interpolación usan los mismos datos para el cálculo de ff para esos intervalos de tiempo como se puede ver en las figuras 100 y 105.

En forma general se observa que el ff a partir del Pif constante sigue mejor la tendencia del NDA que el ff a partir del Pif interpolado como se observa en el lapso de tiempo del 13/10/2009 al 16/10/2010 en donde se observa que las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes presentan mayor ruido.

Este comportamiento es el contrario al esperado, ya que si bien ambos esquemas asumen un cierto comportamiento del Pif , que depende de la altura del agua dentro de la planicie, a priori, la suposición de un aumento gradual del Pif parecía más realista que un valor constante con saltos abruptos.

4.7 Primera época de análisis de la zona Total.

Se analizó el comportamiento temporal del $PIobs$ de cada uno de los sistemas de microondas pasivas en comparación con la fracción del área de inundación derivada de las imágenes ALOS PALSAR comprendido entre el período 01/01/2007 al 30/06/2008, y el nivel hidrométrico del río Paraná medido en la estación Santa Fe (ver figura 110).

Nota: Para ver los gráficos de las zonas Norte y Sur correspondiente al período 1, se puede consultar en el ANEXO B.

4.7.1 Valores de $PIobs$ de la zona Total.

En la figura 110 por el poco número de datos de ff (cuatro) de la imágenes de ALOS PALSAR no se puede saber el grado de acuerdo con los datos de AMSRE de $PIobs$. Se observa que los datos de ff de las imágenes ALOS PALSAR siguen la tendencia del NDA del río con un retraso de aproximadamente 90 días medidos desde el 01/04/2007 que es la fecha en que se detecta el pico del NDA en la estación Santa Fe (ver figura 76) en comparación al segundo valor de ff de las imágenes ALOS correspondiente del 08/07/2007 para este período (UNL, 2016b), esto podría deberse a que Santa Fe cuya altura de evacuación es de 5.7 m y Paraná cuya altura de evacuación es de 5 m (UNL, 2016a), son lugares de entrada de agua a la llanura inundable y el retraso sería el tiempo que tarda el agua en distribuirse a la llanura de inundación. En los valores del $PIobs$ calculados a partir de los sistemas de microondas pasivas del 01/01/2007 al 23/05/2007, se observa que siguen adecuadamente la tendencia del NDA del río; del 23/05/2007 al 31/10/2007, se observa que siguen medianamente la tendencia del NDA; del 31/10/2007 al 30/04/2008 no se observa una buena tendencia con el NDA; y del 30/04/2008 hasta el 30/06/2008, los valores del $PIobs$ retoman la tendencia del NDA. El período en el cual los valores de $PIobs$ no siguen la tendencia del NDA coincide con el período en el cual el NDA es menor a 3 m, lo que sugiere que por debajo de dicho valor el comportamiento de la planicie está desacoplado del comportamiento del río. Con respecto a las bandas, se puede observar que las bandas C y X tanto ascendentes como descendentes tienen valores un poco superiores a las bandas Ku y Ka.

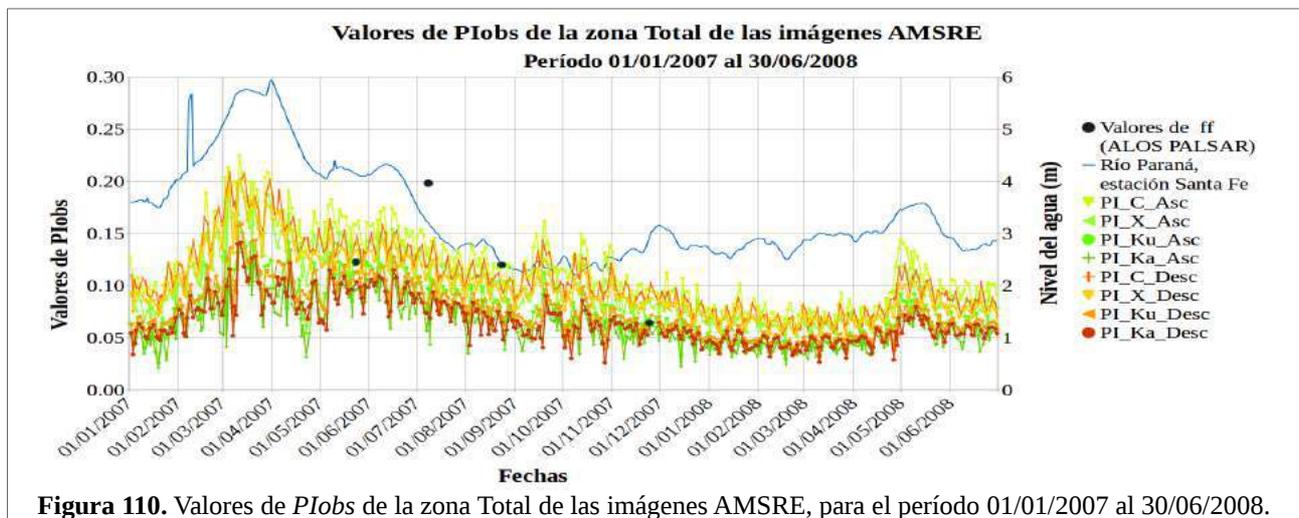


Figura 110. Valores de $PIobs$ de la zona Total de las imágenes AMSRE, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.

4.7.2 Valores de *Pif* en el esquema de valor constante de la zona Total.

En la figura 111, se observan los valores de *Pif* calculados para las fechas de adquisición de imágenes ALOS PALSAR y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de *Pif* obtenidos que se muestran en la tabla 23. Esta figura puede ser comparada con la figura 114 para observar la diferencia entre los esquemas metodológicos estudiados.

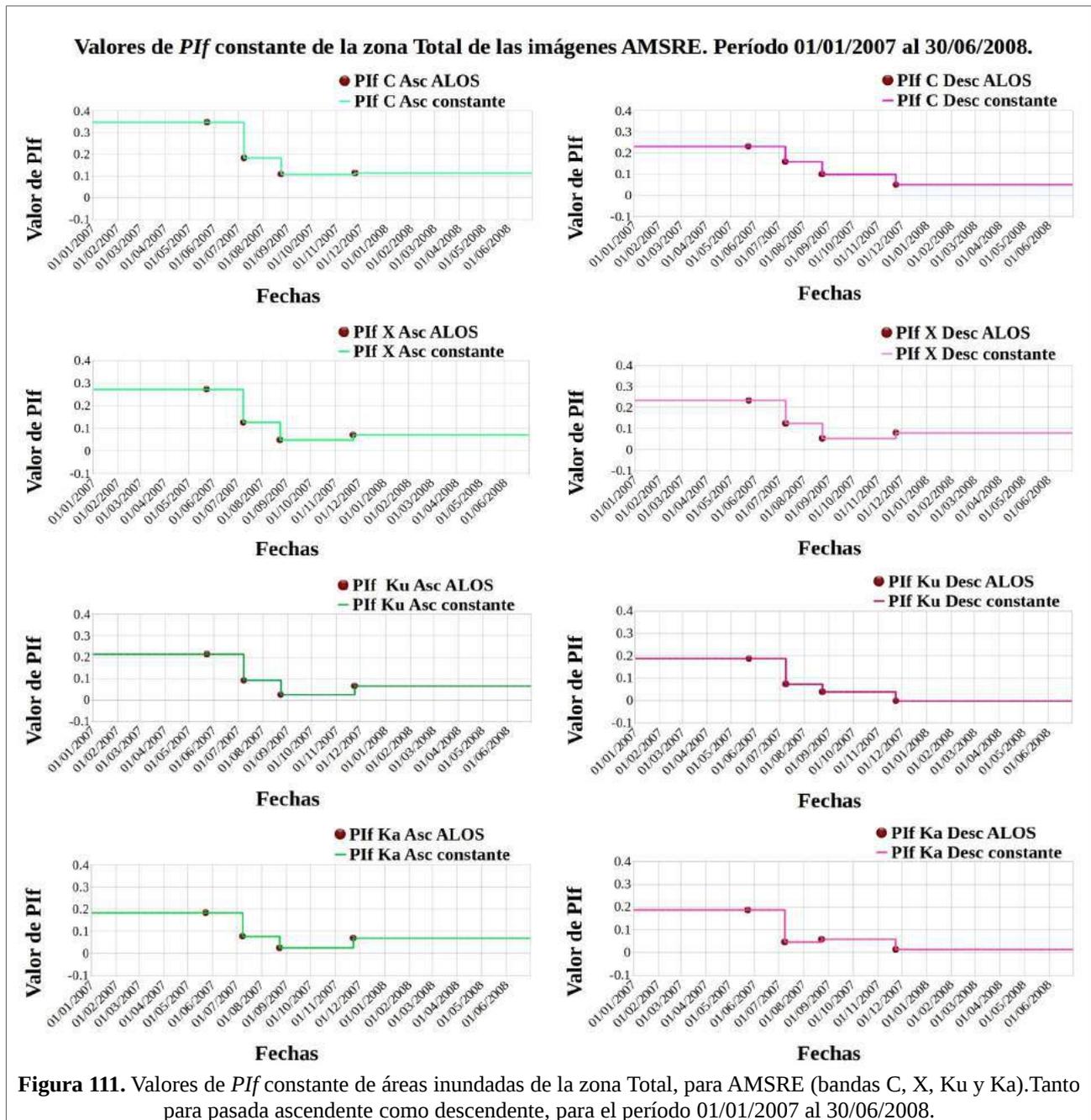


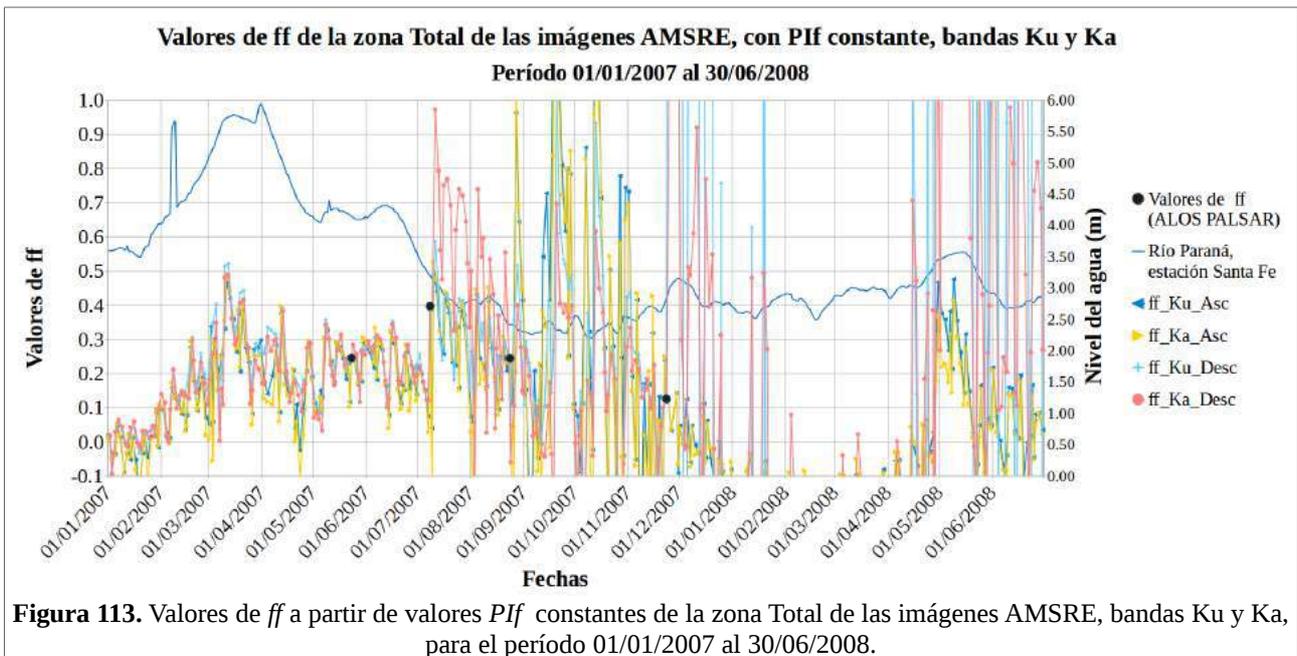
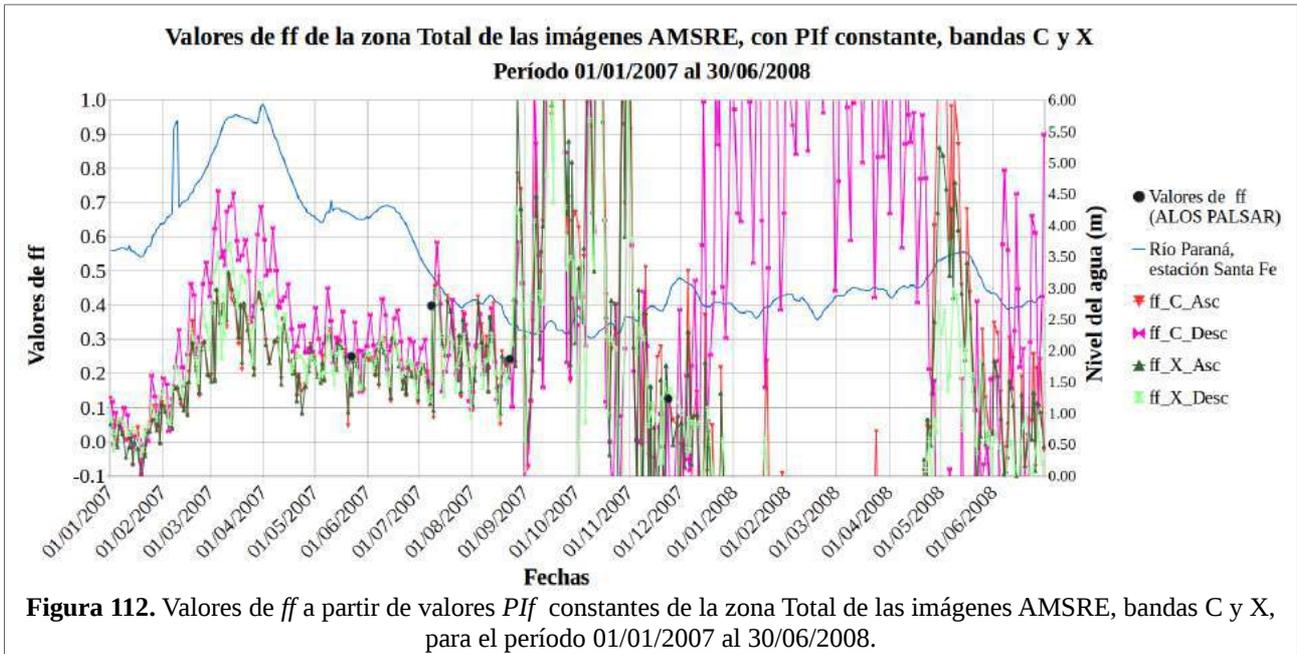
Figura 111. Valores de *Pif* constante de áreas inundadas de la zona Total, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.

4.7.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Total, calculada con el esquema de PIf constante.

En las figuras 112 y 113, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y PI_{inf} presentados en las tablas 21 y 22 respectivamente y los valores de PIf obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 111) para el cálculo.

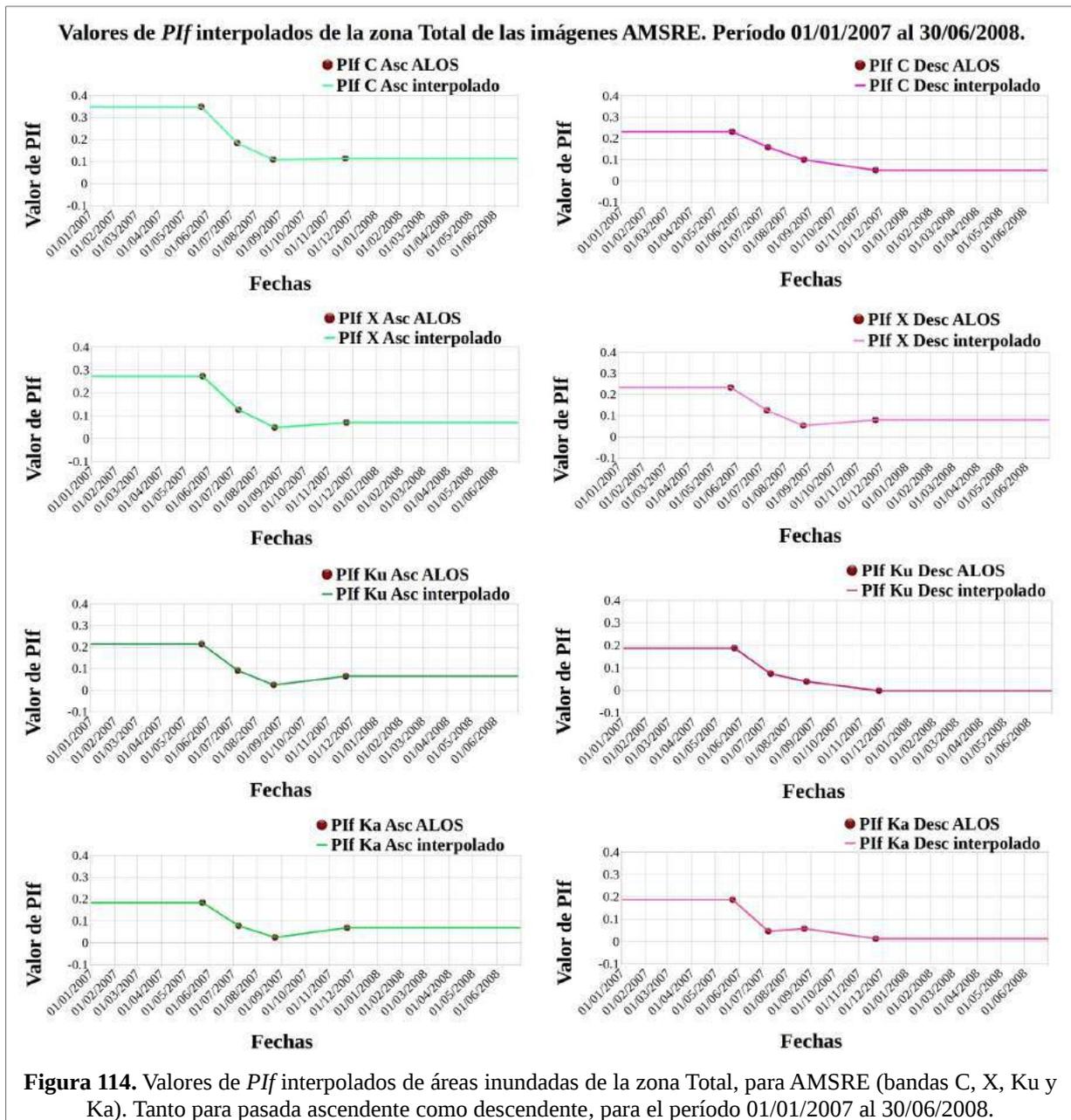
Analizando los valores de ff de AMSRE se observa lo siguiente:

- Del 01/01/2007 al 21/01/2007 se ve un descenso en los valores de ff ; del 21/01/2007 al 05/03/2007 se ve un aumento en los valores de ff ; del 05/03/2007 al 30/03/2007 se ve un ligero descenso en los valores de ff ; del 30/03/2007 al 27/04/2007 se ve un descenso en los valores de ff ; del 27/04/2007 al 08/05/2007 se ve un aumento en los valores de ff ; del 08/05/2007 al 09/06/2007 se ve un ligero descenso en los valores de ff ; del 09/06/2007 al 09/07/2007 se ve un descenso en los valores de ff . En los casos indicados anteriormente, la tendencia de los valores de ff coinciden con la tendencia de los valores del NDA.
- Del 09/07/2007 al 23/08/2007 empieza haber mayor variabilidad en las bandas con relación al NDA.
- Del 23/08/2007 al 21/12/2007 todas las bandas presentan ruido.
- Del 21/12/2007 al 21/04/2008 todos los valores de ff de las bandas son menores a 0, a excepción de la banda C descendente que presenta ruido, esto podría deberse a que en los primeros meses del 2008 hubo una sequía regional muy fuerte, y esto podría haber generado el secado de los cuerpos de agua de áreas pequeñas, y como no se está tomado en cuenta en el f_w , el algoritmo compensa dando valores de ff menores a 0 y el algoritmo para el cálculo de ff se puede volver errático, este problema fue observado en Sippel *et al.* (1994).
- Del 21/04/2008 hasta el final del período todas las bandas presentan ruido. El período en el que ff presenta mucho ruido coincide con el período en el cual PI_{obs} presenta valores ruidosos, que coincide con el período en el cual NDA está por debajo de los 3 m. Por lo tanto, la mala performance del algoritmo de obtención de fracción de área inundada puede explicarse por 2 causas no excluyentes: 1) la amplificación del ruido presente en PI_{obs} , que es la variable observacional al algoritmo y 2) la posibilidad, ya explicada, que con NDA menores a 3 m la planicie y el río posean dinámicas desacopladas.



4.7.4 Valores de Pif en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Total.

En la figura 114, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de Pif correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de Pif obtenidos que se muestran en la tabla 23.



4.7.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Total, calculada con valores de *Pif* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 115 y 116, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *Pif* interpolados (ver figura 114) para el cálculo.

Analizando los valores de *ff* de AMSRE se observa lo siguiente:

- Del 01/01/2007 al 21/01/2007 se ve un descenso en los valores de *ff*; del 21/01/2007 al 05/03/2007 se ve un aumento en los valores de *ff*; del 05/03/2007 al 30/03/2007 se ve un

ligero descenso en los valores de ff ; del 30/03/2007 al 27/04/2007 se ve un descenso en los valores de ff ; del 27/04/2007 al 08/05/2007 se ve un aumento en los valores de ff ; del 08/05/2007 al 19/06/2007 se ve un ligero descenso en los valores de ff . En los casos indicados anteriormente, la tendencia de los valores de ff coinciden con la tendencia de los valores del NDA.

- Del 19/06/2007 al 21/12/2007 todas las bandas presentan ruido.
- Del 21/12/2007 al 21/04/2008 todos los valores de ff de las bandas son menores a 0, a excepción de la banda C descendente que presenta ruido, esto podría deberse a que en los primeros meses del 2008 hubo una sequía regional muy fuerte, y esto podría haber generado el secado de los cuerpos de agua de áreas pequeñas, y como no se está tomado en cuenta en el fw , el algoritmo compensa dando valores de ff menores a 0 y el algoritmo para el cálculo de ff se puede volver errático, este problema fue observado en Sippel *et al.* (1994).
- Del 21/04/2008 hasta el final del período todas las bandas presentan ruido.

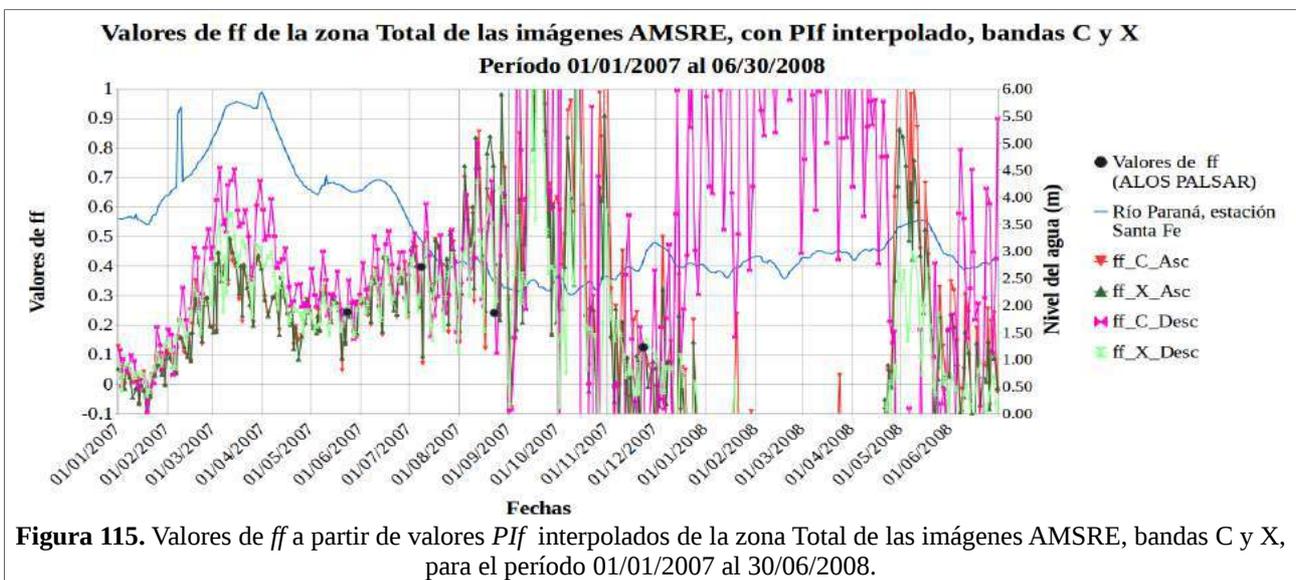


Figura 115. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.

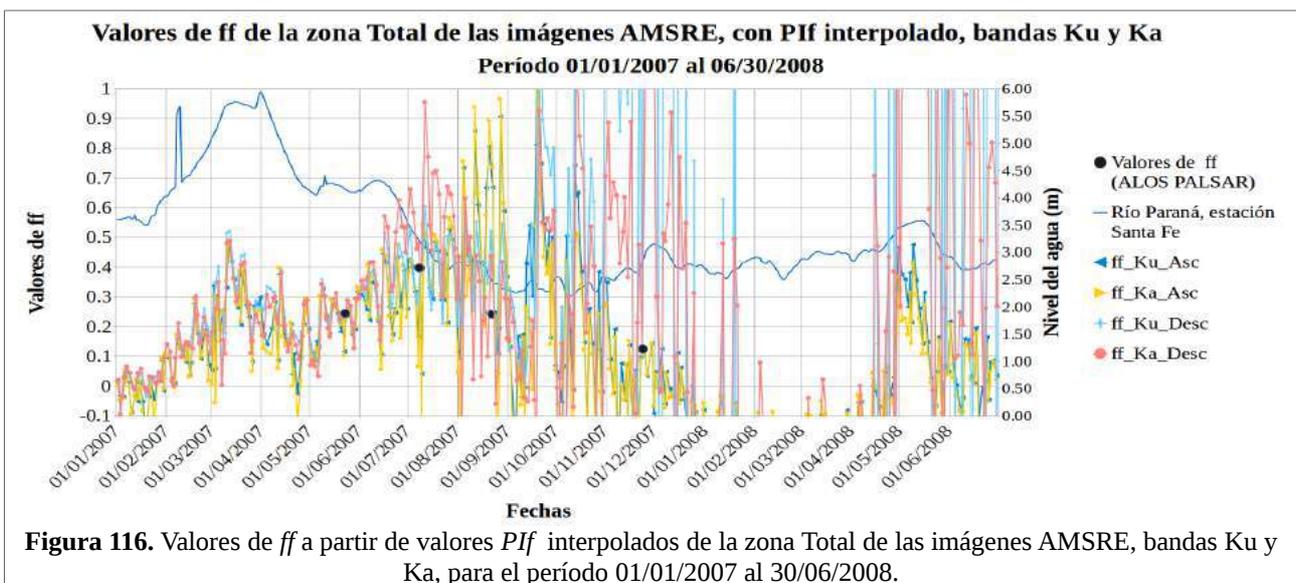


Figura 116. Valores de ff a partir de valores PIf interpolados de la zona Total de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.

4.7.6 Comparación de los ff obtenidos mediante los distintos métodos de PIf , tanto constante como de interpolación.

Del 01/01/2007 al 23/05/2007 y del 23/11/2007 al 30/06/2008 los dos métodos de ff no presentan diferencia esto es debido a que ambos métodos de interpolación usan los mismos datos para el cálculo de ff para esos intervalos de tiempo como se puede ver en las figuras 111 y 114.

En forma general se observa que el ff a partir del PIf constante sigue mejor la tendencia del NDA como se observa del 23/05/2007 al 09/07/2007 mientras que el ff a partir del PIf interpolado sigue bien la tendencia del NDA del 23/05/2007 al 19/06/2007, siendo un tiempo menor que el ff a partir del PIf constante. Del 08/07/2007 al 23/11/2007 se observa que ff a partir del PIf interpolado presenta mayor ruido que ff a partir del PIf constante.

Este comportamiento es el contrario al esperado, ya que si bien ambos esquemas asumen un cierto comportamiento del PIf , que depende de la altura del agua dentro de la planicie, a priori, la suposición de un aumento gradual del PIf parecía más realista que un valor constante con saltos abruptos.

4.8 Comparación entre períodos de análisis de imágenes ALOS PALSAR con imágenes COSMO Skymed.

En los dos primeros períodos de análisis tanto en la del 01/06/2009 al 30/06/2011 como en la del 01/01/2007 al 30/06/2008 las cuales usan información derivada de imágenes ALOS PALSAR para sus cálculos, se observa en forma general que el ff a partir del PIf constante sigue mejor la tendencia del NDA, presentando menores sectores con ruido como se analizó en las secciones 4.6 y 4.7; mientras que en el tercer período del 01/03/2014 al 08/01/2015 el cual utiliza información derivada de imágenes COSMO Skymed para sus cálculos, se observa en forma general que el ff a partir del PIf interpolado sigue mejor la tendencia del NDA y presenta menores sectores con ruido como se analizó en la sección 4.4.6.

Esto podría indicar que a mayor cantidad de datos SAR disponibles, con fechas más cercanas y con longitudes de onda más corta (~ 3 cm) como es el caso de imágenes COSMO Skymed para el período 01/03/2014 al 08/01/2015 (6 combinaciones, ver tabla 24), el algoritmo para el cálculo de ff a partir del PIf interpolado da mejores resultado, en contraposición de cuando se dispone de menor cantidad de datos SAR con fechas más espaciadas y con longitudes de onda más largas (~ 23 cm) como es el caso de las imágenes ALOS PALSAR para los períodos 01/01/2007 al 30/06/2008 (4 combinaciones, ver tabla 24) o de fechas más alejadas como es el caso del período 01/06/2009 al 30/06/2011 (2 combinaciones, ver tabla 24), el algoritmo para el cálculo de ff a partir del PIf constante da mejores resultados.

4.9 Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos.

Como se explico en la sección 3.3, para obtener la información con la cual se validó algunos de los mapas generados y poder hacer los cálculos de la evaluación de la exactitud (ver 2.6), se accedió a la página del Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA) a la dirección electrónica <http://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?alerta=1>, y se descargó los productos de máscara de agua (ver tabla 30), generadas a partir de imágenes Landsat 5.

Tabla 30. Códigos de las imágenes de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua generadas en la tesis y los archivos de máscara de agua del INA con sus respectivas fechas que servirán para la validación de los productos SAR.

Fecha imágenes de áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua	Fecha máscara de agua del INA, archivo p226r81 y p226r82	Fecha máscara de agua del INA, archivo p227r81 y p227r82
23/05/2007	27/04/2007	13/02/2007
13/10/2009	09/10/2009	01/11/2009

Este método de evaluación no es el ideal, ya que el mapa usado para comparar tiene su propio error, y muchas veces no es posible conseguir un mapa independiente que corresponda al estudio del mismo fenómeno, pero en muchos casos es la única opción viable. La evaluación de la exactitud mediante datos de campo requiere muestreos extensos (en cuanto a la cantidad de puntos relevados), y simultáneos a la adquisición de las imágenes usadas (dado el carácter dinámico del fenómeno estudiado), lo que resulta logísticamente muy difícil en medio de un evento de la magnitud y características del fenómeno estudiado (Salvia, 2010) en esta tesis.

A continuación se muestran los resultados de la evaluación de exactitud realizada para los mapas de áreas inundadas del 23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007, correspondiente al período 1, para la zona Total (ver tabla 31, figura 73). Para la zona Norte (ver tabla 41, figura 132) (ver ANEXO C) y para la zona Sur (ver tabla 42, figura 156) (ver ANEXO C). Para el 13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009 correspondiente al período 2, para la zona Total (ver tabla 32, figura 128). Para la zona Norte (ver tabla 43, figura 140) (ver ANEXO C), y para la zona Sur (ver tabla 44, figura 164) (ver ANEXO C).

Tabla 31. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Total basado en imágenes de radar en Banda L (23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007).

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error de comisión
		Áreas no inundadas	Áreas inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas no inundadas	421	289	59.30	40.70
	Áreas inundadas	174	116	40.00	60.00
Exactitud del productor		70.76	28.64	Exactitud General: 53.70%	
Error de omisión		29.24	71.36	Índice Kappa: -0.01	

La matriz de errores realizada (ver tabla 31) muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas realizado con imágenes SAR en Banda L del 53,7%. La exactitud para el usuario presenta una buena exactitud para las áreas no inundadas (59,30%), mientras que para las áreas inundadas presenta una exactitud moderada (40,00%), lo que indica que el mapa generado es medianamente confiable en cuanto a las áreas clasificadas como “inundadas”. La exactitud para el productor presenta una muy buena exactitud para las áreas no inundadas (70,76%), mientras que para las áreas inundadas presenta una baja exactitud (28,64%). Sin embargo, el Índice Kappa (ver tabla 6), que toma en cuenta las coincidencias por efecto del azar, indica una concordancia pésima (-0,01) entre los mapas analizados. Se observa un importante número de píxeles que el mapa usado como referencia designa como no inundados y el mapa producido con datos de microondas con Banda L clasifica como inundados, dando lugar a una baja exactitud para el usuario en la clase Áreas inundadas. Al menos parte de este error puede ser atribuido al carácter dinámico de los eventos de inundación, en relación a la diferencia en la fecha de las imágenes usadas para la producción de los dos mapas comparados que como se puede ver en la tabla 30 que va de 26 días hasta 3 meses y 21 días debido a que se realizó un mosaico de máscaras del agua del INA para completar la información de la zona Total del área de estudio para la validación.

Cabe recordar que en los 26 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 226 row 81 y path 226 y row 82, la altura del río Paraná en Esquina pasó de 4,07 m a 4,25 m (alcanzando el máximo de 4,60 m), mientras que para los 3 meses y 21 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 227 y row 82, la altura del río Paraná en Santa Fe pasó de 4,38 m a 4,15 m (con un máximo de 5,94 m).

Además, en este caso debe tenerse en cuenta la diferencia en las características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso, datos de microondas en esta tesis versus datos ópticos utilizados por el INA (ver 2.4.1.15, 2.4.1.16, 2.4.1.17 y 3.3).

Por otro lado, se observa un número aún mayor de píxeles que fueron catalogados como áreas inundadas por el mapa del INA, y que el mapa realizado con imágenes SAR clasifica como no inundado. En este caso, hay dos factores que influyen en dicha diferencia: por un lado la importante diferencia de resoluciones espaciales entre los mapas. Al tener el mapa usado como referencia con un píxel de 30 m puede haber ocasionado que píxeles inundados, al querer integrarse en píxeles de 100 m en las imágenes SAR correspondan a una pequeña parte del píxel, dificultando su detección.

Más importante aún es la forma en que, debido a la incerteza radiométrica de las imágenes SAR en banda L (derivada del fenómeno de speckle), se define la clase “áreas no inundadas”. Al definir los límites del intervalo de cambio para la clase “no inundada” como el valor de la incerteza radiométrica de las imágenes SAR para un intervalo de confianza utilizado, lo que se está asegurando es que todos aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor a la incerteza radiométrica efectivamente sufrieron un cambio. Sin embargo no puede decirse lo mismo de aquellos píxeles cuyo valor de cambio está dentro de la incerteza radiométrica. En ese caso se los etiqueta como no inundados porque no puede asegurarse que hayan sufrido un cambio real, y que lo observado no sea producto de un desigual efecto del fenómeno speckle. Sin embargo, por los mismos motivos, tampoco puede asegurarse que no hayan sufrido cambios, en este caso, que no se hayan inundado.

Tabla 32. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Total basado en imágenes de radar en Banda L (13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009).

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error de comisión
		Áreas no inundadas	Áreas inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas no inundadas	213	211	50.24	49.76
	Áreas inundadas	168	408	70.83	29.17
Exactitud del productor		55.91	65.91	Exactitud General: 62.10%	
Error de omisión		44.09	34.09	Índice Kappa: 0.21	

La matriz de errores realizada (ver tabla 32) muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas realizado con imágenes SAR en Banda L del 62,10%. La exactitud para el usuario presenta una moderada exactitud para las áreas no inundadas (50.24%), mientras que para las áreas inundadas presenta una muy buena exactitud (70.83%), lo que indica que el mapa generado es altamente confiable en cuanto a las áreas clasificadas como “inundadas”. La exactitud para el productor presenta una moderada exactitud para las áreas no inundadas (55.91%), mientras que para las áreas inundadas presenta una buena exactitud (65.91%). Sin embargo, el Índice Kappa, que toma en cuenta las coincidencias por efecto del azar, indica una concordancia razonable (0.21) entre los mapas analizados. Se observa un importante número de píxeles que el mapa usado como referencia designa como no inundados y el mapa producido con datos de microondas con Banda L clasifica como inundados, dando lugar a una alta exactitud para el usuario en la clase Áreas inundadas. Al menos parte de este error puede ser atribuido al carácter dinámico de los eventos de inundación, en relación a la diferencia en la fecha de las imágenes usadas para la producción de los dos mapas comparados que como se puede ver en la tabla 30 que va de 4 hasta 18 días debido a que se realizó un mosaico de máscaras del agua del INA para completar la información de la zona Total del área de estudio para la validación.

Cabe recordar que en los 4 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 226 row 81 y path 226 y row 82, la altura del río Paraná en Esquina pasó de 4.19 m a 4.02 m (alcanzando el máximo de 4.19 m), mientras que para los 18 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 227 y row 82, la altura del río Paraná en Santa Fe pasó de 3.71 m a 3.87 m (con un máximo de 3.87 m).

Además, en este caso debe tenerse en cuenta la diferencia en las características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso (datos de microondas en esta tesis vs datos ópticos utilizados por el INA). Las ondas correspondiente a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo no son capaces de atravesar el dosel de la vegetación arbórea o herbácea densa, mientras que las microondas son capaces de atravesar la vegetación y detectar el agua debajo de ella, lo que aumentaría la detección de áreas inundadas en los mapas realizados para esta tesis.

Por otro lado, se observa un número aún mayor de píxeles que fueron catalogados como áreas inundadas por el mapa del INA, y que el mapa realizado con imágenes SAR clasifica como no

inundado. En este caso, hay dos factores que influyen en dicha diferencia: por un lado la importante diferencia de resoluciones espaciales entre los mapas. Al tener el mapa usado como referencia con un píxel de 30 m puede haber ocasionado que píxeles inundados, al querer integrarse en píxeles de 100 m en las imágenes SAR correspondan a una pequeña parte del píxel, dificultando su detección.

Más importante aún es la forma en que, debido a la incerteza radiométrica de las imágenes SAR en banda L (derivada del fenómeno de speckle), se define la clase “áreas no inundadas”. Al definir los límites del intervalo de cambio para la clase “no inundada” como el valor de la incerteza radiométrica de las imágenes SAR para un intervalo de confianza utilizado, lo que se está asegurando es que todos aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor a la incerteza radiométrica efectivamente sufrieron un cambio. Sin embargo no puede decirse lo mismo de aquellos píxeles cuyo valor de cambio está dentro de la incerteza radiométrica. En ese caso se los etiqueta como no inundados porque no puede asegurarse que hayan sufrido un cambio real, y que lo observado no sea producto de un desigual efecto del fenómeno speckle. Sin embargo, por los mismos motivos, tampoco puede asegurarse que no hayan sufrido cambios, en este caso, que no se hayan inundado.

Nota: Para ver los análisis de la zonas Norte y Sur, se puede consultar en el ANEXO C.

4.10 Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación.

Como se explico en la sección 3.6, para obtener la información con la cual se validó algunos de los datos obtenidos de la fracción de área inundada y poder hacer los cálculos de la correlación para los datos de Microondas Pasivas (ver 2.8), se accedió a la página del Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA) a la dirección electrónica <http://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?alerta=1>, y se descargó los productos de máscara de agua (ver tabla 19), generadas a partir de imágenes Landsat 5 y 7. A continuación se muestran los resultados de la validación realizada para la información de microondas pasivas de las fechas disponibles correspondiente al período 2 (del 01/06/2009 al 30/06/2011). Para todas las zonas se hizo una comparación para los valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de áreas inundadas obtenidas de la información del INA y del valor de *ff* las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* constante y *PIf* interpolado. Para la zona Norte se indica en las tablas 33 y 36. Para la zona Total y Sur se indica en las tablas 45, 48, 51 y 54 y se pueden consultar en el ANEXO D.

4.10.1 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de *PIf* constante.

Tabla 33. Zona Norte, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* constante.

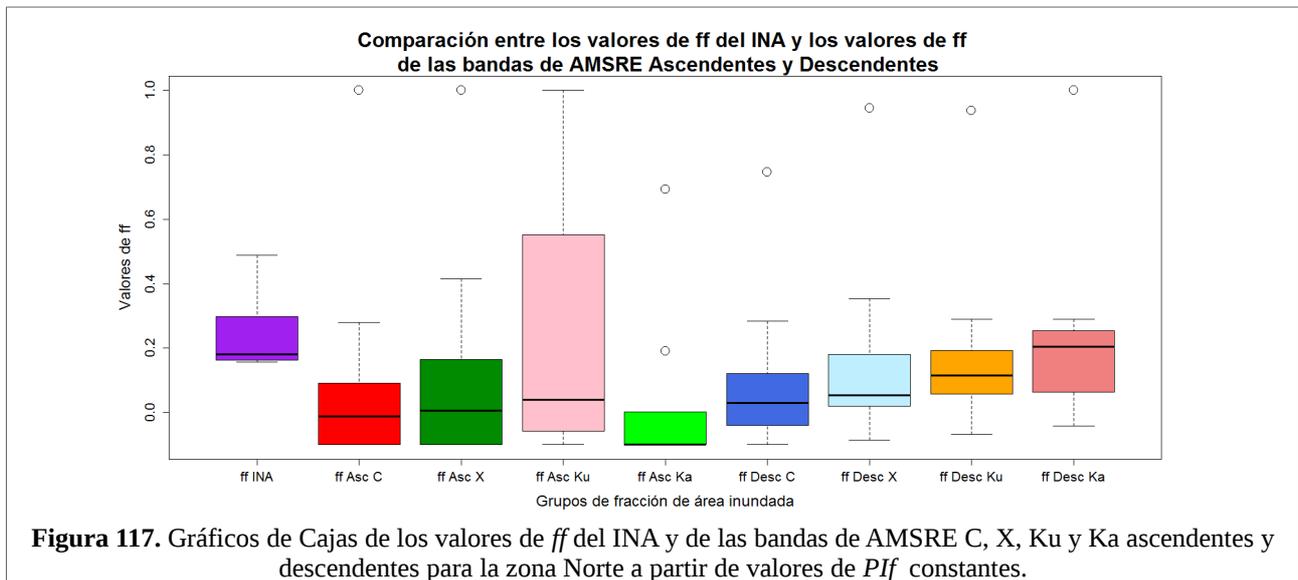
Período	Fecha	Información INA.	Información Tesis.							
		Fracción de área inundada (<i>ff</i>)	Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Ascendentes				Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Descendentes.			
			C	X	Ku	Ka	C	X	Ku	Ka
Segundo	06/08/2009	0.159	0.024	0.049	0.226	-0.100	0.030	0.054	0.062	0.077
	09/10/2009	0.298	0.092	0.164	0.553	-0.100	0.121	0.181	0.193	0.205
	29/01/2010	0.488	0.280	0.416	1.000	-0.100	0.284	0.353	0.290	0.289
	26/09/2010	0.162	-0.011	0.006	0.040	-0.099	0.045	0.075	0.057	0.059
	12/10/2010	0.180	-0.096	-0.080	-0.095	0.190	-0.022	0.020	0.039	0.064
	13/11/2010	0.167	-0.100	-0.100	-0.039	0.003	-0.079	0.018	0.115	0.221
	15/12/2010	0.182	-0.100	-0.100	-0.057	-0.033	-0.040	0.054	0.119	0.255
	16/01/2011	0.157	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.085	-0.068	-0.042
	06/04/2011	0.410	1.000	1.000	0.781	0.693	0.747	0.946	0.937	1.000

Tabla 34. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Norte con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante.

Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor
ff INA - ff Asc C	0.283	ff INA - ff Desc C	0.274	ff INA - ff Asc Ku	0.214	ff INA - ff Desc Ku	0.104
ff INA - ff Asc X	0.458	ff INA - ff Desc X	0.188	ff INA - ff Asc Ka	0.010	ff INA - ff Desc Ka	0.024

Realizando un análisis de los datos en la prueba de normalidad realizada, para las clases Asc Ka y Desc Ka se obtuvo un p-valor menor al nivel de significación de 0.05, por lo que no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , por lo tanto se concluye que las clases no se ajustan a una distribución normal. Para el resto de clases se obtuvo un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis H_0 , por lo tanto se concluye que estas clases se ajustan a una distribución normal.

En la figura 117, se indica el gráfico de cajas generado donde se puede hacer una primera comparación entre los diferentes valores de ff . Todas las bandas presentan valores en su mediana menores al del ff del INA. La banda Asc Ku es la que mayor variabilidad presenta de todas las bandas. La banda Asc Ka es la que mayor diferencia presenta con las demás bandas también con el ff del INA. Todas las bandas a excepción de la banda Asc Ku tienen rangos de valores similares en mayor o menor grado.



En la figura 118, se indica los gráficos de dispersión. Visualmente se puede apreciar que todas las bandas presentan en mayor o menor grado correlación lineal.

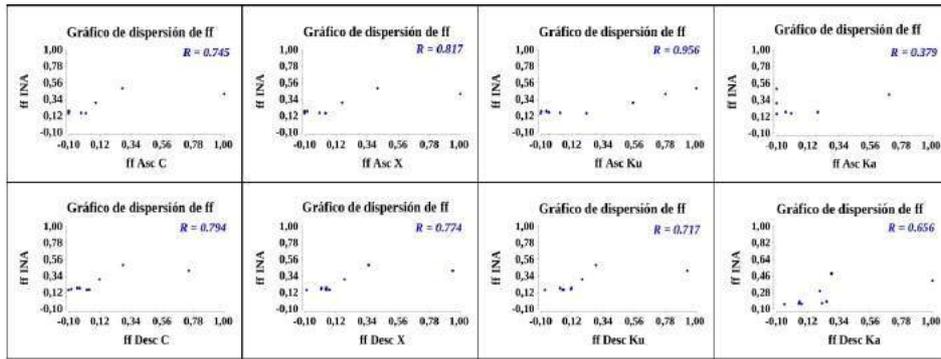


Figura 118. Gráficos de Dispersión de los valores de *ff* del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Norte a partir de valores de *PIf* constantes..

En la tabla 35, se indica las estadísticas de los coeficientes de correlación de Pearson para las bandas Asc C, Asc X, Asc Ku, Desc C, Desc X y Desc Ku; y el coeficiente de correlación de Spearman para las bandas Asc Ka y Desc Ka debido que éstas no presentaron una distribución normal luego de aplicarles el test de normalidad de Shapiro-Wilks. La H_0 plantea que no existe una significativa correlación lineal entre los *ff* de las bandas y el *ff* del INA. Se observa que solamente para la clase Asc Ka presenta un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05 por lo que para esta clase se acepta la H_0 con lo que se concluye que no existe una significativa correlación lineal; además analizando su valor *r* indica una asociación lineal mala. Para el resto de clases presentan un p-valor menor al nivel de significación de 0.05 por lo que para estas clases no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , lo que indicaría que se a encontrado indicios de que existe una correlación estadísticamente significativa con el *ff* del INA; todos los valores de *r* son mayores a 0.7 que indican una asociación lineal que va desde regular hasta excelente. La banda Desc Ka se le aplicó la correlación lineal de Spearman dando un r_s con un asociación lineal buena.

Tabla 35. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* constante.

Clases a comparar	Valor estadístico t	Grados de libertad	p-valor	Intervalo de confianza al 95%		Valor de correlación de Pearson (r).	Valor de correlación de Sperman (rs).	Asociación lineal
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	2.953	7	0.021	0.160	0.943	0.745		Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	3.751	7	0.007	0.335	0.960	0.817		Buena
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	8.627	7	0.00006	0.800	0.991	0.956		Excelente
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka			0.543				0.24	Mala
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	3.450	7	0.011	0.274	0.955	0.794		Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	3.235	7	0.014	0.226	0.950	0.774		Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	2.718	7	0.030	0.100	0.936	0.717		Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka			0.008				0.83	Buena

4.10.2 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de *Pif* interpolado.

Tabla 36. Zona Norte, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de los cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *Pif* interpolado.

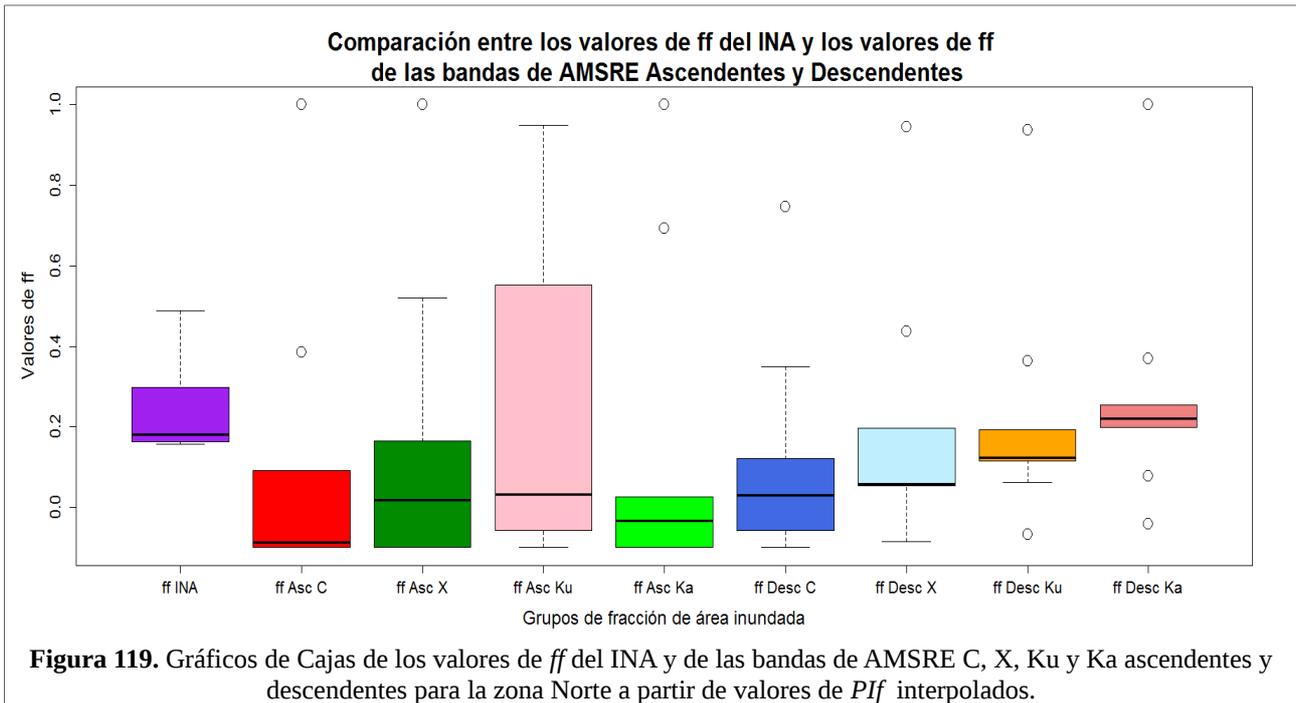
Período	Fecha	Información INA.	Información Tesis.							
		Fracción de área inundada (<i>ff</i>)	Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Ascendentes				Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Descendentes.			
			C	X	Ku	Ka	C	X	Ku	Ka
Segundo	06/08/2009	0.159	0.024	0.049	0.226	-0.100	0.030	0.054	0.062	0.077
	09/10/2009	0.298	0.092	0.164	0.553	-0.100	0.121	0.181	0.193	0.205
	29/01/2010	0.488	0.385	0.521	0.950	1.000	0.349	0.436	0.364	0.369
	26/09/2010	0.162	-0.087	0.018	0.032	0.026	0.112	0.196	0.163	0.199
	12/10/2010	0.180	-0.100	-0.100	-0.074	-0.047	-0.058	0.058	0.123	0.241
	13/11/2010	0.167	-0.100	-0.100	-0.039	0.003	-0.079	0.018	0.115	0.221
	15/12/2010	0.182	-0.100	-0.100	-0.057	-0.033	-0.040	0.054	0.119	0.255
	16/01/2011	0.157	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.085	-0.068	-0.042
	06/04/2011	0.410	1.000	1.000	0.781	0.693	0.747	0.946	0.937	1.000

Tabla 37. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Norte con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *Pif* interpolado

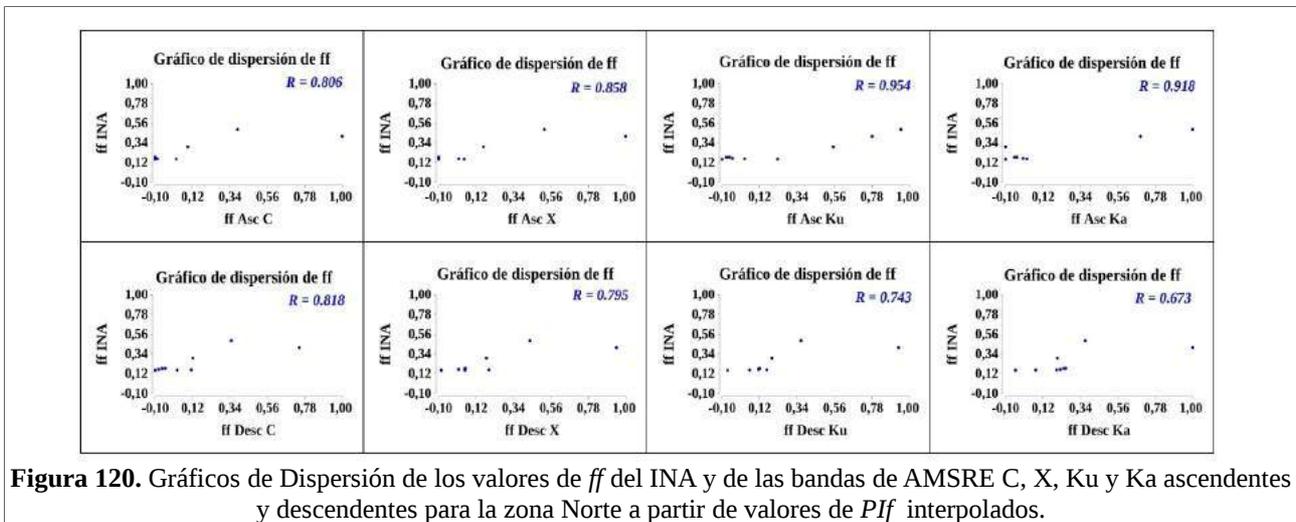
Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	0.329	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	0.503	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	0.417	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	0.203
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	0.730	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	0.464	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka	0.004	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka	0.020

Realizando un análisis de los datos en la prueba de normalidad realizada, para las clases Asc Ka y Desc Ka se obtuvo un p-valor menor al nivel de significación de 0.05, por lo que no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , por lo tanto se concluye que las clases no se ajustan a una distribución normal. Para el resto de clases se obtuvo un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta la hipótesis H_0 , por lo tanto se concluye que estas clases se ajustan a una distribución normal.

En la figura 119, se indica el gráfico de cajas generado donde se puede hacer una primera comparación entre los diferentes valores de *ff*. Todas las bandas presentan valores en su mediana menores al del *ff* del INA. La banda Asc Ku es la que mayor variabilidad presenta de todas las bandas. La banda Asc Ka es la que mayor diferencia presenta con las demás bandas también con el *ff* del INA. Las bandas descendentes se comportan de forma diferentes entre ellas.



En la figura 120, se indica los gráficos de dispersión. Visualmente se puede apreciar que todas las bandas presentan en mayor o menor grado correlación lineal.



En la tabla 38, se indica las estadísticas de los coeficientes de correlación de Pearson para las bandas Asc C, Asc X, Asc Ku, Desc C, Desc X y Desc Ku; y el coeficiente de correlación de Spearman para las bandas Asc Ka y Desc Ka debido que éstas no presentaron una distribución normal luego de aplicarles el test de normalidad de Shapiro-Wilks. La H_0 plantea que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas y el ff del INA. Se observa que solamente para la clase Asc Ka presenta un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05 por lo que para esta clase se acepta la H_0 con lo que se concluye que no existe una significativa correlación lineal; y

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

analizando su valor r_s indica una asociación lineal regular. Para el resto de clases presentan un p-valor menor al nivel de significación de 0.05 por lo que para estas clases no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , lo que indicaría que se a encontrado indicios de que existe una correlación estadísticamente significativa con el ff del INA; todos los valores de r son mayores a 0.7 que indican una asociación lineal que va desde regular hasta excelente. La banda Desc Ka se le aplicó la correlación lineal de Spearman dando un r_s con un asociación lineal buena.

Tabla 38. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Norte para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado.

Clases a comparar	Valor estadístico t	Grados de libertad	p-valor	Intervalo de confianza al 95%		Valor de correlación de Pearson (r).	Valor de correlación de Sperman (r_s).	Asociación lineal
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	3.608	7	0.009	0.306	0.958	0.806		Buena
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	4.429	7	0.003	0.452	0.970	0.858		Buena
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	8.417	7	0.00007	0.791	0.991	0.954		Excelente
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka			0.09				0.593	Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	3.758	7	0.007	0.336	0.960	0.818		Buena
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	3.465	7	0.010	0.277	0.955	0.795		Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	2.933	7	0.022	0.155	0.942	0.743		Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka			0.003				0.883	Buena

Nota: Para ver los análisis y gráficos de la zonas Total y Sur, se puede consultar en el ANEXO D.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En la tesis se logró integrar con éxito información de microondas activas y pasivas, para la estimación de la fracción de área inundada en humedales fluviales de un sector de la planicie de inundación del Bajo Paraná en Argentina, aplicando una metodología para la detección de cambios para la obtención de áreas inundadas y no inundadas en la zona de estudio y se evaluó la exactitud de estos resultados.

Se logró obtener información eco-hidrológica de relevancia para actividades de manejo y pronóstico en el área de estudio desarrolladas en el campo de la teledetección en microondas. Por el desarrollo realizado en la tesis, esta metodología puede ser incorporada a procedimientos operativos de pronóstico hidrológico.

Se generaron mapas de área inundada de alta resolución espacial a intervalos regulares utilizando imágenes de microondas activas (SAR) (ver ANEXO A).

Utilizando los resultados obtenidos de microondas activa, se logró obtener los parámetros necesarios para la estimación de fracción de área inundada a partir de datos de microondas pasivas (ver CAPÍTULO 4).

Se logró calcular la fracción de área inundada con una resolución temporal cuasi diaria para los eventos de inundación ocurridos los años 2007, 2009-2010 y 2014 (ver CAPÍTULO 4).

- a) Como **conclusiones de la información SAR** se indica que para poder realizar una adecuada comparación entre imágenes radar de distintas fechas, es muy importante trabajar con imágenes que tengan un ángulo de incidencia muy cercano, como se puede observar en la tabla 14 y figura 52; por eso el paso de obtener las imágenes de ángulos de incidencia derivado de las imágenes COSMO Skymed fue muy importante. Así mismo deben tener el mismo modo de pasada, ascendente o descendente, no se puede mezclar entre modos de pasadas.
- b) Luego de procesadas las imágenes de microondas activa, y obtenidos sus grupos de imágenes (ver tabla 14 y figura 52), se concluyó que la mejor manera de trabajar con el área de estudio para los diferentes cálculos y poder utilizar las imágenes COSMO Skymed, era dividirla en dos zonas, Norte y Sur.
- c) Por efecto de la conclusión anterior, fue necesario volver a procesar las imágenes de microondas pasiva, debido a que al dividirse el área de estudio en dos grupos, se necesitó volver a realizar los cálculos en estas imágenes. Por lo que se concluye que para este tipo de aplicaciones es crucial procesar primero las imágenes de microondas activa y con esto se podrá conocer la división en caso de haberla del área de estudio.
- d) El cálculo del número equivalente de looks, y el posterior cálculo de intervalo de confianza permite conocer el umbral de cambio adecuado para cada tipo de imágenes radar con las cuales se está trabajando.

- e) Como **conclusiones de la evaluación de datos SAR con información derivada de sensores ópticos**. Realizando una comparación entre los valores Kappa del período 1 y el período 2 derivados de imágenes ALOS PALSAR, los del período 2 presentan un mejor valor que los del período 1. Por lo que se evidenció que con mapas de referencia con fechas más cercanas a los mapas a ser evaluados, la evaluación es mucho más confiable y las estadísticas de la matriz de confusión dan mejores resultados.
- f) La evaluación de los mapas de cambio con información SAR con respecto a una fuente de referencia externa (Datos del INA) presentó algunos problemas. Primeramente fue la única información disponible con que se pudo comparar los productos de la tesis que cubren toda el área de estudio por lo cual no se contó ni fue posible tener otra fuente de información con que contrastar los resultados como puntos de campo. Segundo no fue posible evaluar todos los períodos debido a que no se disponía de información para todas las fechas como fue el caso del período 1 y 2 con lo cual solamente se pudo evaluar algunos de los productos derivados de imágenes ALOS PALSAR de banda L, tampoco fue posible evaluar producto derivado de imágenes COSMO Skymed. Tercero al generar los mosaicos de información de referencia para la evaluación estos no fueron de la misma fecha (ver tabla 16) lo que de por sí generaron diferencias estadísticas en los cálculos.
- g) Otras diferencias entre los datos de referencia y los datos generados en la tesis pueden encontrarse en las características del sensor utilizado. La energía electromagnética de la porción óptica del espectro (medida por el satélite Landsat 5 y 7 usado por el INA para la producción de sus máscaras de agua), no es capaz de atravesar el dosel de la vegetación arbórea. La energía de la porción de las microondas, en cambio, es capaz de atravesar el dosel y detectar la presencia de agua sobre el suelo de las forestaciones. Por lo tanto se considera la diferencia encontrada como una mayor capacidad de los sensores SAR para detectar inundaciones debajo del dosel de la vegetación arbórea.
- h) Como **conclusiones de la información de Microondas Pasivas**, por los análisis realizados, se observó que a mayor cantidad de datos SAR disponibles y con fechas más cercanas (como es el caso del período tres), el algoritmo para el cálculo de ff a partir del PIf interpolado dio mejores resultados como sucedió en la zona Norte, en contraposición de cuando se dispone de menor cantidad de datos SAR con fechas más espaciadas (como es el caso de los períodos uno y dos), el algoritmo para el cálculo de ff a partir del PIf constante dio mejores resultados; además se observó que en el segundo período las bandas descendentes funcionaron mejor en los resultados de ff . La banda L tanto ascendente y descendente presentó mayor variabilidad en comparación a las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes del sensor AMSR2, esto fue esperable debido a que SMOS tiene un período de revisita menor (3 días) y su longitud de onda es mayor (~23 cm) en comparación a las otras bandas.
- i) Con datos de campo se puede mejorar las estimaciones para decidir que banda es la más apropiada para para el cálculo de fracción de área inundada.
- j) Se observó que el período en el cual los valores de $PIobs$ no siguen la tendencia del NDA coincide con el período en el cual el NDA es menor a 3 m, lo que sugiere que por debajo de

dicho valor el comportamiento de la planicie está desacoplado del comportamiento del río.

- k) El período en el que ff presenta mucho ruido coincide con el período en el cual $PIobs$ presenta valores ruidosos, que coincide con el período en el cual NDA está por debajo de los 3 m. Por lo tanto, la mala performance del algoritmo de obtención de fracción de área inundada puede explicarse por 2 causas no excluyentes: 1) la amplificación del ruido presente en $PIobs$, que es la variable observacional al algoritmo de ff y 2) la posibilidad, ya explicada, que con NDA menores a 3 m la planicie y el río posean dinámicas desacopladas.
- l) Como **conclusiones de la correlación de datos de microondas pasivas con información derivada de sensores ópticos para evaluación**. Resulta interesante que los mejores resultados en la correlación hayan sido, en la mayoría de los casos analizados, los correspondientes a las bandas de microondas pasivas de mayor frecuencia. En estos casos es en los que se espera una mayor atenuación de la emisión por parte del dosel vegetal, lo que indicaría a priori una menor aptitud para detectar agua bajo la vegetación, similarmente a (aunque en menor medida) lo que ocurre con los datos en la porción visible e infrarrojo del espectro electromagnético utilizados por el INA (datos usados de referencia). En este sentido, es posible especular que las diferencias encontradas entre los valores de fracción de área inundada obtenidas a partir del algoritmo usado en esta tesis y los valores obtenidos a partir de las mascaradas de agua realizadas por el INA se deban mayormente a las diferencias en la porción del espectro electromagnético usado para la detección y no necesariamente a defectos del algoritmo explorado en esta tesis.
- m) La validación de los datos de microondas pasivas usando los coeficiente de correlación para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf constante determinaron lo siguientes. Para la zona Total la clase Asc Ka presentó una asociación lineal excelente, seguido de las clases Asc C, Asc Ku, Desc C y Des X que presentaron una asociación lineal regular. Para la zona Norte todas las clases a excepción de la clase Asc Ka tuvieron evidencias de una significativa correlación, presentando una asociación lineal entre excelente a regular. Para la zona Sur las clases Asc Ku, Asc Ka y Desc C presentaron una asociación lineal regular.
- n) La validación de los datos de microondas pasivas usando los coeficiente de correlación para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de PIf interpolado determinaron lo siguientes. Para la zona Total la clase Asc Ka presentó una asociación lineal excelente, seguido de las clases Asc C, Asc Ku, Desc C y Des X que presentaron una asociación lineal regular. Para la zona Norte todas las clases a excepción de la clase Asc Ka tuvieron evidencias de una significativa correlación, presentando una asociación lineal entre excelente a regular. Para la zona Sur las clases Desc C presentó una asociación lineal buena, mientras que las clases Asc Ku, Asc Ka y Desc X presentaron una asociación lineal regular.
- o) La evaluación de los datos de microondas pasivas con respecto a una fuente de referencia (Datos del INA) presentó algunos problemas. Solo fue posible evaluar el período 2 debido a que no se dispone de información para todas las fechas, esto implicó no poder evaluar los

datos de SMOS que se encuentran en el período 3 correspondiente al año 2014.

- p) Como **conclusiones varias** del trabajo se indica que los datos hidrológicos proporcionados por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (UNL, 2016b), fueron insumos de gran ayuda para poder conocer las fechas de época seca para poder hacer los cálculos del índice de polarización de áreas no inundadas (PI_{nf}) utilizando las imágenes de microondas pasivas. Además sirvieron para saber si el algoritmo de los diferentes valores de fracción de área inundada (ff) obtenidos siguen una adecuada tendencia con el NDA y en el caso de no hacerlo conocer el tiempo de retraso con respecto al NDA del río Paraná. Finalmente sirvió para poder clasificar las imágenes SAR en época no inundada e inundada para poder aplicar la detección de cambios.
- q) Como conclusión complementaria, se indica que los programas libres como Bash, OGR y awk. para el procesamiento de la información de la tesis demostraron gran potencia en la automatización de los procesos de la información de microondas pasivas en formato vector, lo que influyó en un ahorro de tiempo considerable por el gran volumen de datos. Mientras que el programa R sirvió para el cálculo de las estadísticas para la evaluación de la correlación en los datos de microondas pasivas. El programa libre Nest cuenta con herramientas de preprocesamiento y calibración muy adecuadas para imágenes SAR. Por otro lado los programas comerciales ENVI, ERDAS y ArcGIS tienen herramientas muy buenas que ayudaron en varias etapas del procesamiento de la información.
- r) Como **recomendaciones del trabajo** se indica que es importante tener un Mapa de Ambientes (ver figura 2) adecuadamente generado, para poder contar con un límite de cuerpos de agua confiable y así minimizar los errores en la detección de áreas inundadas o no inundadas. Debido a que el límite de los cuerpos de agua es variable en el tiempo, se podría probar generar mapas de cuerpos de agua para diferentes fechas usando por ejemplo la detección de umbrales.
- s) Dentro de las posibilidades de diferentes proyectos relacionados con mapeo temático, se sugiere trabajar con datos de campo para validación y de fechas lo más cercanas al evento estudiado.
- t) Adicionalmente se recomienda para análisis estadísticos para la exploración de los datos el uso de gráficos de cajas y diagramas de dispersión, las cuales fueron una herramienta muy útil para una revisión cualitativa de los datos. También el uso de pruebas de normalidad ayudaron a conocer cual coeficiente de correlación es aplicable en los datos. Los contraste de hipótesis ayudaron a definir cuales variables eran significativamente correlacionadas. Finalmente los coeficientes de correlación ayudaron a cuantificar el grado de correlación entre los datos de ff obtenidos en la tesis con relación a una fuente externa de evaluación.
- u) **Para trabajos a futuro** la metodología de trabajo puede aplicarse en zonas de humedales donde se quiera usar información de microondas activas y pasivas.
- v) la metodología de trabajo puede replicarse en zonas de estudio de área más pequeña (buscando el modo de adquisición adecuado para la aplicación ver secciones 3.1.2.2.2.1 y

3.1.2.3.2) donde se quiera utilizar imágenes SAR para detectar zonas de inundación.

- w) Al utilizarse en el presente estudio imágenes ALOS PALSAR (Banda L) puede servir de guía para cuando estén disponible imágenes del satélite SAOCOM de CONAE que tendrá el mismo tipo de banda.

BIBLIOGRAFÍA.

- Ahtonen, P., Euro, M., Hallikainen, M., Solbø, S., Johansen, B., & Solheim, I. (2004). *SAR and optical based algorithms for estimation of water bodies*.
- Alonso, M., & Finn, E. (1999). *Física. Fundamentos Cuánticos y Estadísticos* (Revisada y aumentada, Vol. III). Addison Wesley Iberoamericana.
- Aparicio, J., Martínez, M., & Morales, J. (2004). *Modelos Lineales Aplicados en R*. Universidad Miguel Hernández.
- Aronoff, S. (1982). The map accuracy report: A user's view. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48, 1309–1312.
- AS I & TELESPAZIO COMPANY. (2016). COSMO-SkyMed FAQ. Retrieved from http://www.e-geos.it/images/Satellite_data/DG_DATA/tech/Cosmo_FAQ.pdf
- ASI. (2007a). *COSMO SkyMed SAR PRODUCTS HANDBOOK*. Italian Space Agency.
- ASI. (2007b). *COSMO SkyMed System Description & User Guide*. Italian Space Agency.
- Badii, M., Guillen, O., Lugo, S., & Aguillar, G. (2014). Correlación No-paramétrica y su Aplicación en la Inveestigaciones Científicas. *International of Good Conscience*, 9(2), 31–40.
- Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J., & Robledo, C. (2008). *InfoStat Software Estadístico. Manual del usuario*. Córdoba, Argentina.: Brujas.
- Bamler, R., & Schättler, B. (1993). Geometric Properties of SAR Images. In *SAR Geocoding: Data and Systems* (pp. 53–102). Karlsruhe: Hebert Wichmann Verlag GmbH.
- Barber, M. (2013). *Parametrización y optimización de modelos de inversión para la obtención de humedad del suelo a partir de datos satelitales de Radares de Apertura Sintética*. (Tesis doctoral). Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales., Argentina.
- Bourgeau-Chavez, L., Kasischke, E., Brunzell, S., Mudd, J., Smith, K., & Frick, A. (2001). Analysis of space-borne SAR data for wetland mapping in Virginia riparian ecosystems., 22(18), 3665–3687.
- Buemi, M. (2012). *Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack*

- (Tesis doctoral). Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- CCRS. (2001). *Programa GlobeSAR: Material educativo para teledetección mediante radares*. Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada. Retrieved from <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/internat/glbsar2/indexe.html>.
- CEC-OS. (2016). *Sea Surface Salinity Remote Sensing*. Centre Aval de Traitement des Données SMOS Ocean Salinity Expert Center. Retrieved from <http://www.salinityremotesensing.ifremer.fr/activities/smos>
- Chor, L. (1986). *Applied Remote Sensing*. Longman Group UK.
- Choudhury, B. (1989). Monitoring global land surface using Nimbus-7 37 GHz data, theory and examples. *International Journal of Remote Sensing*, (10), 1579–1605.
- Chuvieco, E. (2007). *Teledetección Ambiental* (3ra ed., Vol. 1). Barcelona – España: Ariel, S.A.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental* (1ra ed., Vol. 1). Barcelona – España: Ariel, S.A.
- Clementi, A. (2013). *Física Moderna y Aplicaciones* (Primera). Buenos Aires: De la Universidad Tecnológica Nacional.
- Cohen, J. (1960). *A coefficient of agreement for nominal scales* (1st ed., Vol. 20).
- Congalton, R. (1988). A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(5), 593–600.
- Cumming, I., & Wong, F. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar. Algorithms and Implementation*. Artech House.
- Curlander, J., & McDonough, R. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: John Wiley & Sons.
- Danklmayer, A., Döring, B., Schwerdt, M., & Chandra, M. (2009). Assessment of atmospheric propagation effects in SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(10), 3507–3518.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Gonzalez, L., Tablada, M., DÍaza, M., Robledo, C., & Balzarini, M.

- (2009). *Estadística para las ciencias agropecuarias*. (Séptima). Argentina.
- Drago, E. (1971). Génesis y evolución de la llanura aluvial del Paraná medio y los cuerpos de agua y contenidos en ella. *Instituto Nacional de Limnología (CNICT), Santo Tomé*.
- Drakos, N. (1998). *Bioestadística: Métodos y Aplicaciones*. Universidad de Malaga. Retrieved from <http://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/libros/ftp.bioestadistica.uma.es/libro/node22.htm>
- Edrosa, M. (2011, November). *Aplicación de la Teledetección para el Monitoreo de Eventos Hídricos Superficiales mediante Imágenes Cosmo SkyMed*. Córdoba Argentina.
- Elachi, C. (1988). *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Technology*. New York, USA: IEEE Press.
- ESA. (2009a). *La Misión Del Agua De La ESA . SMOS* (1ra edición en español). European Spatial Agency.
- ESA. (2009b, February). The SMOS payload: MIRAS. *Bulletin*, (137), 7.
- ESA. (2017). Radar and SAR Glossary. Retrieved from <http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.htm>
- Espinosa, V. (2016). actores que afectan la estimación de biomasa aérea en bosques tropicales utilizando sensores remotos de radar.
- Evans, D., Farr, T., Forf, J., Thompson, T., & Werner, C. (1986). Multipolarization radar images for geologic mapping and vegetation discrimination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(2), 246–257.
- Ferrazzoli, P., & Guerriero, L. (1996). Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 34, 433–443.
- Ferrazzoli, P., Rahmoune, R., Moccia, F., Grings, F., Salvia, M., Barber, M., ... Borro, M. (2010). The effect of rain and flooding events on AMSR-E signatures of La Plata Basin, Argentina, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(1), 81–90.

- Filí, M. (1986). Geohydrology of the region affected by the Paraná Medio Multipurpose Development. In *Proyecto Paraná Medio, Agua y energía Eléctrica*. Buenos Aires, Argentina.
- Font, J., Kerr, Y., & Berger, M. (2000). Measuring ocean salinity from space: The European space agency's SMOS mission. *Backscatter*, (11), 17–19.
- Franceschetti, G., & Lanari, R. (1999). *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC Press.
- Gloersen, P., & Hardis, L. (1979). *The Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) Experiment*. Madrid, NASA/Goddard Space flight Center: C.R.
- Gong, M., Zhou, Z., & Ma, J. (2012). Change detection in synthetic aperture radar images based on image fusion and fuzzy clustering. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(4), 2141–2151.
- Gong, P., & Howart, P. (1990). An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(5), 597–603.
- Gordas, J., Cardiel, N., & Zamorano, J. (2011). *Estadística Básica para estudiantes de Ciencias*. Madrid, España.
- Green, K., Kempka, D., & Lackey, Y. (1994). Using Remote Sensing to Detect and Monitor Land-cover and Land-use Change. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(3), 331–337.
- Grings, F. (2008). *Extracción de información ambiental a partir de imágenes de radar utilizando modelos de interacción onda-blanco*. (Tesis doctoral). de Buenos Aires., Buenos Aires, Argentina.
- Grings, F., Ferrazzoli, P., Jacobo-Berlles, J., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Pratolongo, P., & Kandus, P. (2006). Monitoring flood condition in marshes using EM models and Envisat ASAR observations. *Geoscience and Remote Sensing*, 44(4), 936–942.
- Grings, F., Ferrazzoli, P., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Kandus, P., Guerriero, L., & Jacobo-Berlles, J. (2005). Modeling temporal evolution of junco marshes radar signatures.

- Geoscience and Remote Sensing*, 43(10), 2238–2245.
- Hamilton, S., Sippel, S., & Melack, J. (2002). Comparison of inundation patterns among major South American floodplains. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20).
- Hanssen, R. (2002). *Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Hecht, E. (2000). *Óptica* (Tercera). Madrid: Addison Wesley Iberoamericana.
- Henderson, F. (1987). Consistency of open surface detection with L-band SEASAT SAR imagery and confusion with other hydrologic features (pp. 69–78). Presented at the Proceedings of the 13th Annual Conference of Remote Sensing Society (Advances in Digital Image Processing), UK: University of Nottingham.
- Henderson, F., & Lewis, A. (Eds.). (1998a). *Principles and Applications of Imaging Radar* (Third, Vol. 2). EE.UU.
- Henry, J., Chastanet, P., Fellah, K., & Desnos, Y. (2006). ENVISAT multi-polarised ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10), 1921–1929.
- Hess, L., & Melack, J. (1994). Mapping wetland hydrology and vegetation with synthetic aperture radar. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 20, 197–205.
- Hess, L., Melack, J., Filoso, S., & Wang, Y. (1995). Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 896–904.
- Hess, L., Melack, J., Novo, E., Barbosa, C., & Gastil, M. (2003). Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 87, 404–428.
- Hess, L., Melack, J., & Simonett, D. (1990). Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), 1313–1325.
- Hong, S., Wdowinski, S., & Kim, S. (2010). Evaluation of TerraSAR-X observations for wetland InSAR application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 864–873.

- Horritt, M., Mason, D., Cobby, D., Davenport, I., & Bates, P. (2003). Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 85, 271–281.
- <http://www.waleedelsafoury.com/VB/showthread.php?137-What-is-Antenna>. (n.d.). Retrieved May 15, 2016, from
- Hudson, W., & Ramn, C. (1987). Correct formulation fo the kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (53), 421–422.
- Hunt, G. (1980). Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing., 5–45.
- Iriondo, M. (1972). Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás (República Argentina). *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 27(2), 155–160.
- Iriondo, M., & Drago, E. (1972). Descripción cuantitativa de dos unidades geomorfológicas de la llanura aluvial del rio Paraná Medio (República Argentina). *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 27, 143–160.
- ITC. (2004a). *Principles of Remote Sensing* (Third). The Netherlands: International Institute For Geo-Information Science And Earth Obsevation.
- Janssen, L., & Van Der Wel, F. (1994). Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: a review. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (60), 419–426.
- JAXA. (2006). *AMSR-E Data Users Handbook* (4th ed.). Earth Observation Center, Japan Aerospace Exploration Agency.
- JAXA. (2008). *ALOS Data Users Handbook* (Revision C). Earth Observation Center, Japan Aerospace Exploration Agency.
- JAXA. (2011). Advanced Land Observing Satellite. Earth Observation Research Center JAXA EORC. Retrieved from http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm.
- JAXA. (2012). *PALSAR User's Guide* (2nd ed.). Earth Observation Center, Japan Aerospace Exploration Agency.
- JAXA. (2013). *Data User' Manual for the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)*

- onboard the Global Change Observation Mission 1st – Water “SHIZUKU” (GCOM-W1)* (2nd ed.). Earth Observation Center, Japan Aerospace Exploration Agency.
- Jensen, J. (1996). *Introductory Digital Image Processing, A Remote Sensing Perspective*. (2da ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Jensen, J. (2000). *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. Upper Saddle River Prentice Hall.
- Junk, W., Barley, P., & Sparks, R. (1989). The flood pulse concept in river floodplain system. *Fish Aquatic*, 101–127.
- Kasischke, E., & Bourgeau-Chavez, L. (1997). Monitoring south Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 33, 281–291.
- Kasischke, E., Smith, K., Bourgeau - Chavez, L., Romanowicz, E., Brunzell, S., & Richardson, C. (2003). Effects of the seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backsatter measured on ERS-2 SAR image. *Remote Sensing Environ*, (88), 423–441.
- Kawanishi, T., Sezai, T., Ito, Y., Imaoka, K., Takeshima, T., Ishido, Y., ... Spencer, R. (2003). The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E). *NASDA’s Contribution to the EOS for Global Energy and Water Cycle Studies, IEEE T. Geoscience Remote Sensing*, 41, 184–194. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808331>
- Kerr, Y., Waldteufel, J., Wigneron, J., Matinuzzi, J., Font, J., & Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space: The soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1729–1735.
- Landis, J., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics.*, 33, 159—174.
- Lanfri, S. (2011). *Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs* (Tesis Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias). Nacional de Córdoba, Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, CONAE, Córdoba Argentina. Retrieved from

http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/512/mod_page/content/85/Lanfri_1.pdf

- Lang, M., Townsend, P., & Kasischke, E. (2008). Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3898–3907.
- Laur, H., Bally, P., Meadows, P., Sanchez, J., Schaettler, B., Lopinto, E., & Esteban, D. (2004). *Derivation of the Backscattering Coefficient in ESA ERS SAR PRI Products*. European Spatial Agency. Retrieved from https://earth.esa.int/documents/10174/13019/ers_sar_calibration_issue2_5f.pdf
- Leckie, D. (1998). *Forestry applications using imaging radar*. – In Henderson, F. M. & Lewis, A. J. (eds.): *Manual of remote sensing: Principles and applications of imaging radar*. (F. Henderson & A. Lewis, Eds.) (Third). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Lee, J. (1980). Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, PAMI-2(2), 165–168.
- Lee, J. (1981). Refined filtering of image noise using local statistics. *Computer Graphics and Image Processing*, 15(4), 380–389.
- Lewis, A. (Ed.). (1998). *Geomorphic and hydrologic applications of active microwave remote sensing*. – In Henderson, F. & Lewis, A. *Manual of remote sensing: Principles and applications of imaging radar* (Third). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (Fifth). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Long, D. (2009). Microwave Sensors – Active and Passive, Chapter 6,. In *Earth Observation Platforms & Sensors* (Third, Vol. 1). Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Lopinto, E. (2010). *An Introduction to the Synthetic Aperture Radar*.
- Lusch, D. (1999). *Introduction To Microwave Remote Sensing*. Center For Remote Sensing and

Geographic Information Science Michigan State University.

- Maitre, H. (Ed.). (2001). *Processing of Synthetic Aperture Radar Images*. John Wiley and Sons, Inc.
- Malnes, E., Guneriussen, T., & Høgda, K. (2002). Mapping of flood-area by RADARSAT in Vannsjø, Norway. In *Proceedings of the 29th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. Buenos Aires, Argentina.
- Marchetti, Z. (2010). *Patrones de distribución de la vegetación en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná* (Tesis doctoral). Nacional de Cuyo, Argentina.
- Marchetti, Z., Minotti, P., Ramonell, C., Schivo, F., & Kandus, P. (2015). NDVI patterns as indicator of morphodynamic activity in the middle Paraná river floodplain. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.003>
- Marchionni, D., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural: Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. *Geoacta*, 39(1), 62–89.
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A., & Cánova, A. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION. *Rev Haban Cienc Méd La Habana*, III(2).
- Martinis, S. (2010). *Automatic near real-time flood detection in high resolution X-band Synthetic Aperture Radar satellite data using context-based classification on irregular graphs* (Dissertation). Ludwig-Maximilians, München, Germany. Retrieved from <http://edoc.ub.unimuenchen.de/12373/>
- Mason, D., Horritt, M., Dall'Amico, J., Scott, T., & Bates, P. (2007). Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12), 3932– 3943.
- Mathews, J., & Fink, K. (2000). *Métodos Numéricos con MATLAB* (Tercera). Madrid, España: Prentice Hall.
- Mejía, X., & Moncayo, P. (2012, June). *Evaluación de métodos de clasificación de imágenes*

satelitales de moderada y alta resolución para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo basados en píxeles y orientados a objetos: Estudio de caso en sub escena de la parroquia Shushufindi, provincia de Sucumbíos, utilizando imágenes Aster e Ikonos. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolqui Ecuador.

Melack, J., & Wang, Y. (1998). Delineation of flooded area and flooded vegetation in Balbina Reservoir (Amazonas, Brazil) with synthetic aperture radar. *Verhandlungen Internationale Vereinigung Für Limnologie*, 26, 2374–2377.

Mendenhall, W., Breaver, R., & Breaver, B. (2010a). *Introducción a la probabilidad y estadística.* (Decima Tercera).

Monela, E. (2014). *Estudio de modelos electromagnéticos para la obtención de mapas de humedad superficial de suelo* (Tesis Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias). Nacional de Córdoba, Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, CONAE, Córdoba Argentina. Retrieved from http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/512/mod_page/content/98/Tesis_Maestr%C3%ADa_Monella.pdf

Moreira, A. (2013). Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications. Microwaves and Radar Institute of the German Aerospace Center (DLR). Presented at the 4yh Advanced Training Course in Land Remote Sensing, Horokopio University, Athens, Greece.

Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. (2013). A tutorial on Synthetic Apertura Radar. Microwaves and Radar Institute of the German Aerospace Center (DLR), Germany. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*.

Neiff, J. (1990). Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Interciencia*, 15(6), 424–441.

Neiff, J. (1996). Large rivers of South America: toward the new approach. *Verhandlungen Des Internationalen Verein Limnologie, Alemania*, 26, 167–180.

Njoku, E., & Farr, T. (2013). *Encyclopedia of Remote Sensing*. London: Springer.

NSIDC. (2016). *AMSR-E/Aqua*. National Snow and Ice Data Center Distributed. Retrieved from

<https://nsidc.org/data/amsre>

- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding Synthetic Aperture Radar Images* (2nd ed.). SciTech Publishing.
- Olmsted, C. (1993, July). Alaska SAR Facility - Scientific SAR User's Guide.
- Ormeño, S. (2006). *Teledetección Fundamental* (Tercera). Universidad Politécnica de Madrid.
- Ormsby, J., Blanchard, B., & Blanchard, A. (1985). Detection of lowland flooding using active microwave systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(3), 317–328.
- Ouchi, K. (2013). Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. *Remote Sensing*, 5, 716–807. <https://doi.org/10.3390/rs5020716>
- Palladino, A. (2011). Atención primaria de salud, Epidemiología e informática II.
- Panozzo, Z. (2013). *Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega K. Simulación y Validación* (Tesis maestría). Nacional de Córdoba, Córdoba Argentina. Retrieved from http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/512/mod_page/content/78/M_Panozzo-Tesis.pdf
- Parmuchi, M., Karszenbaum, H., & Kandus, P. (2002). Mapping the Paraná River delta wetland using multi-temporal RADARSAT/SAR data and a decision based classifier. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28.
- Pope, K., Rejmankova, E., Paris, F., & Woodruff, R. (1997). Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, 59, 157–166.
- Ramsey, E. (1995). Monitoring flooding in coastal wetlands by using radar imagery and ground-based measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 16(13), 2495–2502.
- Raney, R. (1998). Radar Fundamentals: Technical Perspective. In F. Henderson & A. Lewis (Eds.), *Principles & Applications of Imaging Radar* (p. 866). NY: Wiley & Sons.
- Rees, W. (2005). *Physical Principles of Remote Sensing (Topics in Remote Sensing)*. UK: Cambridge University Press.

- Richards, J. (2009). *Remote Sensing with Imaging Radar*. Canberra Australia: Spring.
- Richards, J., Woodgate, P., & Skidmore, A. (1987). An explanation of enhanced radar backscattering from flooded forests. *International Journal of Remote Sensing*, 8(7), 1093–1100.
- Rignot, E., & Van Zyl, J. (1993). Change detection techniques for ERS-1 SAR data. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(4), 896–906.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., & Watanabe, M. (2004). ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. Presented at the 4th International Symposium on Retrieval of Bio – and Geophysical from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria.
- Saatchi, S., Nelson, B., Podest, E., & Holt, J. (2000). Mapping land cover types in the Amazon Basin using 1 km JERS-1 mosaic. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1201–1234.
- Salvia, M. (2010). *Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del Macrosistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos* (Tesis doctoral). Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Argentina. Retrieved from http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_4691_Salvia.pdf.
- Salvia, M. (2014). Introducción a la teledetección en microondas . Extracción de información , detección de cambios. Clase 3.
- Salvia, M., Grings, F., Ferrazzoli, P., Bruscantini, C., Barraza, V., Perna, P., & Karszenbaum, H. (2013). Paraná River Delta 2013 flood monitoring using AMSR-2, SMOS, Aquarius and Cosmo Skymed data. *Proceedings of 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Microrad14. Pasadena, EEUU*, 14–18. <https://doi.org/10.1109/MicroRad.2014.6878899>
- Salvia, M., Grings, F., Ferrazzoli, P., Rahmoune, R., Barber, M., & Karszenbaum, H. (2010). Monitoring flooded area fraction in floodplains of Paraná basin using passive and active microwave systems. Presented at the I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.

- SARMAP. (2008). *Synthetic Aperture Radar and SARscape*. European Space Agency: UNESCO BILKO group.
- Sarti, F., Inglada, J., Landry, R., & Pultz, T. (2001). Risk management using remote sensing data: moving from scientific to operational applications. Presented at the Proceedings of the X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Schumann, G., Hostache, R., Puech, C., Hoffmann, L., Matgen, P., Pappenberger, F., & Pfister, L. (2007). High-resolution 3-D flood information from radar imagery for flood hazard management. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6), 1715–1725.
- Sharkov, E. (2003). *Passive microwave remote sensing of the Earth: physical foundations*. Springer Science & Business Media.
- Sharma, S. (2006). *Soil Moisture Estimation Using Active And Passive Microwave Remote Sensing Techniques*. Andhra. National Remote Sensing Agency (NRSA), Indian.
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 989–1003.
- Sippel, S., Hamilton, S., Melack, J., & Choudhury, B. (1994). Determination of inundation area in the Amazon River floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. *Remote Sensing Environ*, 48, 70 – 76.
- Sippel, S., Hamilton, S., Melack, J., & Novo, E. (1998). Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3055–3074.
- Skolnik, M. (1962). *Introduction to Radar System*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
- Slater, P. (1980). *Remote Sensing. Optics and Optical Systems*. London; Amsterdam; Don Mills; Sydney; Tokyo: Addison Wesley.
- Smith, L. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 11, 1427–1439.
- Spiegel, M. (1991). *Estadística*. Mc Graw Hill.

- Story, M., & Congalton, R. (1986). *Accuracy assessment: A user's perspective*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. (Vol. 52).
- Szretter, M. (2013, Octubre de). Apuntes de Regresión Lineal.
- Townsend, P. (2001). Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 857–864.
- Townsend, P. (2002). Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forest wetlands using C-band SAR. *International Journal of Remote Sensing*, 23(3), 332–460.
- Townsend, P., & Walsh, S. (1998). Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*, 21, 295–312.
- Ulaby, F., Dobson, M., & Bradley, G. (1981). *Radar reflectivity of bare and vegetation-covered soil*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
- Ulaby, F., Moore, R., & Fung, A. (1981). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive* (Vols. 1–1 and 2). Reading, Massachusetts, USA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Ulaby, F., Moore, R., & Fung, A. (1982). *Microwave Remote Sensing: Active and passive. Vol. II – Radar remote sensing and surface scattering and emission theory* (Advanced Book Program, Vols. 1–1 and 2). Reading, Massachusetts, USA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Ulaby, F., & Van Zyl, J. (1990). *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*.
- UNL. (2016). <http://fich.unl.edu.ar/cim/alturas-rio-parana>. Retrieved January 15, 2016, from
- UNL. (2016, February). Alturas hidrométricas de la cuenca del Paraná de las estaciones: Esquina, Paraná y Santa Fe, comprendidas en el período de tiempo del año 2002 al 2015. Retrieved from <http://fich.unl.edu.ar/cim/alturas-rio-parana>
- Wang, Y., Hess, L., Filoso, S., & Melack, J. (1995). Understanding the radar backscattering from flooded and non-flooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. *Remote Sensing of Environment*, 54, 324–332.

- Wang, Y., & Imhoff, M. (1993). Simulated and observed L-HH radar backscatter from tropical mangrove forests. *International Journal of Remote Sensing*, 14(15), 2819 – 2828.
- Wentz, F., Meissner, T., Gentemann, C., & Brewer, M. (2014a). Remote Sensing Systems AQUA AMSR-E. Remote Sensing Systems. Retrieved from www.remss.com/missions/amsre
- Wentz, F., Meissner, T., Gentemann, C., Hilburn, K., & Scott, J. (2014b). Remote Sensing Systems GCOM-W1 AMSR2. Retrieved from www.remss.com/missions/amsre
- Woodhouse, I. (2006). *Introduction to Microwave Remote Sensing*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Wu, S. (1984). Analysis of synthetic aperture radar data acquired over a variety of landcover. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22(6), 550–554.
- Wu, S., & Sader, S. (1987). Multipolarization SAR data for surface feature delineation and forest vegetation characterization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 25(1), 67–76.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS.

- <https://earth.esa.int/web/nest/downloads>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnético
- http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson7-2/passive.html
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>
- <http://marswiki>
- <http://www.ccrs.nrcan>
- <http://www.iges.org/grads/gadoc/shapefilles.html>
- <http://www.ina.gov.ar/alerta/index.php?alerta=1>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/electrico/gauss/gauss.html>
- <http://www.spataleecology.com/htools>
- <http://www.thestargarden.co.uk/Spectral-lines.html>
- <http://www.waleedelsafoury.com/VB/showthread.php?137-What-is Antenna>.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

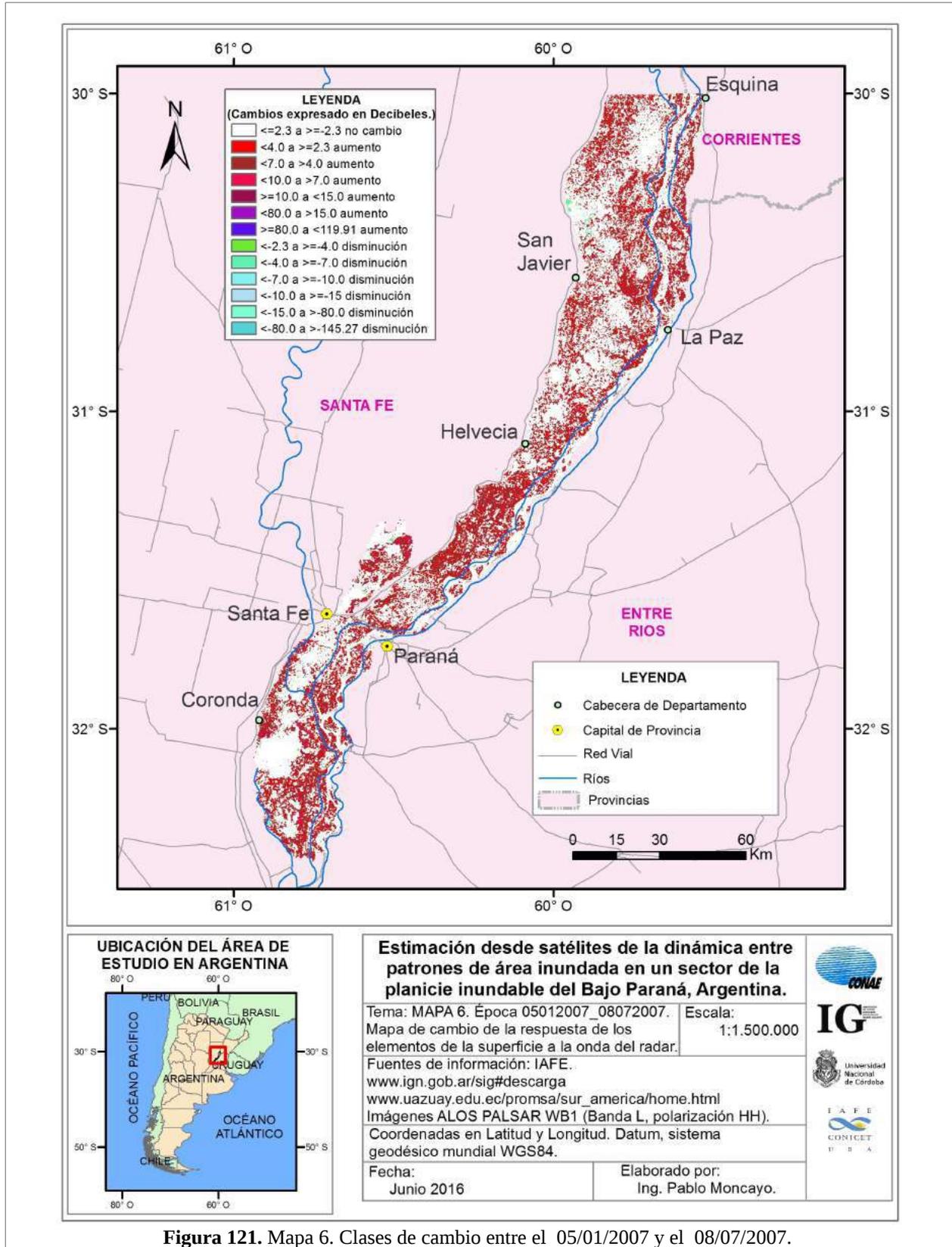
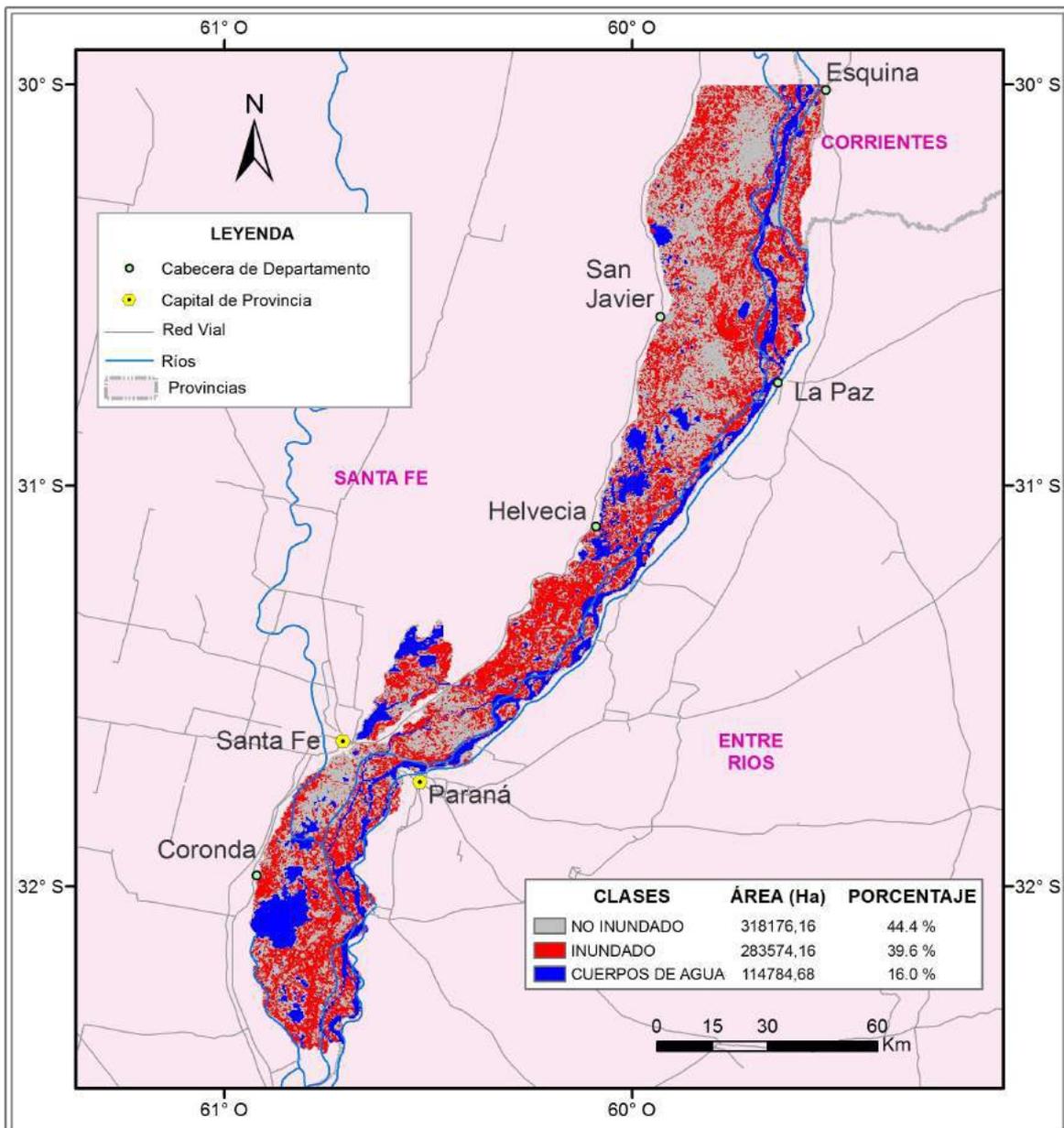


Figura 121. Mapa 6. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 08/07/2007.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 7. Época 05012007_08072007. Escala: 1:1.500.000
 Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016
 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 122. Mapa 7. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

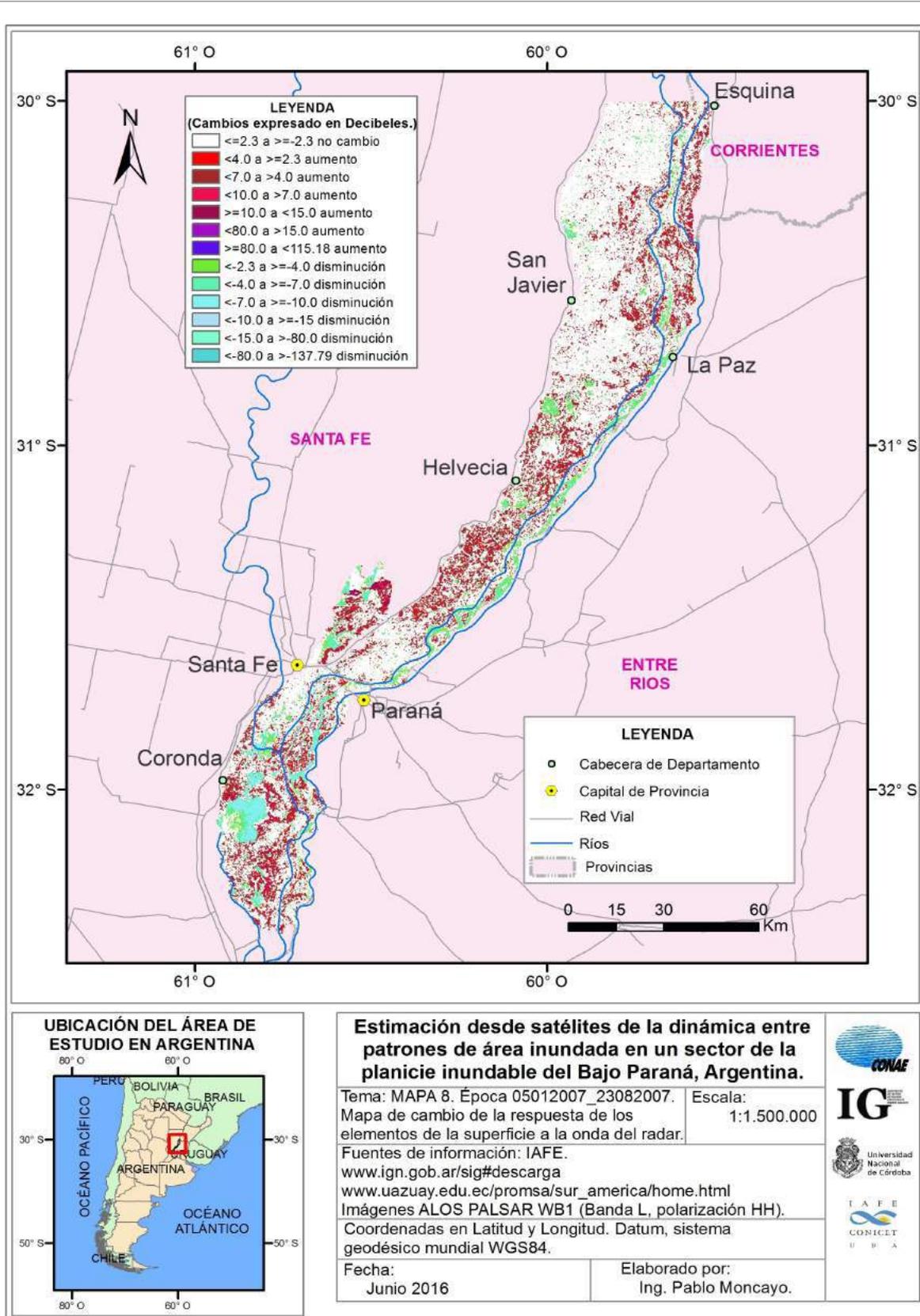
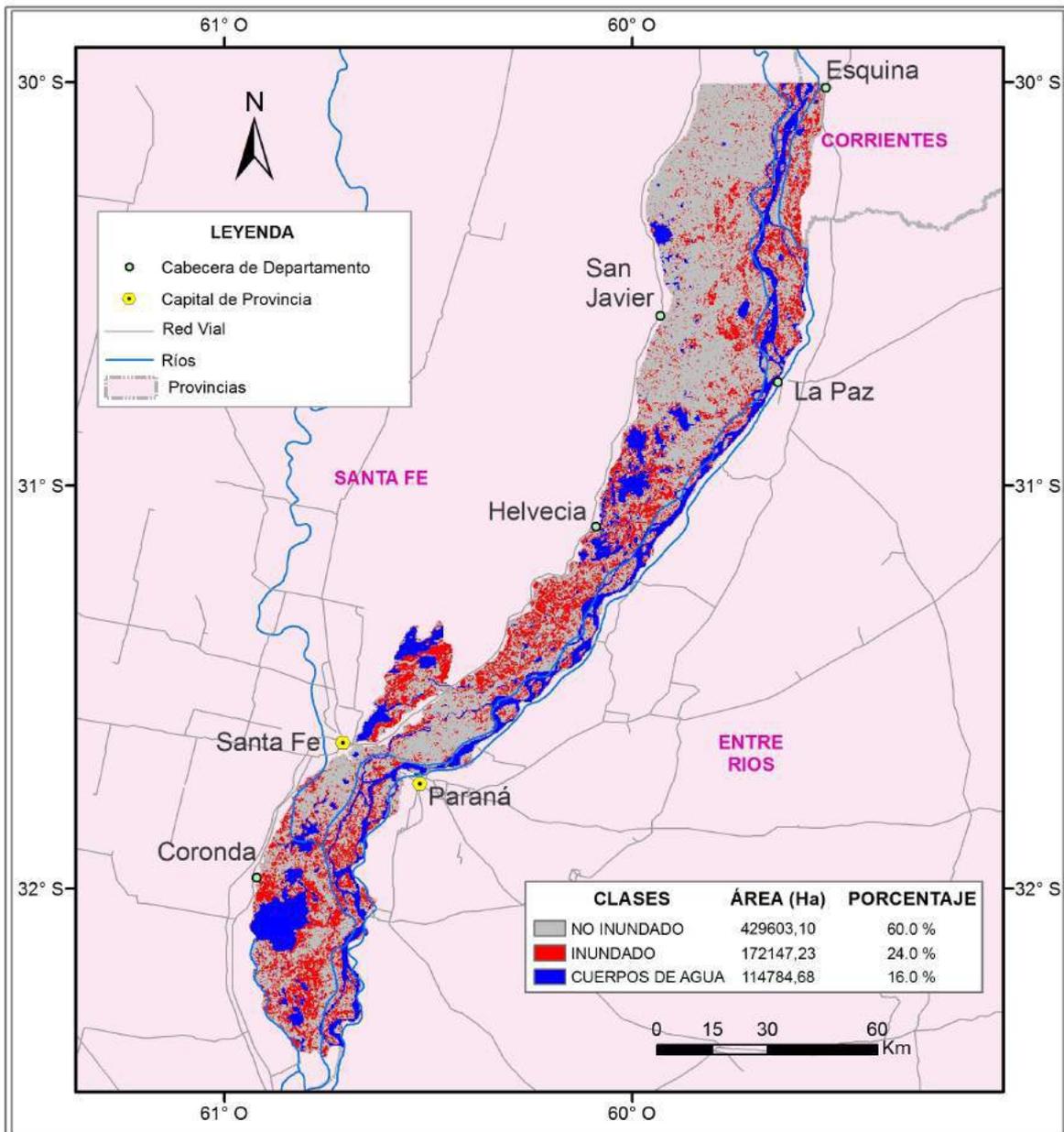


Figura 123. Mapa 8. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/08/2007.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 9. Época 05012007_23082007. Escala: 1:1.500.000
 Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 124. Mapa 9. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/08/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007.

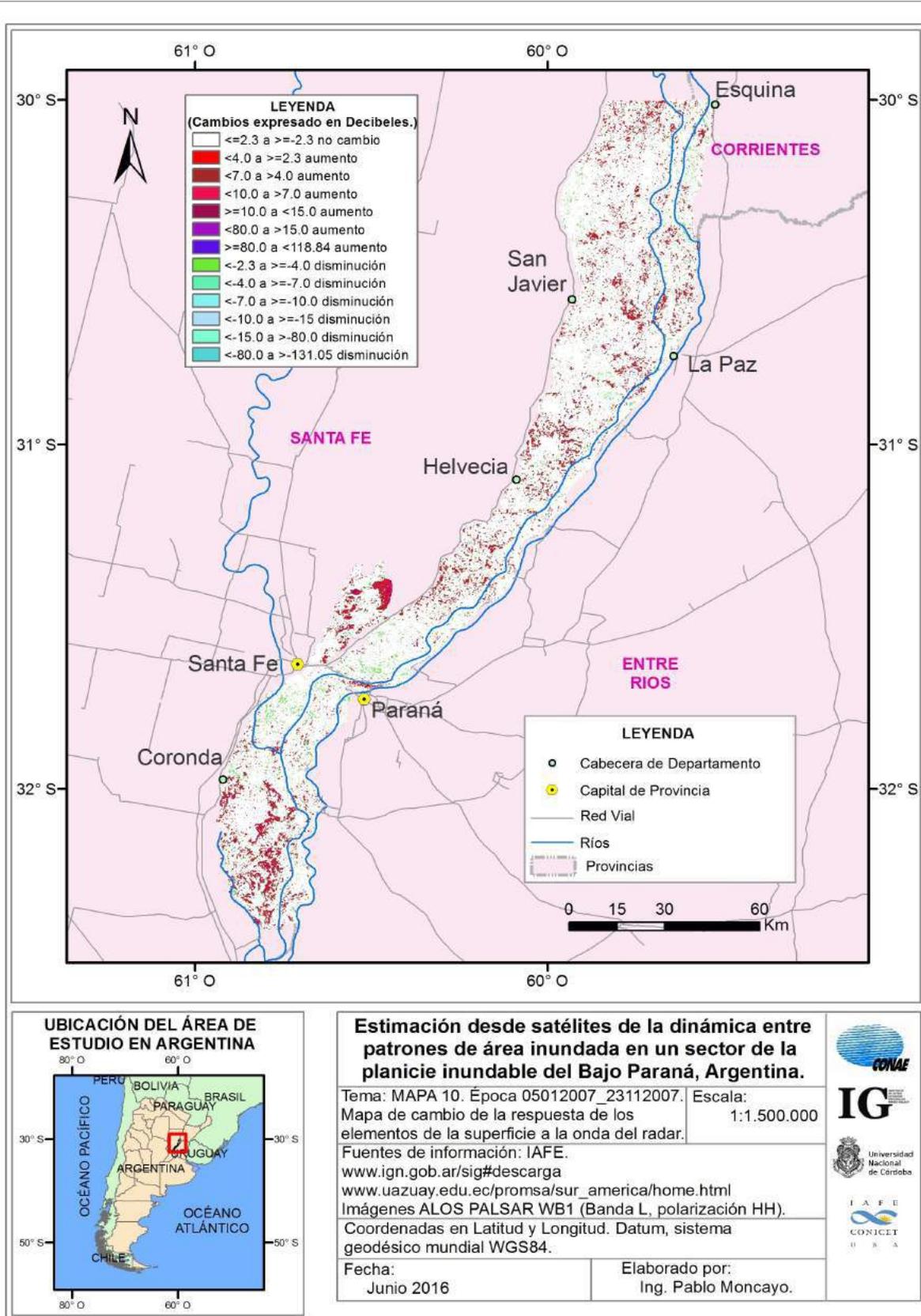


Figura 125. Mapa 10. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/11/2007.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

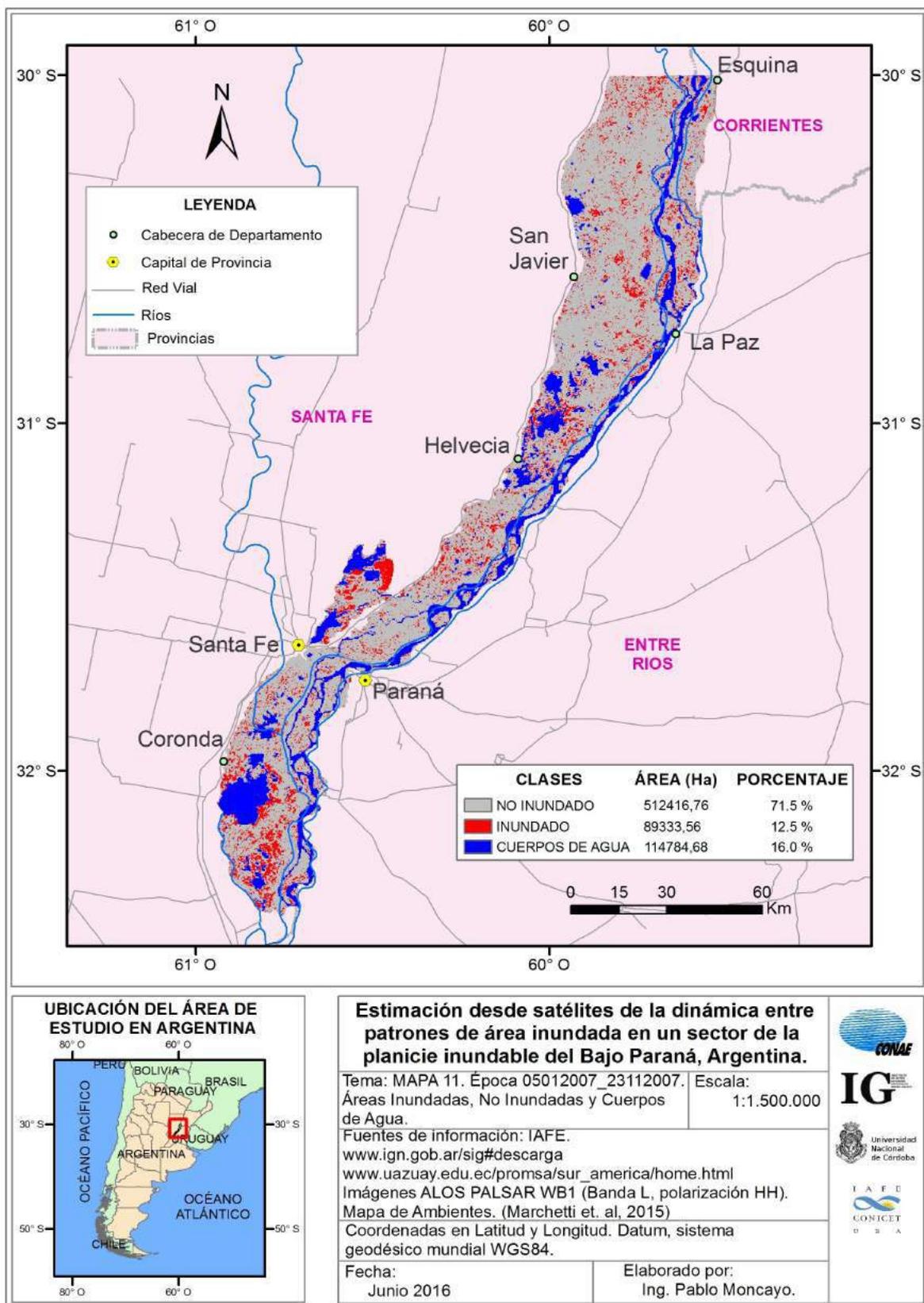


Figura 126. Mapa 11. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/11/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

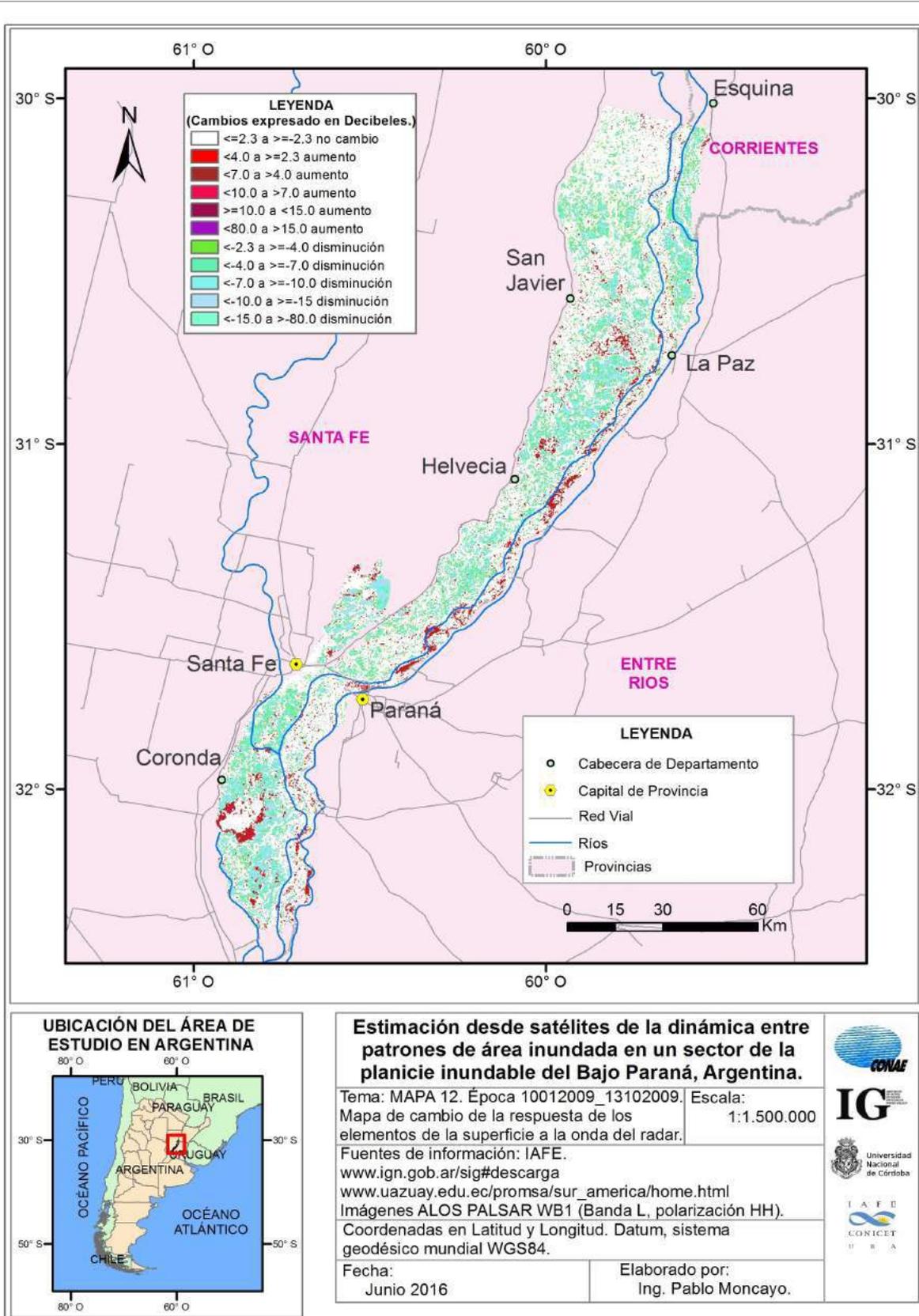
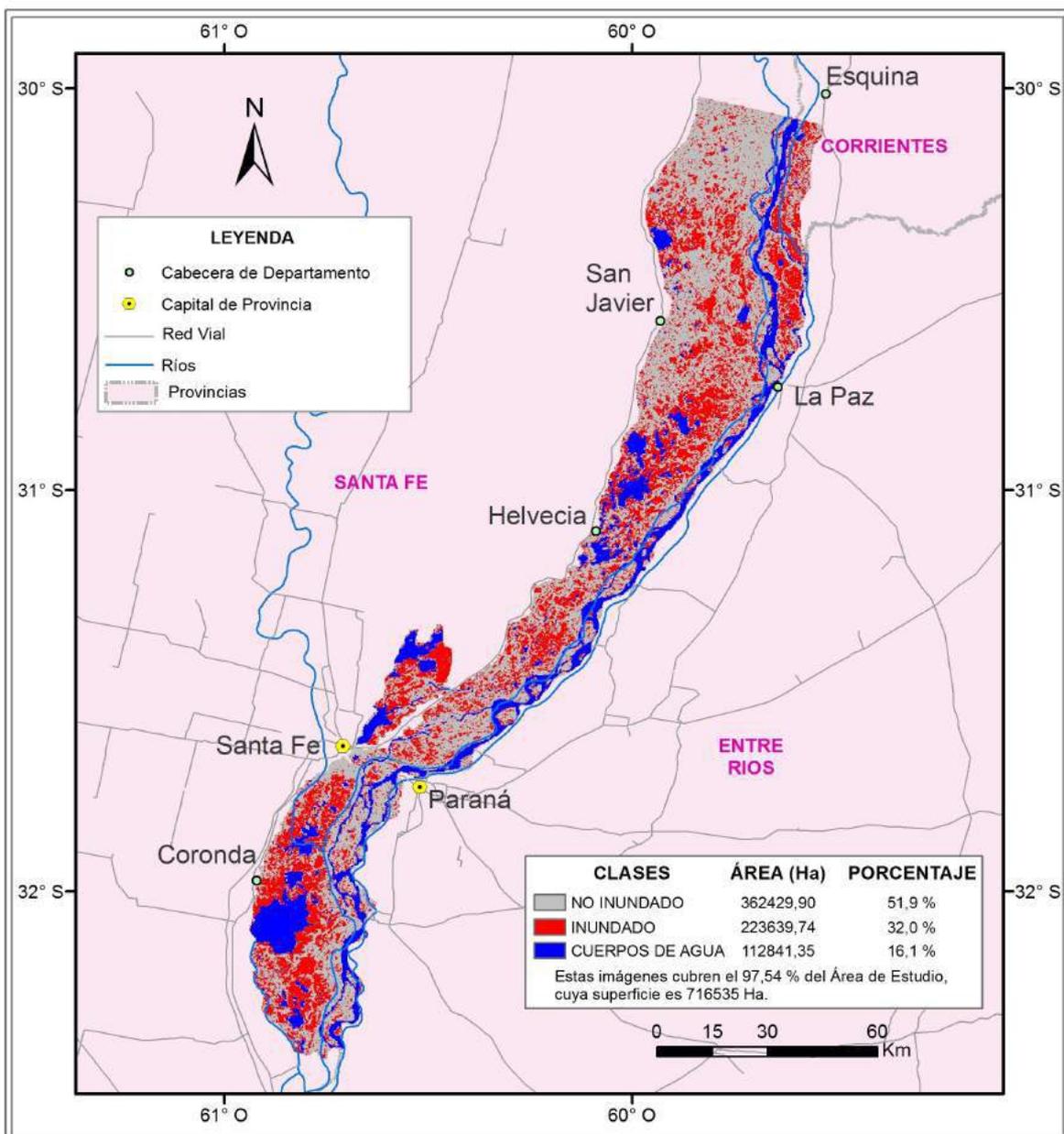


Figura 127. Mapa 12. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 13/10/2009.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN ARGENTINA

Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 13. Época 10012009_13102009. Escala: 1:1.500.000

Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 128. Mapa 13. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2009. Fecha de referencia: 10/01/2009.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

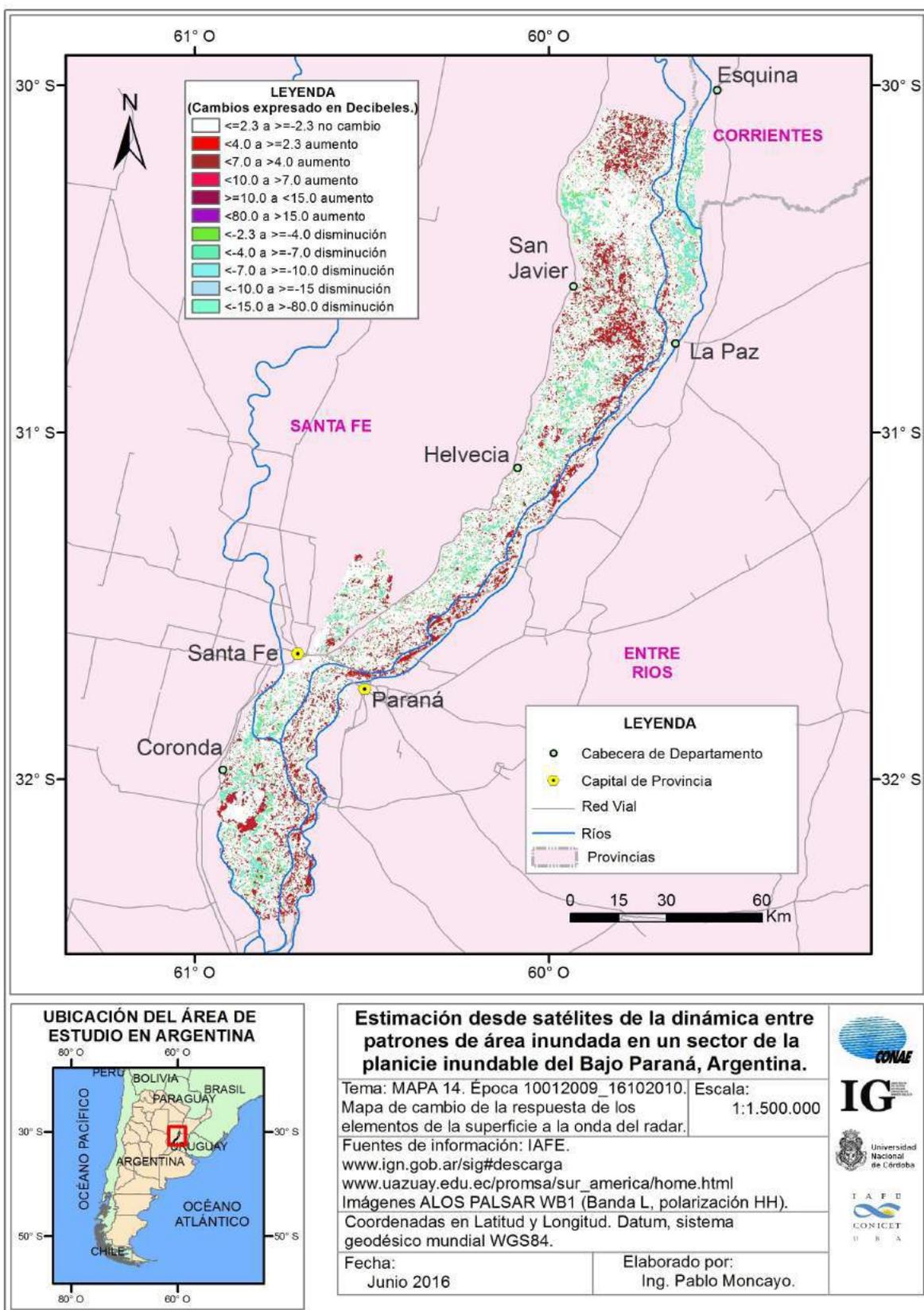
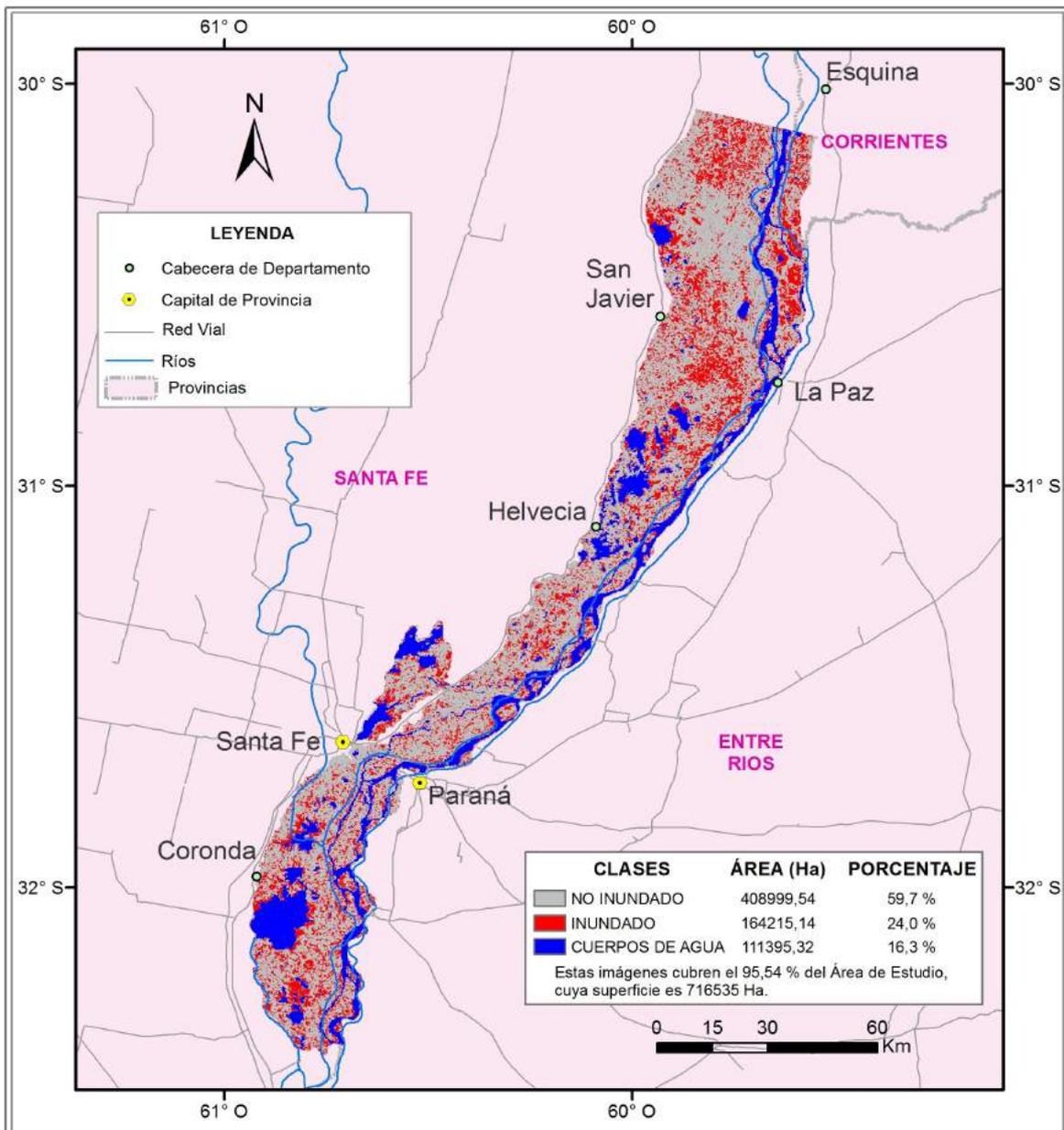


Figura 129. Mapa 14. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 16/10/2010.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 15. Época 10012009_16102010. Escala: 1:1.500.000
Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 130. Mapa 15. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/10/2010. Fecha de referencia: 10/01/2009.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

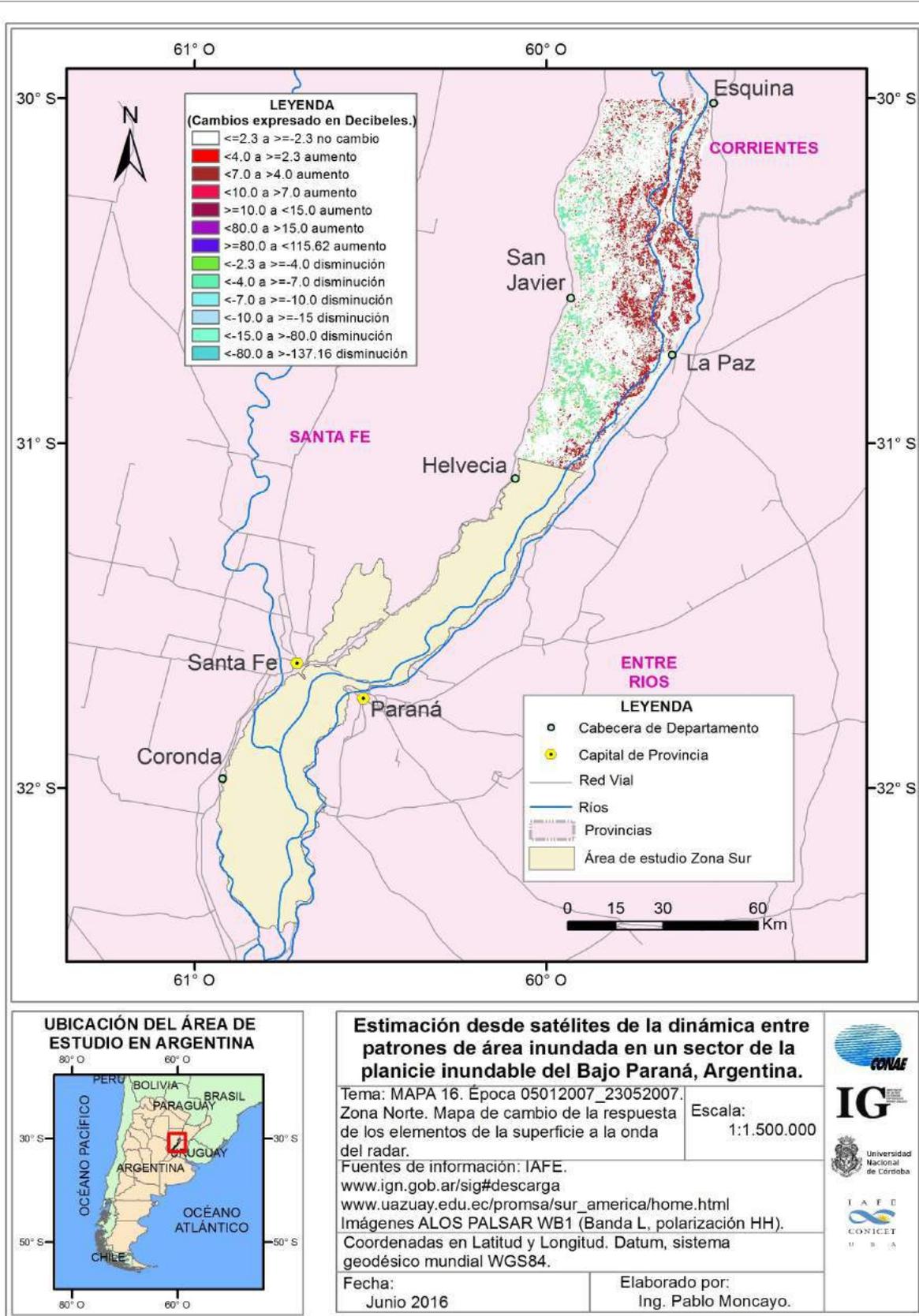


Figura 131. Mapa 16. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

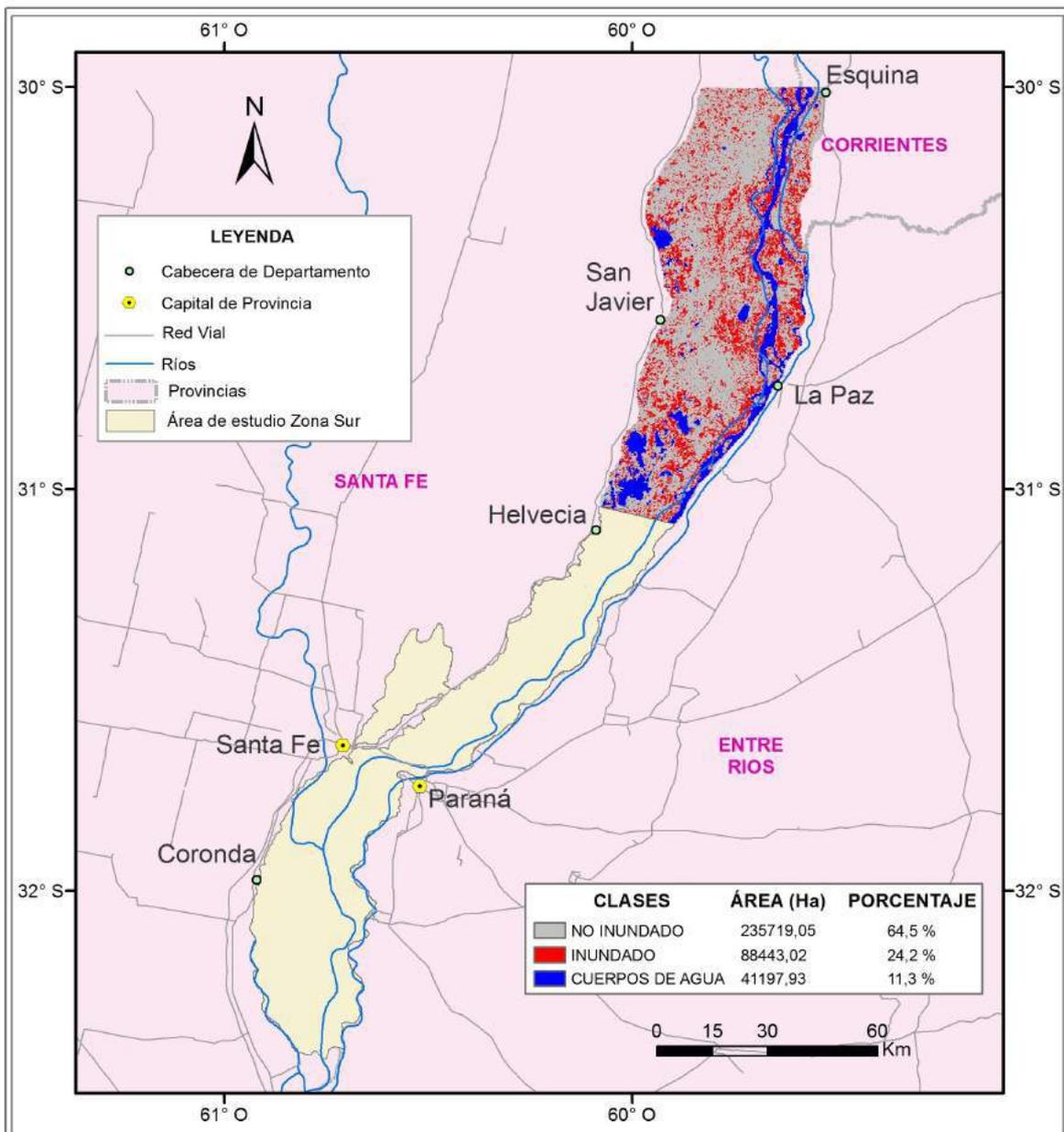


Figura 132. Mapa 17. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/05/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

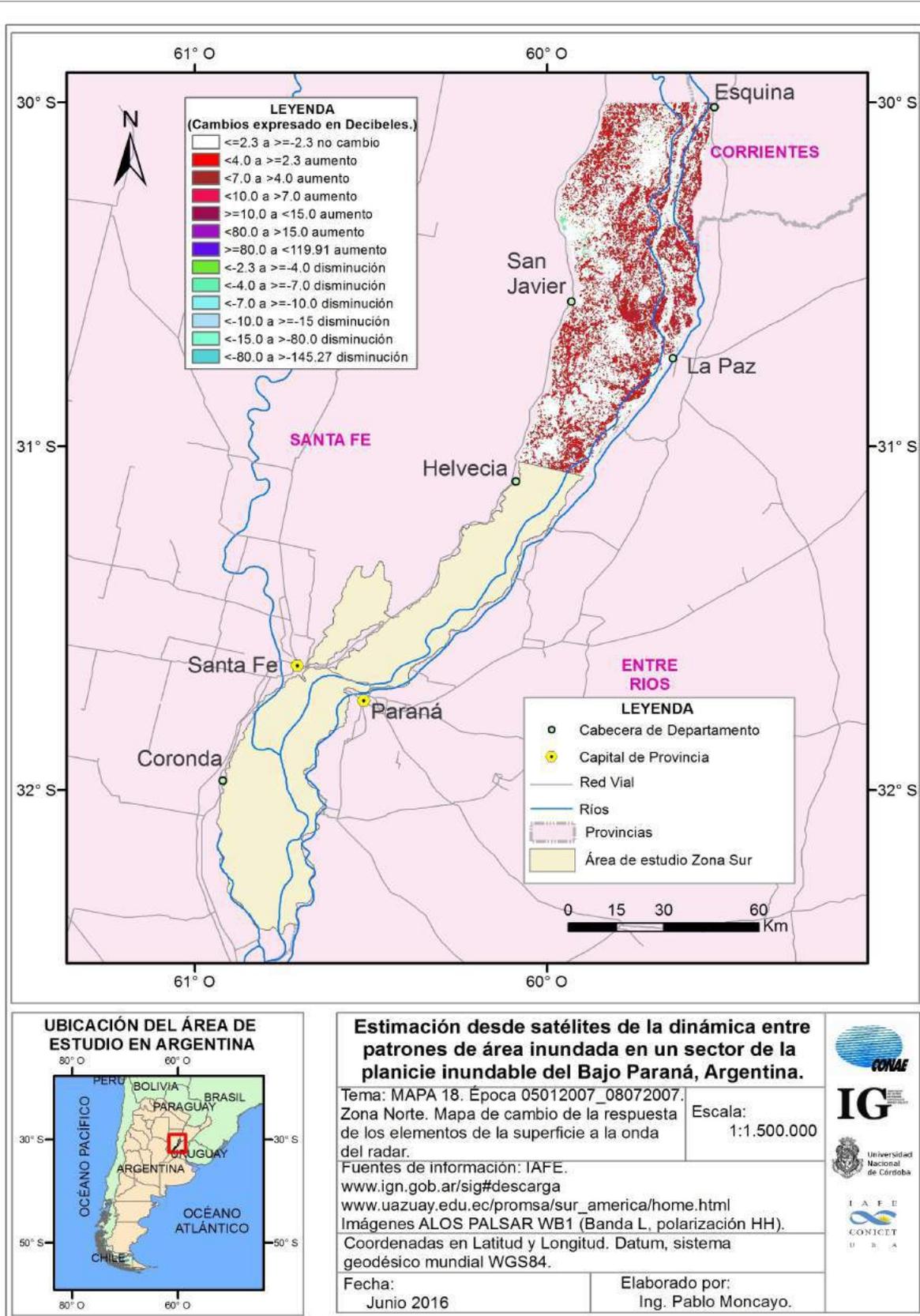


Figura 133. Mapa 18. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 08/07/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

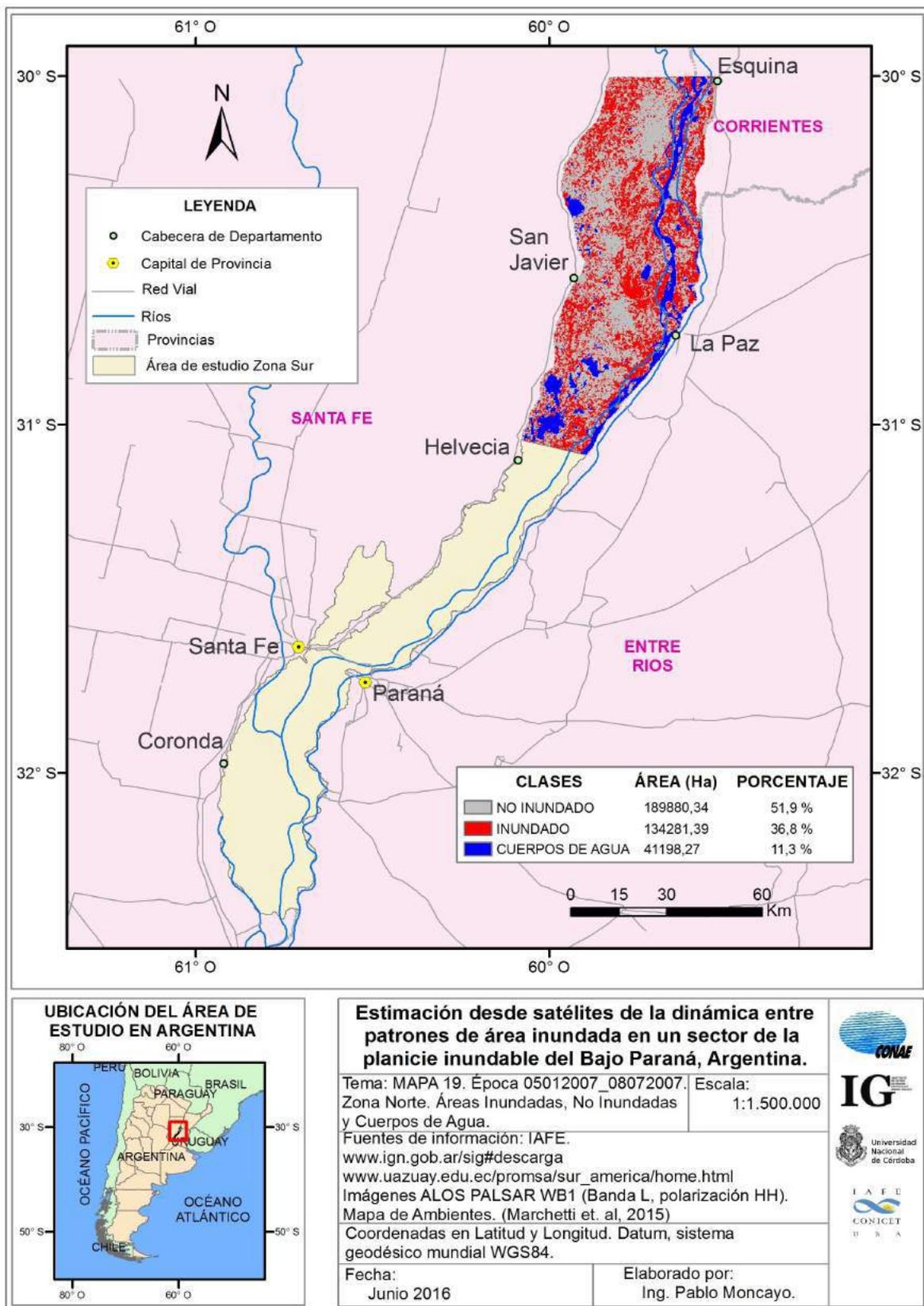
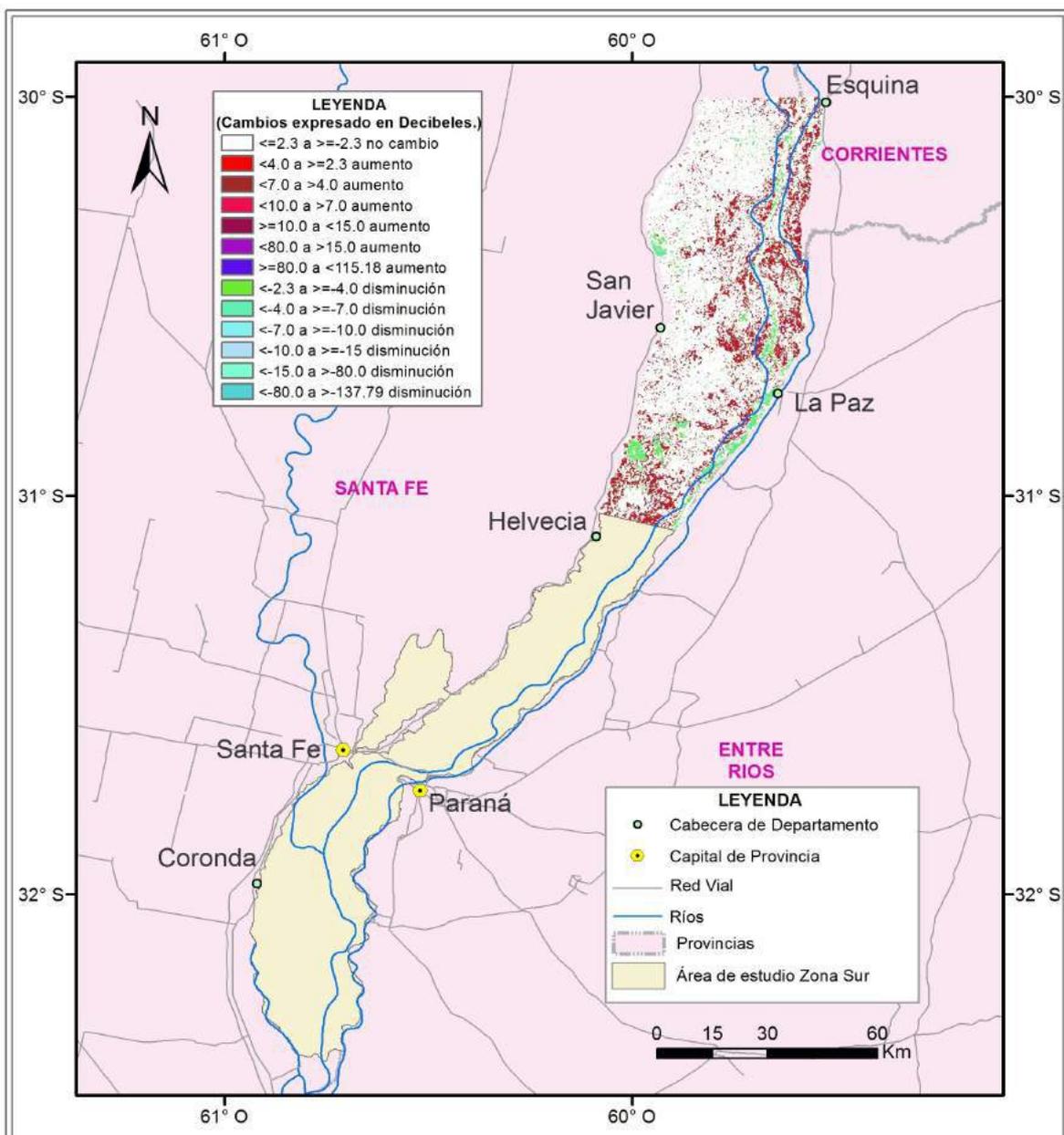


Figura 134. Mapa 19. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 20. Época 05012007_23082007.
Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.

www.ign.gov.ar/sig#descarga

www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

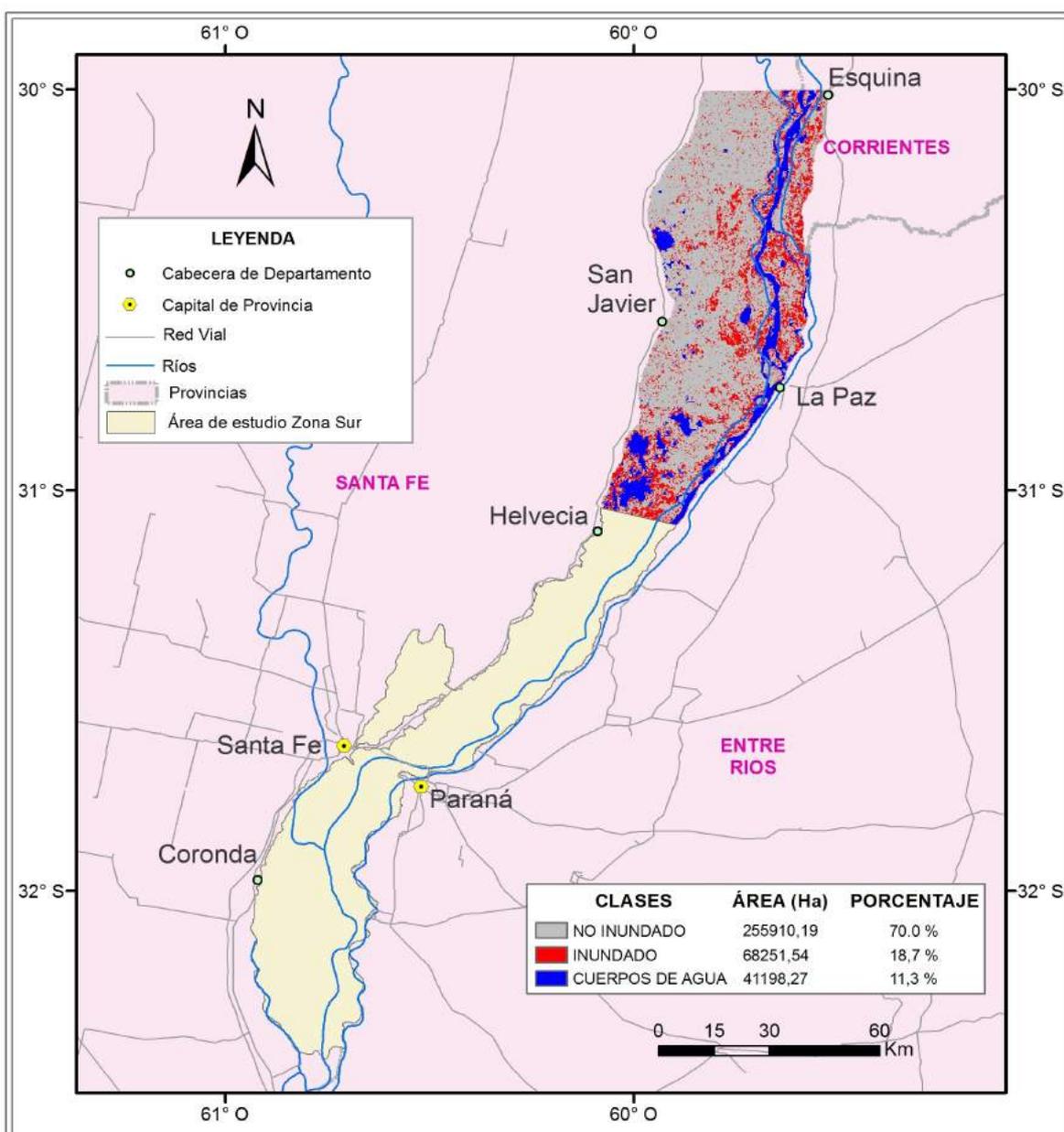
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 135. Mapa 20. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/08/2007. Zona Norte.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 21. Época 05012007_23082007. Escala: 1:1.500.000

Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 136. Mapa 21. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/08/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

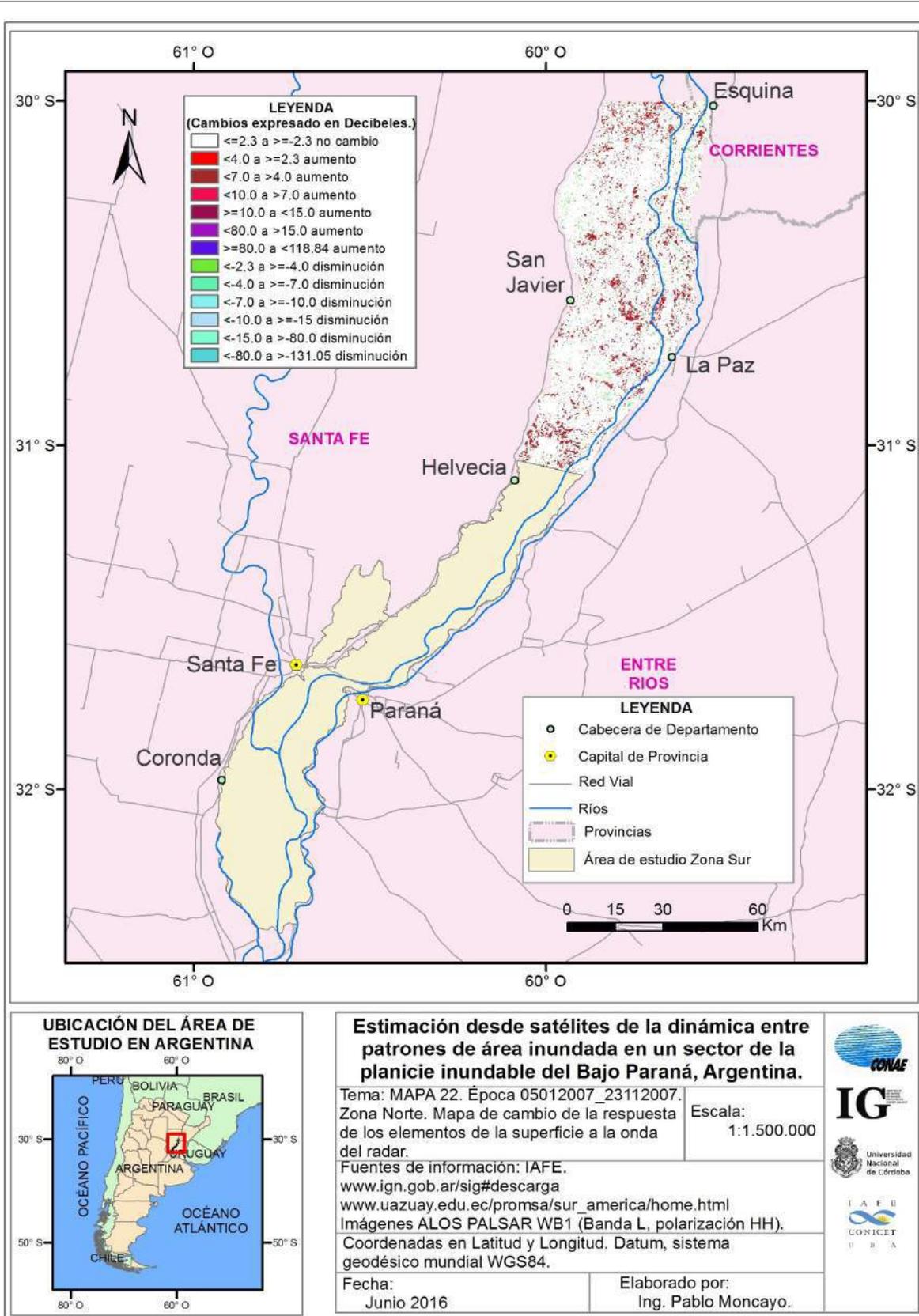
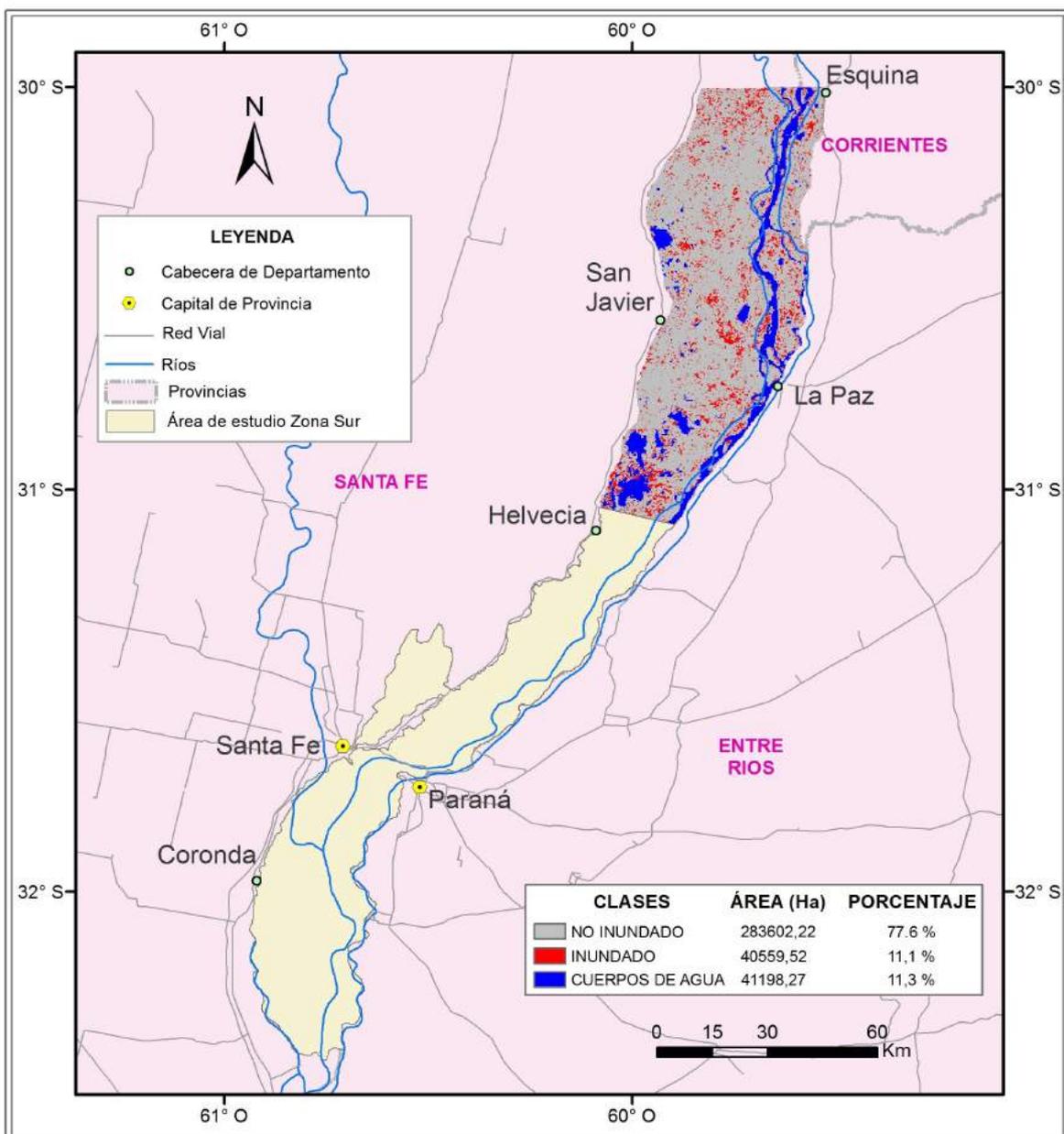


Figura 137. Mapa 22. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/11/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



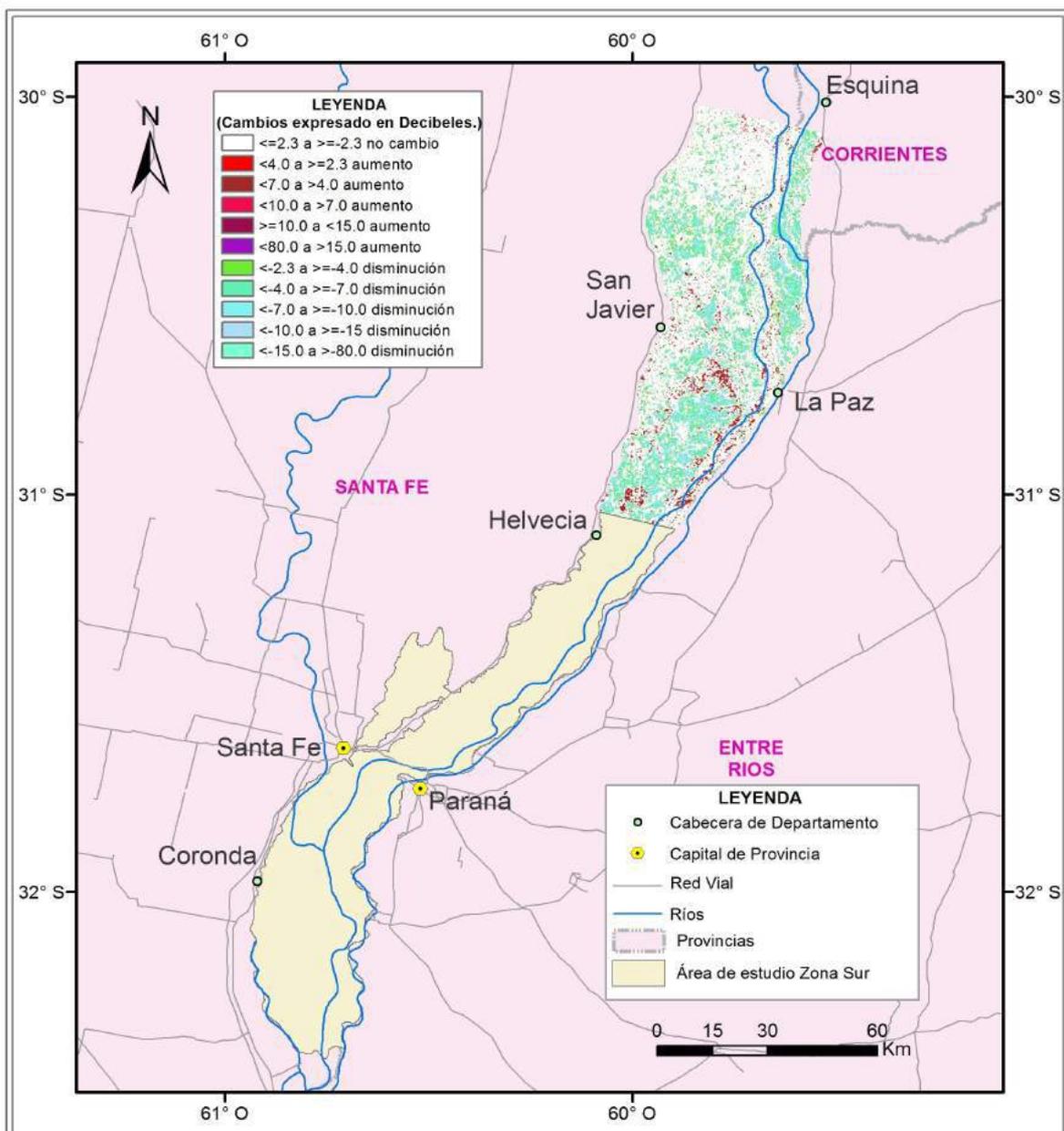
Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 23. Época 05012007_23112007. Escala: 1:1.500.000
 Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.
 Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.
 Fecha: Junio 2016
 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 138. Mapa 23. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/11/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 24. Época 10012009_13102009.
Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.

www.ign.gov.ar/sig#descarga

www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

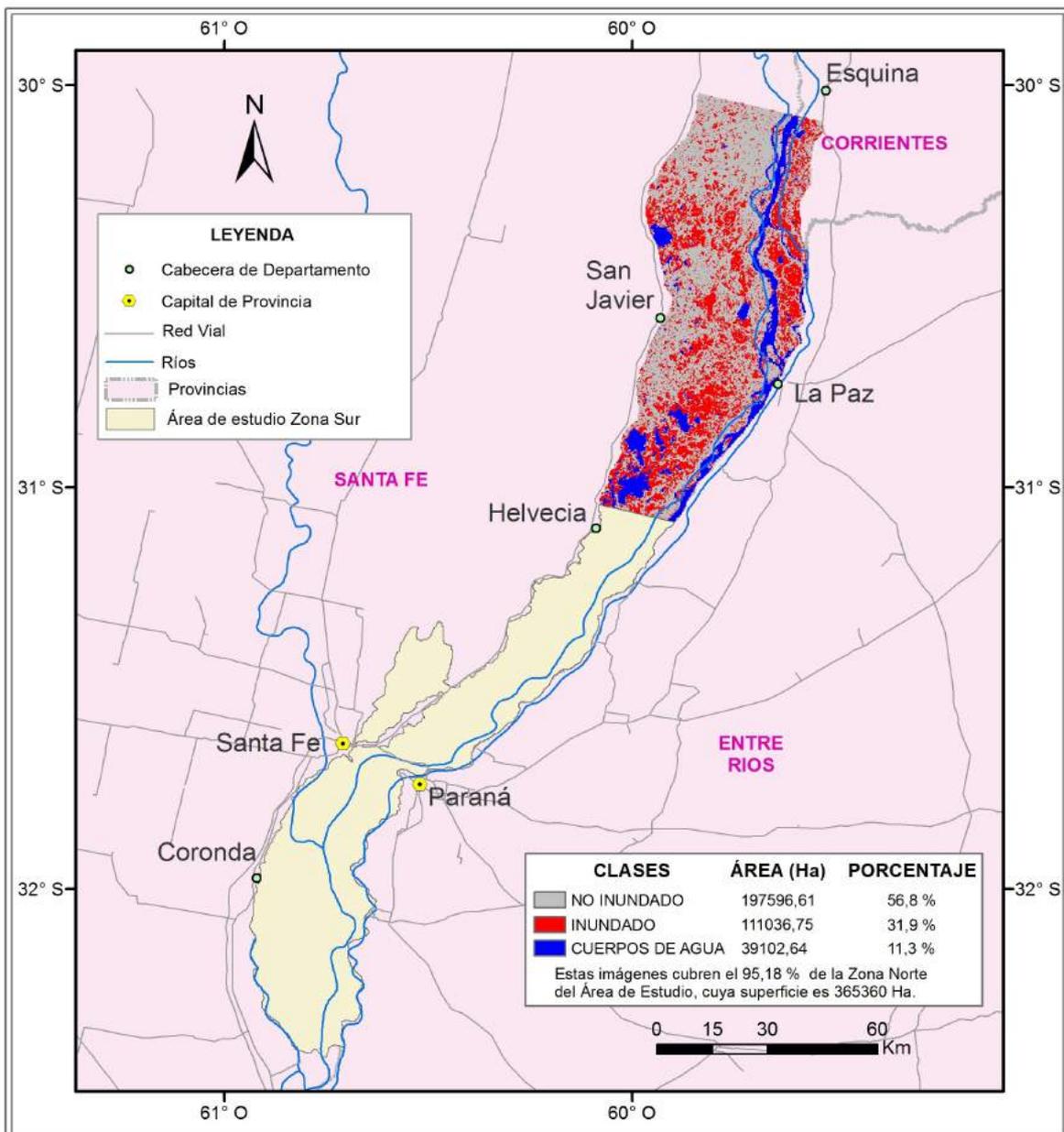
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 139. Mapa 24. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 13/10/2009. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 25. Época 10012009_13102009. Escala: 1:1.500.000
Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 140. Mapa 25. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2009. Fecha de referencia: 10/01/2009. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

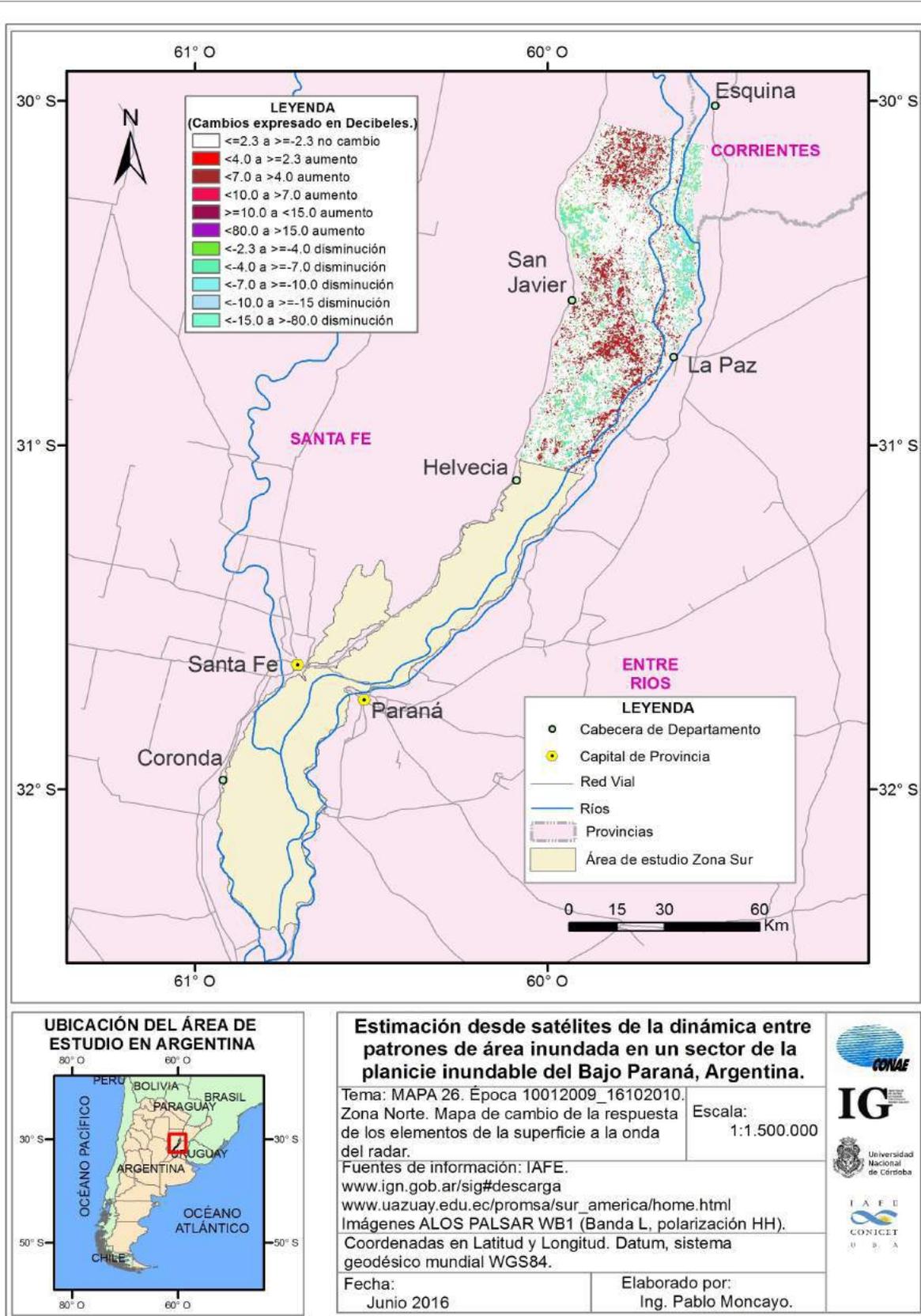
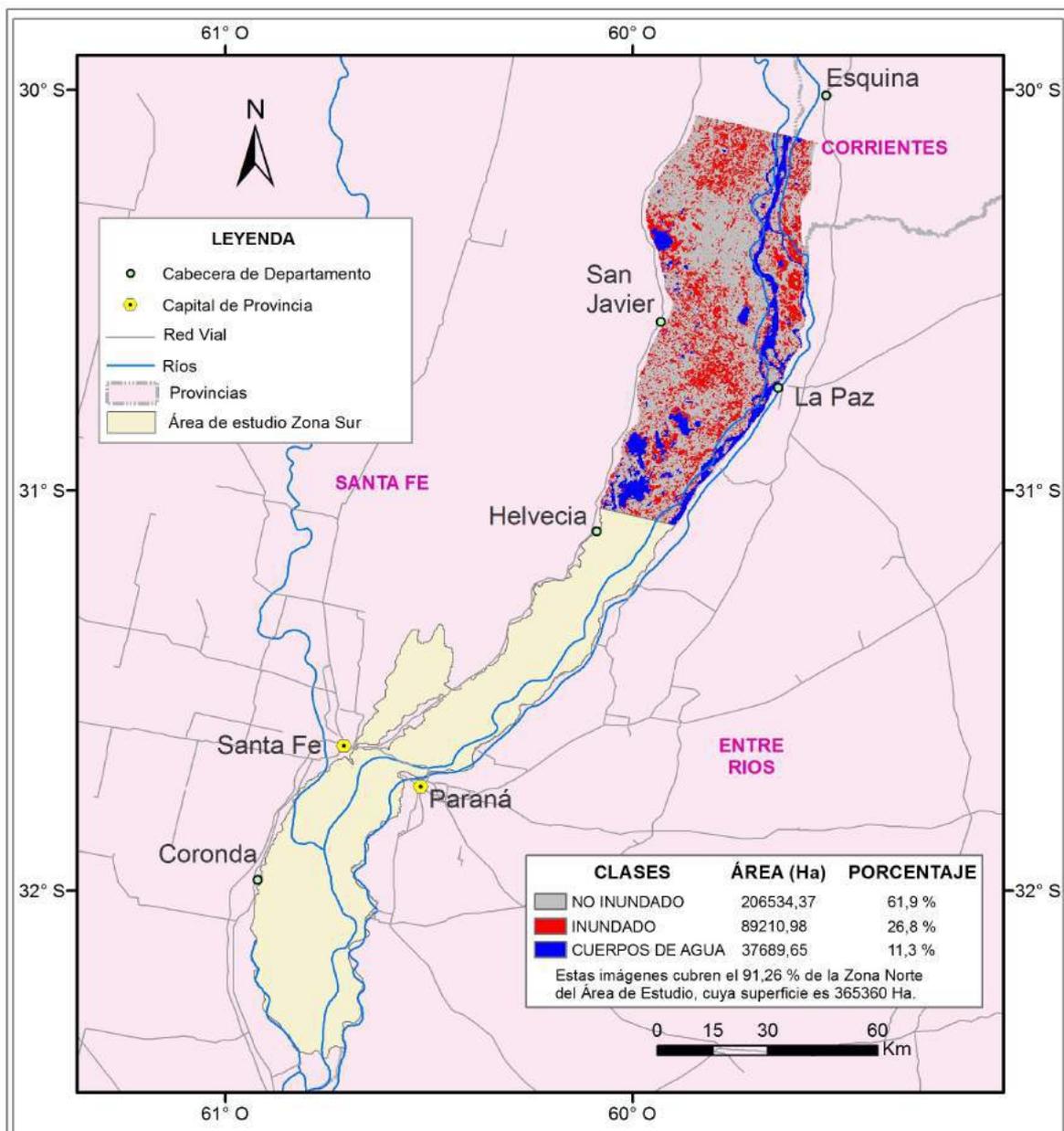


Figura 141. Mapa 26. Clases de cambio entre el 10/01/2009 y el 16/10/2010. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 27. Época 10012009_16102010. Escala: 1:1.500.000
 Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al. 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

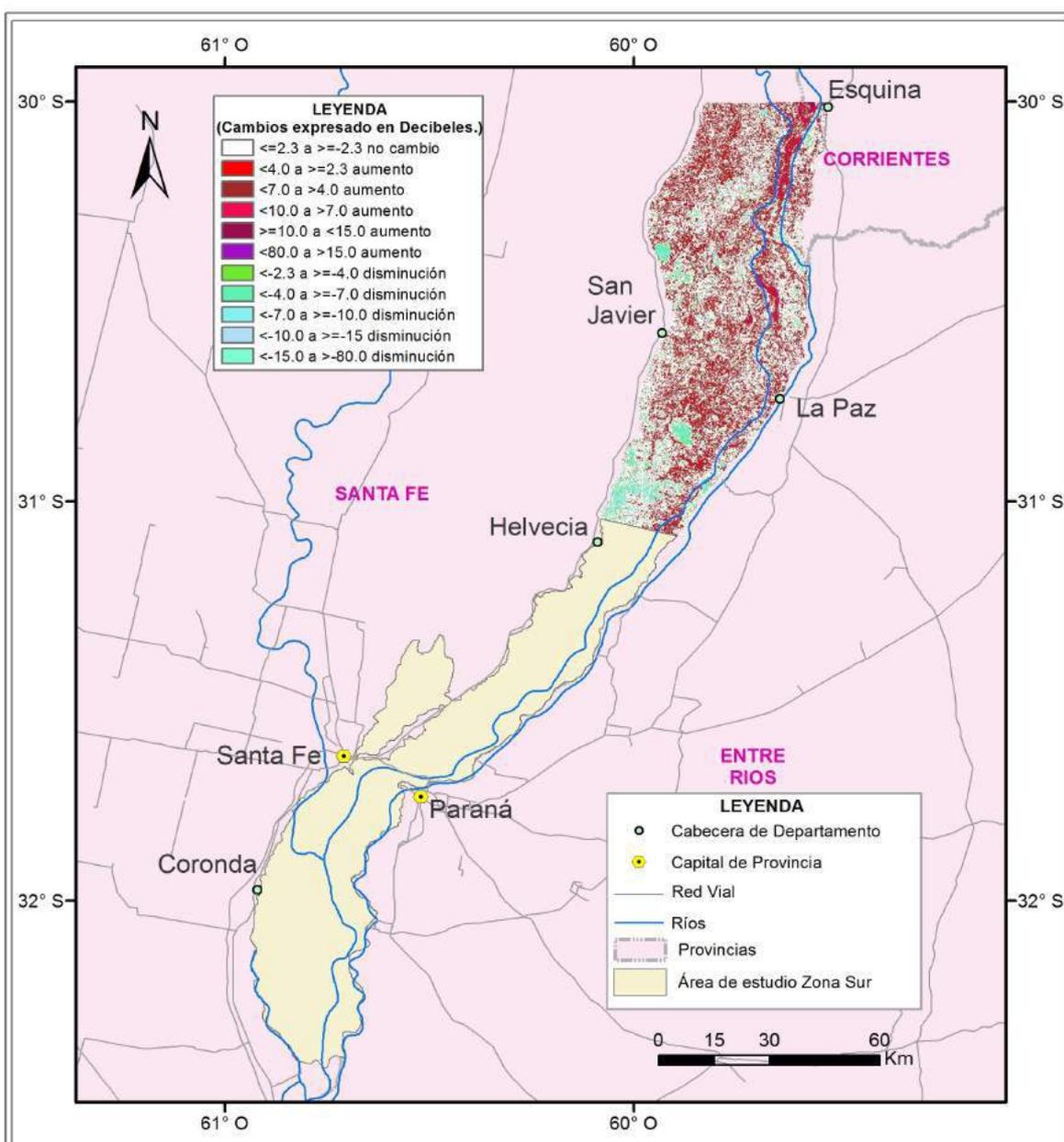
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 142. Mapa 27. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/10/2010. Fecha de referencia: 10/01/2009. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 28. Época 12032012_22062014.
Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala:
1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

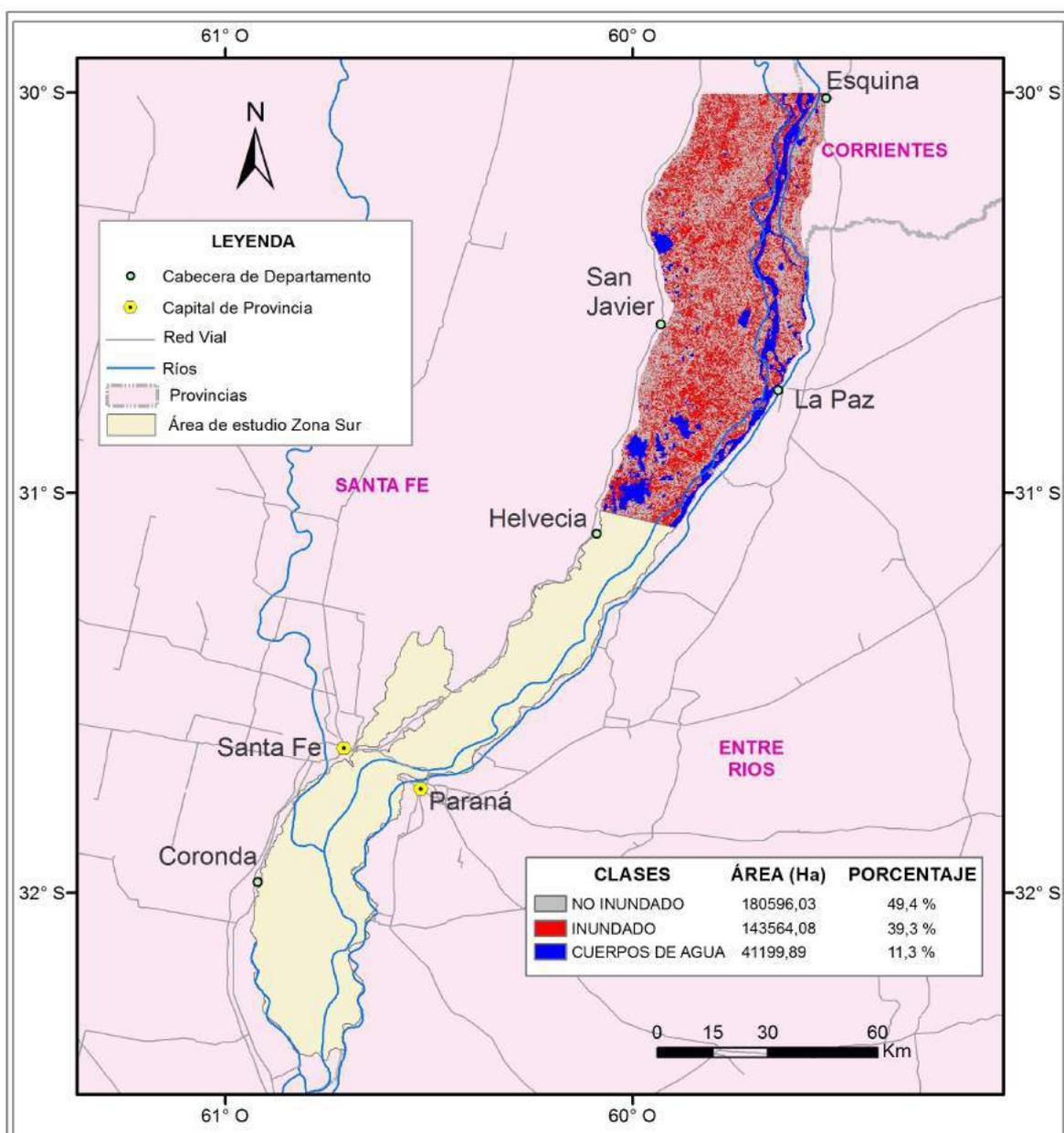
Fecha:
Junio 2016

Elaborado por:
Ing. Pablo Moncayo.



Figura 143. Mapa 28. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 22/06/2014. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 29. Época 12032012_22062014. Escala: 1:1.500.000
 Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

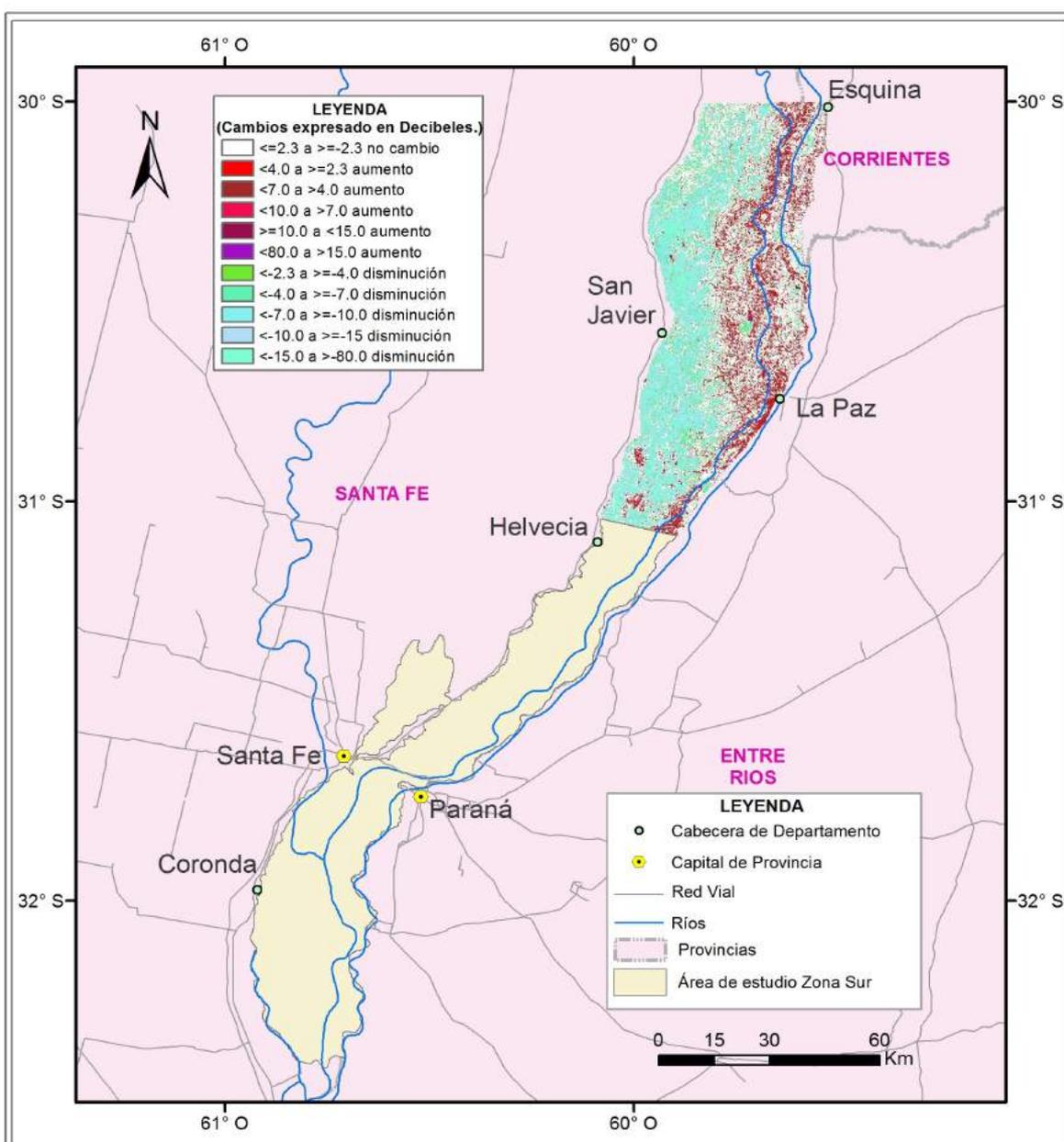
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 144. Mapa 29. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 22/06/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 30. Época 12032012_08072014.
Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala:
1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

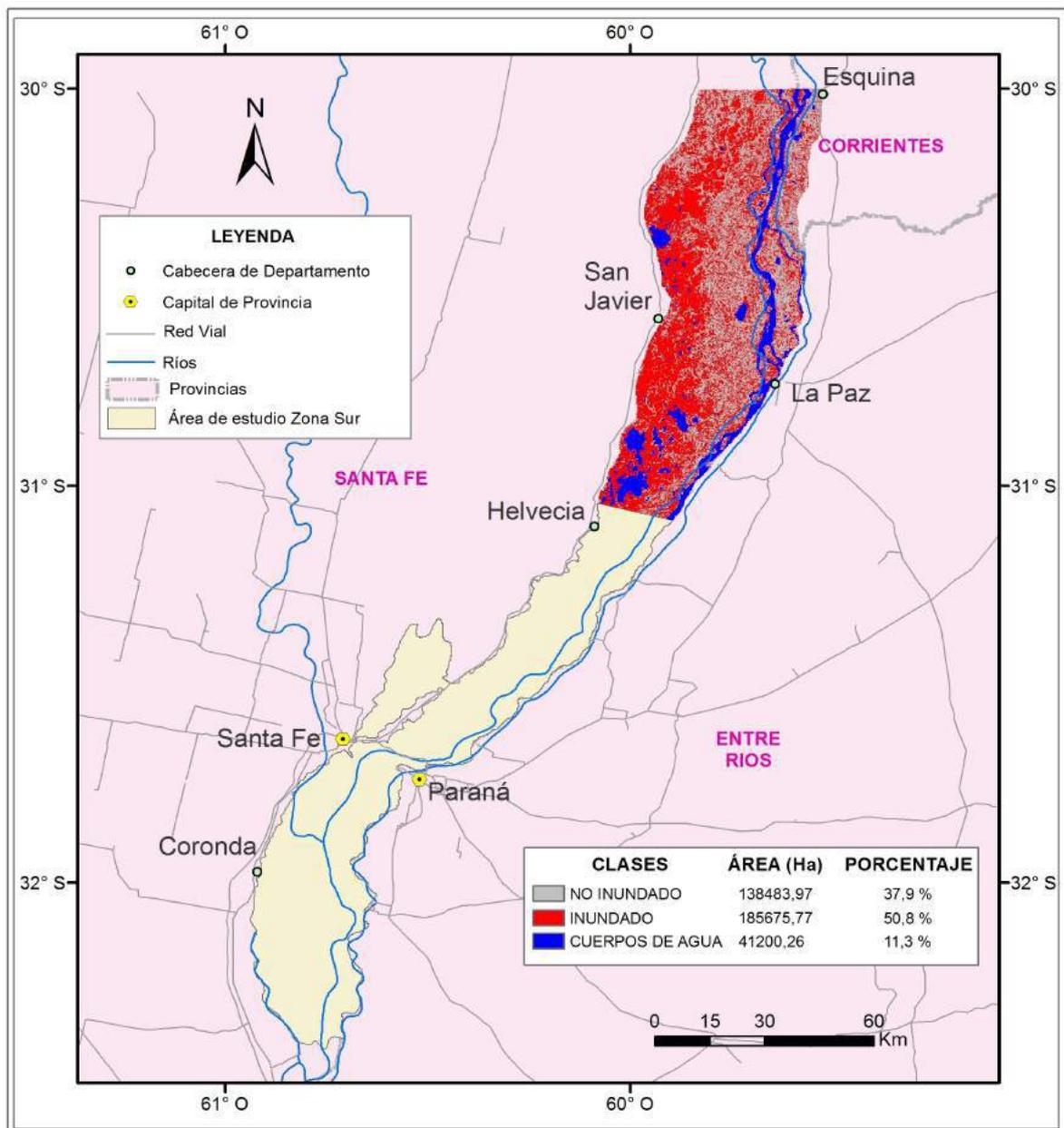
Fecha:
Junio 2016

Elaborado por:
Ing. Pablo Moncayo.



Figura 145. Mapa 30. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 08/07/2014. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN ARGENTINA

Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 31. Época 12032012_08072014. Escala: 1:1.500.000

Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

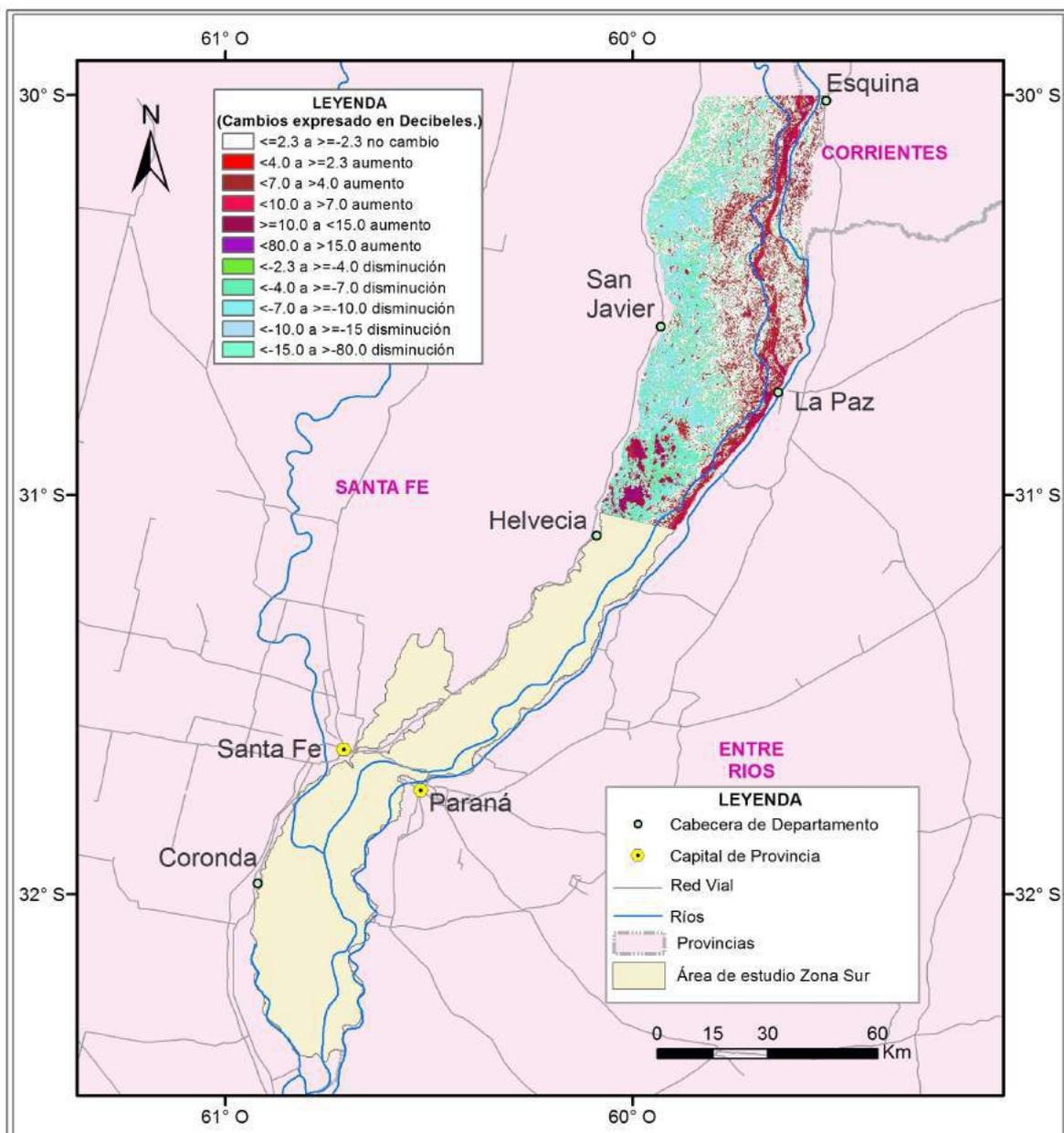
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 146. Mapa 31. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 32. Época 12032012_16072014.
Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.

www.ign.gov.ar/sig#descarga

www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

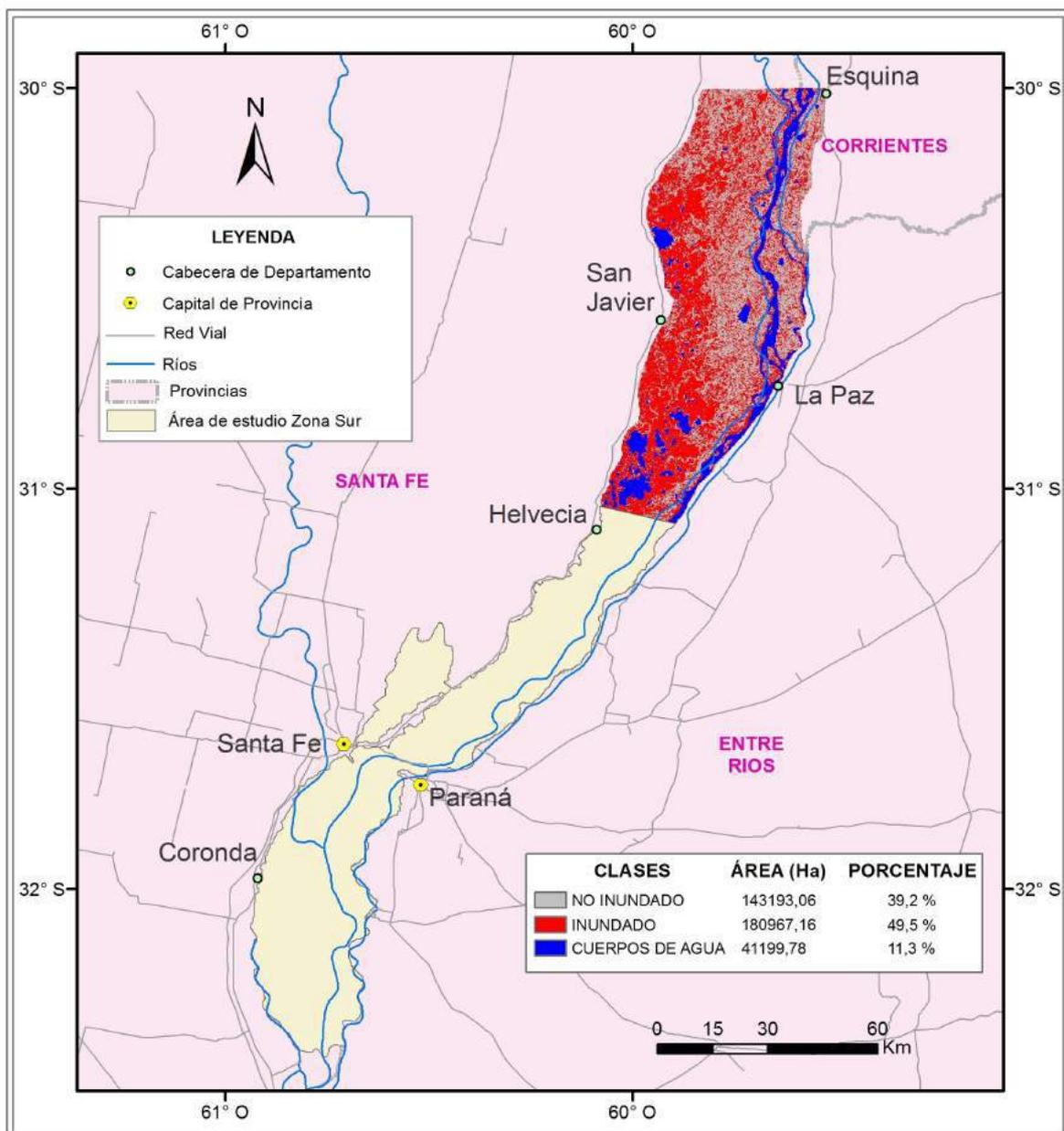
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 147. Mapa 32. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 16/07/2014. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN ARGENTINA

Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 33. Época 12032012_16072014. Escala: 1:1.500.000

Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

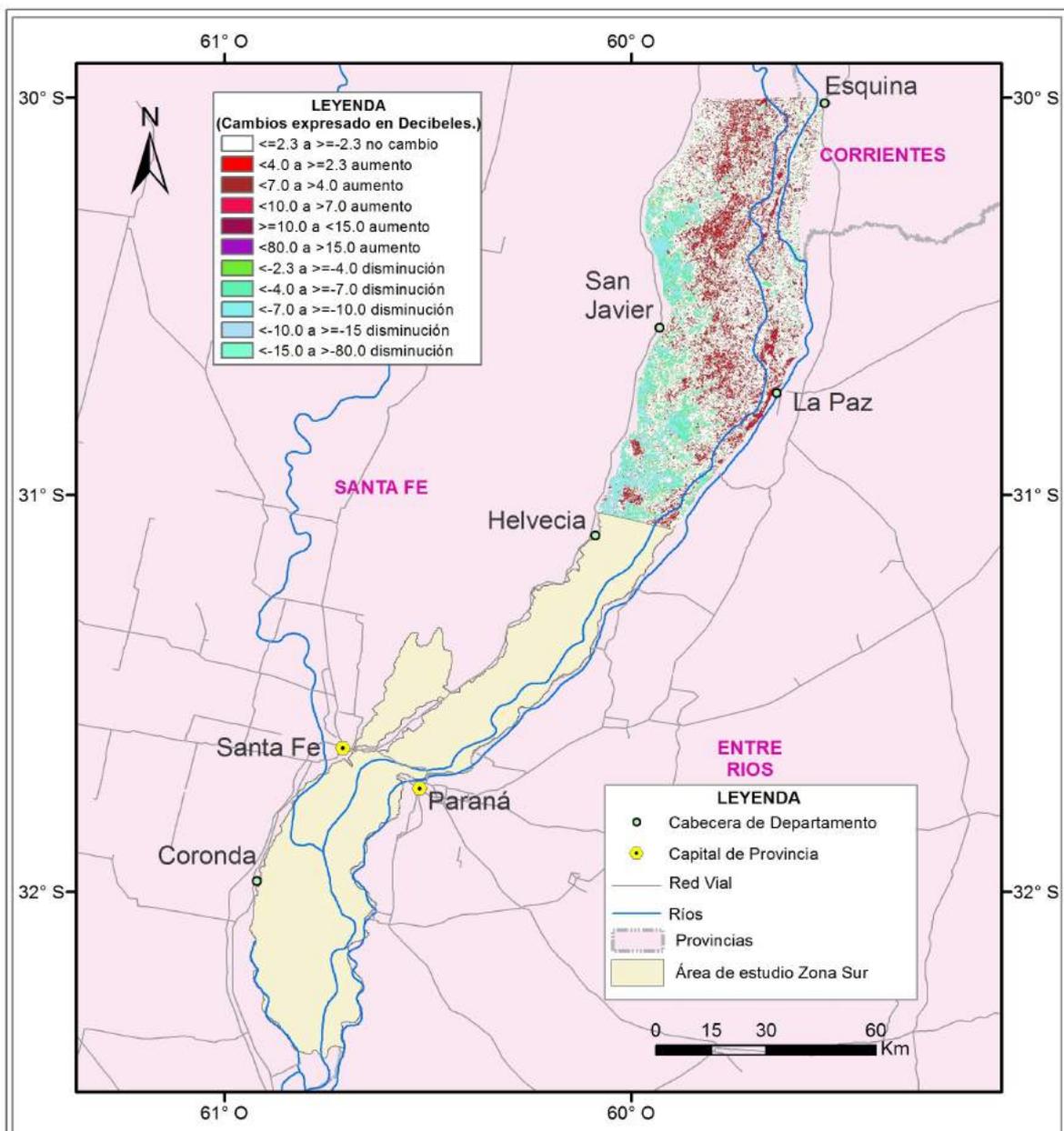
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 148. Mapa 33. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/07/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 34. Época 12032012_13082014.
 Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Logos: CONAE, IG, Universidad Nacional de Córdoba, IAFE, CONICET, UBA.

Figura 149. Mapa 34. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 13/08/2014. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

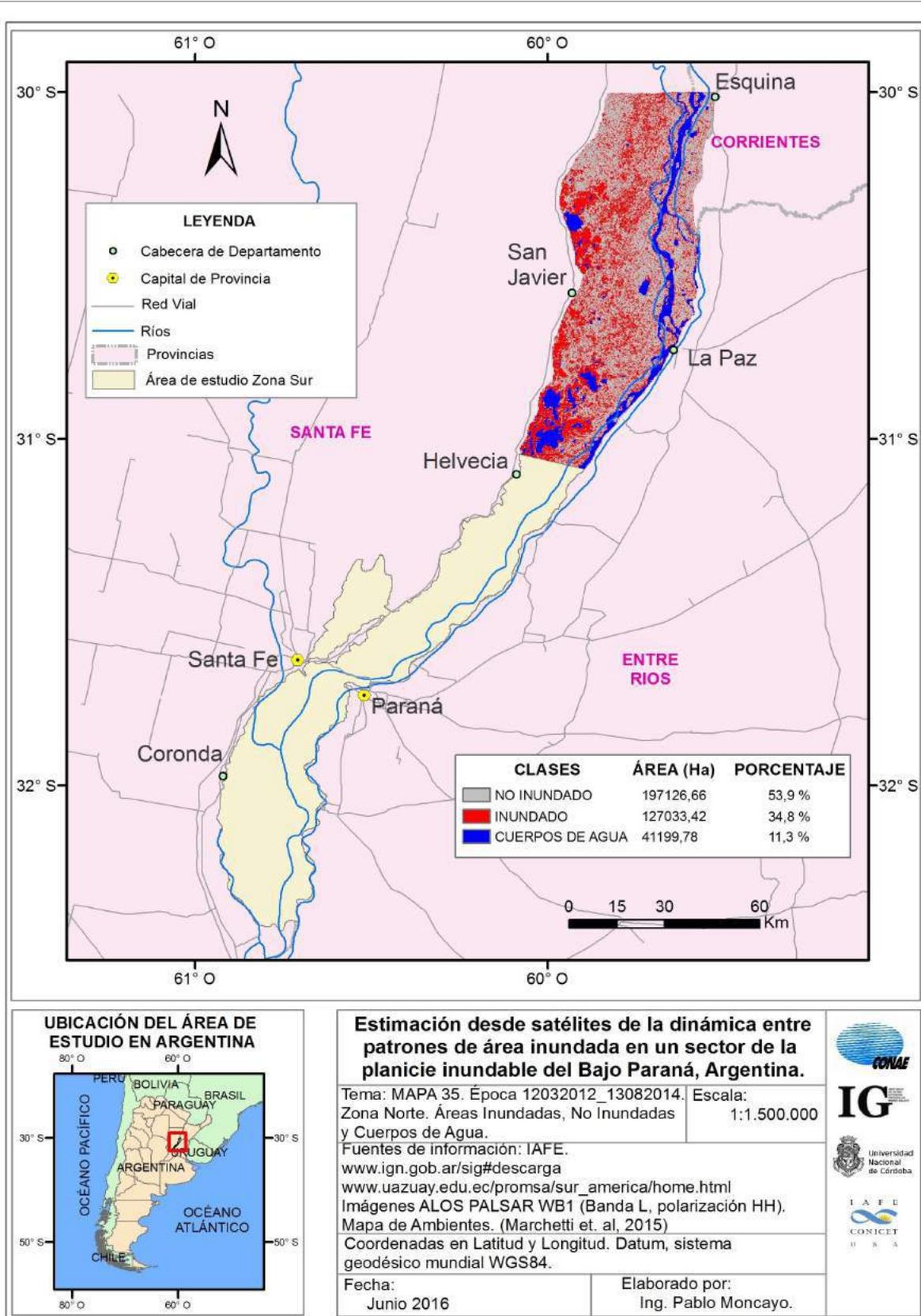


Figura 150. Mapa 35. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/08/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

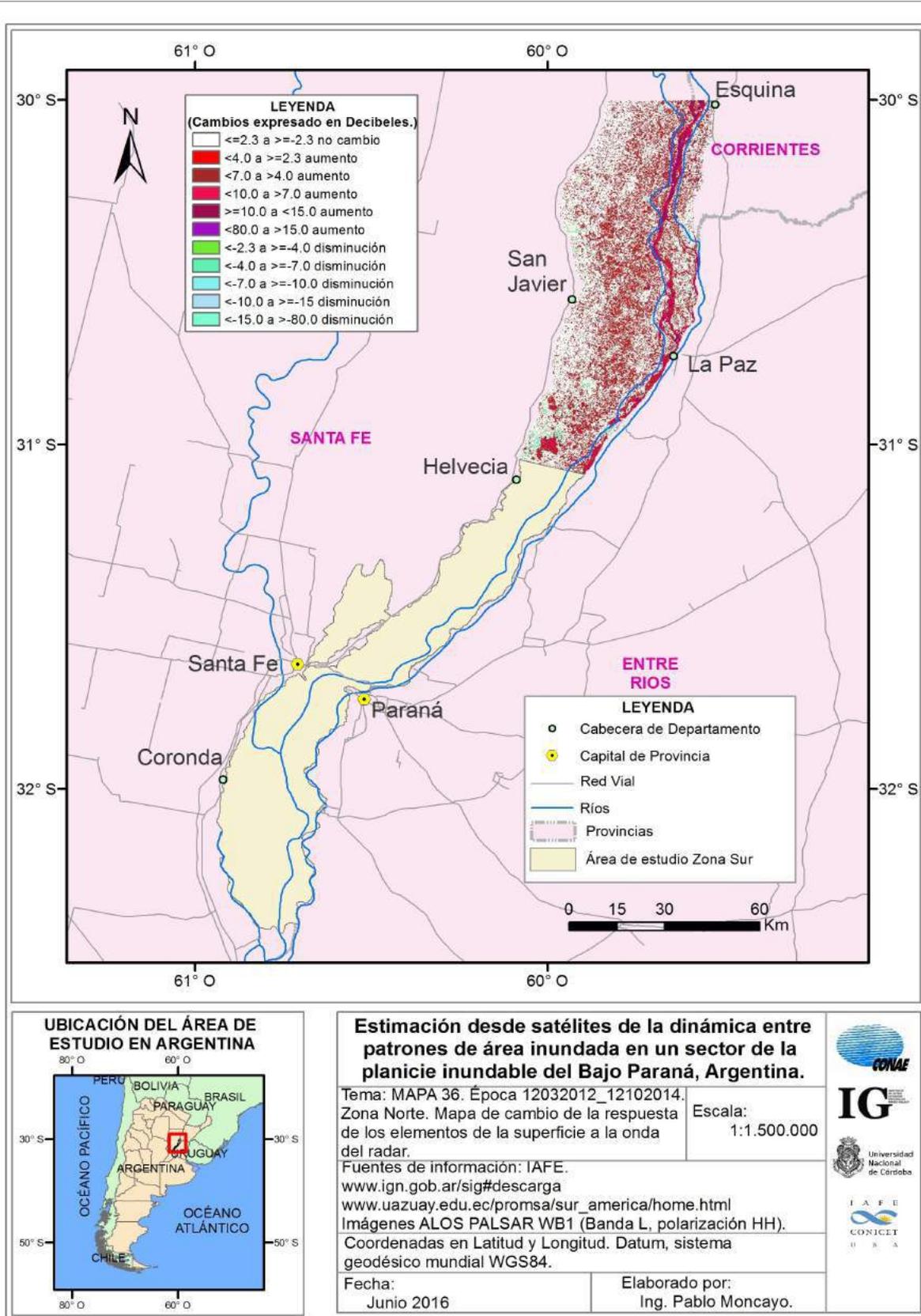
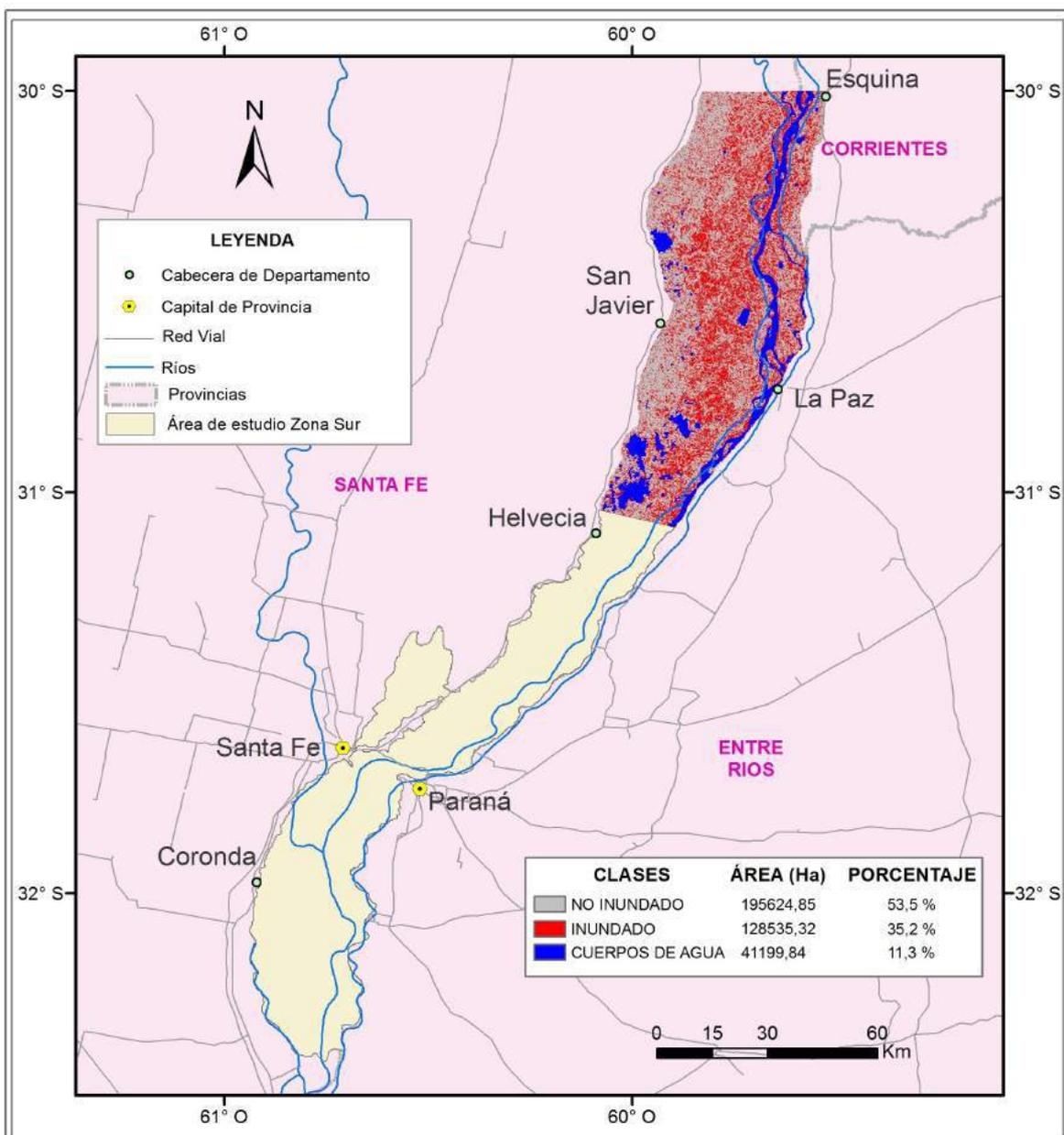


Figura 151. Mapa 36. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 12/10/2014. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 37. Época 12032012_12102014. Escala: 1:1.500.000
 Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

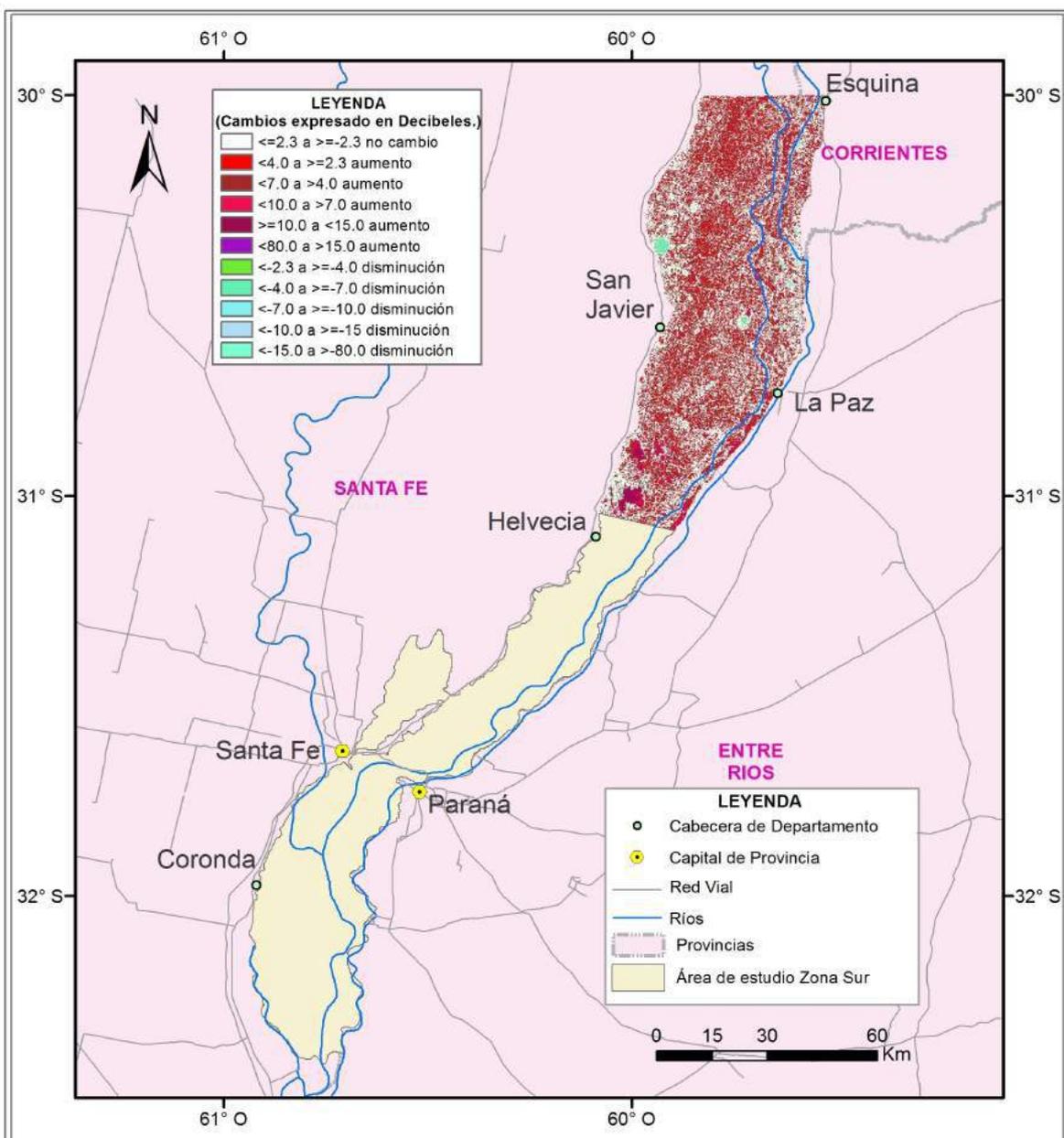
Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016
 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 152. Mapa 37. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 12/10/2014. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 38. Época 12032012_08012015.
Zona Norte. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.

www.ign.gov.ar/sig#descarga

www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

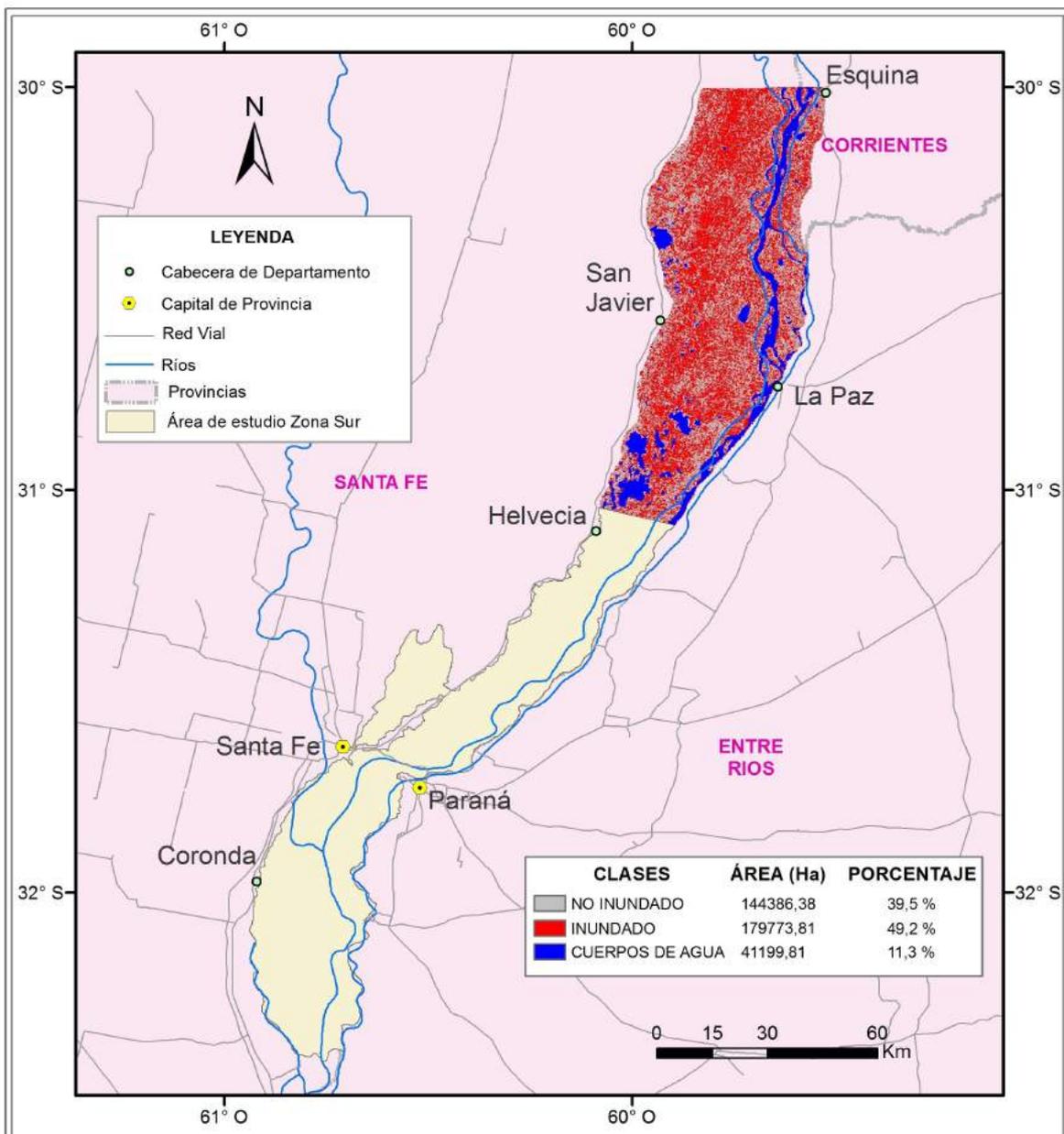
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 153. Mapa 38. Clases de cambio entre el 12/03/2012 y el 08/01/2015. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 39. Época 12032012_08012015. Escala: 1:1.500.000
 Zona Norte. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 154. Mapa 39. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/01/2015. Fecha de referencia: 12/03/2012. Zona Norte.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

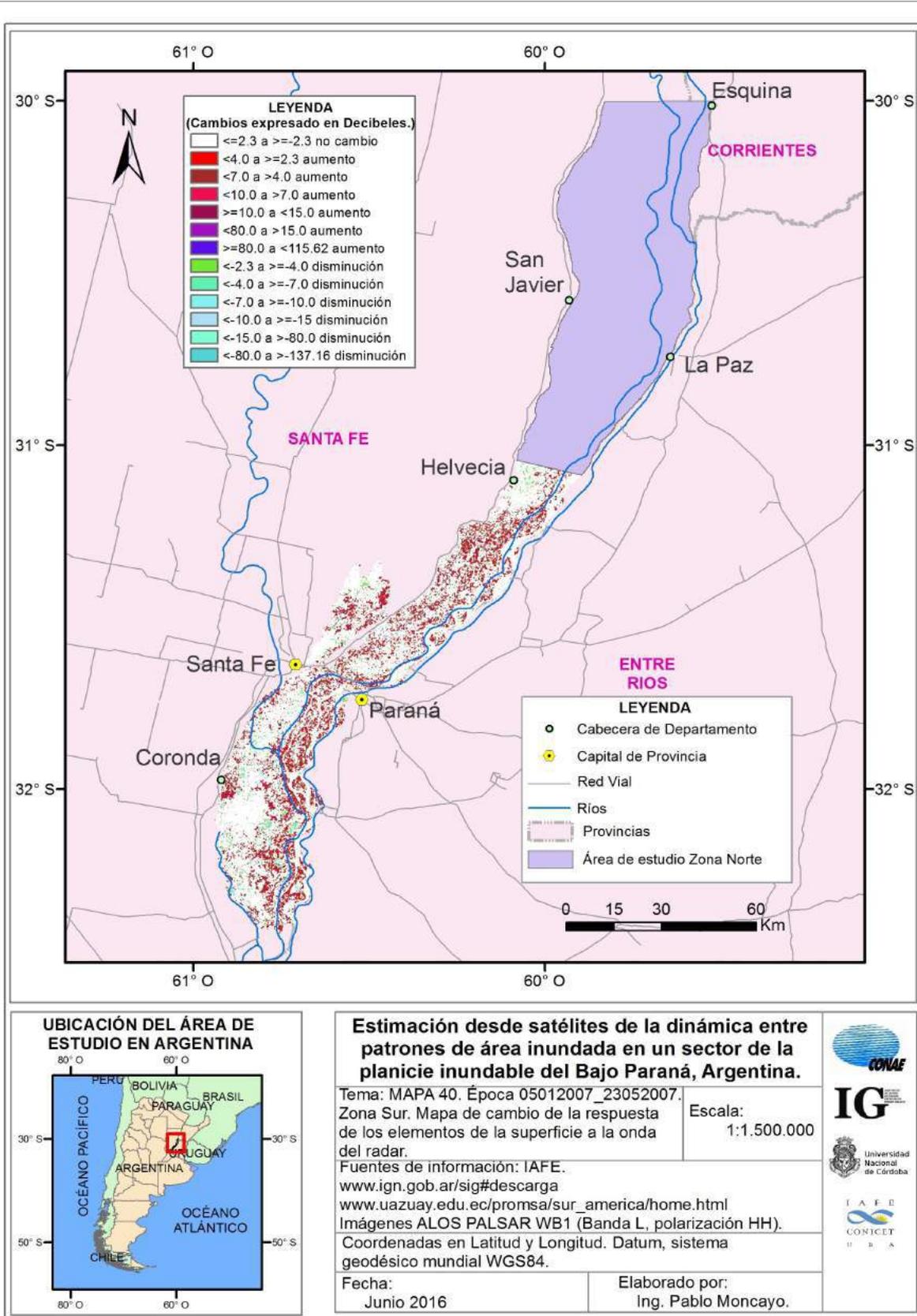
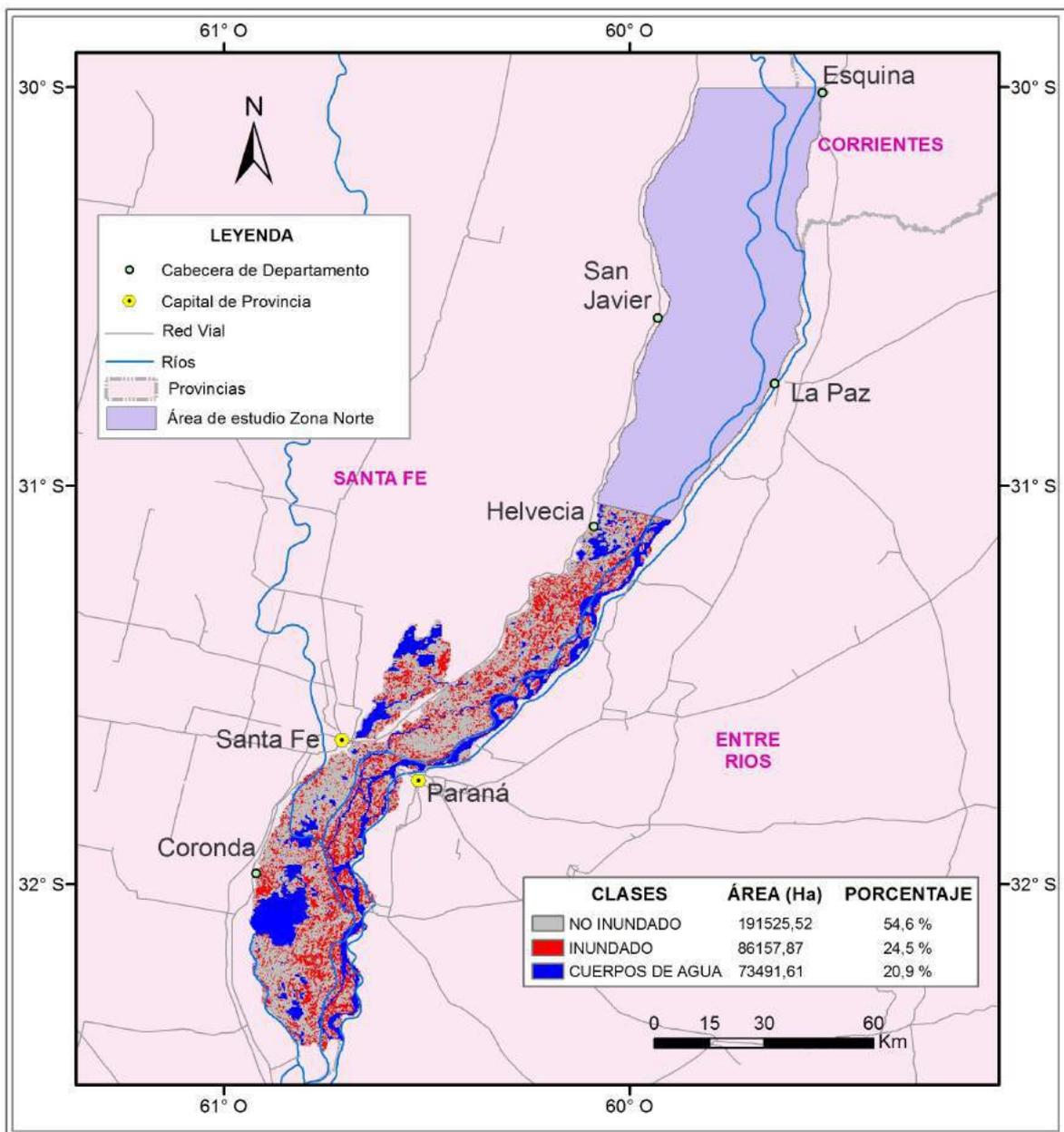


Figura 155. Mapa 40. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/05/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 41. Época 05012007_23052007. Escala: 1:1.500.000
 Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016
 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 156. Mapa 41. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/05/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

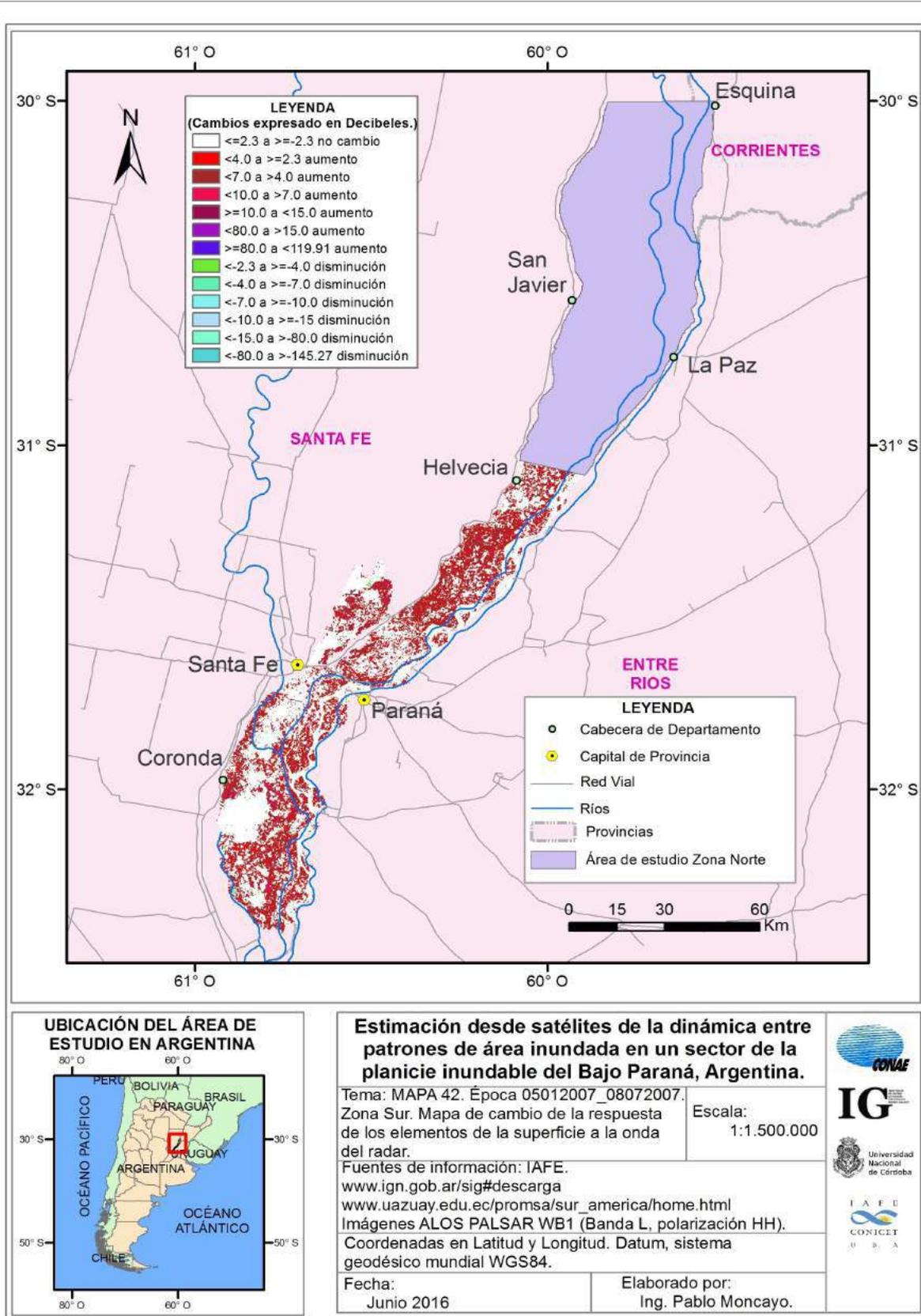


Figura 157. Mapa 42. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 08/07/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

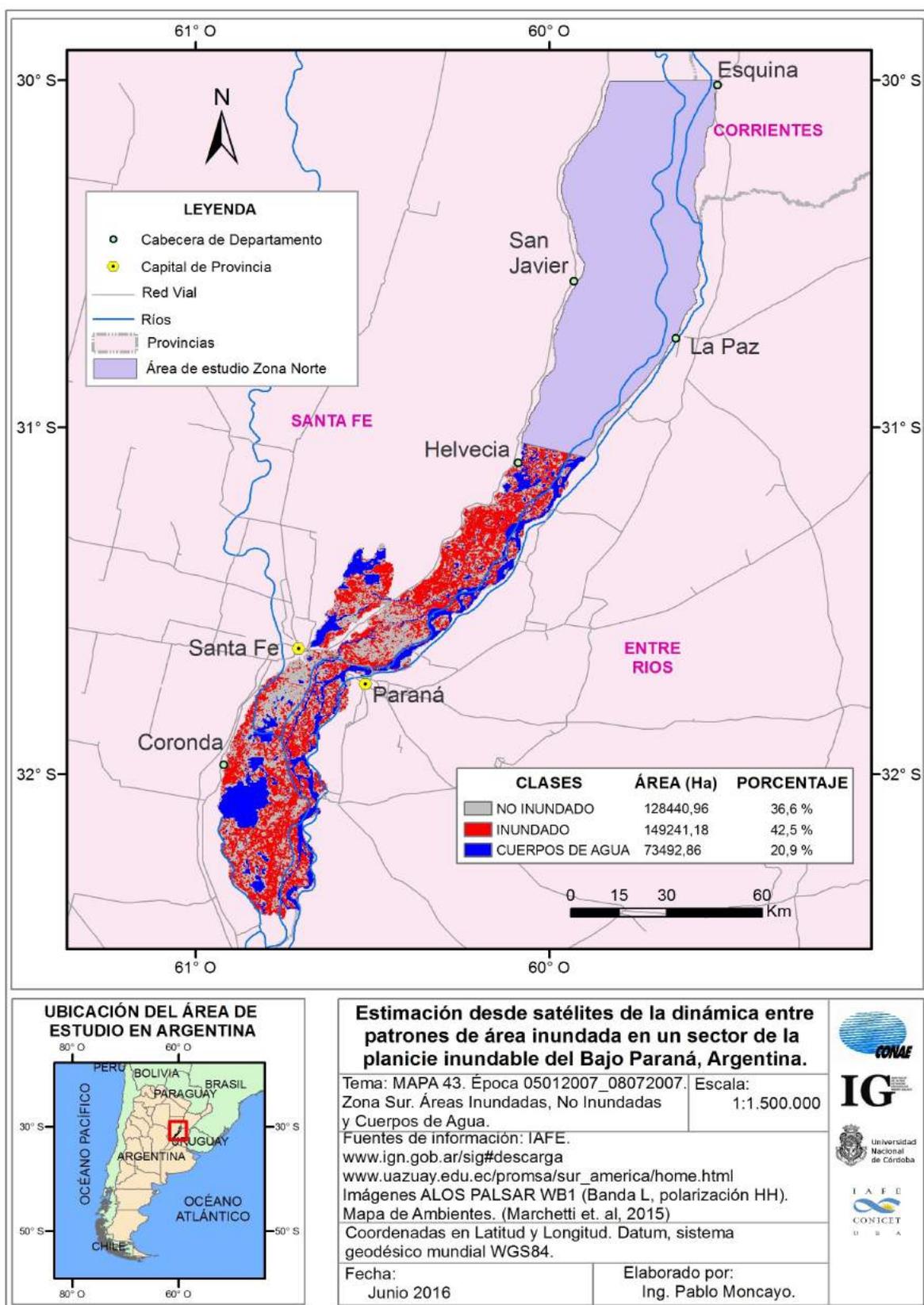
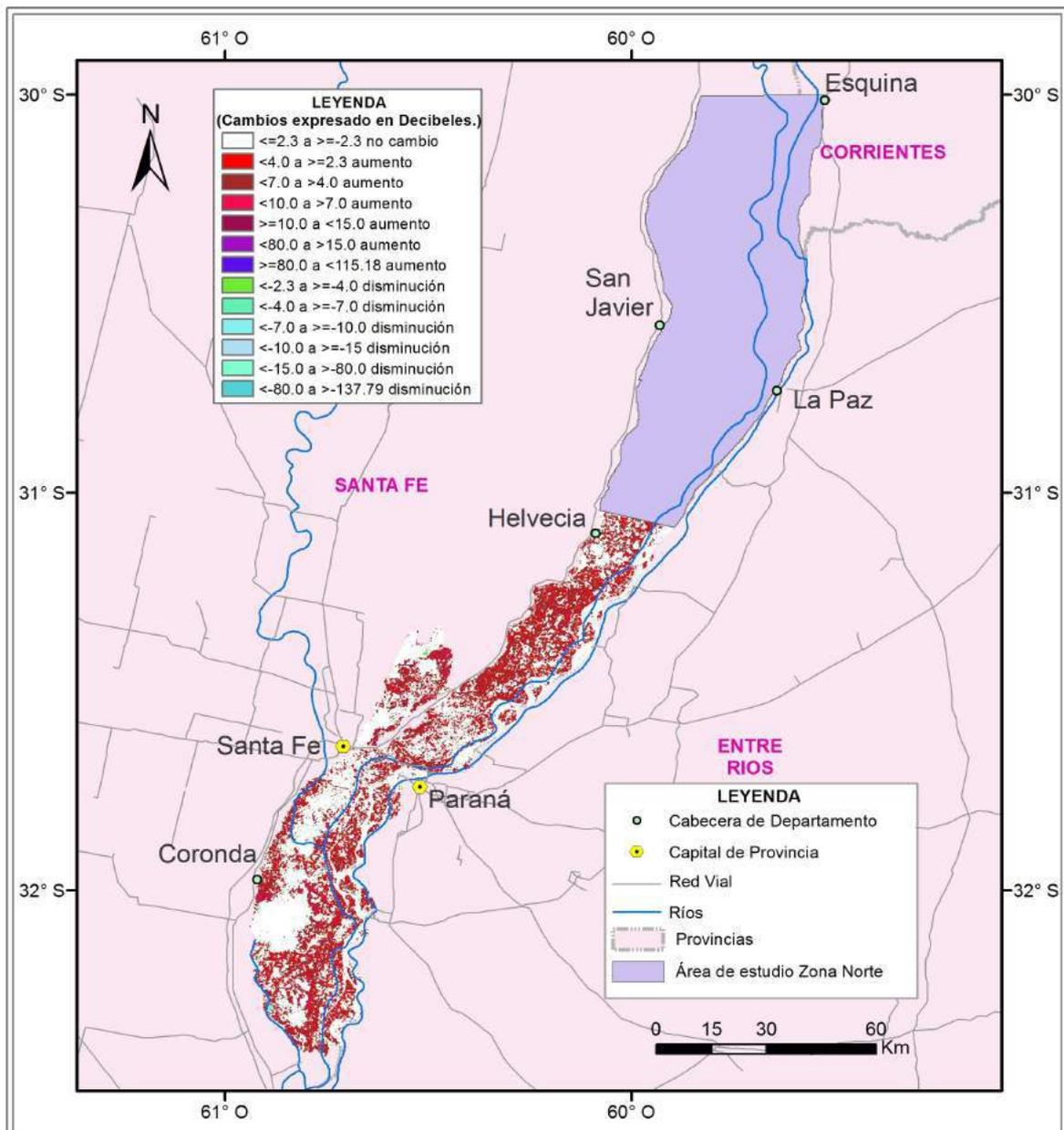


Figura 158. Mapa 43. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 08/07/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 44. Época 05012007_23082007.
 Zona Sur. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

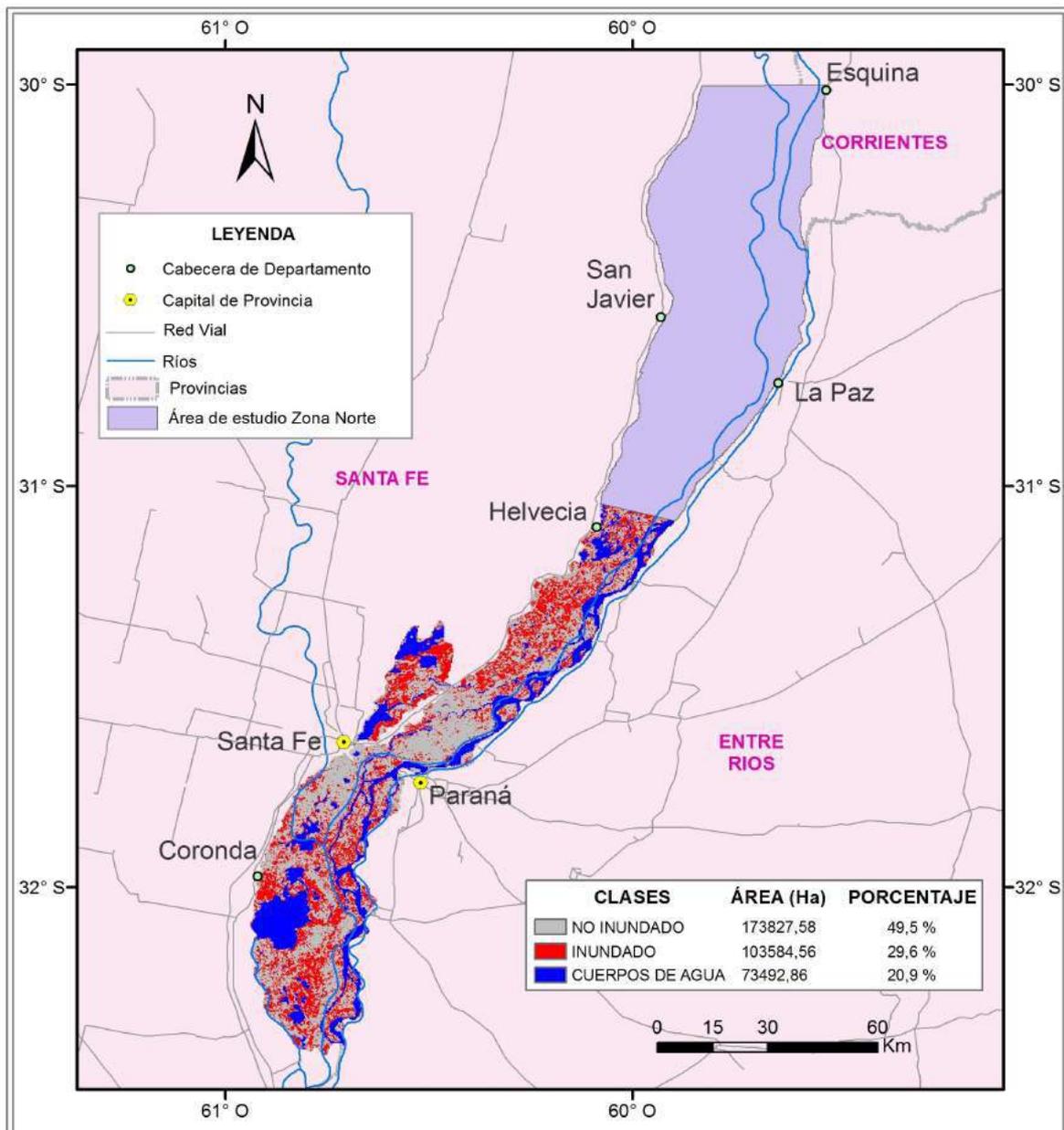
Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Escala: 1:1.500.000

Logos: CONAE, IG, Universidad Nacional de Córdoba, IAFE, CONICET.

Figura 159. Mapa 44. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/08/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 45. Época 05012007_23082007. Escala: 1:1.500.000

Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

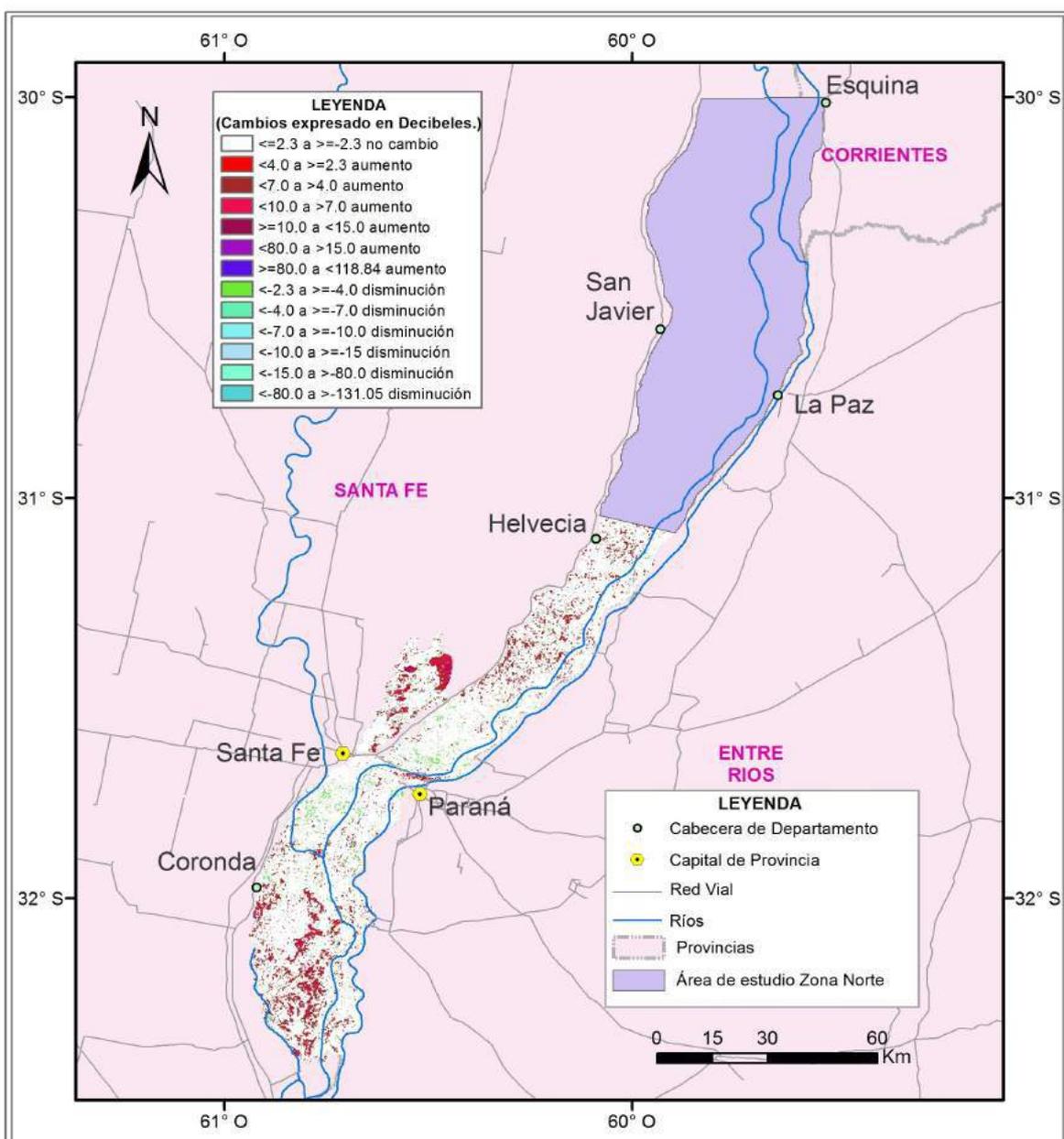
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 160. Mapa 45. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/08/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 46. Época 05012007_23112007.
 Zona Sur. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.
 Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Coordenadas en Latitud y Longitud, Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Escala:
1:1.500.000

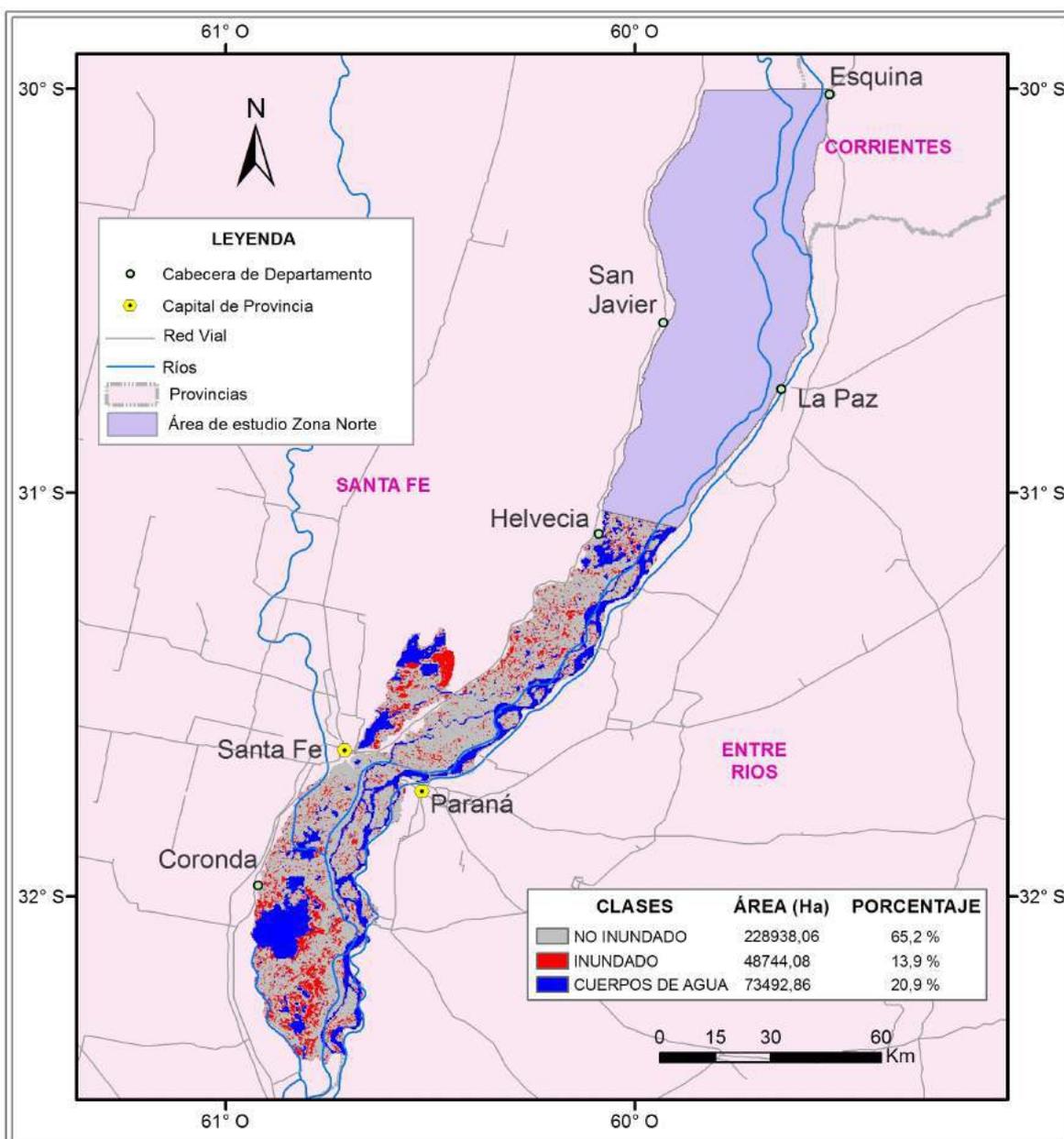


Fecha:
Junio 2016

Elaborado por:
Ing. Pablo Moncayo.

Figura 161. Mapa 46. Clases de cambio entre el 05/01/2007 y el 23/11/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 47. Época 05012007_23112007. Escala: 1:1.500.000
 Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 162. Mapa 47. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 23/11/2007. Fecha de referencia: 05/01/2007. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

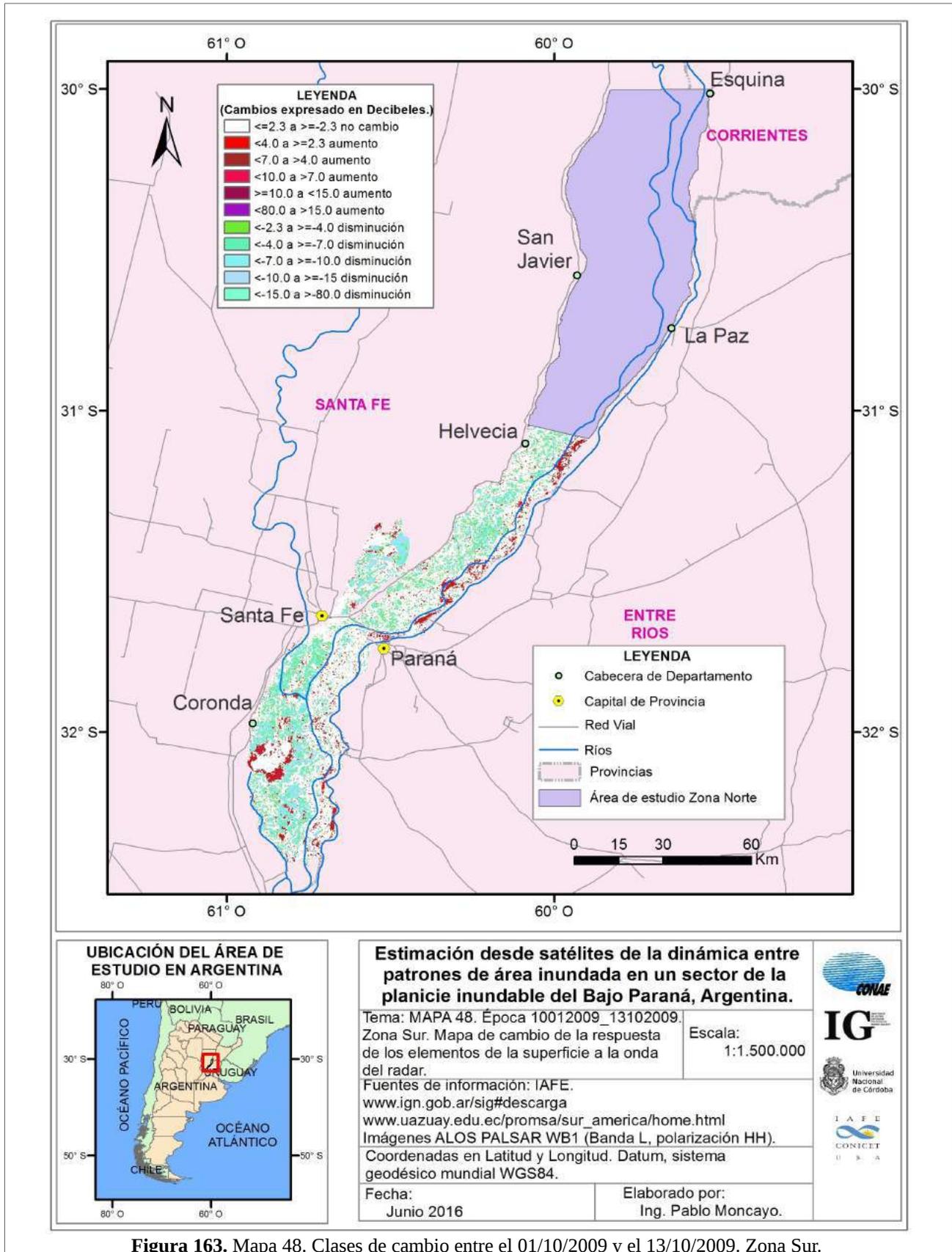
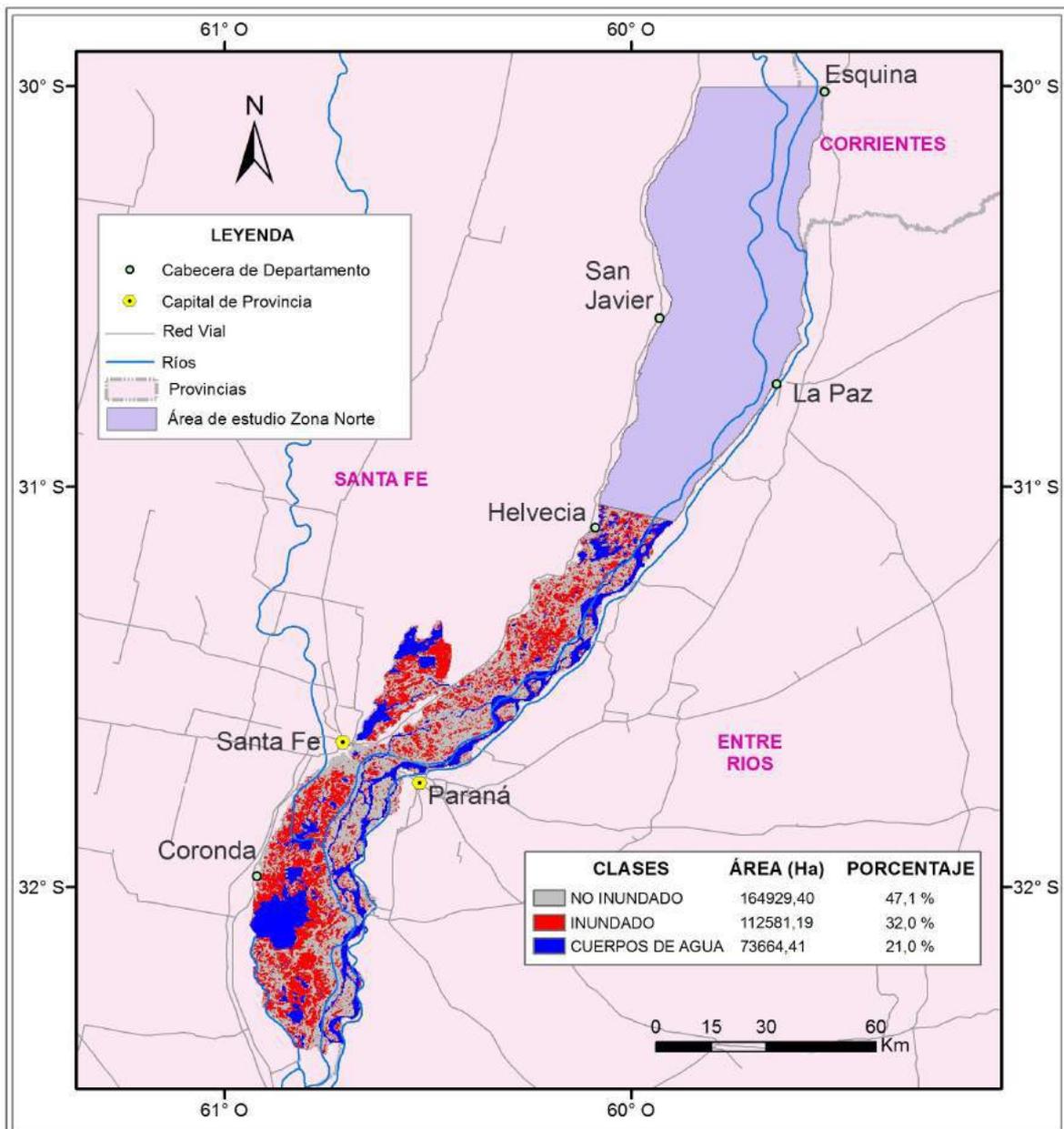


Figura 163. Mapa 48. Clases de cambio entre el 01/10/2009 y el 13/10/2009. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN ARGENTINA

Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 49. Época 10012009_13102009. Escala: 1:1.500.000

Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 164. Mapa 49. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2009. Fecha de referencia: 01/10/2009. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

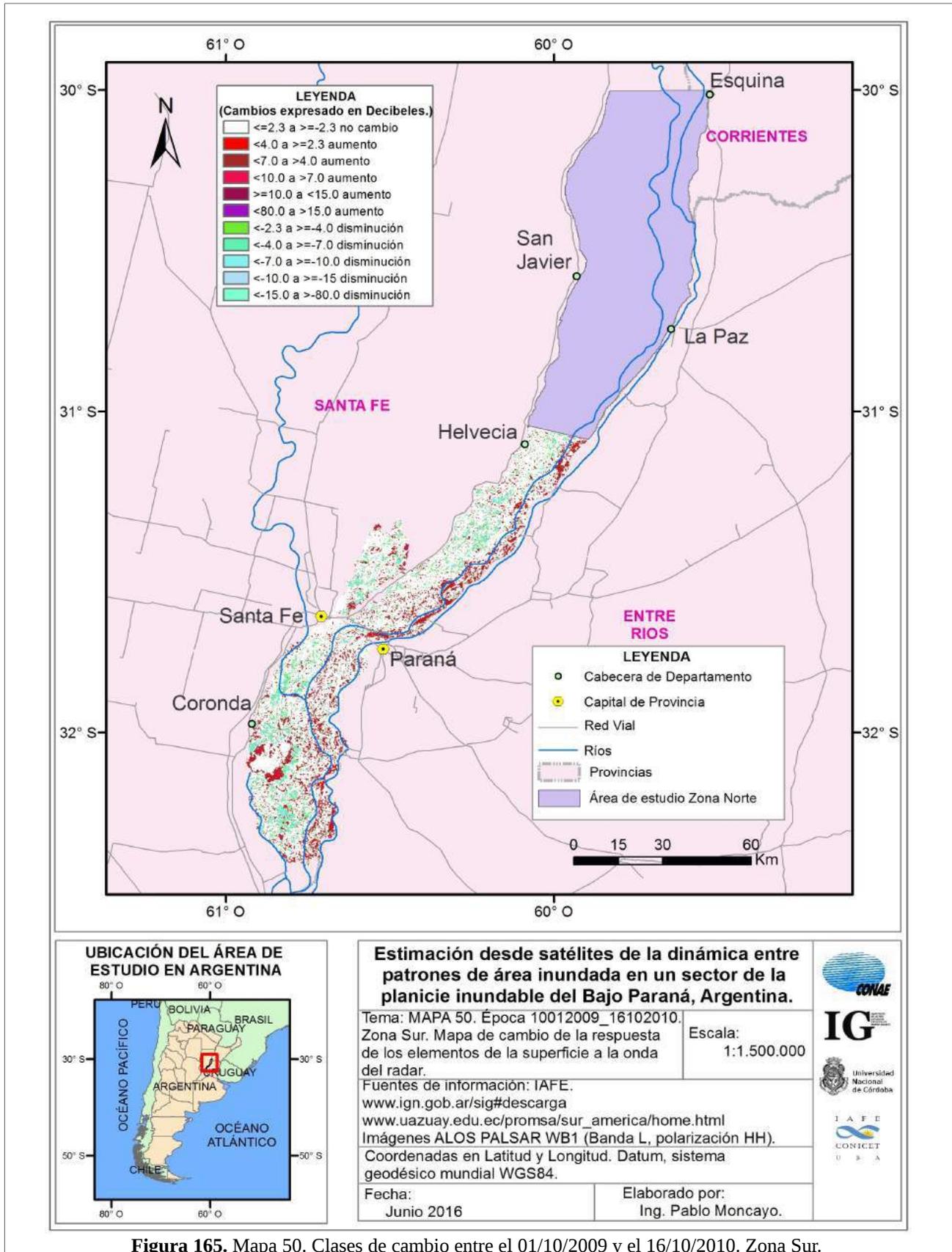


Figura 165. Mapa 50. Clases de cambio entre el 01/10/2009 y el 16/10/2010. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

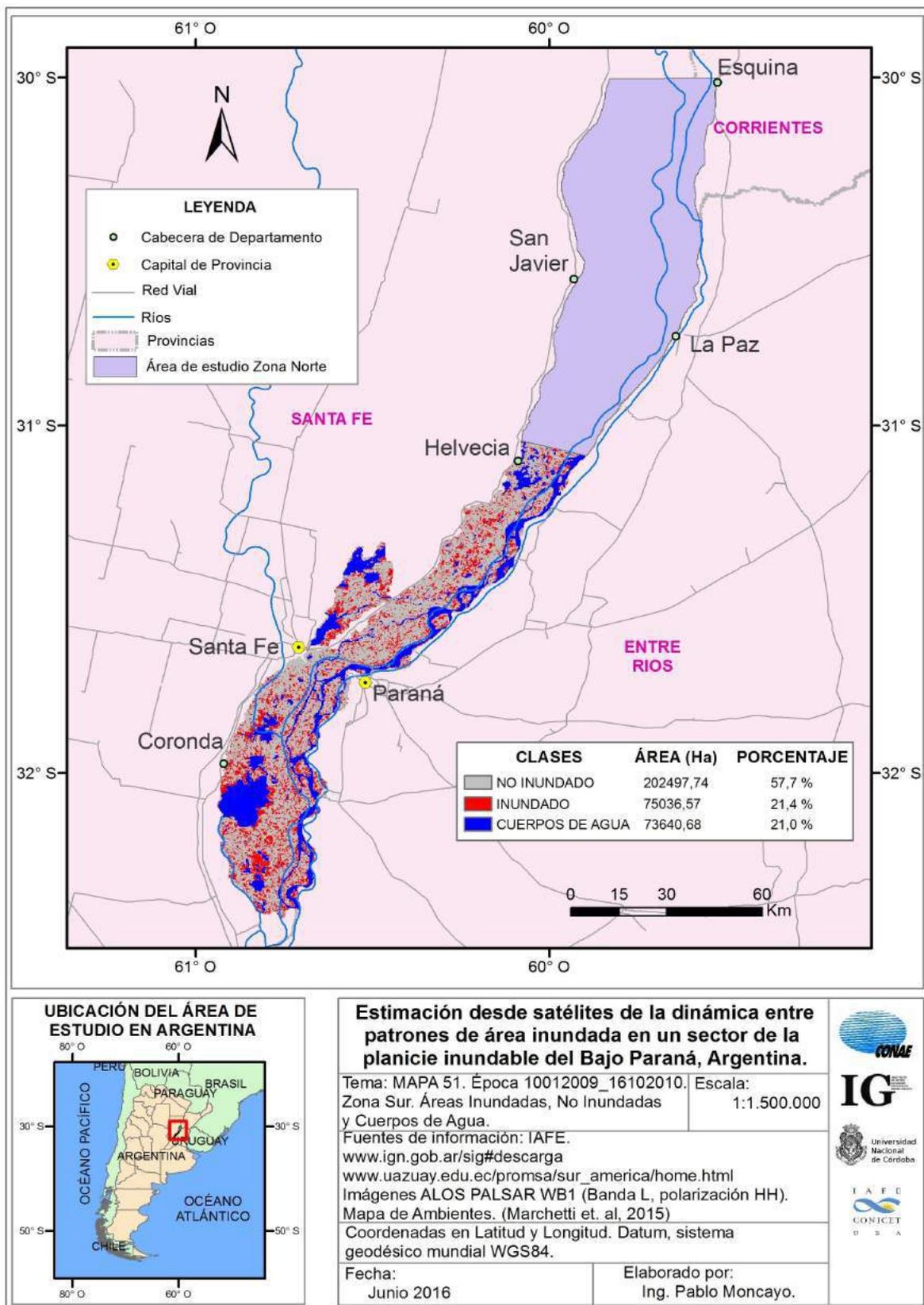
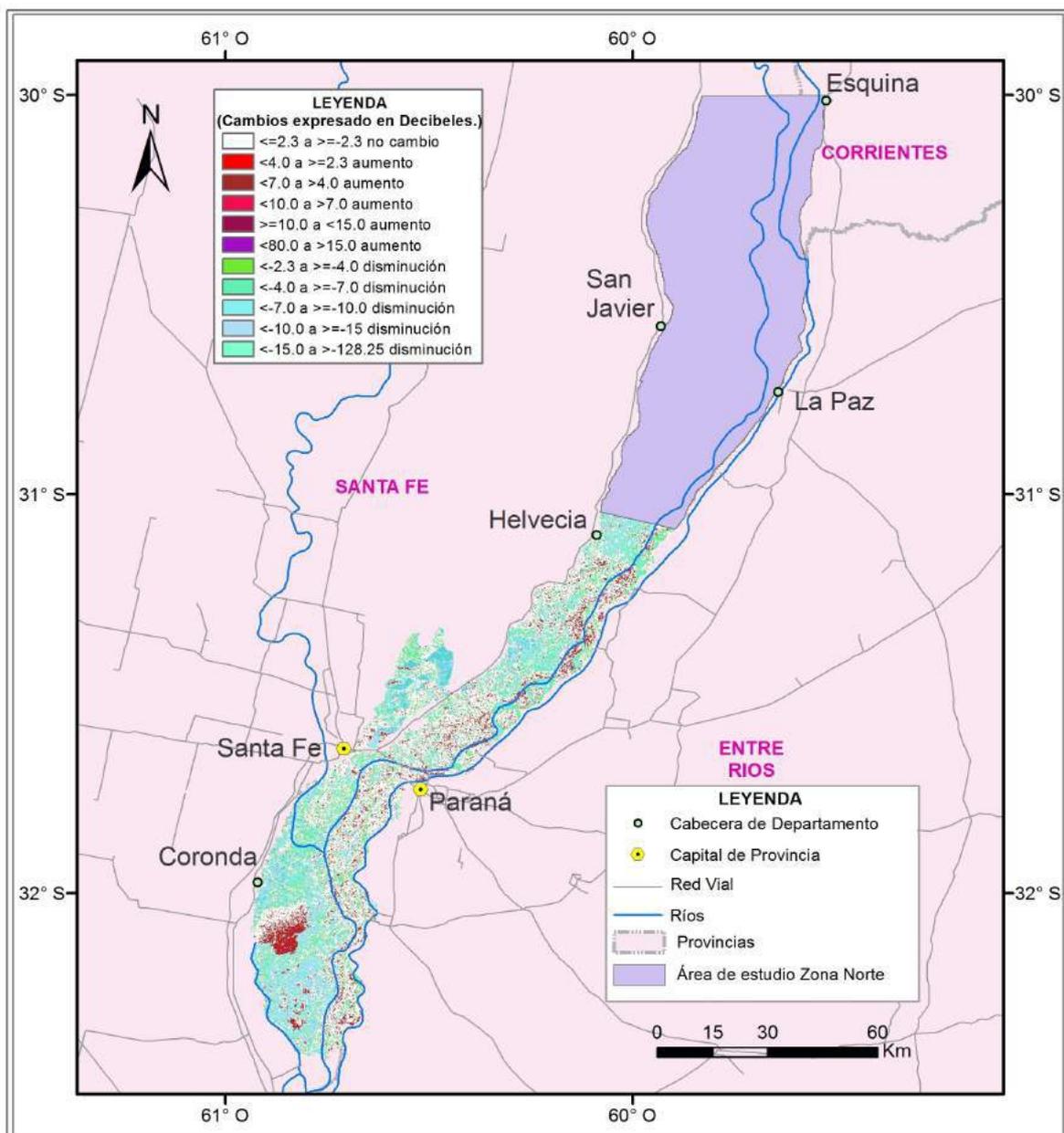


Figura 166. Mapa 51. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/10/2010. Fecha de referencia: 01/10/2009. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 52. Época 13042012_25072014.
 Zona Sur. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

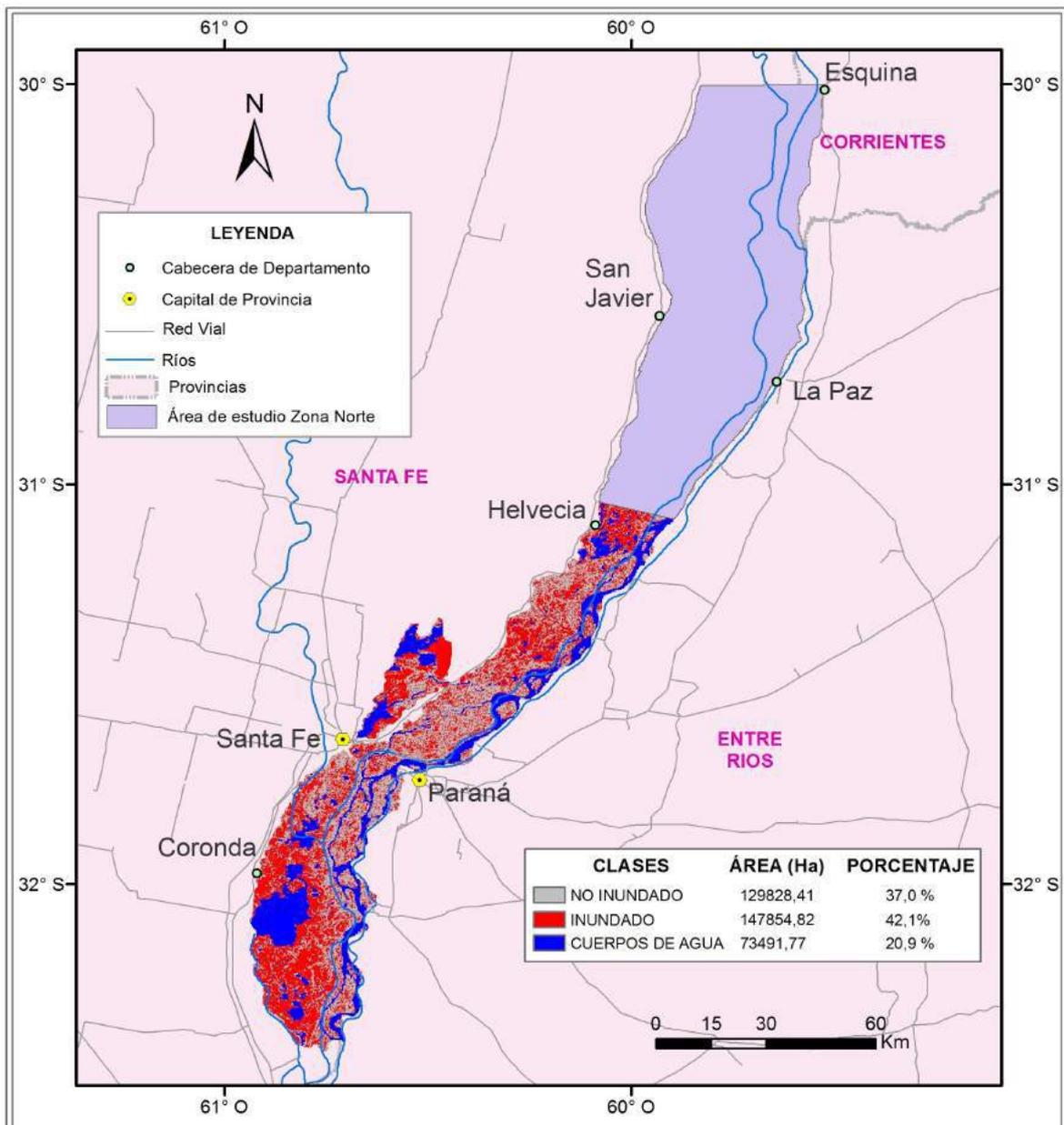
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Logos: CONAE, IG, Universidad Nacional de Córdoba, IAFE, CONICET, UBA

Figura 167. Mapa 52. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 25/07/2014. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 53. Época 13042012_25072014. Escala: 1:1.500.000

Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al. 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 168. Mapa 53. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 25/07/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

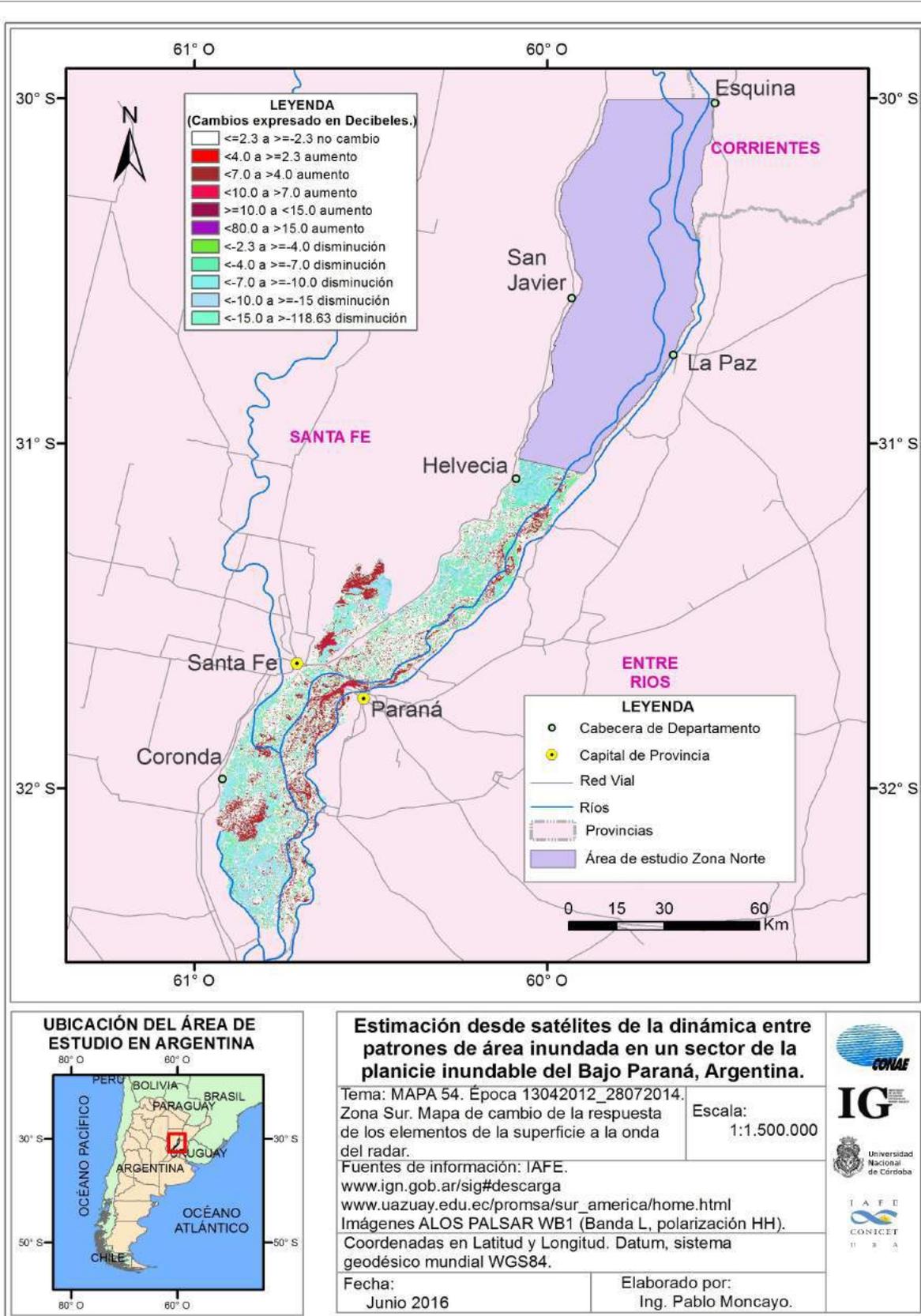
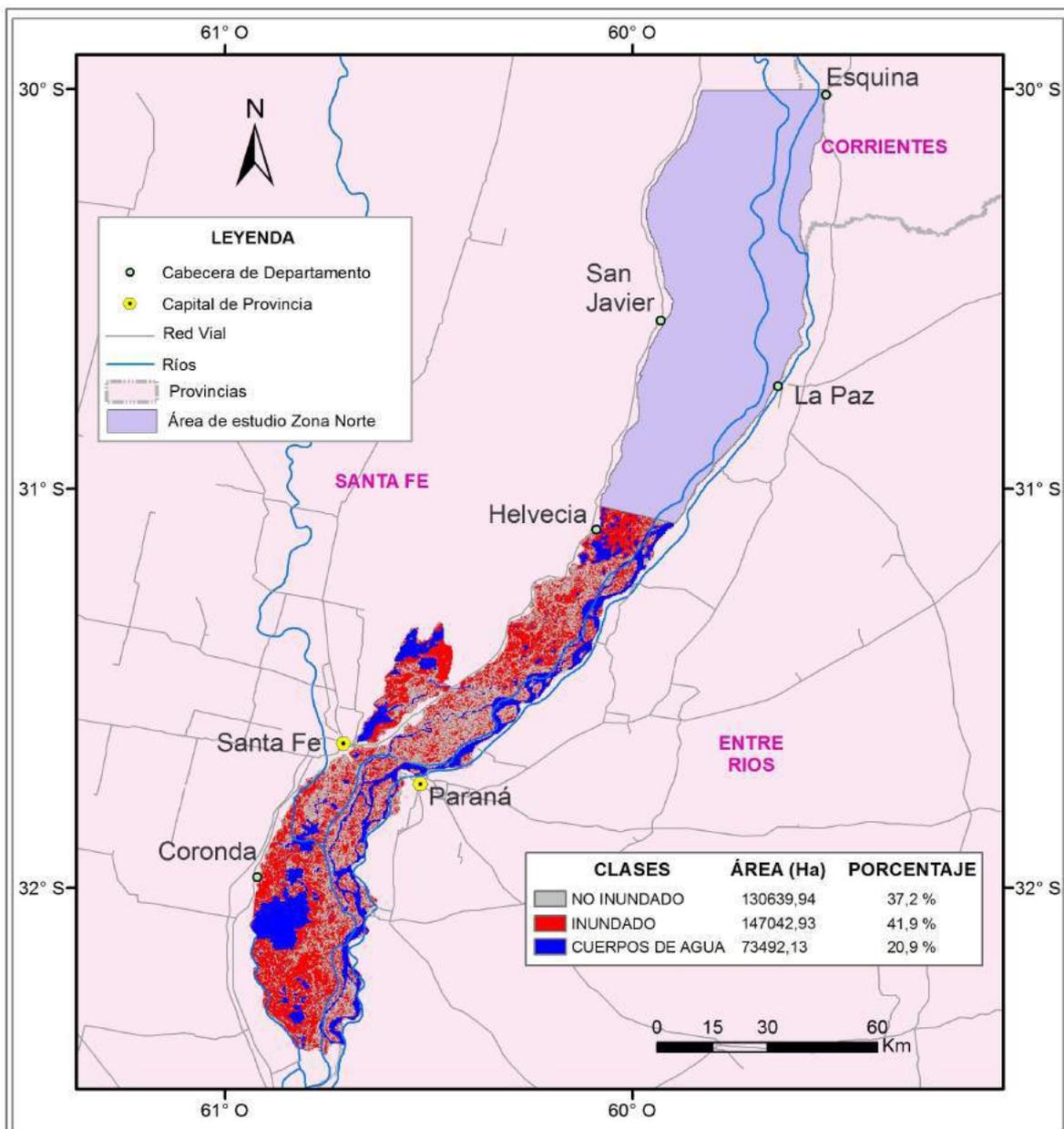


Figura 169. Mapa 54. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 28/07/2014. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 55. Época 13042012_28072014. Escala: 1:1.500.000
Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al. 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 170. Mapa 55. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 28/07/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.

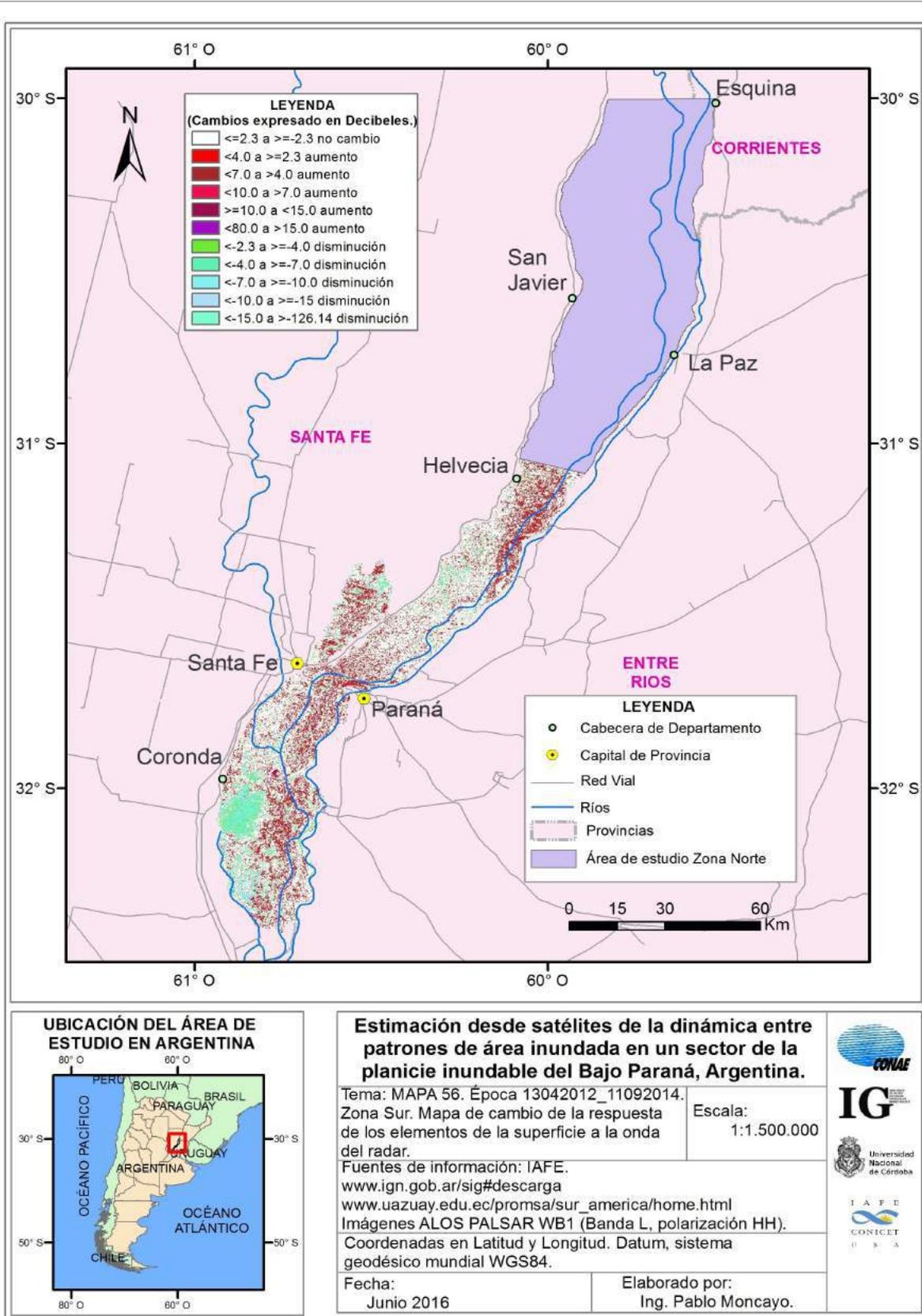
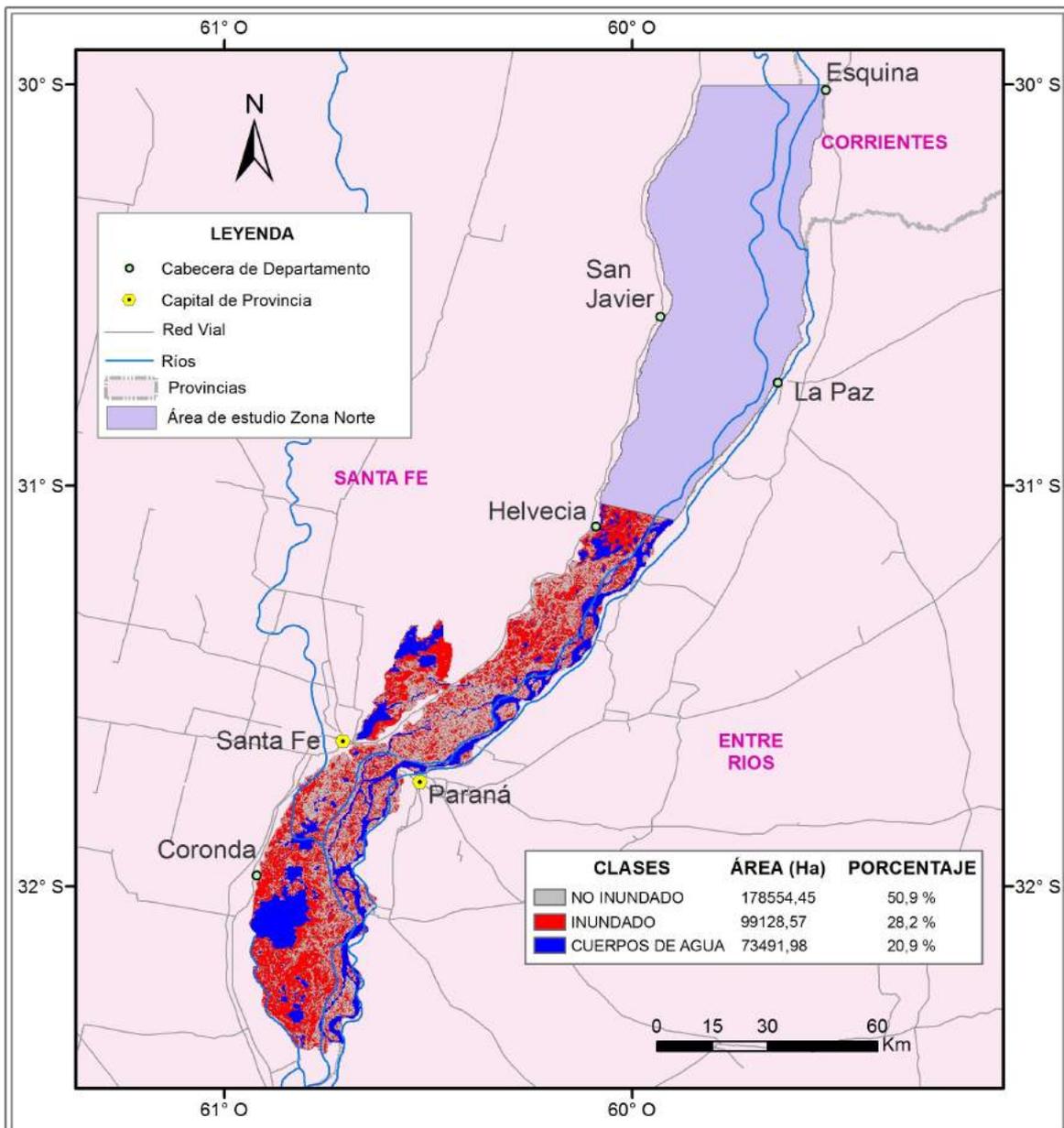


Figura 171. Mapa 56. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 11/09/2014. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 57. Época 13042012_11092014. Escala: 1:1.500.000
 Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

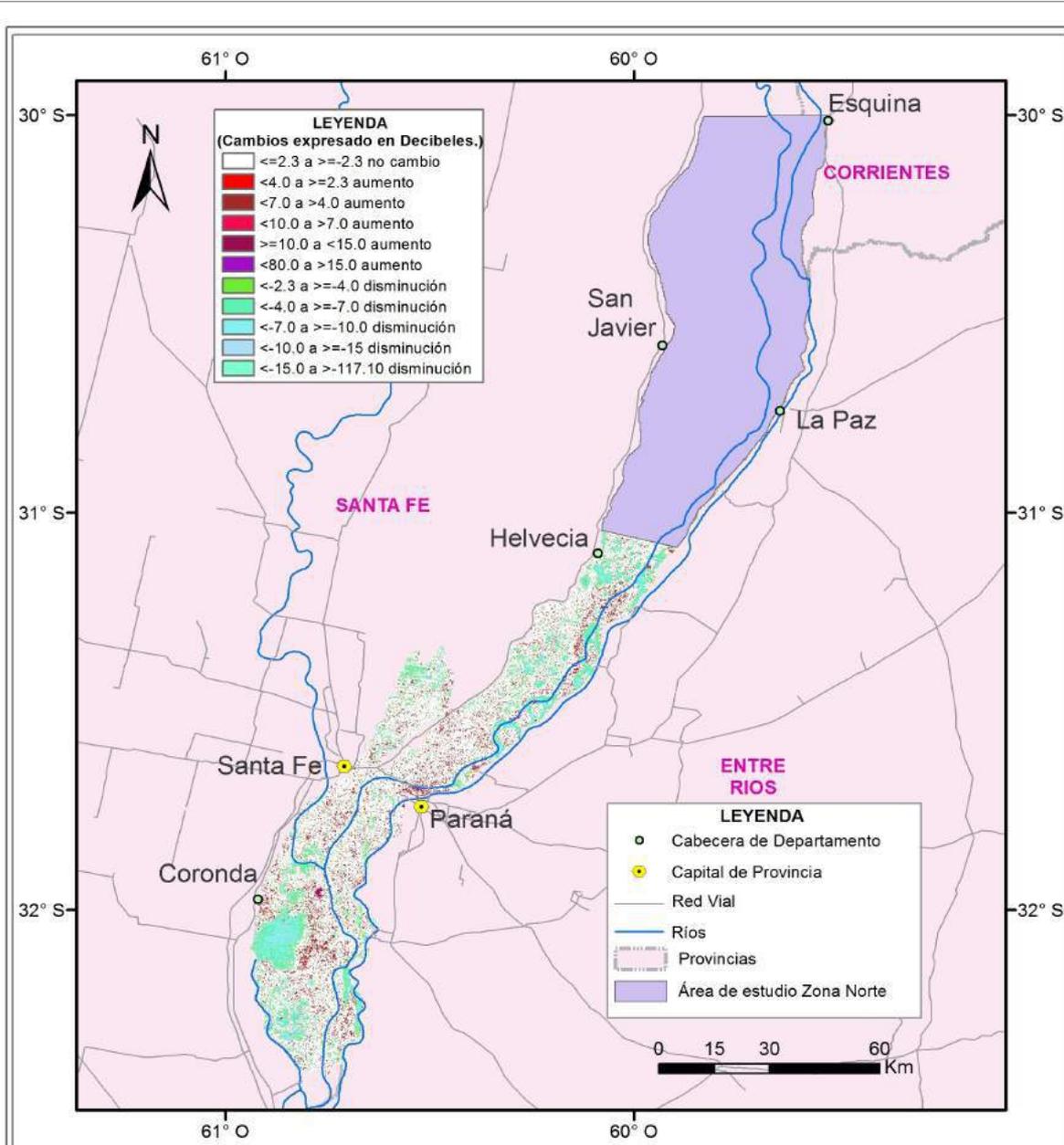
Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016
 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 172. Mapa 57. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 11/09/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 58. Época 13042012_13102014.
 Zona Sur. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

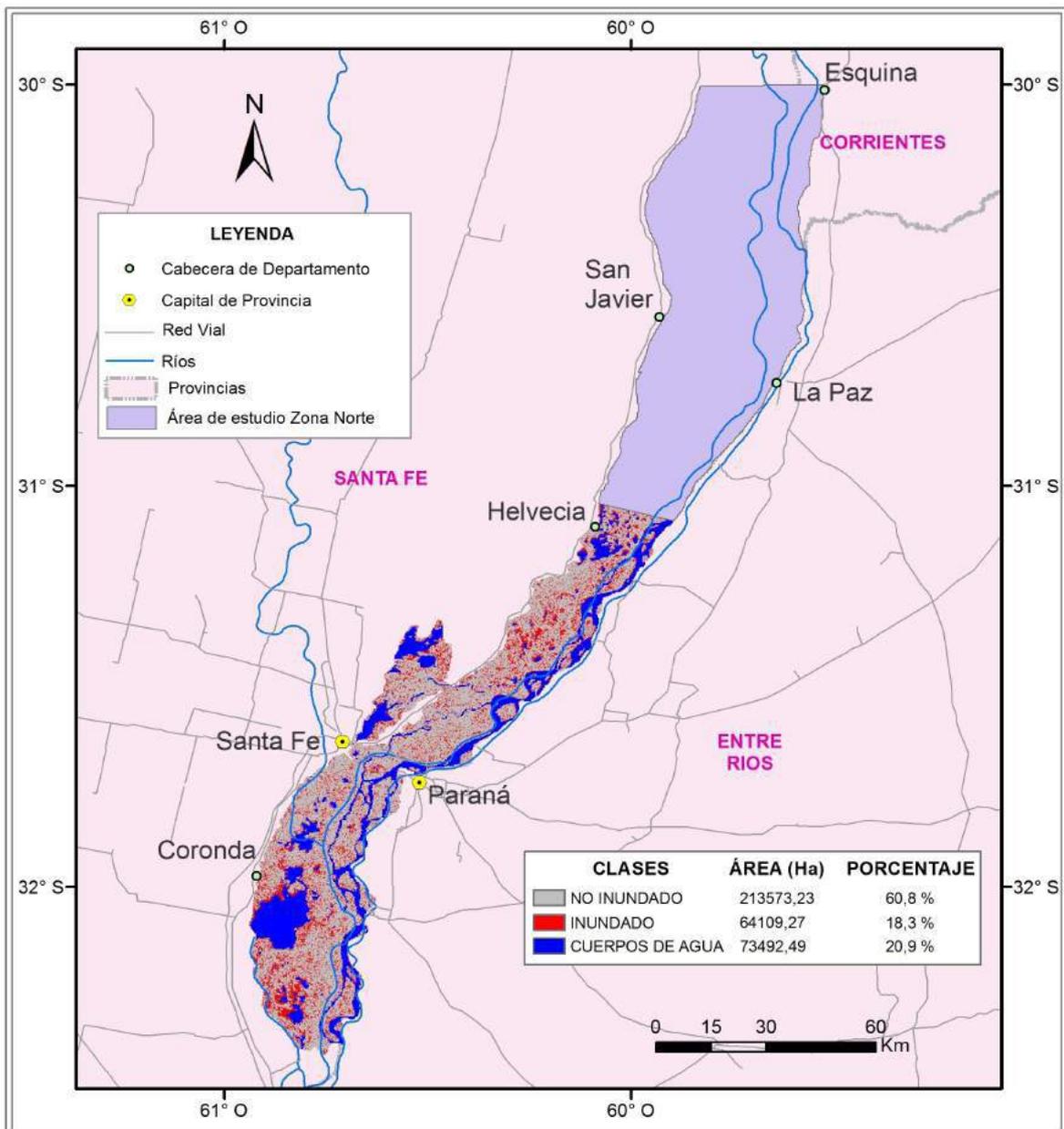
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 173. Mapa 58. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 13/10/2014. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN ARGENTINA

Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 59. Época 13042012_13102014. Escala: 1:1.500.000

Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

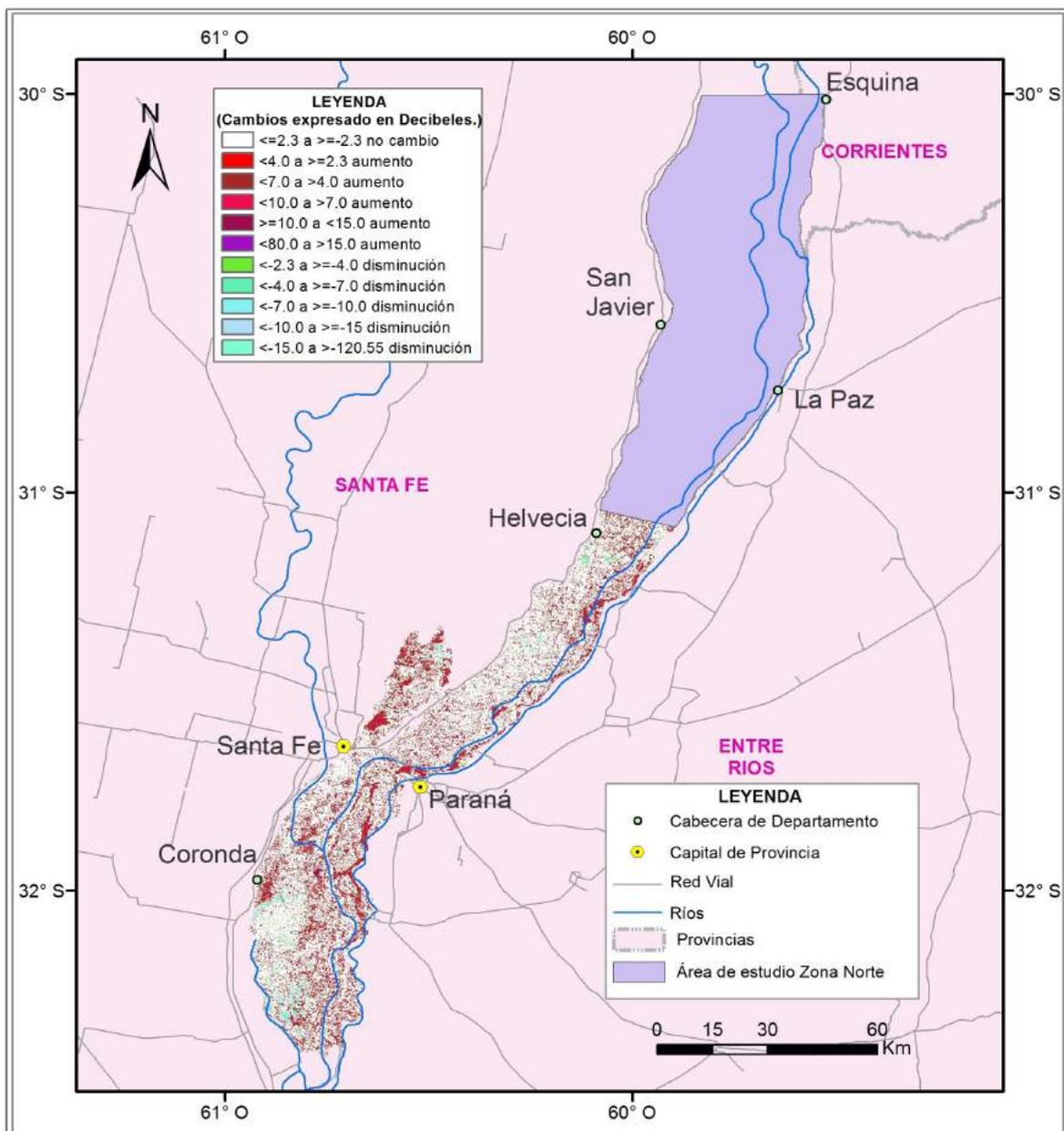
Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Figura 174. Mapa 59. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/10/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 60. Época 13042012_13112014.
Zona Sur. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.

www.ign.gov.ar/sig#descarga

www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

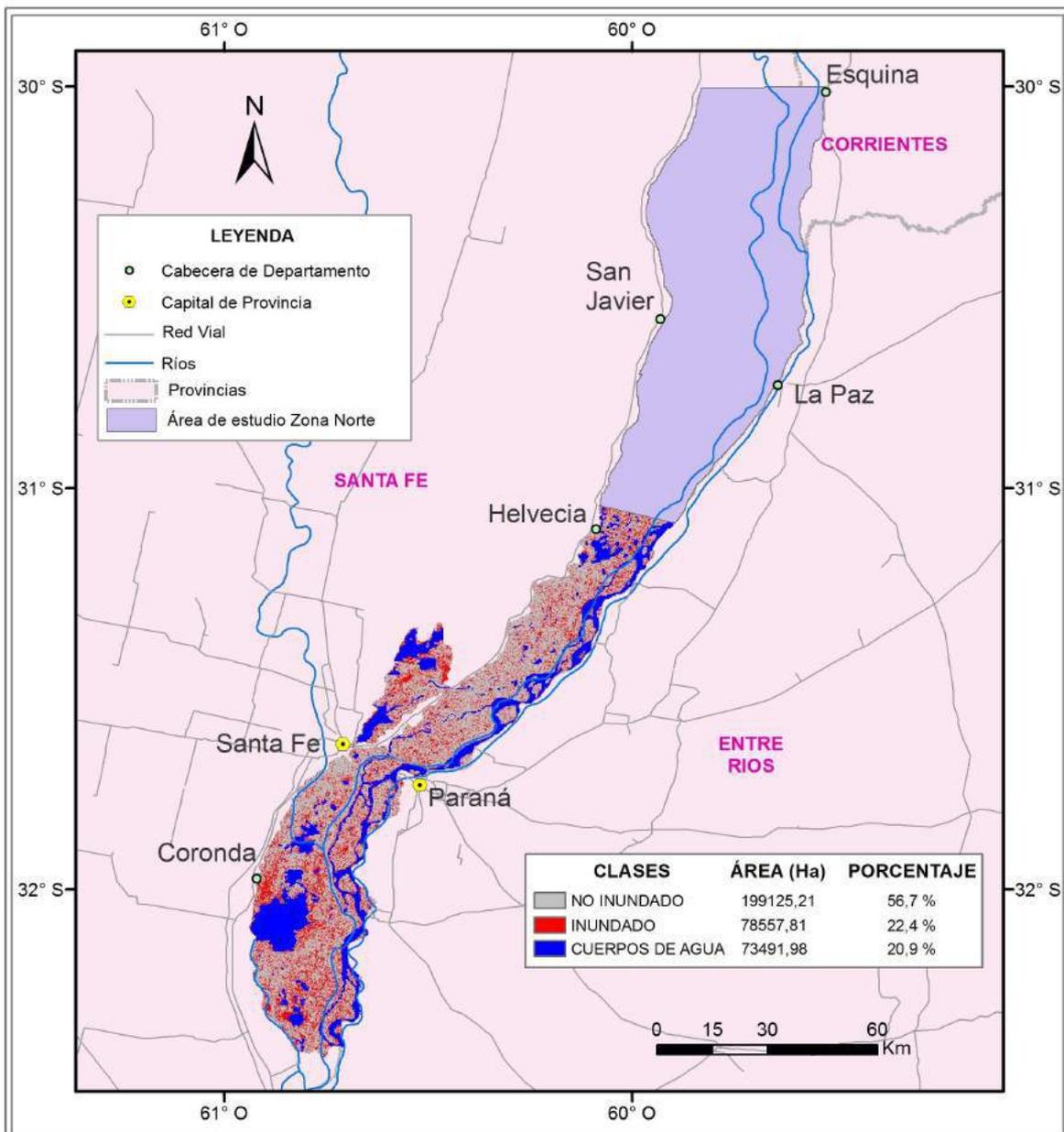
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 175. Mapa 60. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 13/11/2014. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



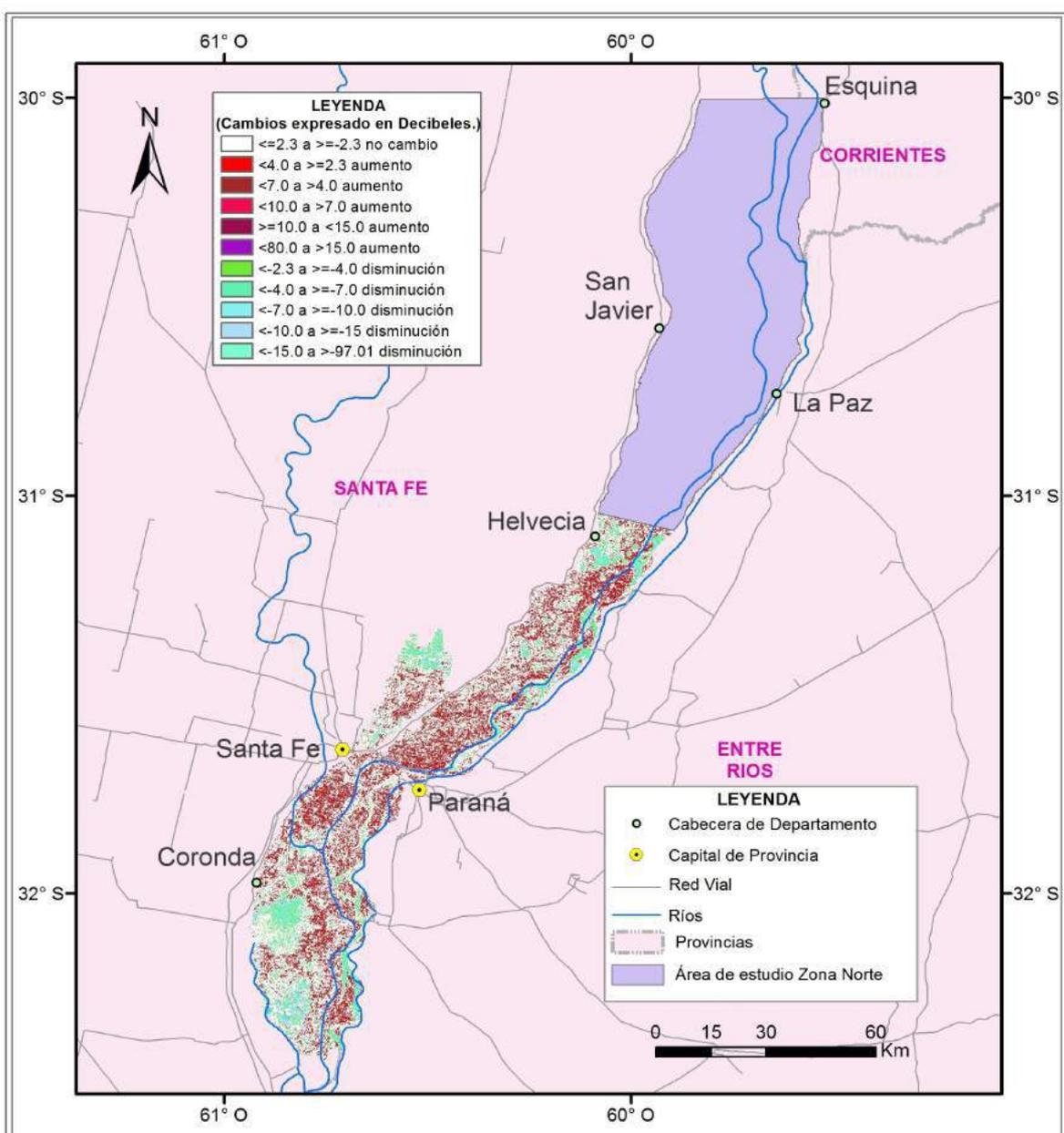
Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 61. Época 13042012_13112014. Escala: 1:1.500.000
 Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.
 Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gob.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.
 Fecha: Junio 2016
 Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.



Figura 176. Mapa 61. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 13/11/2014. Fecha de referencia: 13/04/2012. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 62. Época 13042012_16012015.
 Zona Sur. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

Escala: 1:1.500.000

Fuentes de información: IAFE.
www.ign.gov.ar/sig#descarga
www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html
 Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).
 Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

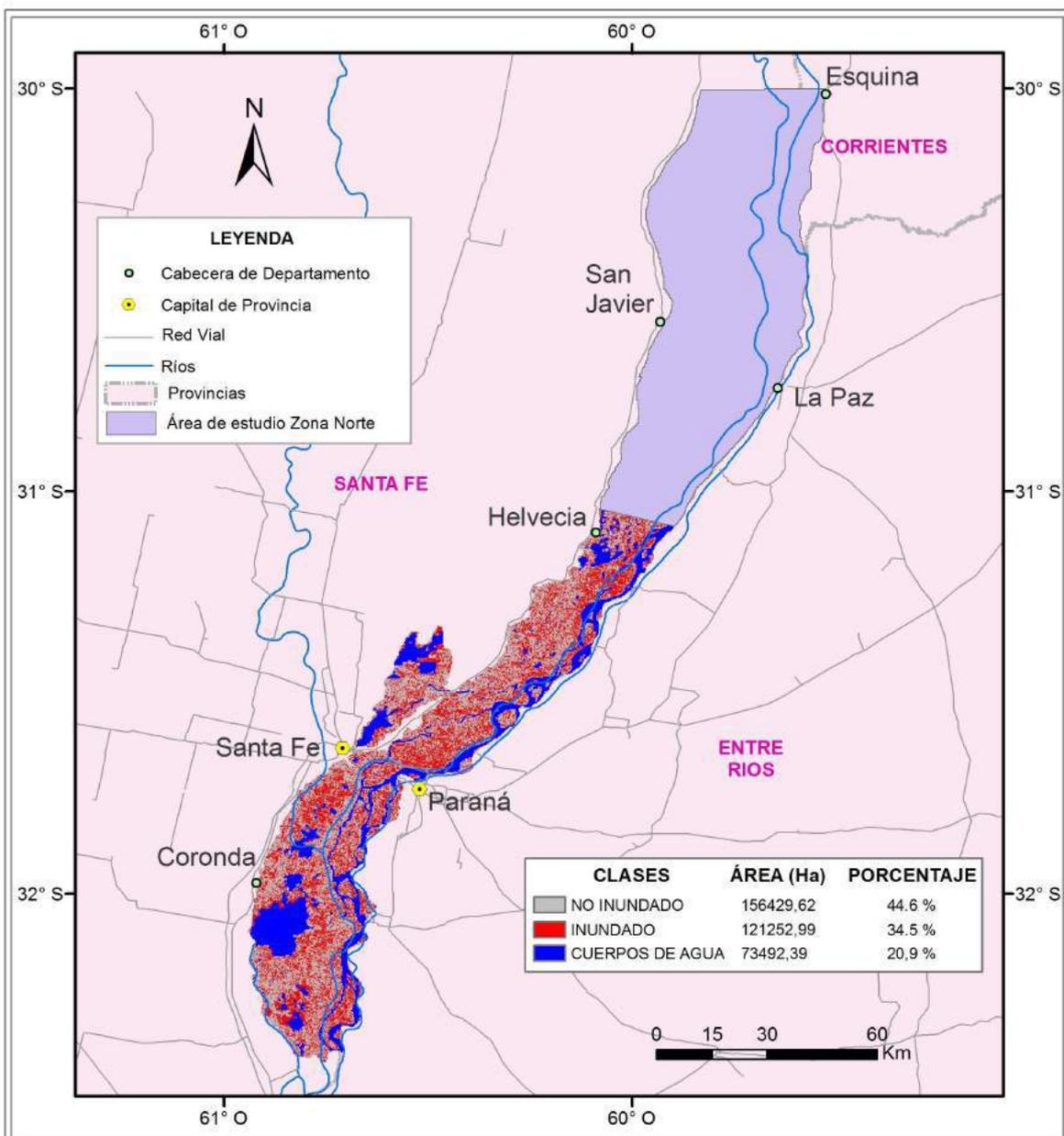
Fecha: Junio 2016

Elaborado por: Ing. Pablo Moncayo.

Logos: CONAE, IG, Universidad Nacional de Córdoba, IAFE, CONICET, UBA.

Figura 177. Mapa 62. Clases de cambio entre el 13/04/2012 y el 16/01/2015. Zona Sur.

ANEXO A. Mapas de detección de cambios y Mapas de inundación generados.



Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada en un sector de la planicie inundable del Bajo Paraná, Argentina.

Tema: MAPA 63. Época 13042012_16012015. Escala: 1:1.500.000

Zona Sur. Áreas Inundadas, No Inundadas y Cuerpos de Agua.

Fuentes de información: IAFE.

www.ign.gob.ar/sig#descarga

www.uazuay.edu.ec/promsa/sur_america/home.html

Imágenes ALOS PALSAR WB1 (Banda L, polarización HH).

Mapa de Ambientes. (Marchetti et. al, 2015)

Coordenadas en Latitud y Longitud. Datum, sistema geodésico mundial WGS84.

Fecha:
Junio 2016

Elaborado por:
Ing. Pablo Moncayo.



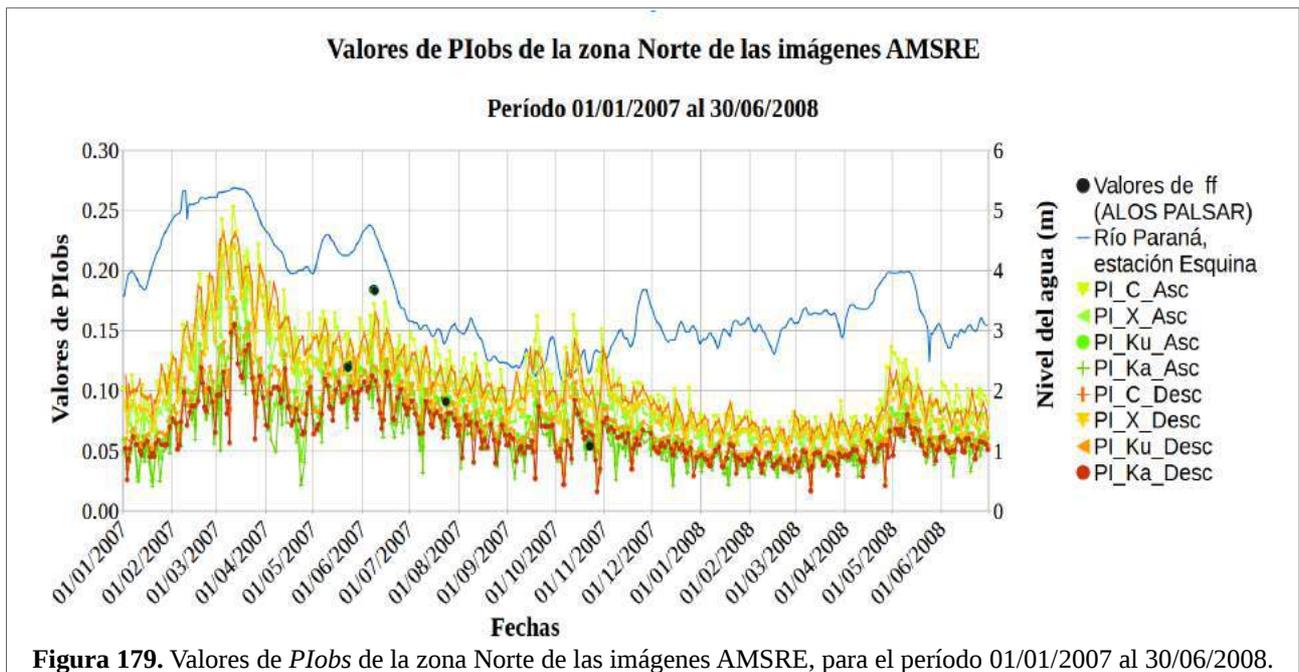
Figura 178. Mapa 63. Áreas inundadas, no inundadas y cuerpos de agua al 16/01/2015. Fecha de referencia: 13/04/2012 . Zona Sur.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.

B.1 Primera época de la zona Norte.

B.1.1 Valores de PI_{obs} de la zona Norte.

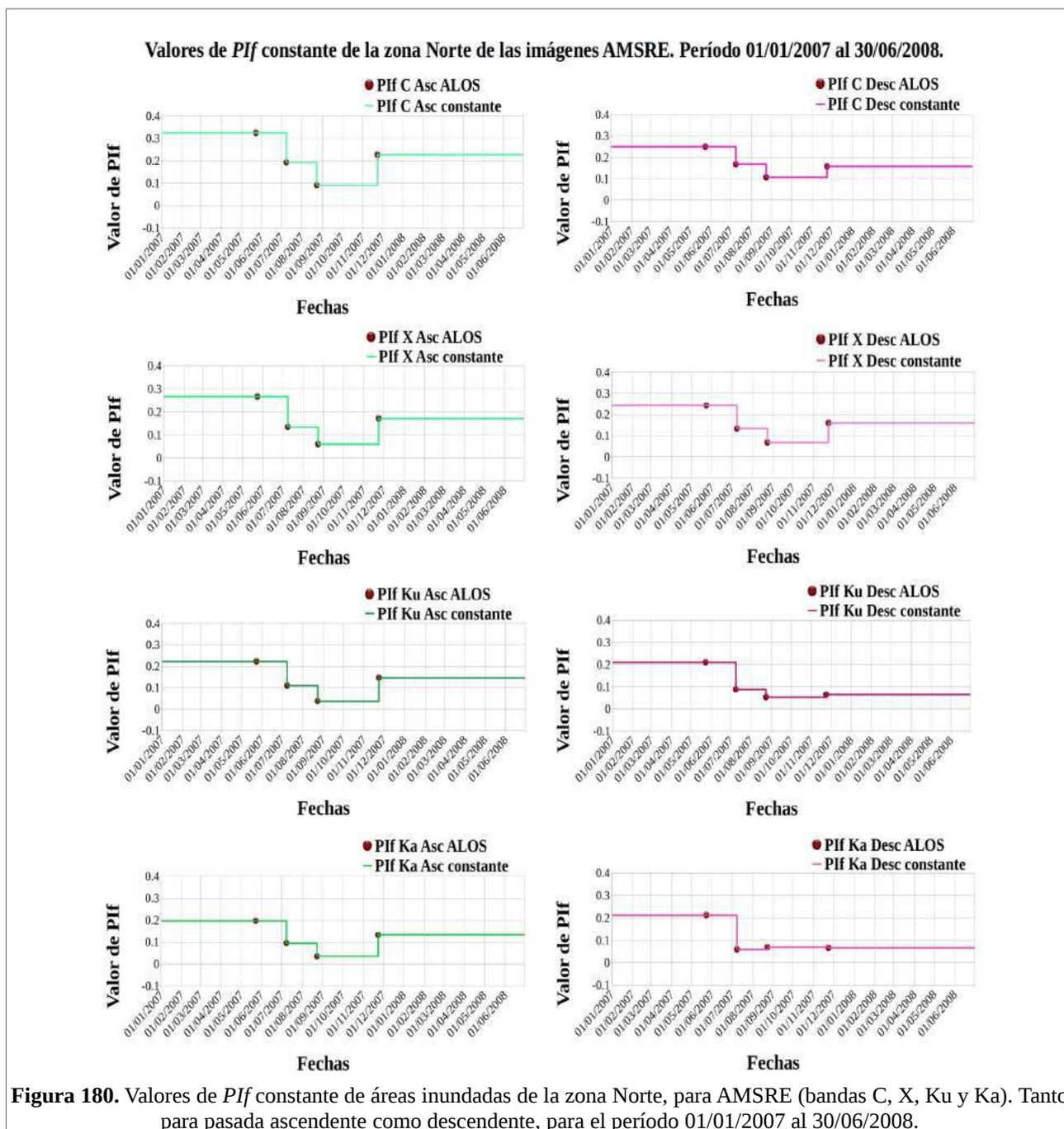
La figura 179 muestra los datos de AMSRE de PI_{obs} .



B.1.2 Valores de PI_f en el esquema de valor constante de la zona Norte.

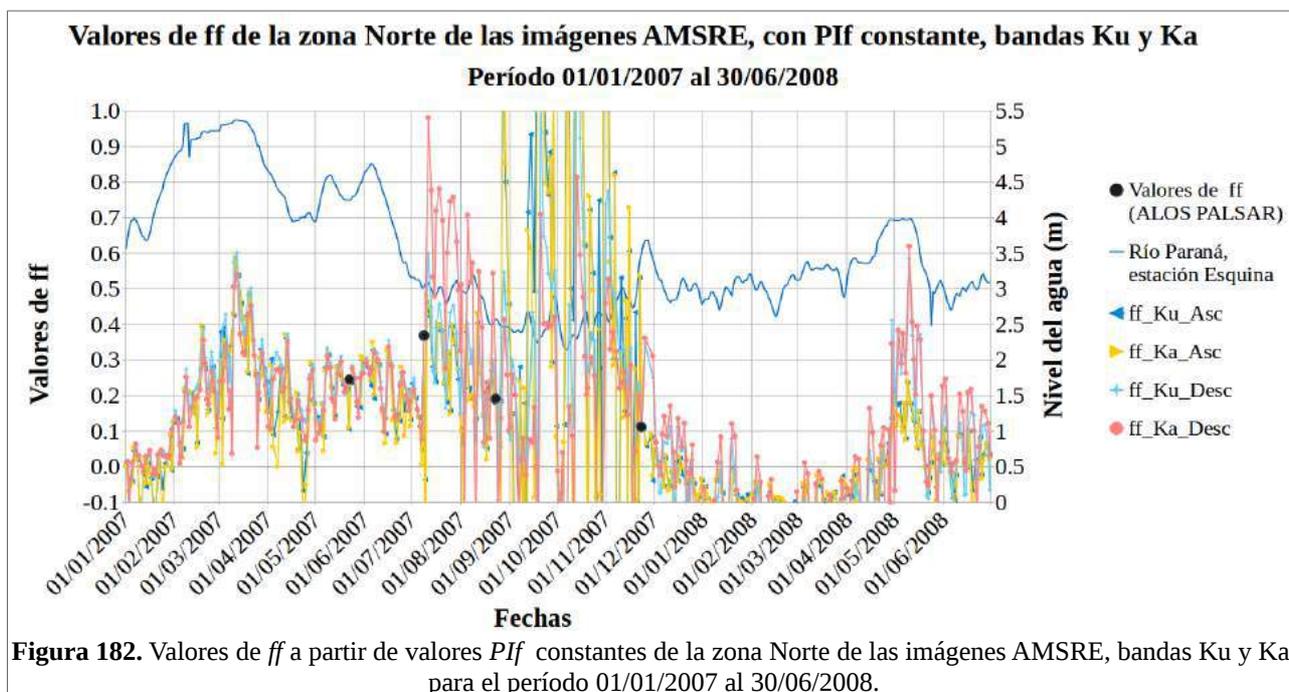
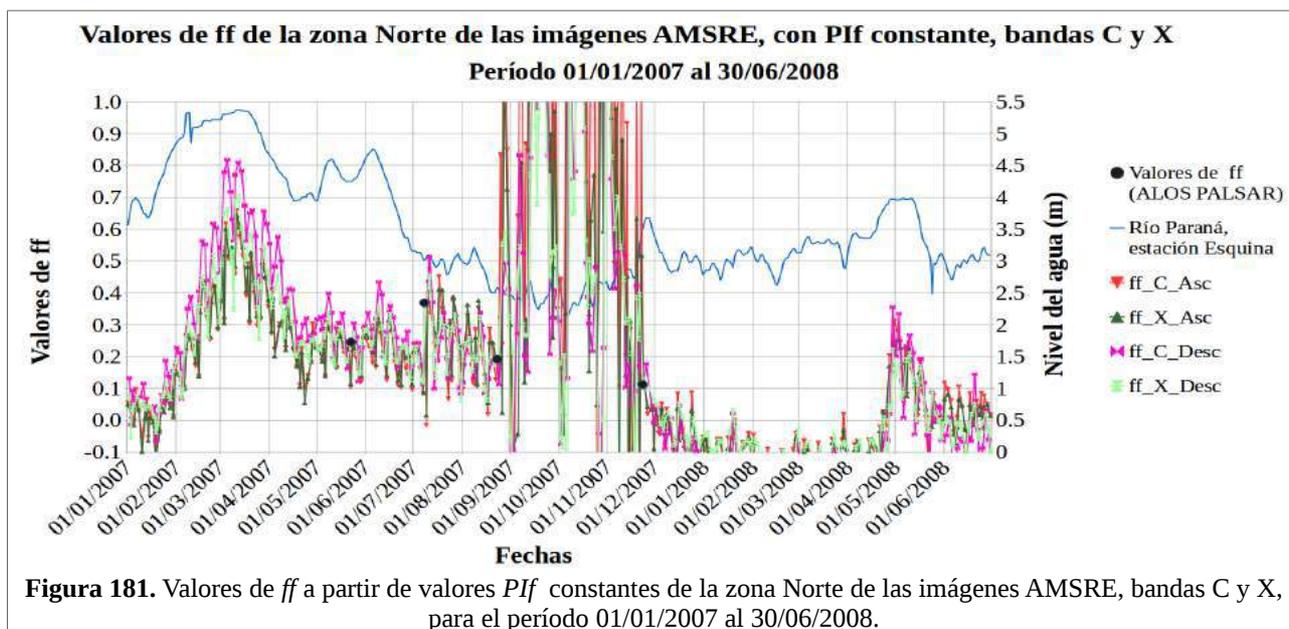
En la figura 180, se observan los valores de PI_f calculados para las fechas de adquisición de imágenes ALOS PALSAR y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de PI_f obtenidos que se muestran en la tabla 26.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.1.3 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Norte, calculada con el esquema *Pif* constante.

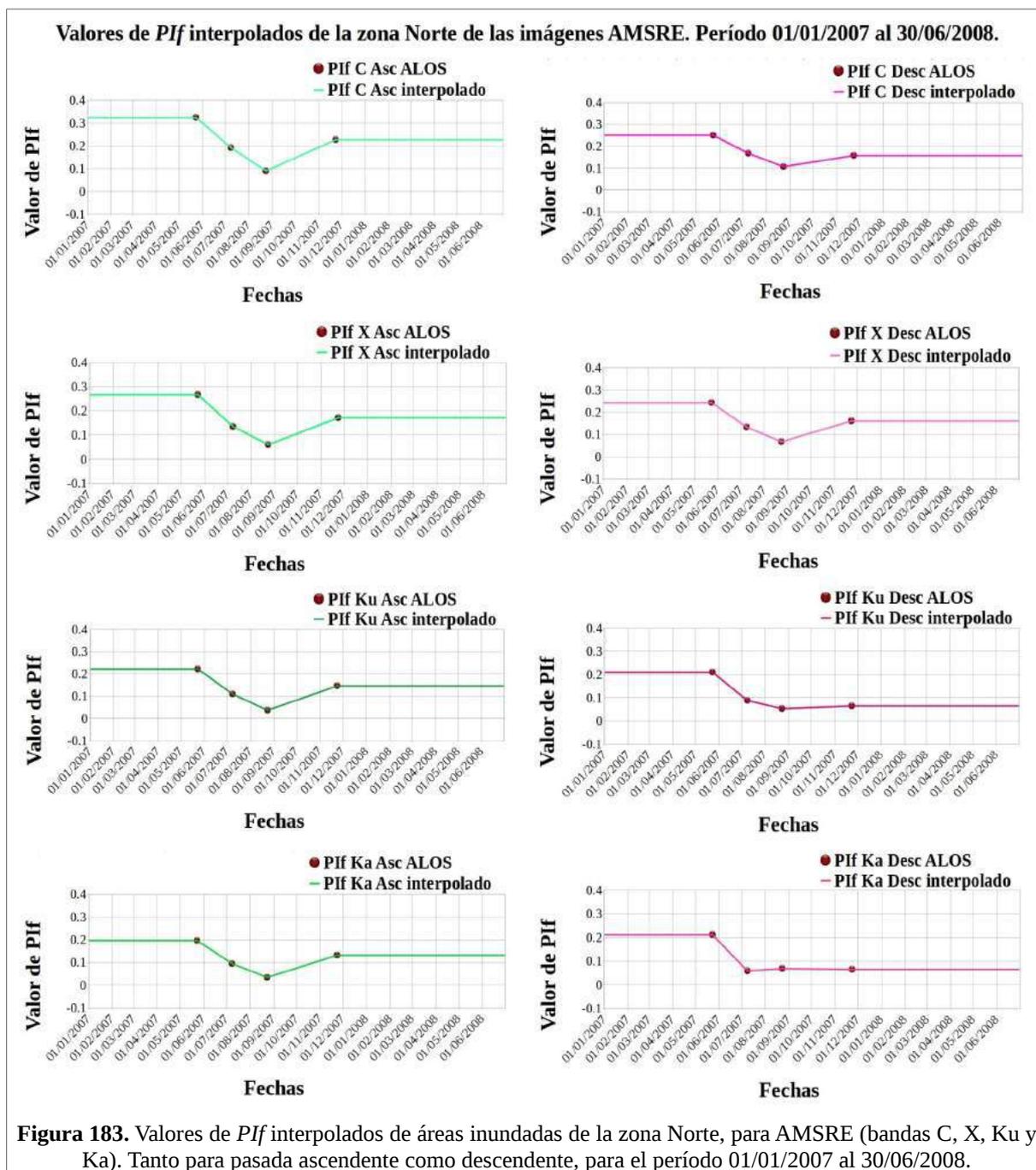
En las Figuras 181 y 182, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y PI_{nf} presentados en las tablas 21 y 25 respectivamente y los valores de *Pif* obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 180) para el cálculo.



B.1.4 Valores de PIf en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Norte.

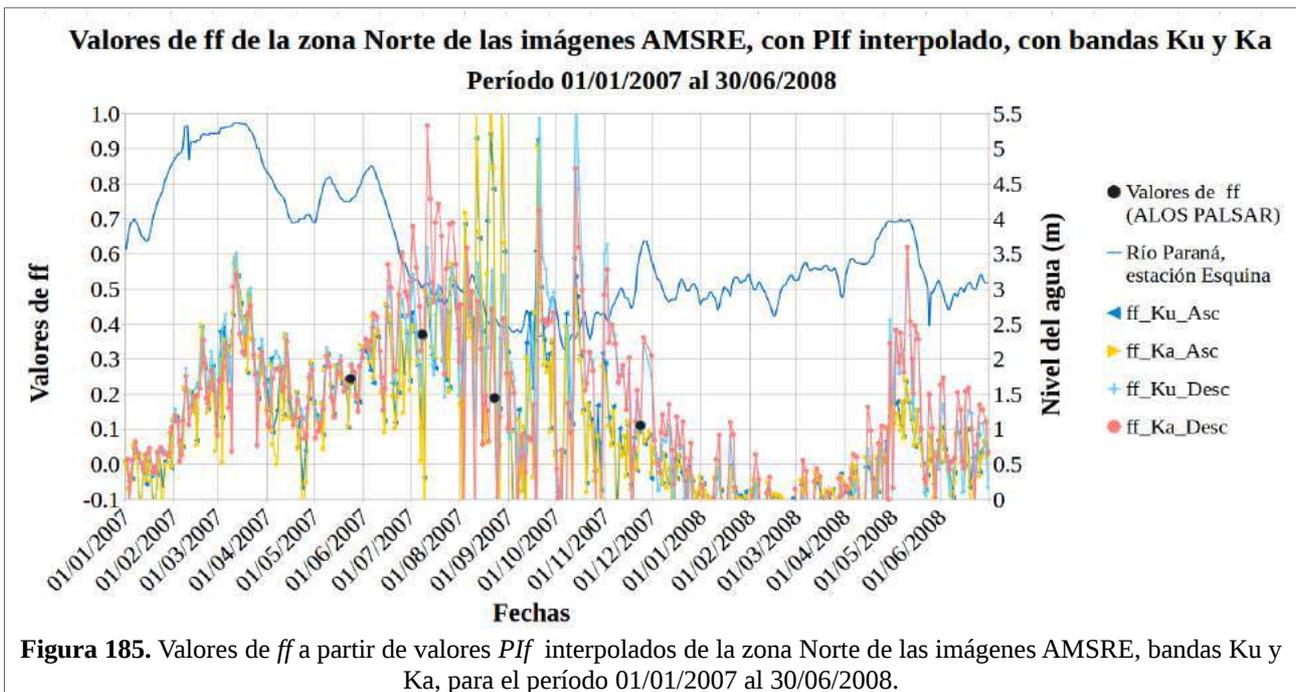
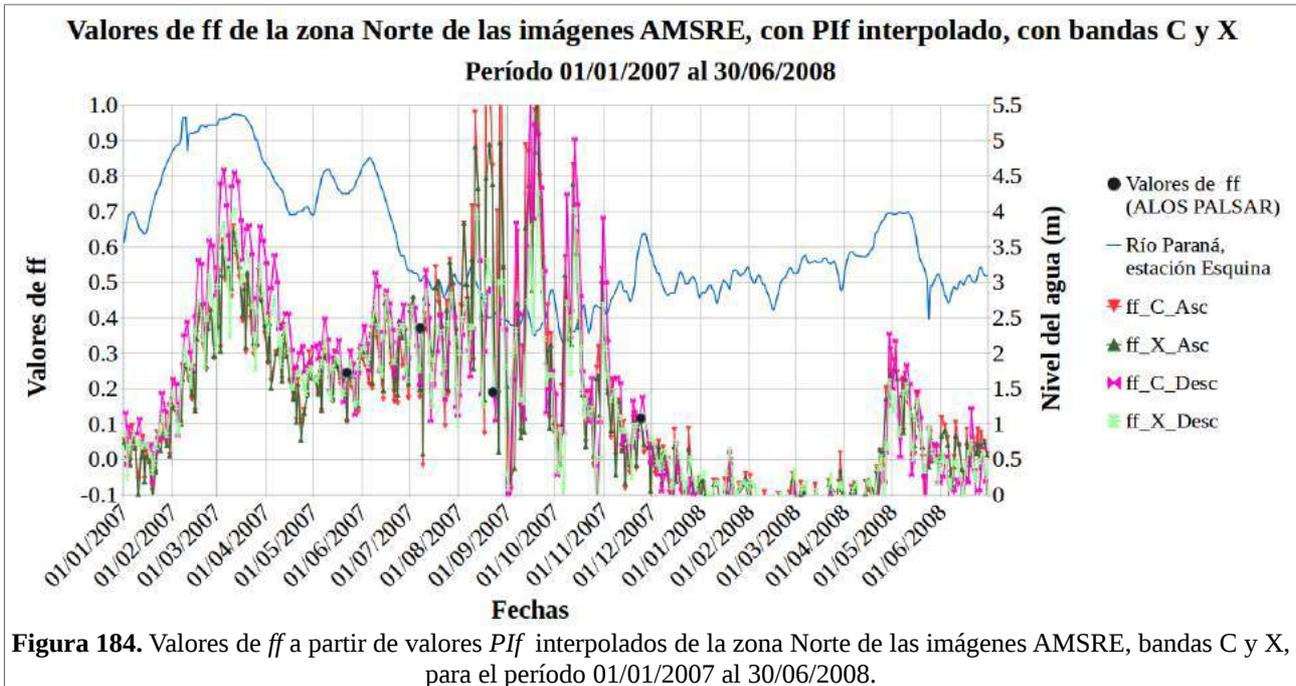
En la figura 183, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de PIf correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de PIf obtenidos que se muestran en la tabla 26.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.1.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Norte, calculada con valores de *Pif* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

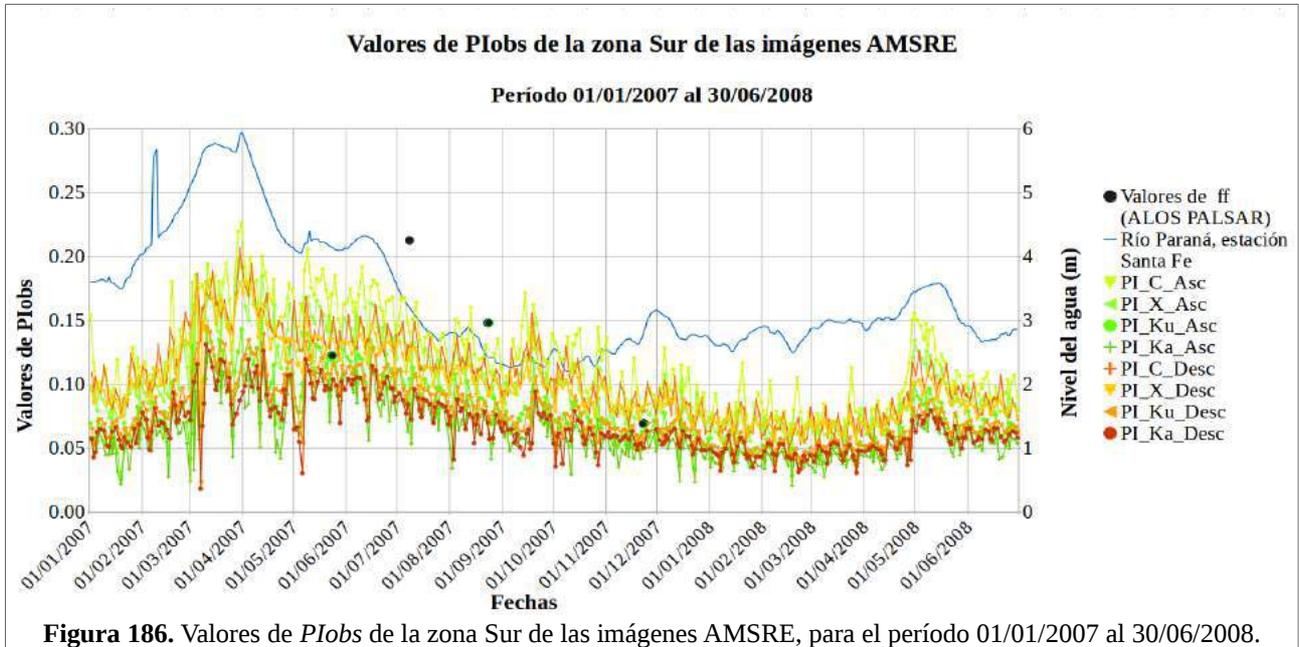
En las figuras 184 y 185, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *Pif* interpolados (ver figura 183) para el cálculo.



B.2 Primera época de análisis de la zona Sur.

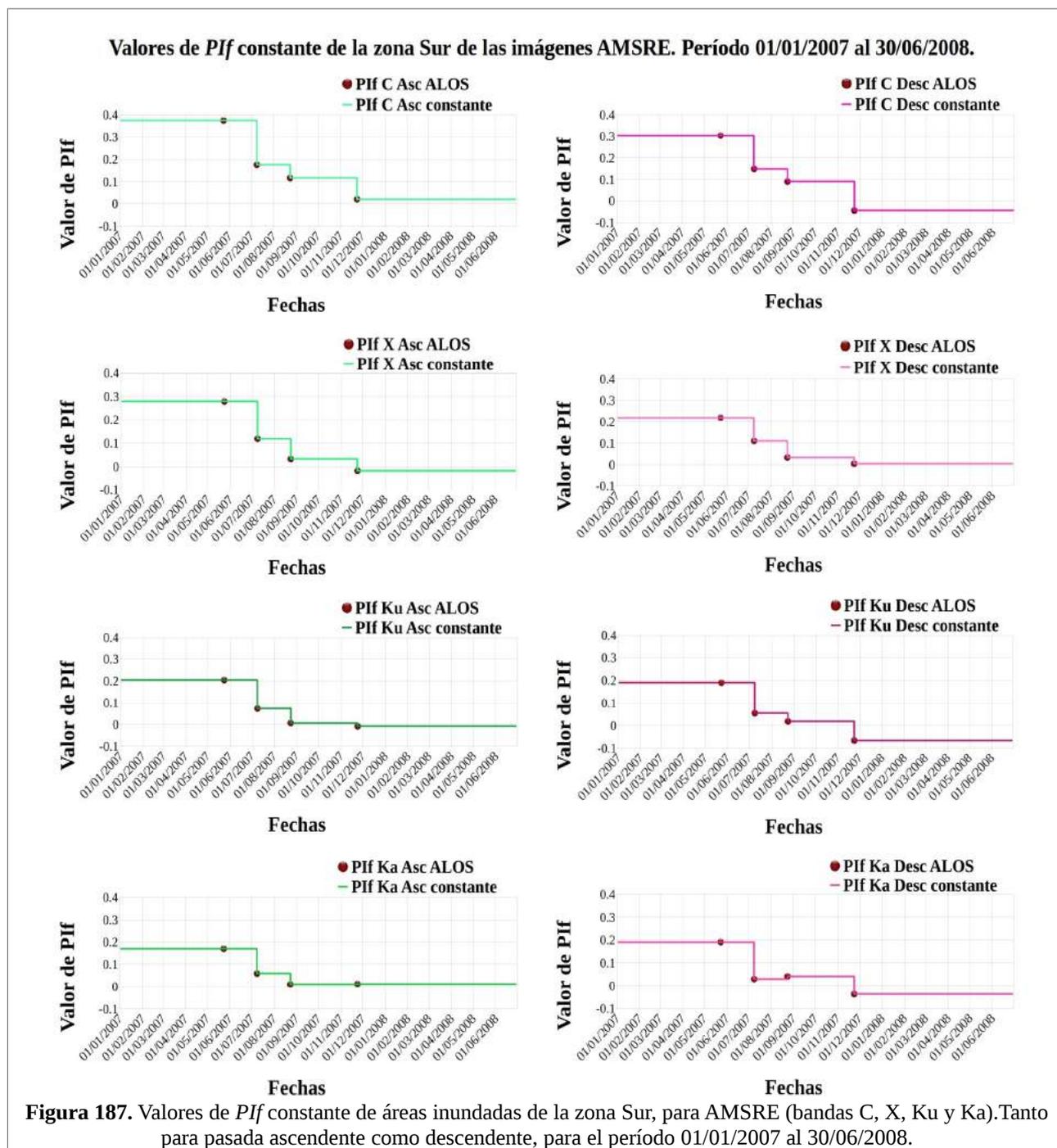
B.2.1 Valores de PI_{obs} de la zona Sur.

La figura 186 muestra los datos de AMSRE de PI_{obs} .



B.2.2 Valores de PI_f en el esquema de valor constante de la zona Sur.

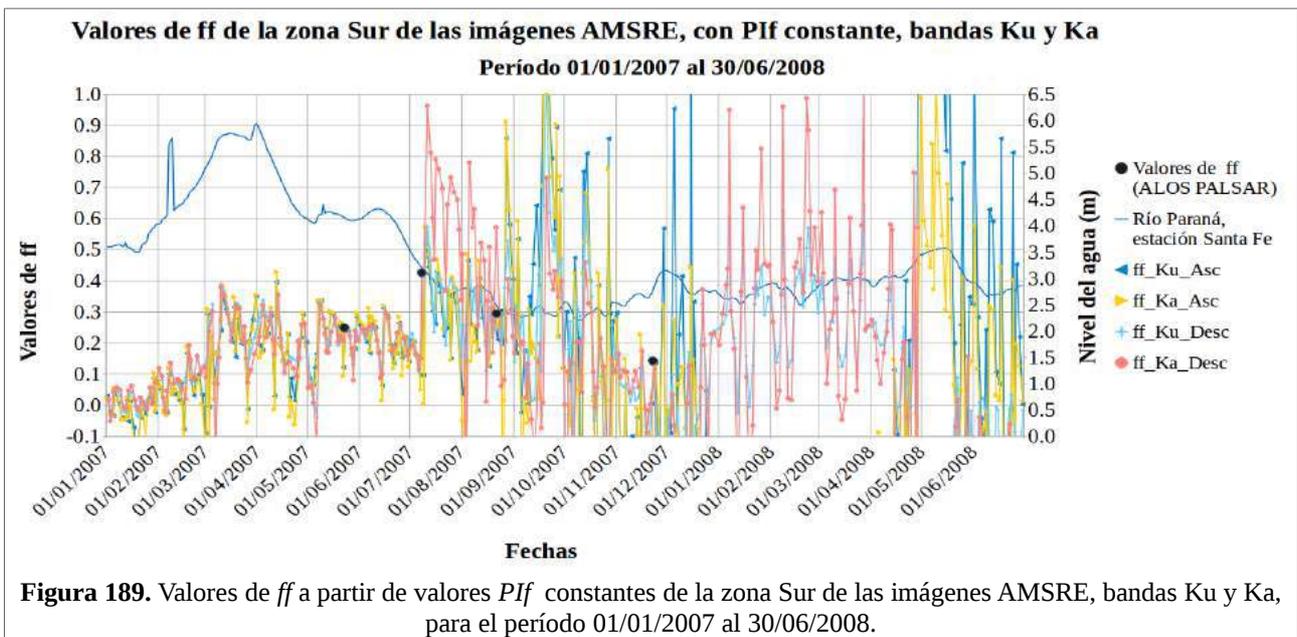
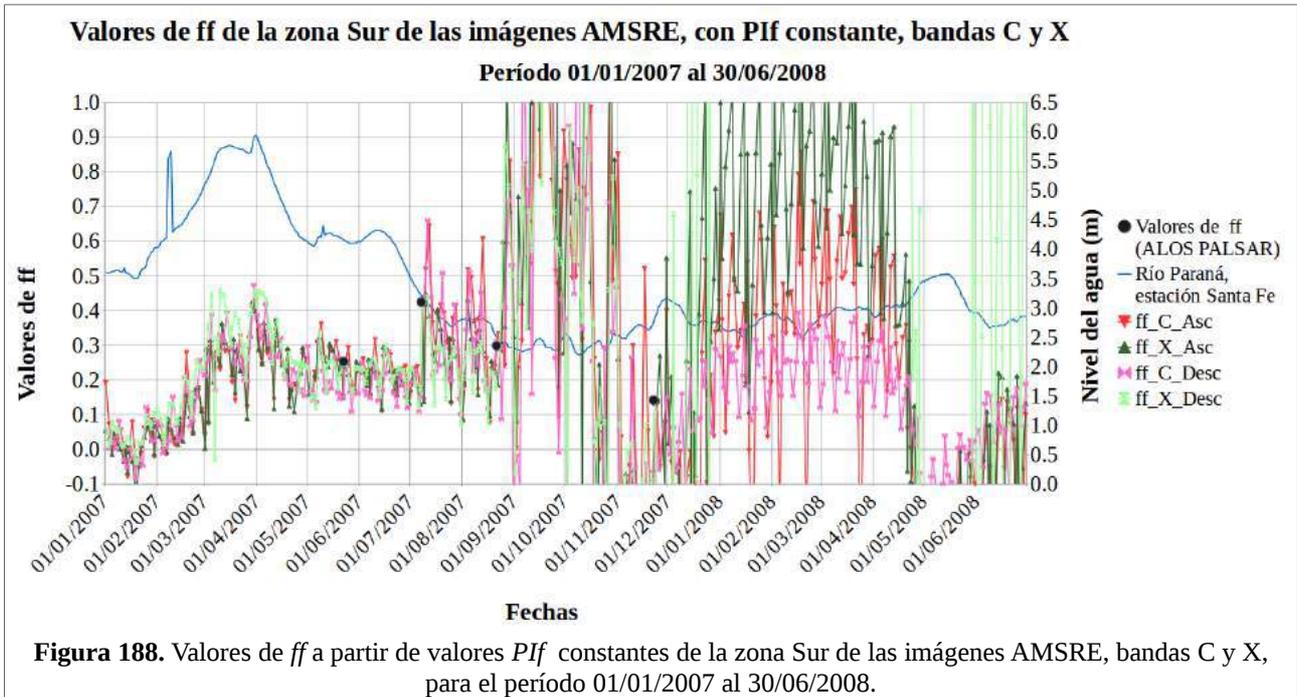
En la figura 187, se observan los valores de PI_f calculados para las fechas de adquisición de imágenes ALOS PALSAR y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de PI_f obtenidos que se muestran en la tabla 29.



B.2.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Sur, calculada con el esquema PIf constante.

En las figuras 188 y 189, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y $PIInf$ presentados en las tablas 21 y 28 respectivamente y los valores de PIf obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 187) para el cálculo.

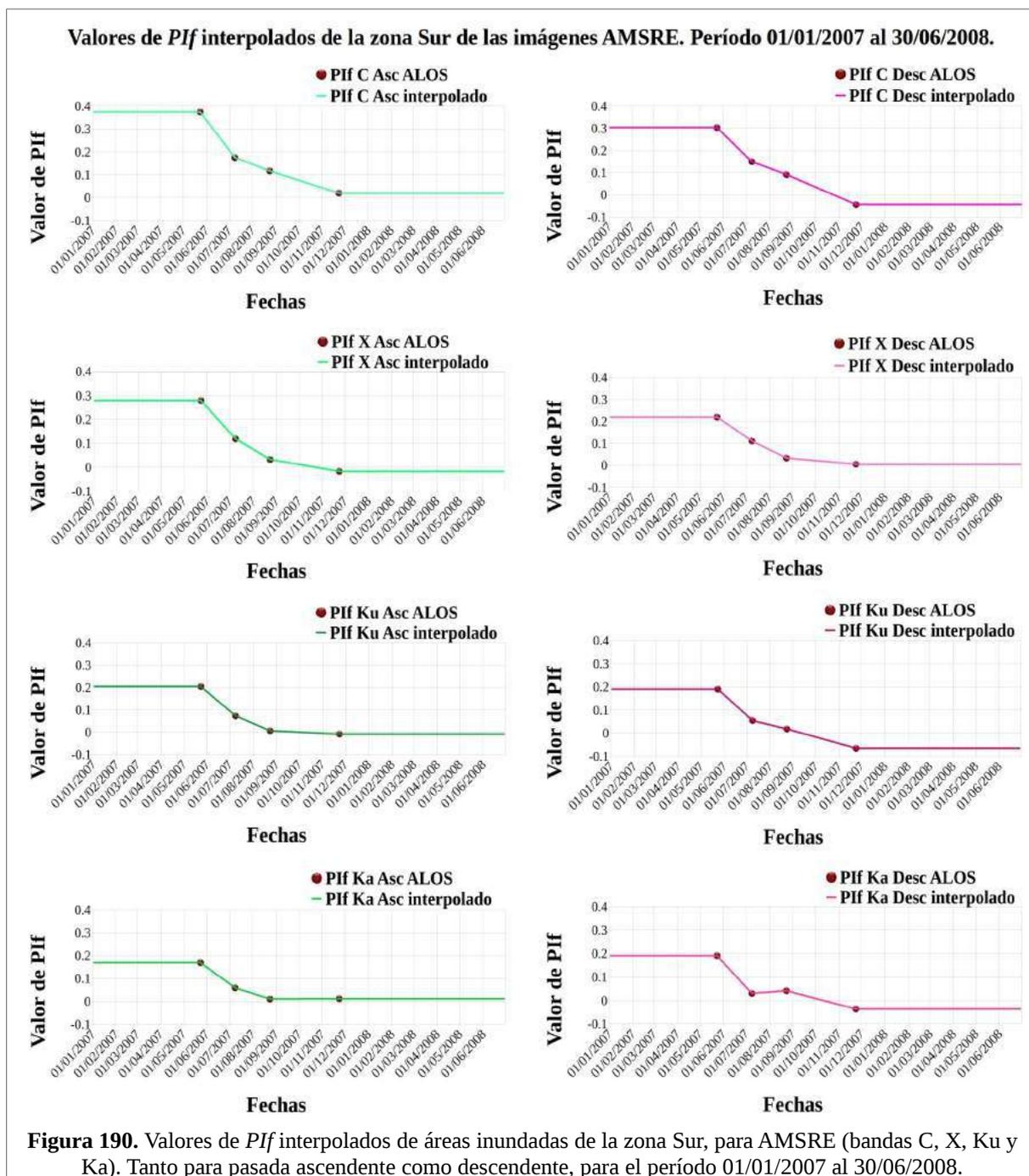
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.2.4 Valores de Pif en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Sur.

En la figura 190, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de Pif correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de Pif obtenidos que se muestran en la tabla 29.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.2.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Sur, calculada con valores de *Pif* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 191 y 192, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *Pif* interpolados (ver figura 190) para el cálculo.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.

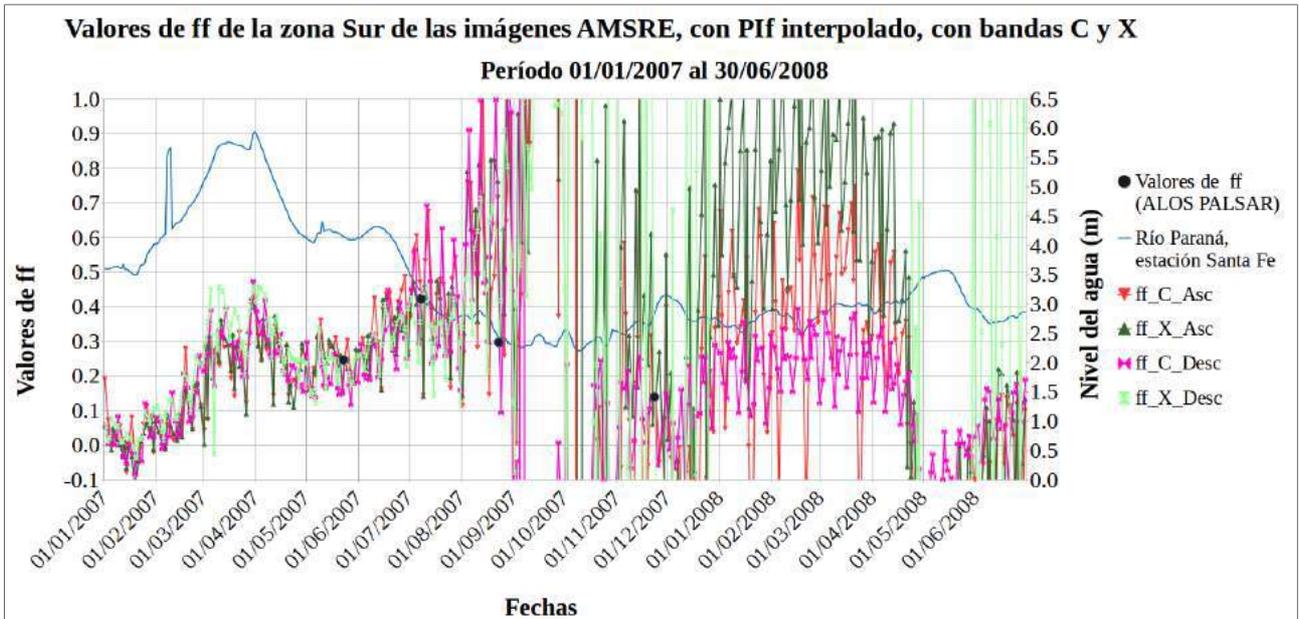


Figura 191. Valores de *ff* a partir de valores *PIf* interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas C y X, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.

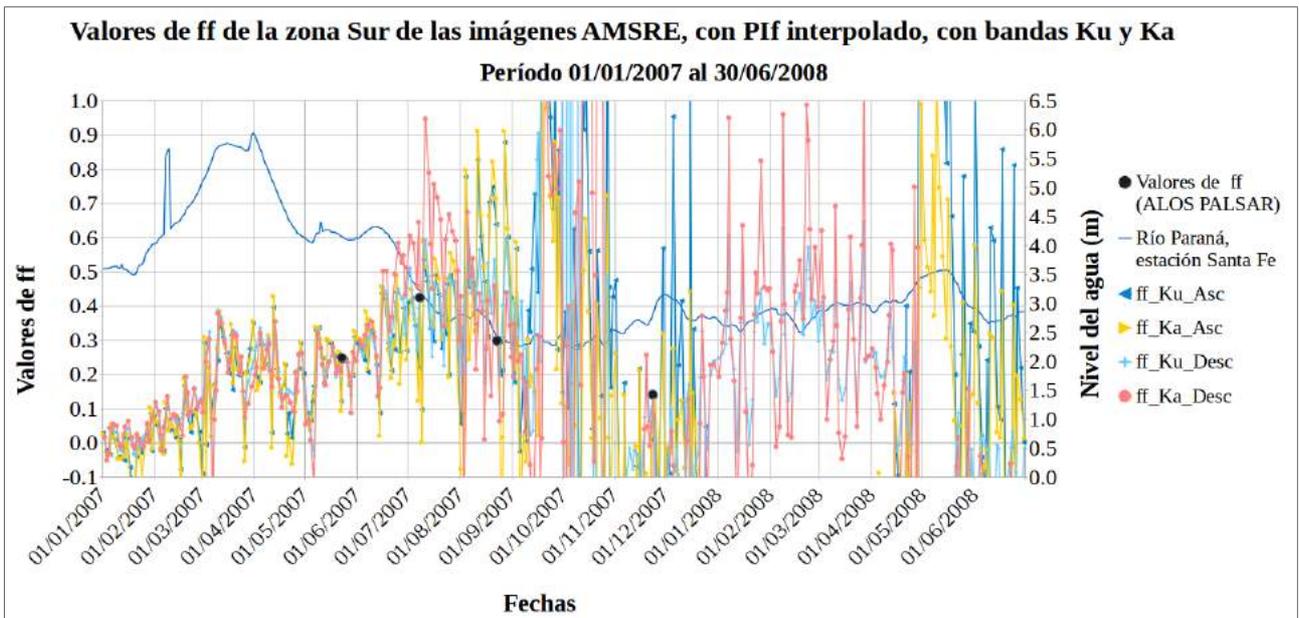
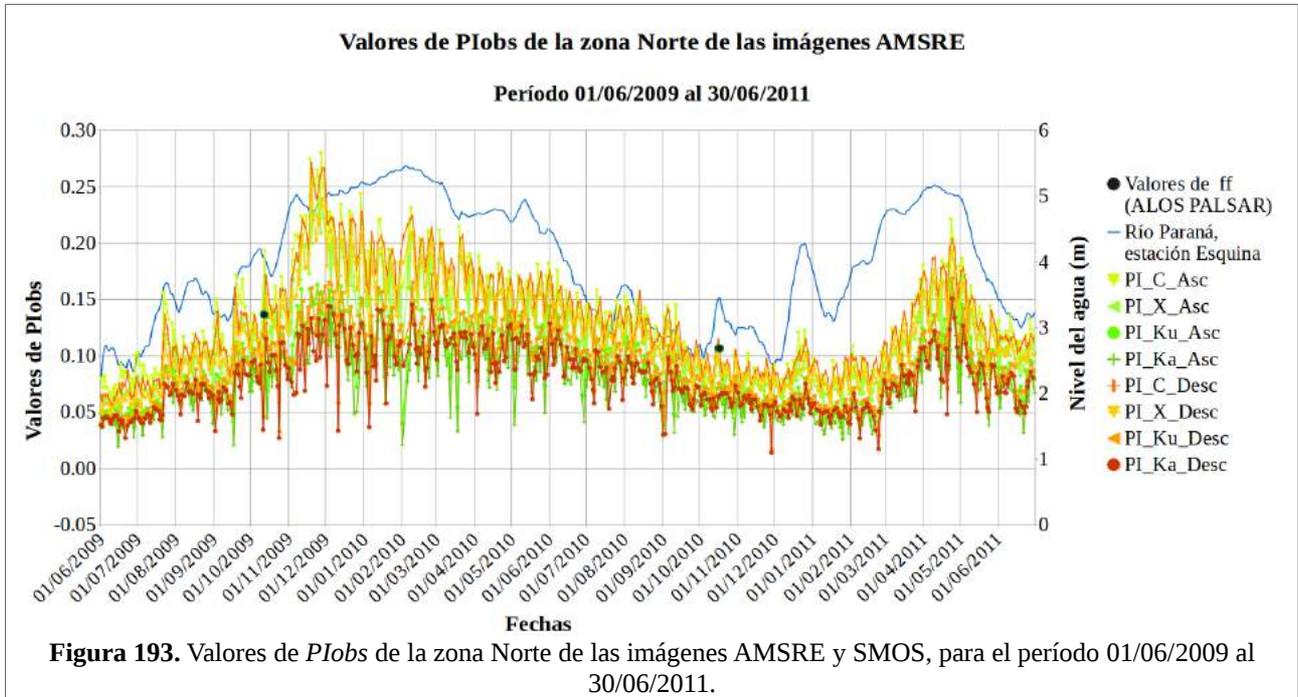


Figura 192. Valores de *ff* a partir de valores *PIf* interpolados de la zona Sur de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka, para el período 01/01/2007 al 30/06/2008.

B.3 Segunda época de análisis de la zona Norte.

B.3.1 Valores de PI_{obs} de la zona Norte.

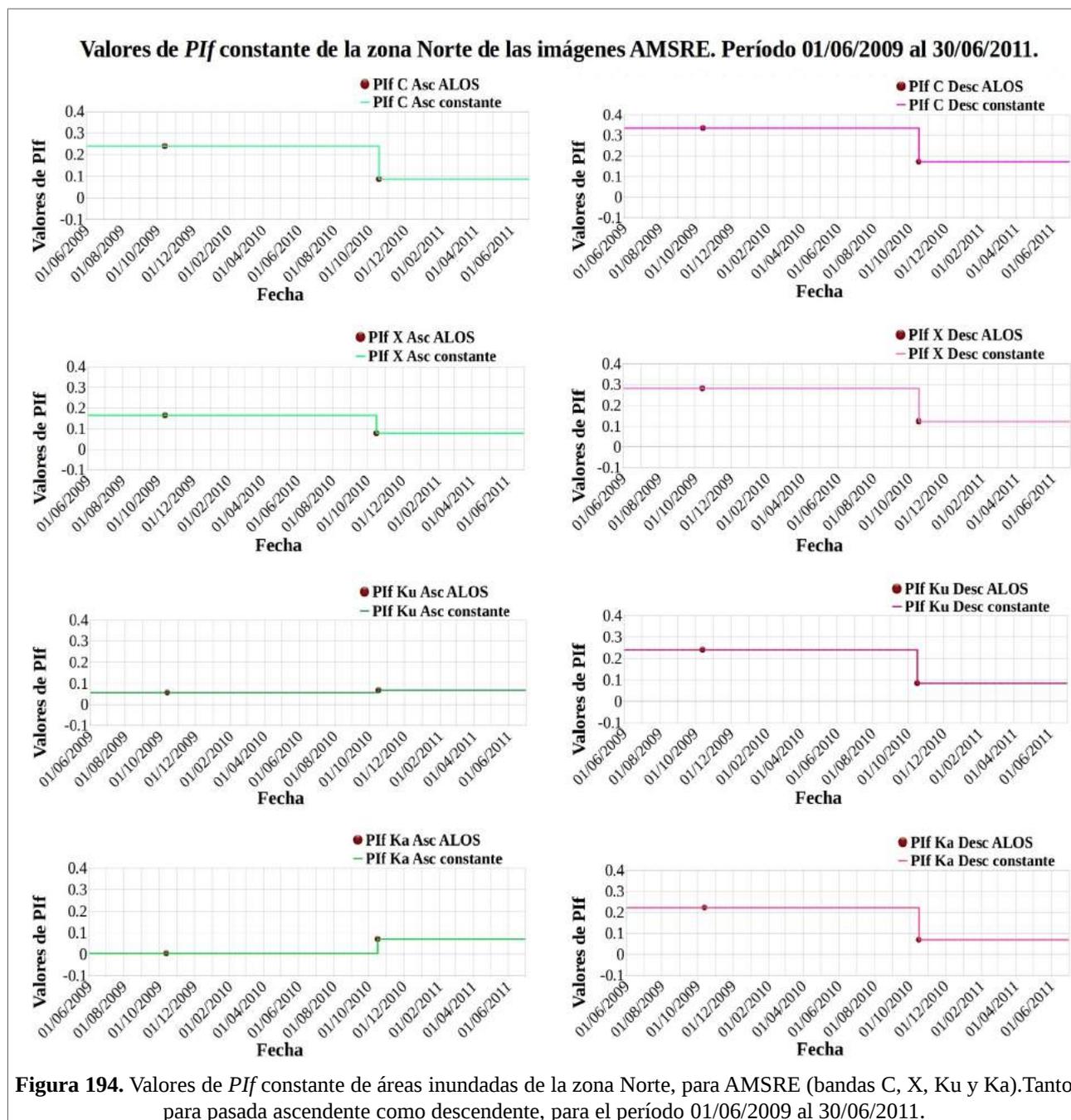
En la figura 193, se observa los valores del PI_{obs} .



B.3.2 Valores de PI_f según el esquema de valor constante de la zona Norte.

En la figura 194, se observan los valores de PI_f calculados para las fechas de adquisición de imágenes ALOS PALSAR y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de PI_f obtenidos que se muestran en la tabla 26.

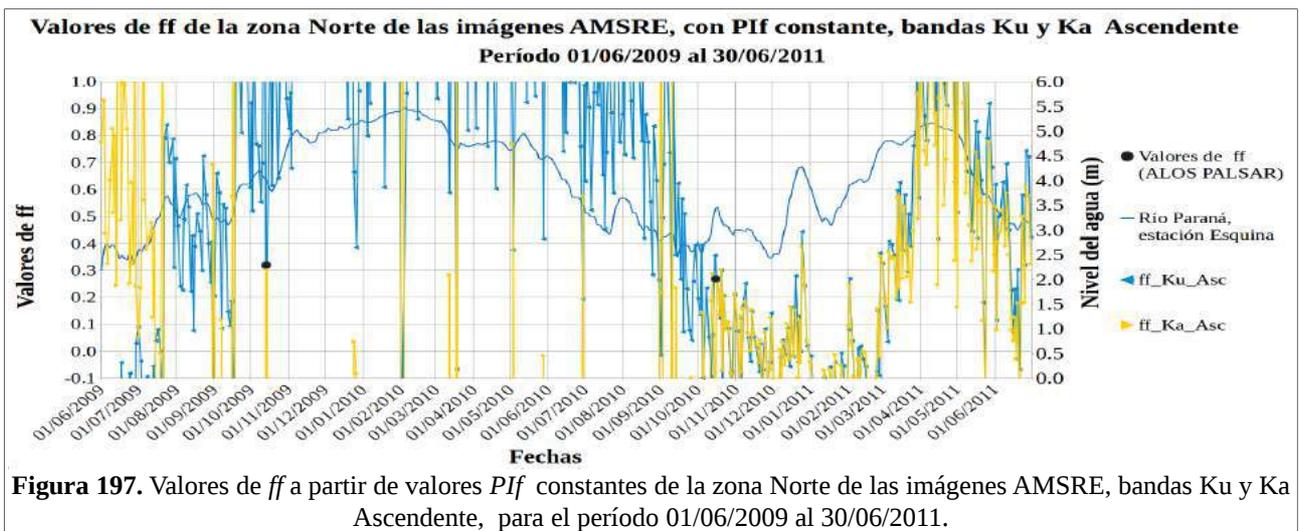
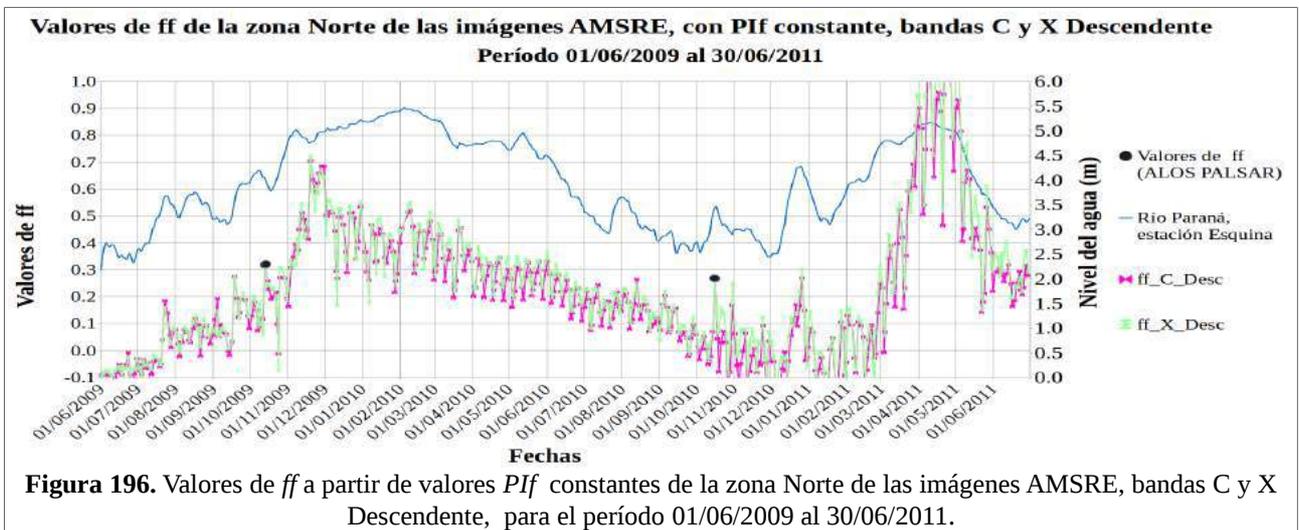
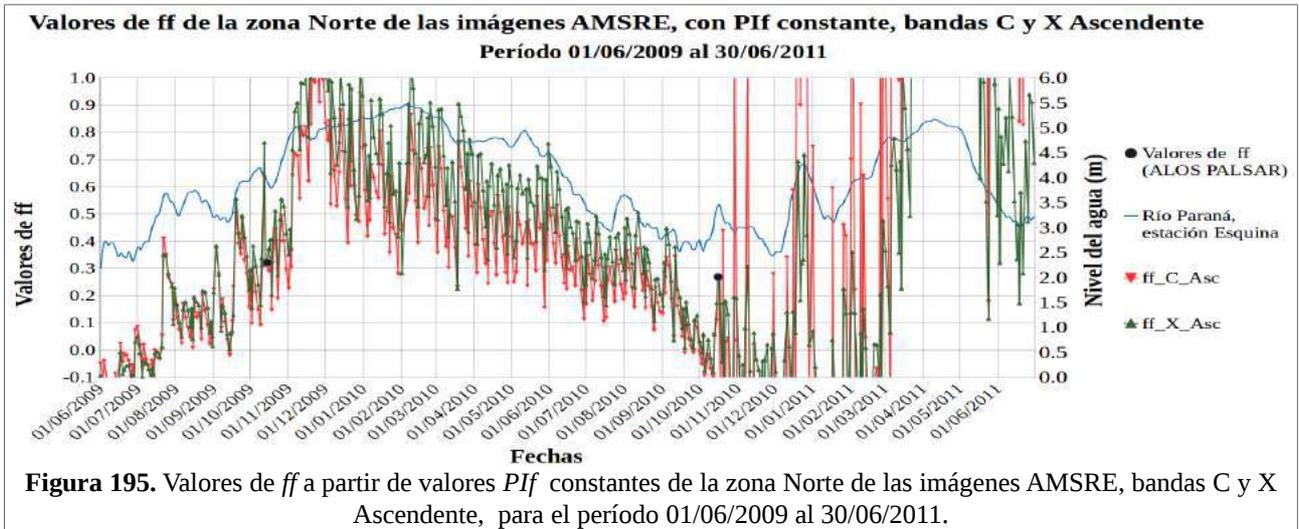
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.3.3 Valores de ff de áreas inundadas de la zona Norte, calculada con el esquema de PIf constante.

En las figuras 195, 196, 197 y 198, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de PIw y PI_{nf} presentados en las tablas 21 y 25 respectivamente y los valores de PIf obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 194) para el cálculo.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.

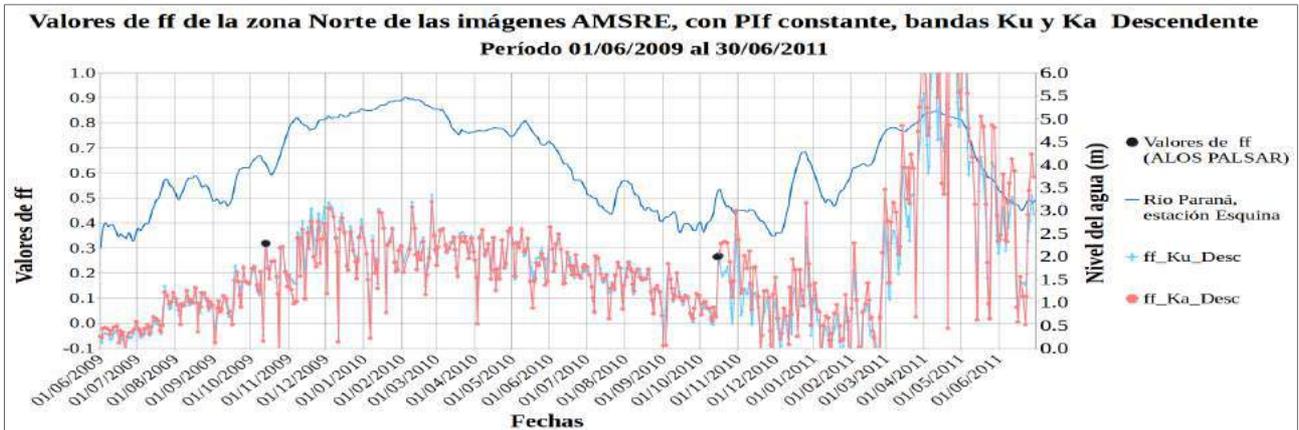


Figura 198. Valores de ff a partir de valores Pif constantes de la zona Norte de las imágenes AMSRE, bandas Ku y Ka Descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.

B.3.4 Valores de Pif en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Norte.

En la figura 199, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de Pif correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de las imágenes AMSRE. Estos datos fueron calculados usando los valores de Pif obtenidos que se muestran en la tabla 26.

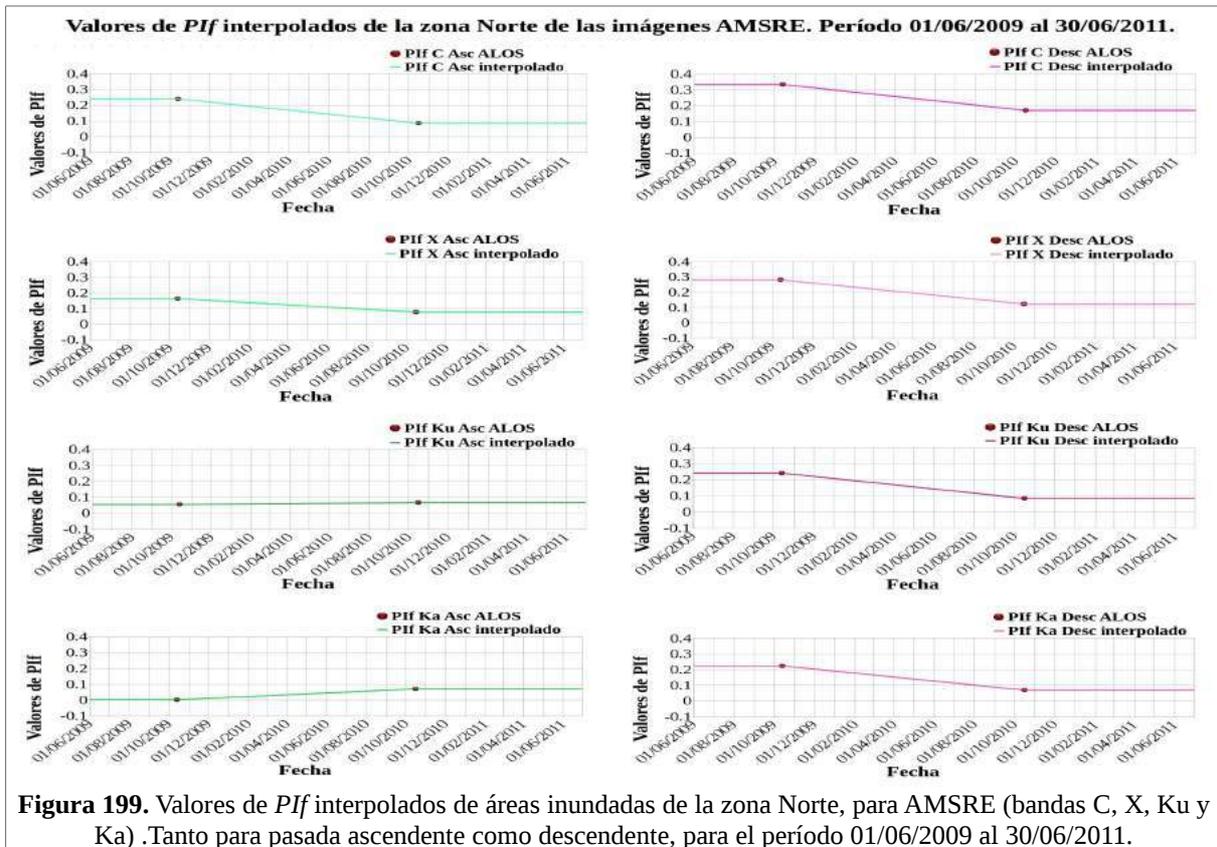
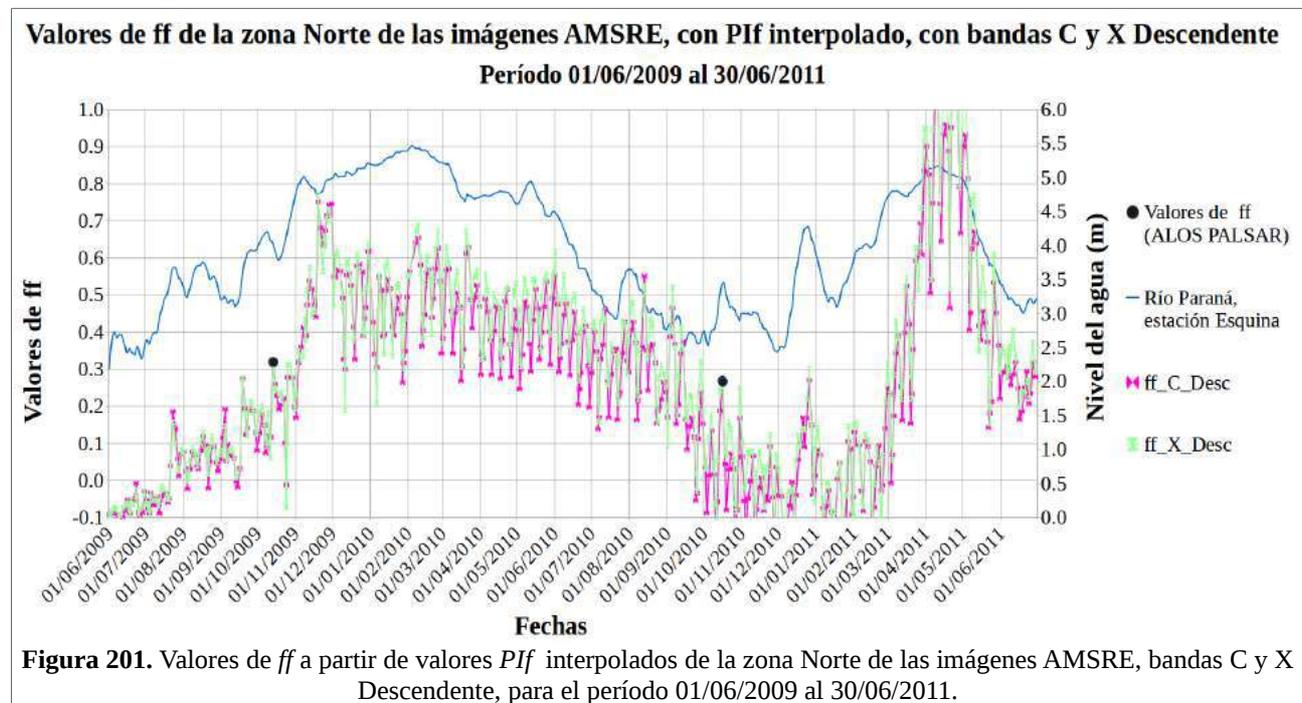
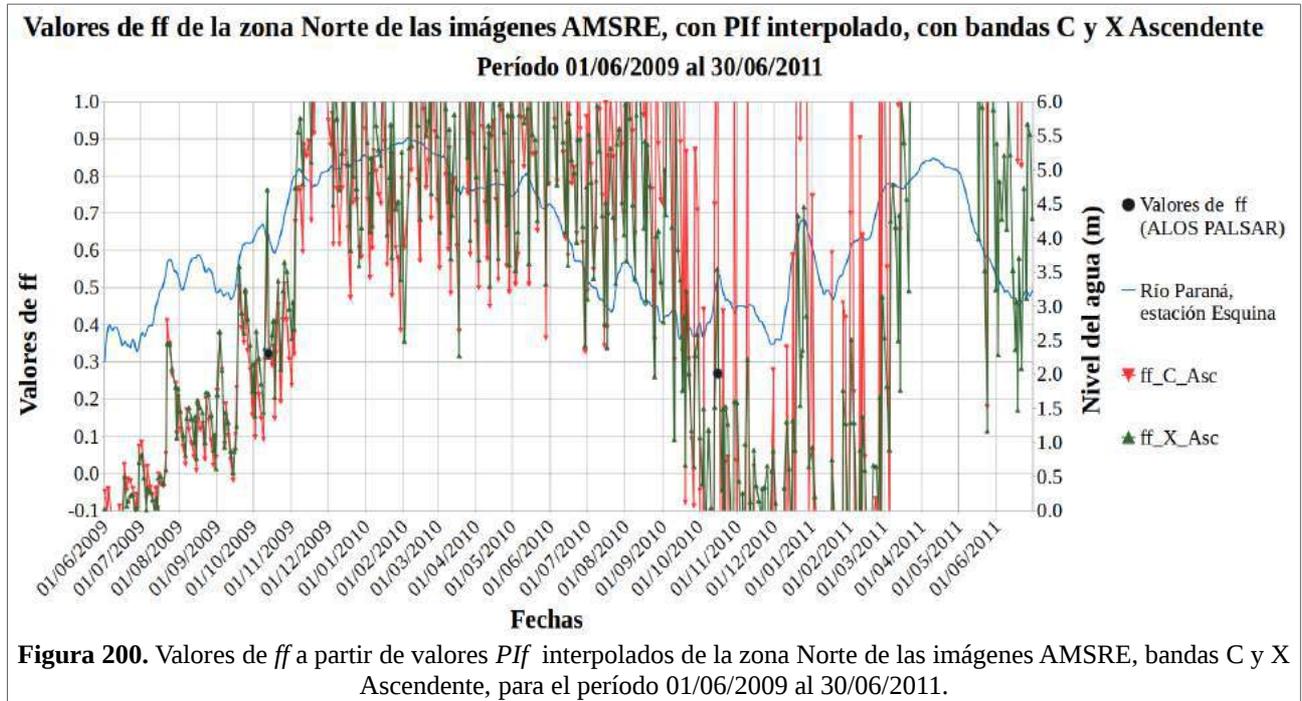


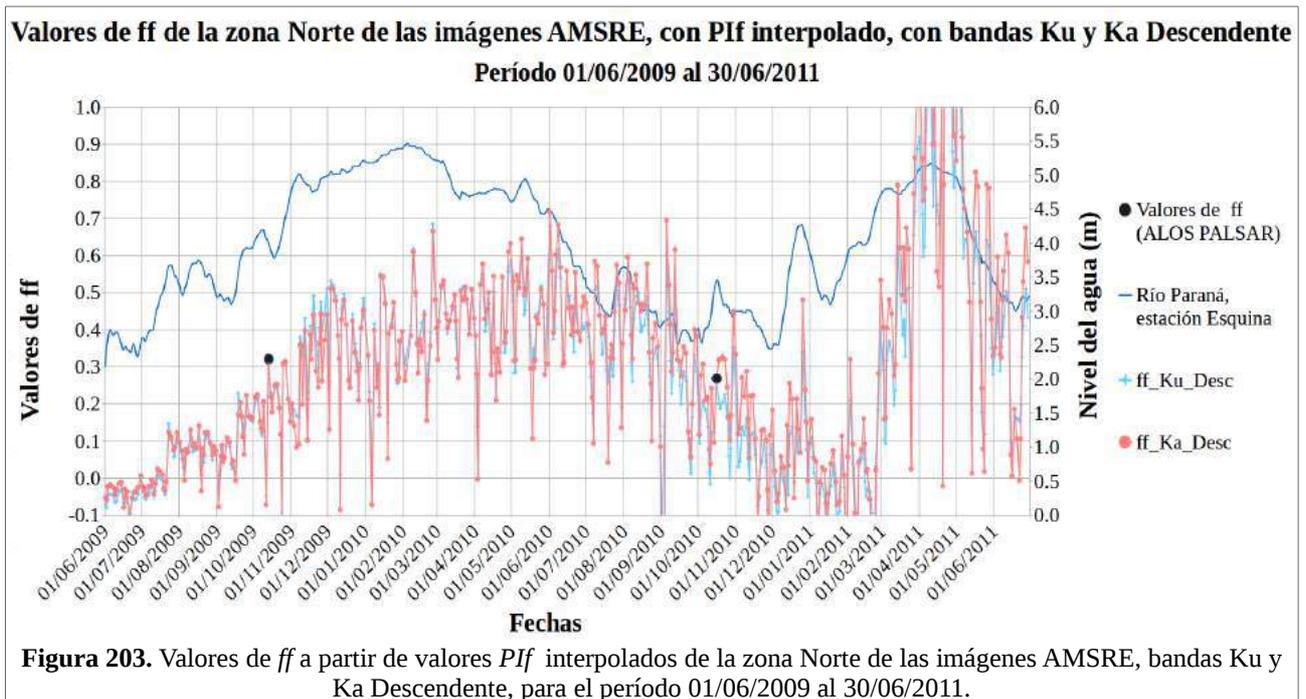
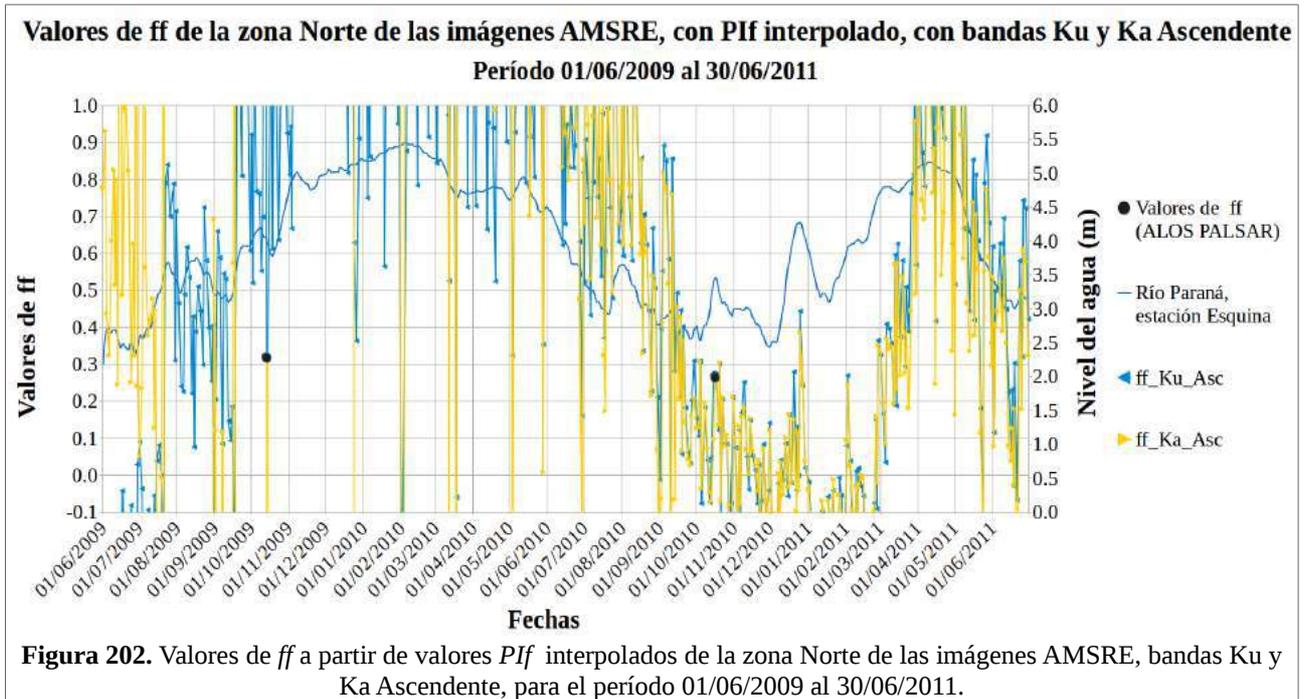
Figura 199. Valores de Pif interpolados de áreas inundadas de la zona Norte, para AMSRE (bandas C, X, Ku y Ka). Tanto para pasada ascendente como descendente, para el período 01/06/2009 al 30/06/2011.

B.3.5 Valores de fracción de áreas inundadas (*ff*) de la zona Norte, calculada con valores de *PIf* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 200, 201, 202 y 203, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *PIf* interpolados (ver figura 199) para el cálculo.



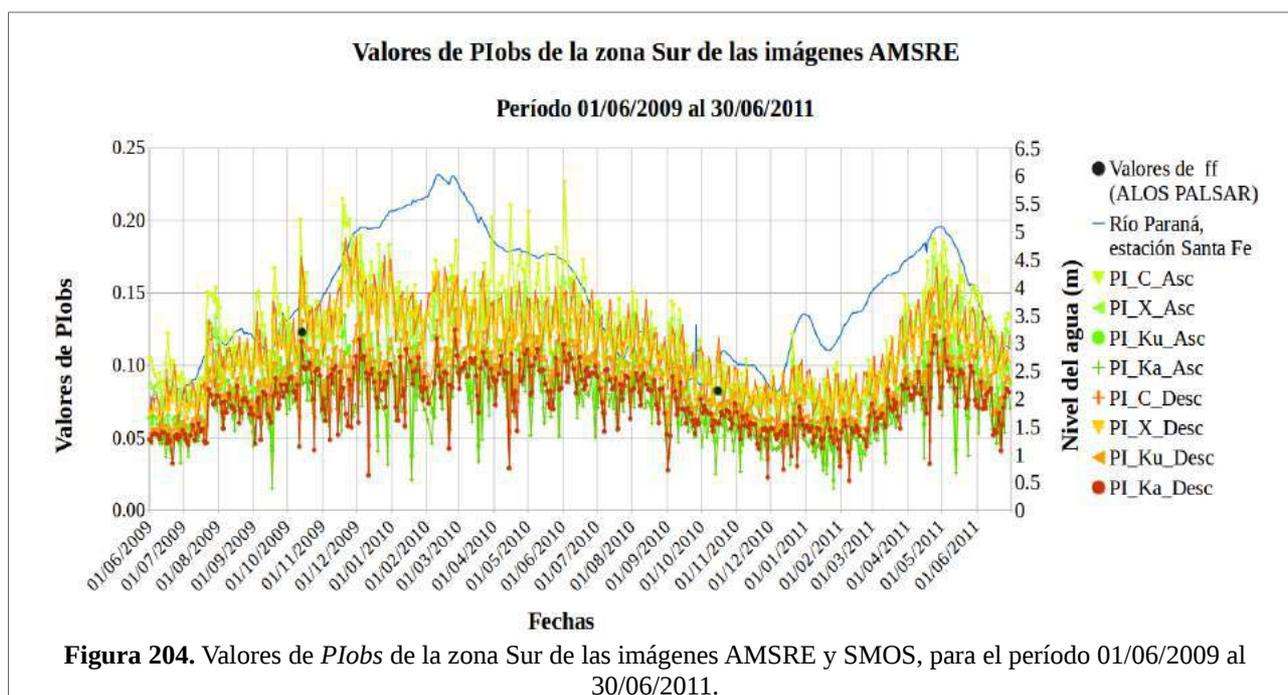
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.4 Segunda época de análisis de la zona Sur.

B.4.1 Valores de $PIobs$ de la zona Sur.

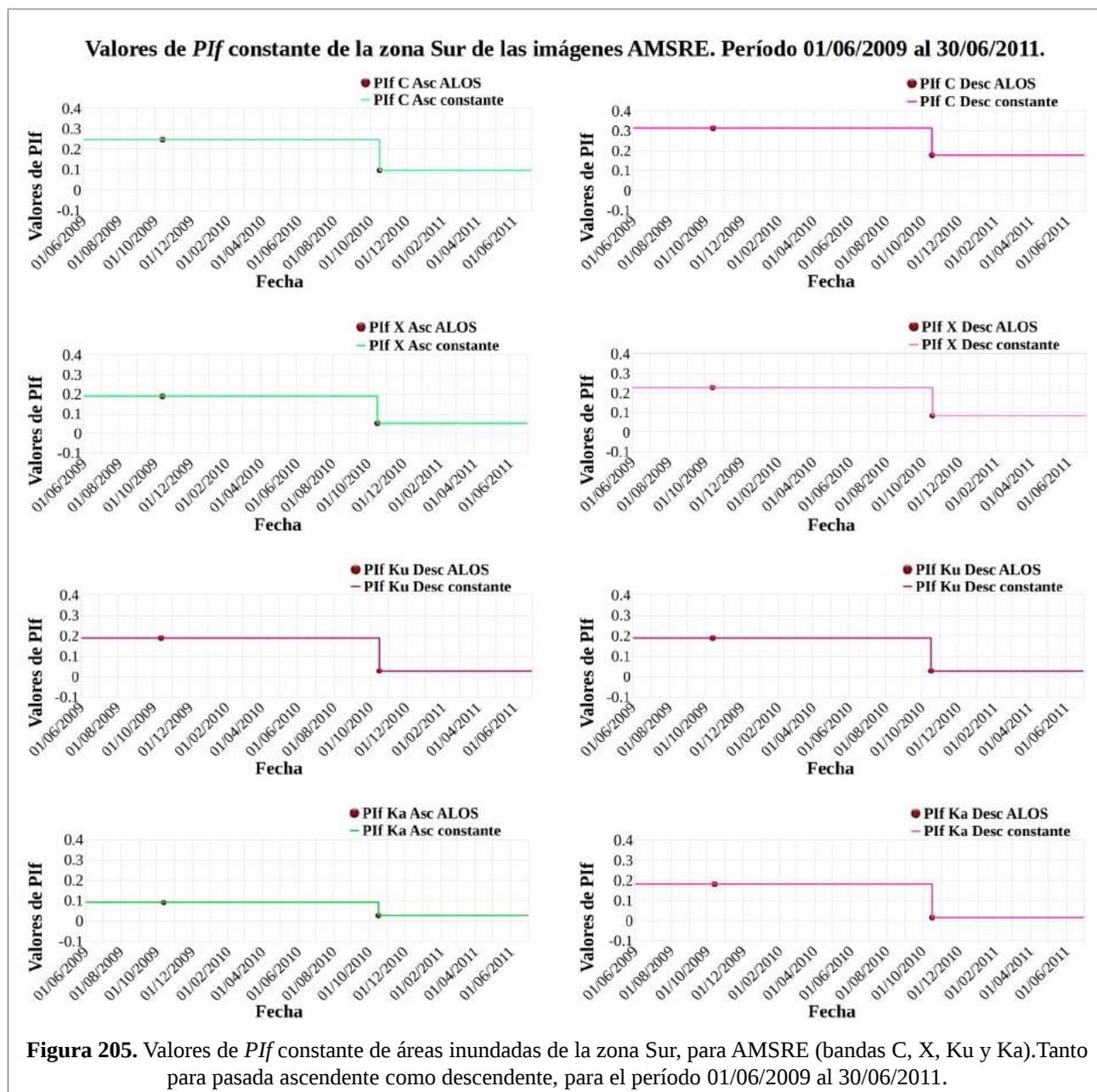
En la figura 204, se observa los valores del $PIobs$.



B.4.2 Valores de *PIf* constantes de áreas inundadas de la zona Norte correspondiente a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR.

En la figura 205, se observan los valores de *PIf* calculados para las fechas de adquisición de imágenes ALOS PALSAR y la interpolación de los mismos realizada en el esquema de valor constante para las bandas C, X, Ku y Ka de las imágenes AMSRE ascendente y descendente. Estos datos fueron calculados usando los valores de *PIf* obtenidos que se muestran en la tabla 29.

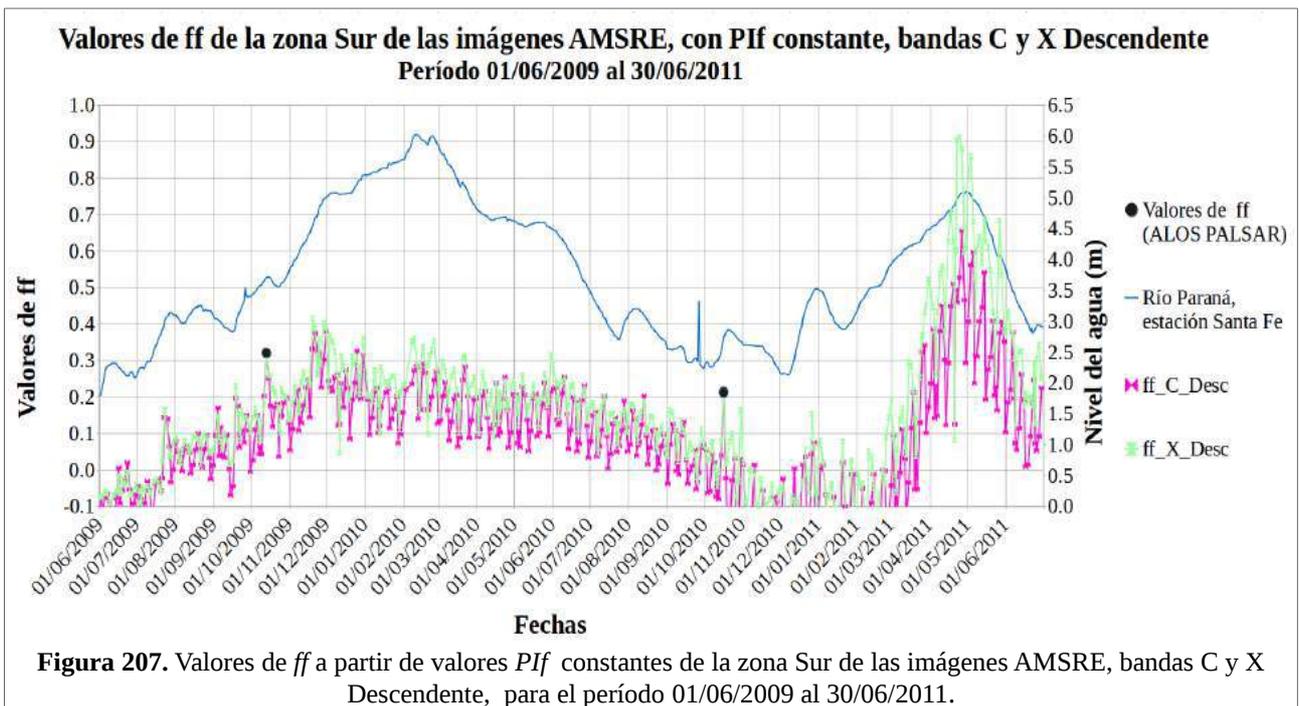
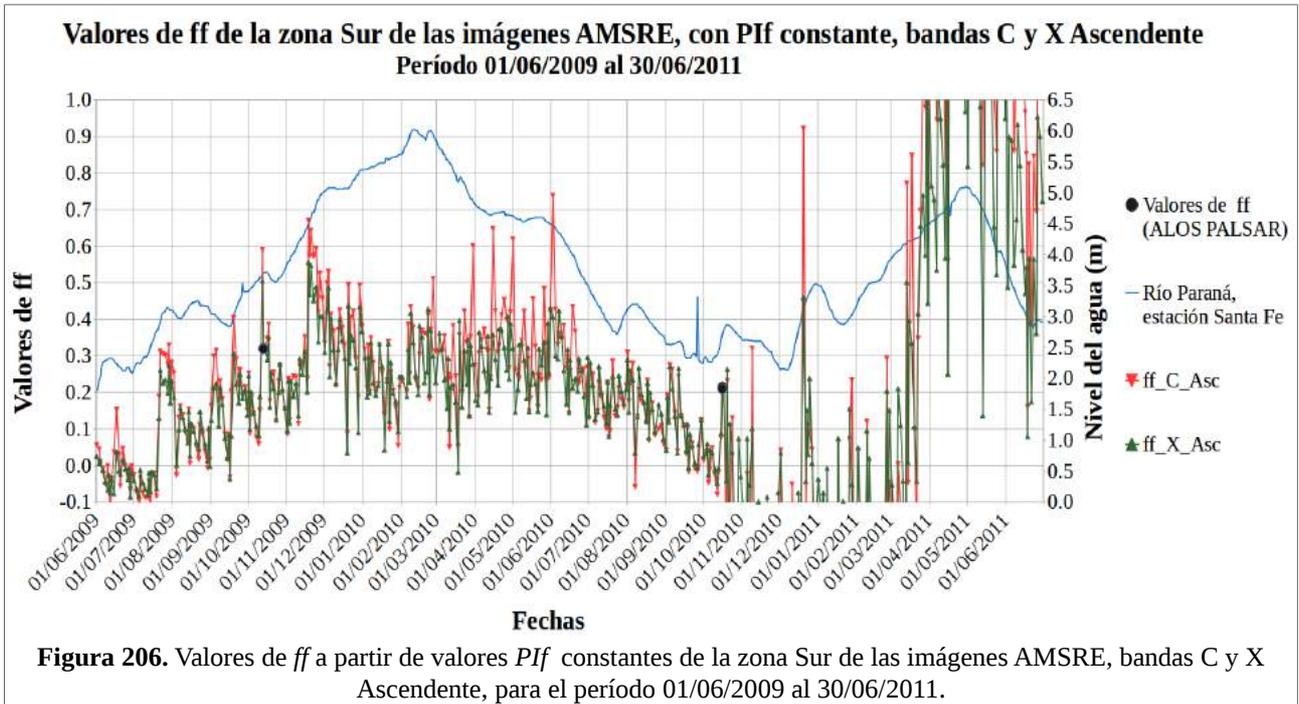
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



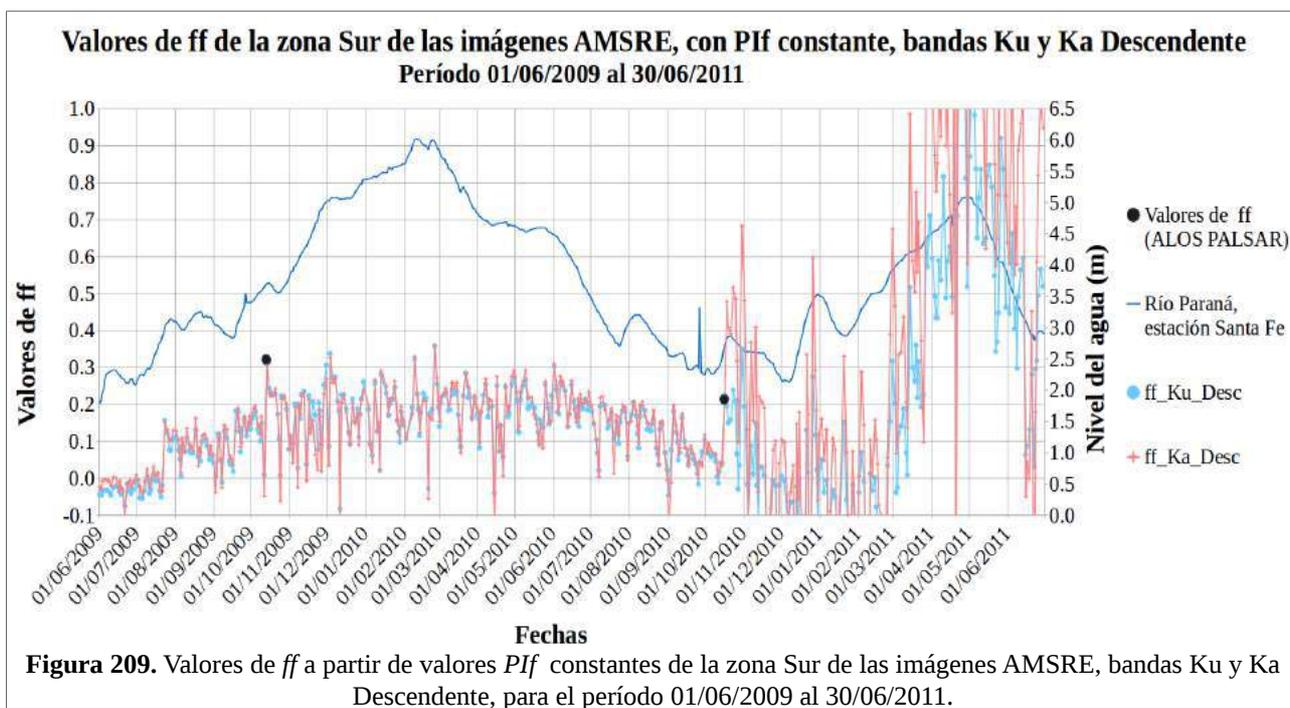
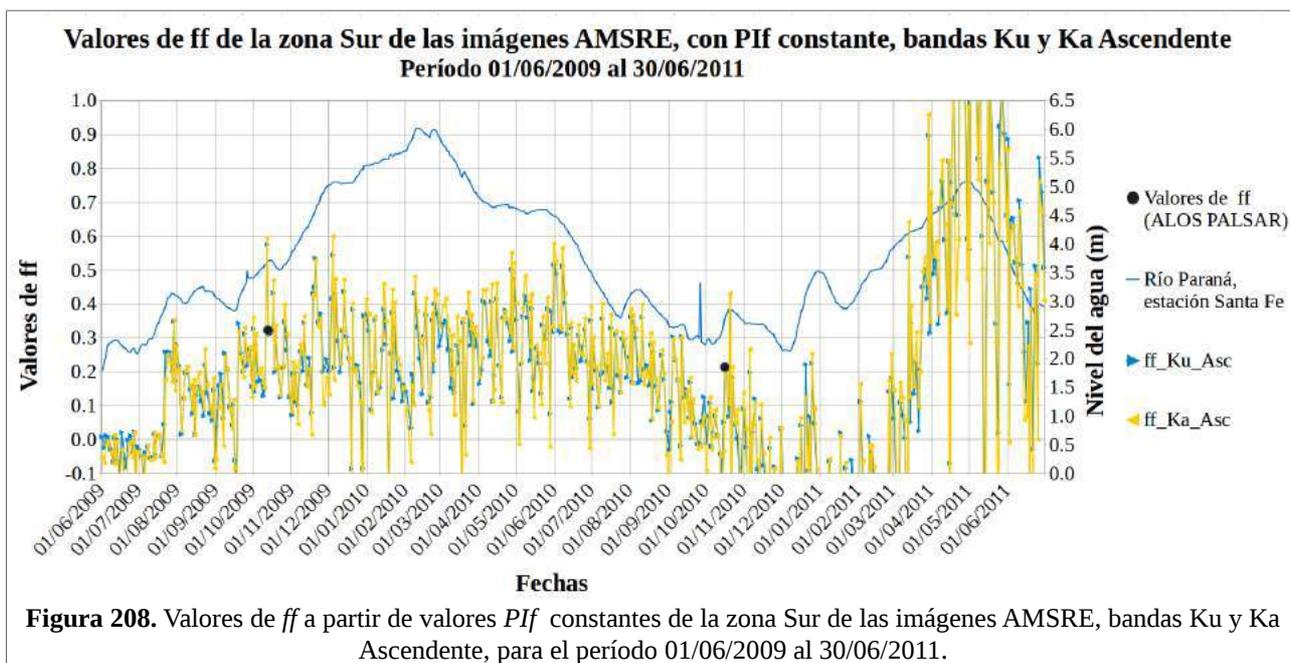
B.4.3 Valores de fracción de área inundada (ff) de la zona Sur, calculada con el esquema de P_{if} constante.

En las figuras 206, 207, 208 y 209, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de P_{Iw} y P_{Inf} presentados en las tablas 21 y 28 respectivamente y los valores de P_{if} obtenidos para cada fecha mediante el esquema constante (ver figura 205) para el cálculo.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



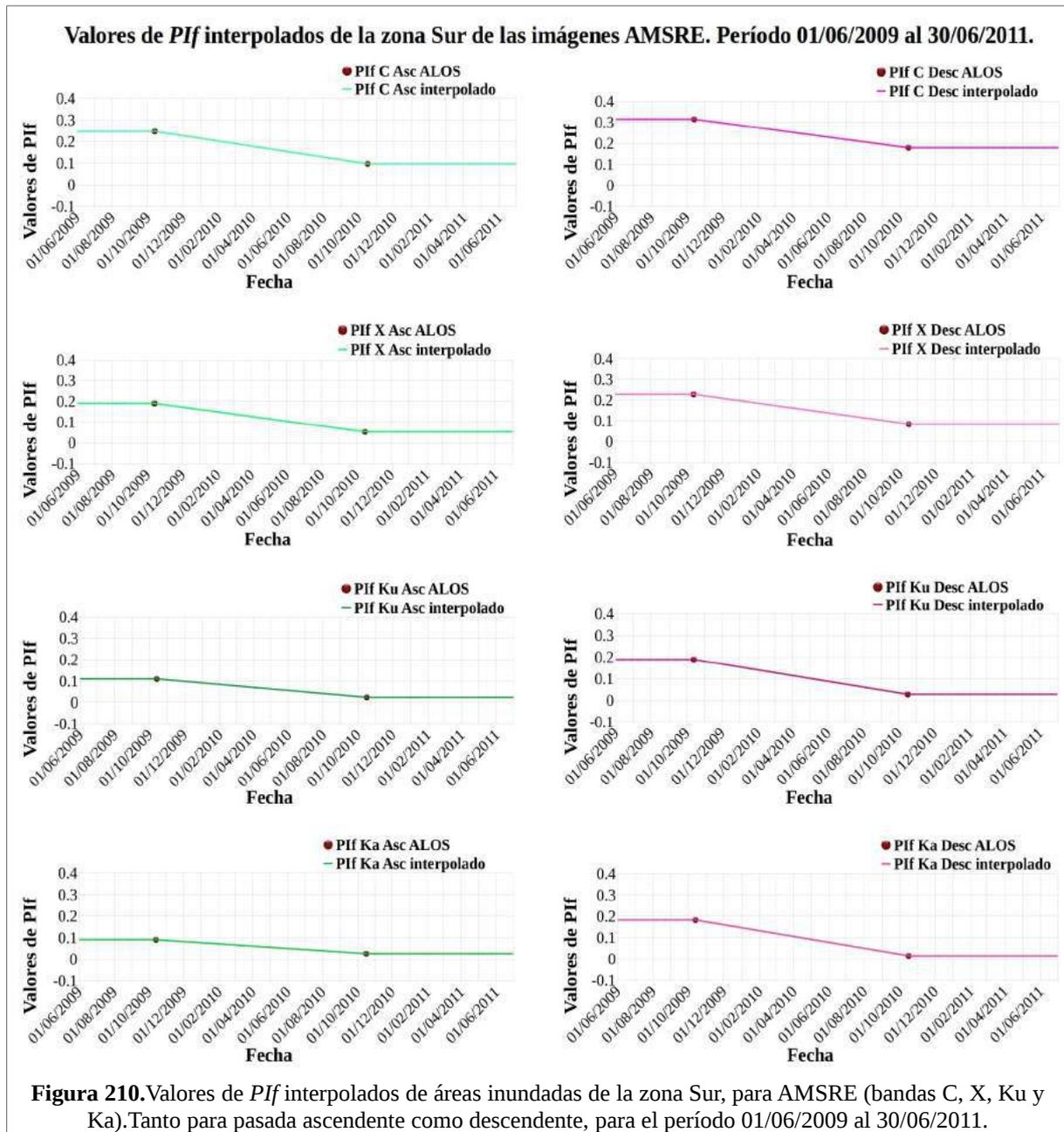
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



B.4.4 Valores de PIf en el esquema de valor interpolado linealmente de la zona Sur.

En la figura 210, se observa el resultado de la interpolación lineal de los valores de PIf correspondientes a las fechas de las imágenes ALOS PALSAR para las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de las imágenes AMSRE. Estos datos fueron calculados usando los valores de PIf obtenidos que se muestran en la tabla 29.

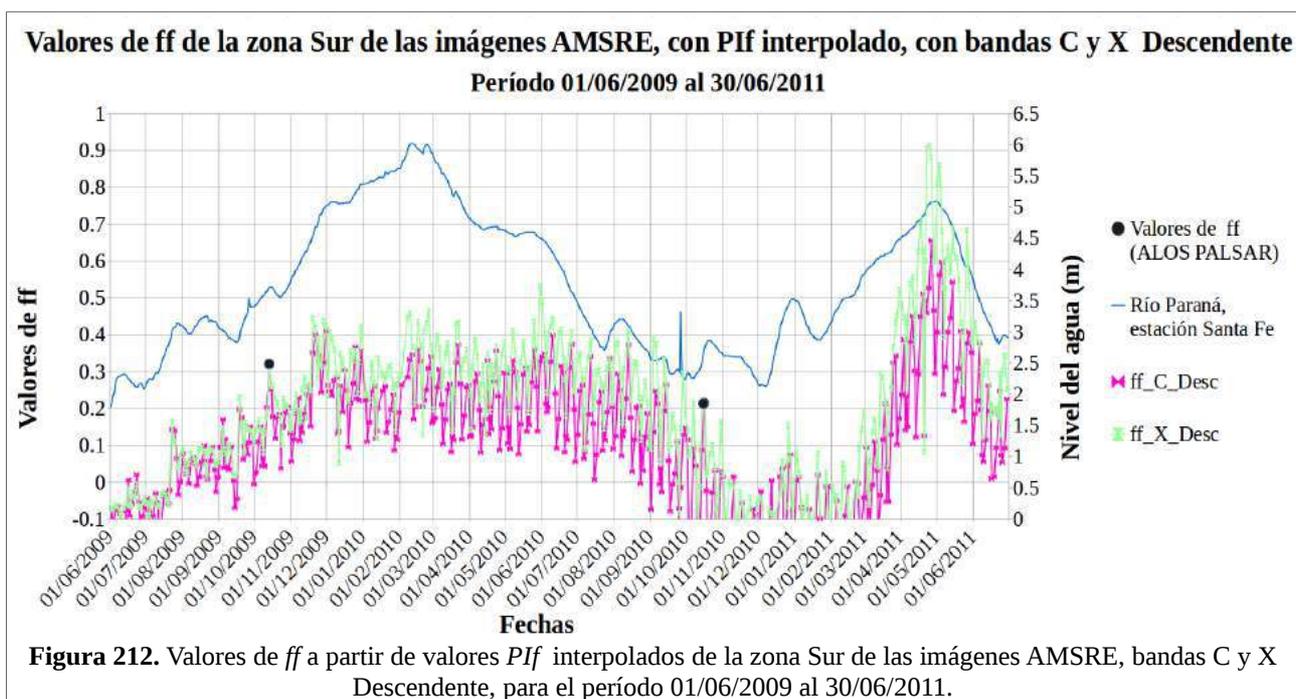
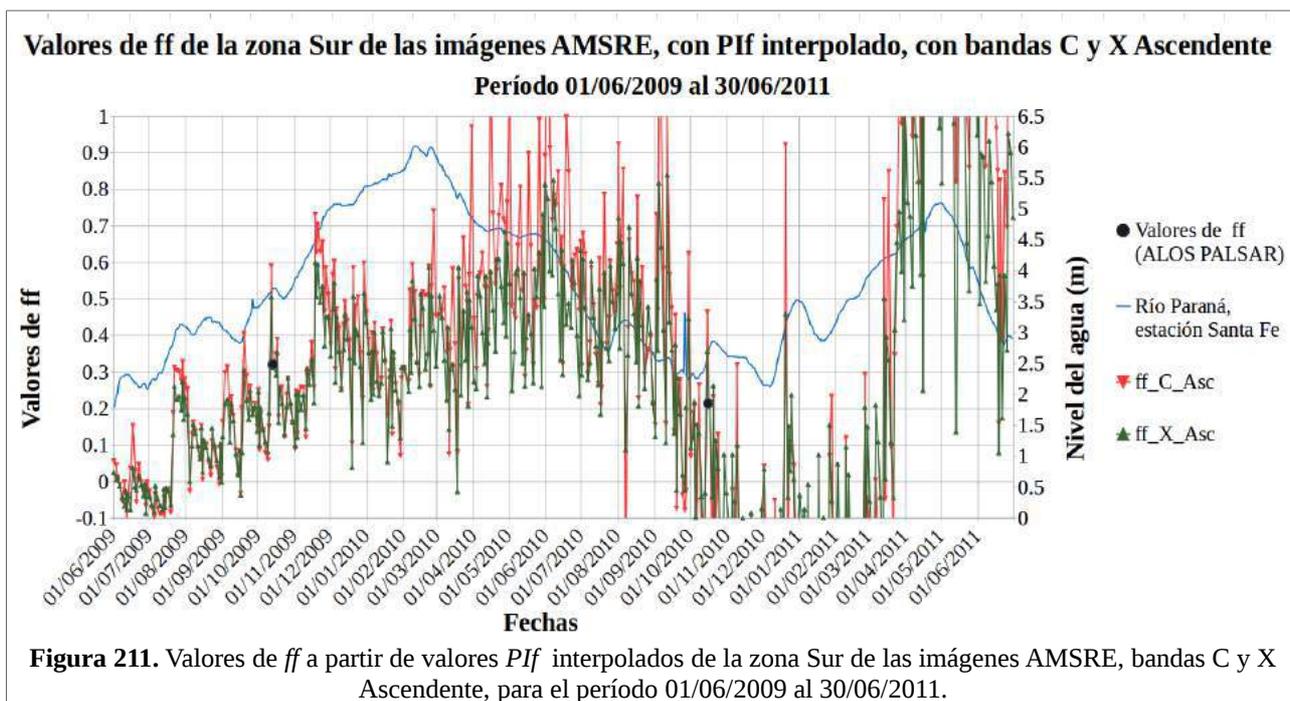
ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



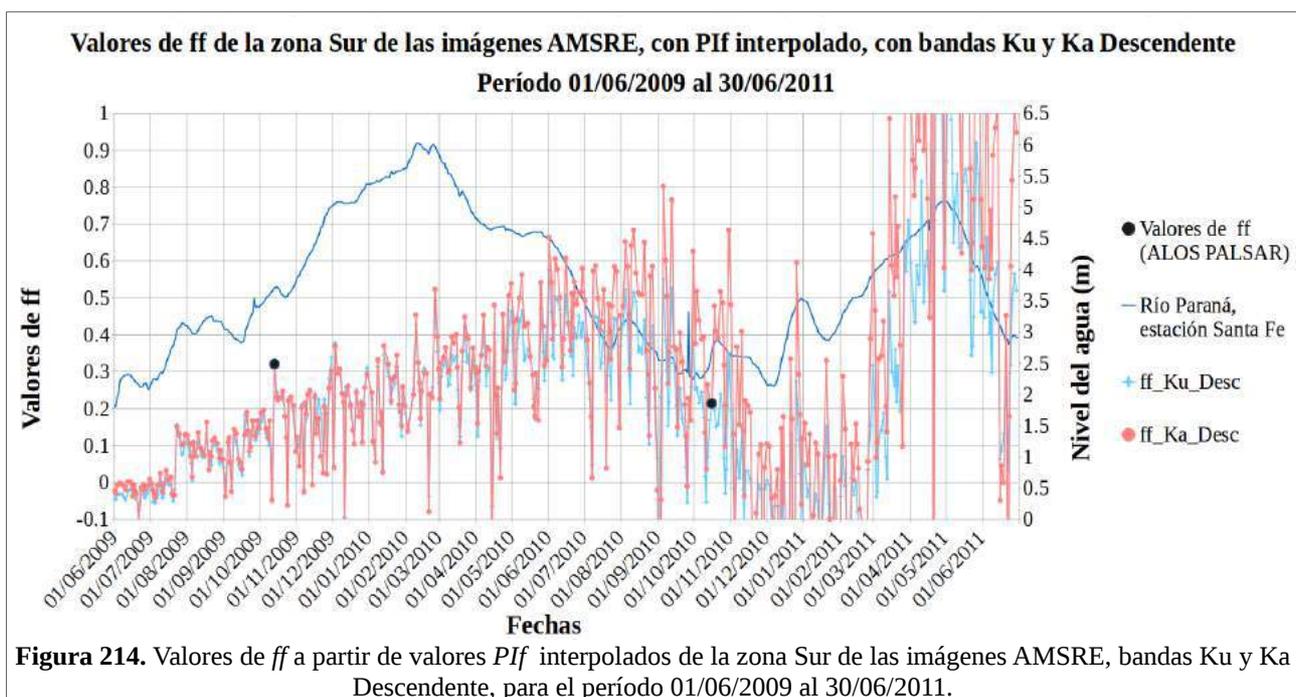
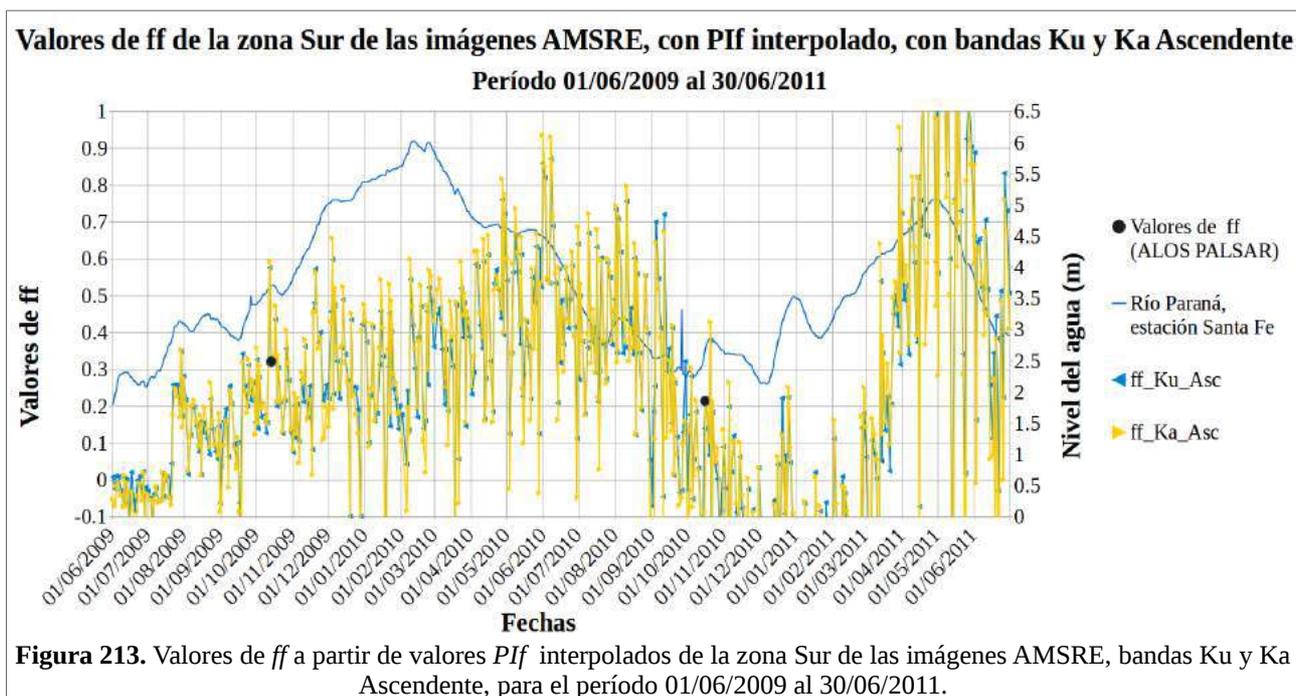
B.4.5 Valores de fracción de área inundada (*ff*) de la zona Sur, calculada con valores de *Pif* obtenidos mediante el esquema de interpolación lineal.

En las figuras 211, 212, 213 y 214, se muestra la fracción de área inundada obtenida aplicando la ecuación 49, tomando los valores de *Pif* interpolados (ver figura 210) para el cálculo.

ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



ANEXO B. Gráficos de los resultados de las zonas Norte y Sur para los períodos 1 y 2.



ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

Tabla 39. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Norte, basado en imágenes de radar en Banda L (23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007).

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error de comisión
		Áreas no inundadas	Áreas inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas no inundadas	413	206	66.72	33.28
	Áreas inundadas	233	148	38.85	61.15
Exactitud del productor		63.93	41.81	Exactitud General: 56.10%	
Error de omisión		36.07	58.19	Índice Kappa: 0.06	

La matriz de errores realizada (ver tabla 39) muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas realizado con imágenes SAR en Banda L del 56,10%. La exactitud para el usuario presenta una muy buena exactitud para las áreas no inundadas (66,72%), mientras que para las áreas inundadas presenta una baja exactitud (38.85%), lo que indica que el mapa generado es poco confiable en cuanto a las áreas clasificadas como “inundadas”. La exactitud para el productor presenta una buena exactitud para las áreas no inundadas (63.93%), mientras que para las áreas inundadas presenta una moderada exactitud (41.81%). Sin embargo, el Índice Kappa, indica una concordancia mala (0.06) entre los mapas analizados. Se observa un importante número de píxeles que el mapa usado como referencia designa como no inundados y el mapa producido con datos de microondas con Banda L clasifica como inundados, dando lugar a una baja exactitud para el usuario en la clase Áreas inundadas. Al menos parte de este error puede ser atribuido al carácter dinámico de los eventos de inundación, en relación a la diferencia en la fecha de las imágenes usadas para la producción de los dos mapas comparados que como se puede ver en la tabla 30 es de 26 días para la zona Norte.

Cabe recordar que en los 26 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 226 row 81 y path 226 y row 82, la altura del río Paraná en Esquina pasó de 4.07 m a 4.25 m (alcanzando el máximo de 4.60 m).

Además, en este caso debe tenerse en cuenta la diferencia en las características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso (datos de microondas en esta tesis vs datos ópticos utilizados por el INA). Las ondas correspondiente a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo no son capaces de atravesar el dosel de la vegetación arbórea o herbácea densa, mientras que las microondas son capaces de atravesar la vegetación y detectar el agua debajo de ella, lo que aumentaría la detección de áreas inundadas en los mapas realizados para esta tesis.

Por otro lado, se observa un número aún mayor de píxeles que fueron catalogados como áreas inundadas por el mapa del INA, y que el mapa realizado con imágenes SAR clasifica como no

ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

inundado. En este caso, hay dos factores que influyen en dicha diferencia: por un lado la importante diferencia de resoluciones espaciales entre los mapas. Al tener el mapa usado como referencia con un píxel de 30 m puede haber ocasionado que píxeles inundados, al querer integrarse en píxeles de 100 m en las imágenes SAR correspondan a una pequeña parte del píxel, dificultando su detección.

Más importante aún es la forma en que, debido a la incerteza radiométrica de las imágenes SAR en banda L (derivada del fenómeno de speckle), se define la clase “áreas no inundadas”. Al definir los límites del intervalo de cambio para la clase “no inundada” como el valor de la incerteza radiométrica de las imágenes SAR para un intervalo de confianza utilizado, lo que se está asegurando es que todos aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor a la incerteza radiométrica efectivamente sufrieron un cambio. Sin embargo no puede decirse lo mismo de aquellos píxeles cuyo valor de cambio está dentro de la incerteza radiométrica. En ese caso se los etiqueta como no inundados porque no puede asegurarse que hayan sufrido un cambio real, y que lo observado no sea producto de un desigual efecto del fenómeno speckle. Sin embargo, por los mismos motivos, tampoco puede asegurarse que no hayan sufrido cambios, en este caso, que no se hayan inundado.

Tabla 40. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Sur. basado en imágenes de radar en Banda L (23/05/2007 con fecha de referencia 05/01/2007).

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error de comisión
		Áreas no inundadas	Áreas inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas no inundadas	331	359	47.97	52.03
	Áreas inundadas	211	99	31.94	68.06
Exactitud del productor		61.07	21.62	Exactitud General: 43.00%	
Error de omisión		38.93	78.38	Índice Kappa: -0.18	

La matriz de errores realizada (ver tabla 40) muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas realizado con imágenes SAR en Banda L del 43.00%. La exactitud para el usuario presenta una buena exactitud para las áreas no inundadas (47.97%), mientras que para las áreas inundadas presenta una exactitud moderada (31.94%), lo que indica que el mapa generado es medianamente confiable en cuanto a las áreas clasificadas como “inundadas”. La exactitud para el productor presenta una muy buena exactitud para las áreas no inundadas (61.07%), mientras que para las áreas inundadas presenta una baja exactitud (21,62%). Sin embargo, el Índice Kappa, que toma en cuenta las coincidencias por efecto del azar, indica una concordancia pésima (-0.18) entre los mapas analizados. Se observa un importante número de píxeles que el mapa usado como referencia designa como no inundados y el mapa producido con datos de microondas con Banda L clasifica como inundados, dando lugar a una baja exactitud para el usuario en la clase Áreas inundadas. Al menos parte de este error puede ser atribuido al carácter dinámico de los eventos de inundación, en relación a la diferencia en la fecha de las imágenes usadas para la producción de los dos mapas comparados que como se puede ver en la tabla 30 que va de 26 días hasta 3 meses y 21 días debido a que se realizó un mosaico de máscaras del agua del INA para completar la información de la zona Sur del área de estudio para la validación.

ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

Cabe recordar que en los 26 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 226 y row 82, la altura del río Paraná en Esquina pasó de 4.07 m a 4.25 m (alcanzando el máximo de 4.60 m), mientras que para los 3 meses y 21 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 227 y row 82, la altura del río Paraná en Santa Fe pasó de 4.38 m a 4.15 m (con un máximo de 5.94 m).

Además, en este caso debe tenerse en cuenta la diferencia en las características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso (datos de microondas en esta tesis vs datos ópticos utilizados por el INA). Las ondas correspondiente a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo no son capaces de atravesar el dosel de la vegetación arbórea o herbácea densa, mientras que las microondas son capaces de atravesar la vegetación y detectar el agua debajo de ella, lo que aumentaría la detección de áreas inundadas en los mapas realizados para esta tesis.

Por otro lado, se observa un número aún mayor de píxeles que fueron catalogados como áreas inundadas por el mapa del INA, y que el mapa realizado con imágenes SAR clasifica como no inundado. En este caso, hay dos factores que influyen en dicha diferencia: por un lado la importante diferencia de resoluciones espaciales entre los mapas. Al tener el mapa usado como referencia con un píxel de 30 m puede haber ocasionado que píxeles inundados, al querer integrarse en píxeles de 100 m en las imágenes SAR correspondan a una pequeña parte del píxel, dificultando su detección.

Más importante aún es la forma en que, debido a la incerteza radiométrica de las imágenes SAR en banda L (derivada del fenómeno de speckle), se define la clase “áreas no inundadas”. Al definir los límites del intervalo de cambio para la clase “no inundada” como el valor de la incerteza radiométrica de las imágenes SAR para un intervalo de confianza utilizado, lo que se está asegurando es que todos aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor a la incerteza radiométrica efectivamente sufrieron un cambio. Sin embargo no puede decirse lo mismo de aquellos píxeles cuyo valor de cambio está dentro de la incerteza radiométrica. En ese caso se los etiqueta como no inundados porque no puede asegurarse que hayan sufrido un cambio real, y que lo observado no sea producto de un desigual efecto del fenómeno speckle. Sin embargo, por los mismos motivos, tampoco puede asegurarse que no hayan sufrido cambios, en este caso, que no se hayan inundado.

Tabla 41. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zona Norte basado en imágenes de radar en Banda L (13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009).

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error de comisión
		Áreas no inundadas	Áreas inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas no inundadas	490	150	76.56	23.44
	Áreas inundadas	180	180	50.00	50.00
Exactitud del productor		73.13	54.55	Exactitud General: 67.00% Índice Kappa: 0.27	
Error de omisión		26.87	45.45		

ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

La matriz de errores realizada (ver tabla 41) muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas realizado con imágenes SAR en Banda L del 67.0%. La exactitud para el usuario presenta una muy buena exactitud para las áreas no inundadas (76.56%), mientras que para las áreas inundadas presenta una exactitud moderada (50.00%), lo que indica que el mapa generado es medianamente confiable en cuanto a las áreas clasificadas como “inundadas”. La exactitud para el productor presenta una muy buena exactitud para las áreas no inundadas (73.13%), mientras que para las áreas inundadas presenta una moderada exactitud (54.55%). Sin embargo, el Índice Kappa, que toma en cuenta las coincidencias por efecto del azar, indica una concordancia razonable (0.27) entre los mapas analizados. Se observa un importante número de píxeles que el mapa usado como referencia designa como no inundados y el mapa producido con datos de microondas con Banda L clasifica como inundados, dando lugar a una mediana exactitud para el usuario en la clase Áreas inundadas. Al menos parte de este error puede ser atribuido al carácter dinámico de los eventos de inundación, en relación a la diferencia en la fecha de las imágenes usadas para la producción de los dos mapas comparados que como se puede ver en la tabla 30 que es de 4 días.

Cabe recordar que en los 4 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 226 row 81 y path 226 y row 82, la altura del río Paraná en Esquina pasó de 4.19 m a 4.02 m (alcanzando el máximo de 4.19 m).

Además, en este caso debe tenerse en cuenta la diferencia en las características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso (datos de microondas en esta tesis vs datos ópticos utilizados por el INA). Las ondas correspondiente a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo no son capaces de atravesar el dosel de la vegetación arbórea o herbácea densa, mientras que las microondas son capaces de atravesar la vegetación y detectar el agua debajo de ella, lo que aumentaría la detección de áreas inundadas en los mapas realizados para esta tesis.

Por otro lado, se observa un número aún mayor de píxeles que fueron catalogados como áreas inundadas por el mapa del INA, y que el mapa realizado con imágenes SAR clasifica como no inundado. En este caso, hay dos factores que influyen en dicha diferencia: por un lado la importante diferencia de resoluciones espaciales entre los mapas. Al tener el mapa usado como referencia con un píxel de 30 m puede haber ocasionado que píxeles inundados, al querer integrarse en píxeles de 100 m en las imágenes SAR correspondan a una pequeña parte del píxel, dificultando su detección.

Más importante aún es la forma en que, debido a la incerteza radiométrica de las imágenes SAR en banda L (derivada del fenómeno de speckle), se define la clase “áreas no inundadas”. Al definir los límites del intervalo de cambio para la clase “no inundada” como el valor de la incerteza radiométrica de las imágenes SAR para un intervalo de confianza utilizado, lo que se está asegurando es que todos aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor a la incerteza radiométrica efectivamente sufrieron un cambio. Sin embargo no puede decirse lo mismo de aquellos píxeles cuyo valor de cambio está dentro de la incerteza radiométrica. En ese caso se los etiqueta como no inundados porque no puede asegurarse que hayan sufrido un cambio real, y que lo observado no sea producto de un desigual efecto del fenómeno speckle. Sin embargo, por los mismos motivos, tampoco puede asegurarse que no hayan sufrido cambios, en este caso, que no se hayan inundado.

ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

Tabla 42. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas de la zonaSur basado en imágenes de radar en Banda L (13/10/2009 con fecha de referencia 10/01/2009).

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error de comisión
		Áreas no inundadas	Áreas inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas no inundadas	353	242	59.33	40.67
	Áreas inundadas	144	261	64.44	35.56
Exactitud del productor		71.03	51.89	Exactitud General: 61.40%	
Error de omisión		28.97	48.11	Índice Kappa: 0.23	

La matriz de errores realizada (ver tabla 42) muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas realizado con imágenes SAR en Banda L del 61.40%. La exactitud para el usuario presenta una moderada exactitud para las áreas no inundadas (59,33%), mientras que para las áreas inundadas presenta una exactitud buena (64.44%), lo que indica que el mapa generado es medianamente confiable en cuanto a las áreas clasificadas como “inundadas”. La exactitud para el productor presenta una muy buena exactitud para las áreas no inundadas (71.03%), mientras que para las áreas inundadas presenta una moderada exactitud (51.89%). Sin embargo, el Índice Kappa, que toma en cuenta las coincidencias por efecto del azar, indica una concordancia razonable (0.23) entre los mapas analizados. Se observa un importante número de píxeles que el mapa usado como referencia designa como no inundados y el mapa producido con datos de microondas con Banda L clasifica como inundados, dando lugar a una baja exactitud para el usuario en la clase Áreas inundadas. Al menos parte de este error puede ser atribuido al carácter dinámico de los eventos de inundación, en relación a la diferencia en la fecha de las imágenes usadas para la producción de los dos mapas comparados que como se puede ver en la tabla 30 que va de 4 hasta 18 días debido a que se realizó un mosaico de máscaras del agua del INA para completar la información de la zona Sur del área de estudio para la validación.

Cabe recordar que en los 4 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 226 y row 82, la altura del río Paraná en Esquina pasó de 4.19 m a 4.02 m (alcanzando el máximo de 4.19 m), mientras que para los 18 días transcurridos entre la adquisición de las imágenes correspondientes al path 227 y row 82, la altura del río Paraná en Santa Fe pasó de 3.71 m a 3.87 m (con un máximo de 3.87 m).

Además, en este caso debe tenerse en cuenta la diferencia en las características de la energía electromagnética en los distintos rangos del espectro utilizados por los sensores en cada caso (datos de microondas en esta tesis vs datos ópticos utilizados por el INA). Las ondas correspondiente a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo no son capaces de atravesar el dosel de la vegetación arbórea o herbácea densa, mientras que las microondas son capaces de atravesar la vegetación y detectar el agua debajo de ella, lo que aumentaría la detección de áreas inundadas en los mapas realizados para esta tesis.

Por otro lado, se observa un número aún mayor de píxeles que fueron catalogados como áreas

ANEXO C. Evaluación de la exactitud de los mapas producidos con imágenes SAR comparando con información de sensores ópticos para la zona Norte y la zona Sur para los períodos 1 y 2.

inundadas por el mapa del INA, y que el mapa realizado con imágenes SAR clasifica como no inundado. En este caso, hay dos factores que influyen en dicha diferencia: por un lado la importante diferencia de resoluciones espaciales entre los mapas. Al tener el mapa usado como referencia con un píxel de 30 m puede haber ocasionado que píxeles inundados, al querer integrarse en píxeles de 100 m en las imágenes SAR correspondan a una pequeña parte del píxel, dificultando su detección.

Más importante aún es la forma en que, debido a la incerteza radiométrica de las imágenes SAR en banda L (derivada del fenómeno de speckle), se define la clase “áreas no inundadas”. Al definir los límites del intervalo de cambio para la clase “no inundada” como el valor de la incerteza radiométrica de las imágenes SAR para un intervalo de confianza utilizado, lo que se está asegurando es que todos aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor a la incerteza radiométrica efectivamente sufrieron un cambio. Sin embargo no puede decirse lo mismo de aquellos píxeles cuyo valor de cambio está dentro de la incerteza radiométrica. En ese caso se los etiqueta como no inundados porque no puede asegurarse que hayan sufrido un cambio real, y que lo observado no sea producto de un desigual efecto del fenómeno speckle. Sin embargo, por los mismos motivos, tampoco puede asegurarse que no hayan sufrido cambios, en este caso, que no se hayan inundado.

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

D.1 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de P_{If} constante.

Tabla 43. Zona Total, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de P_{If} constante.

Período	Fecha	Información INA.	Información Tesis.							
		Fracción de área inundada (ff)	Fracción de área inundada (ff) Bandas Ascendentes				Fracción de área inundada (ff) Bandas Descendentes.			
			C	X	Ku	Ka	C	X	Ku	Ka
Segundo	29/08/2009	0.247	0.007	0.032	0.103	0.173	0.0002	0.053	0.068	0.085
	01/11/2009	0.375	0.152	0.196	0.245	0.425	0.113	0.190	0.148	0.157
	20/01/2010	0.499	0.373	0.410	0.561	0.971	0.225	0.315	0.262	0.265
	25/03/2010	0.503	0.389	0.375	0.554	0.961	0.201	0.295	0.281	0.286
	10/04/2010	0.482	0.317	0.307	0.492	0.865	0.135	0.233	0.238	0.256
	03/10/2010	0.172	-0.008	0.013	0.080	0.134	-0.049	0.016	0.060	0.083
	23/01/2011	0.171	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100
	28/03/2011	0.280	1.000	1.000	0.654	0.612	0.346	0.615	0.679	0.961
	13/04/2011	0.379	1.000	1.000	0.684	0.631	0.368	0.702	0.798	1.000

Tabla 44. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Total con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de P_{If} constante.

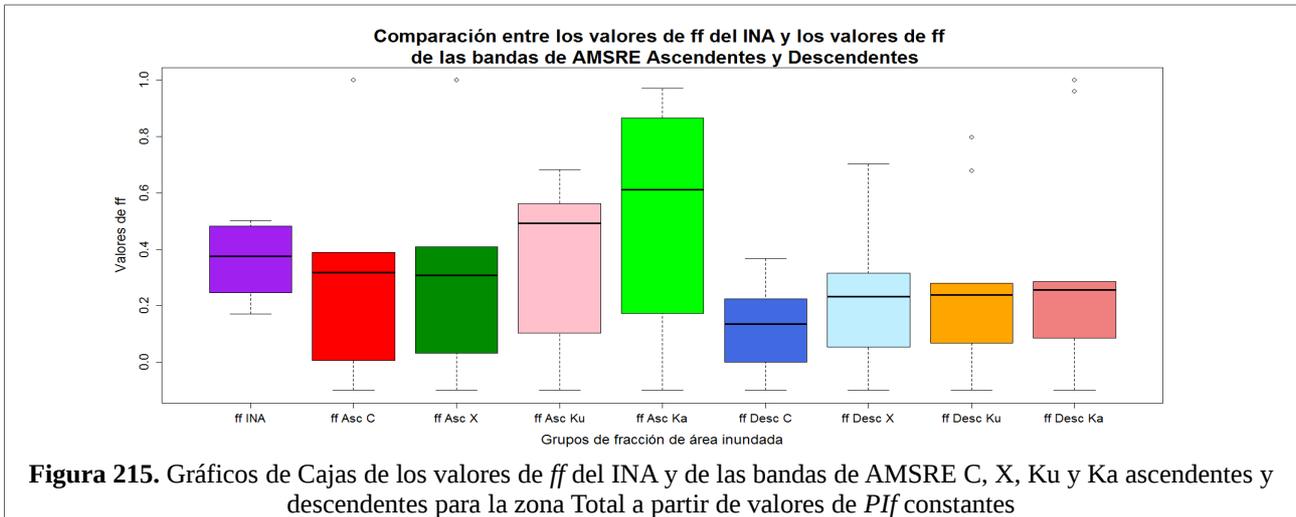
Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor
ff INA - ff Asc C	0.124	ff INA - ff Desc C	0.341	ff INA - ff Asc Ku	0.198	ff INA - ff Desc Ku	0.053
ff INA - ff Asc X	0.132	ff INA - ff Desc X	0.110	ff INA - ff Asc Ka	0.204	ff INA - ff Desc Ka	0.090

Realizando un análisis de los datos en la prueba de normalidad realizada, se obtuvo un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta para todos los casos la hipótesis H_0 (ver sección 2.8.3.1), por lo tanto se concluye que las clases se ajustan a una distribución normal.

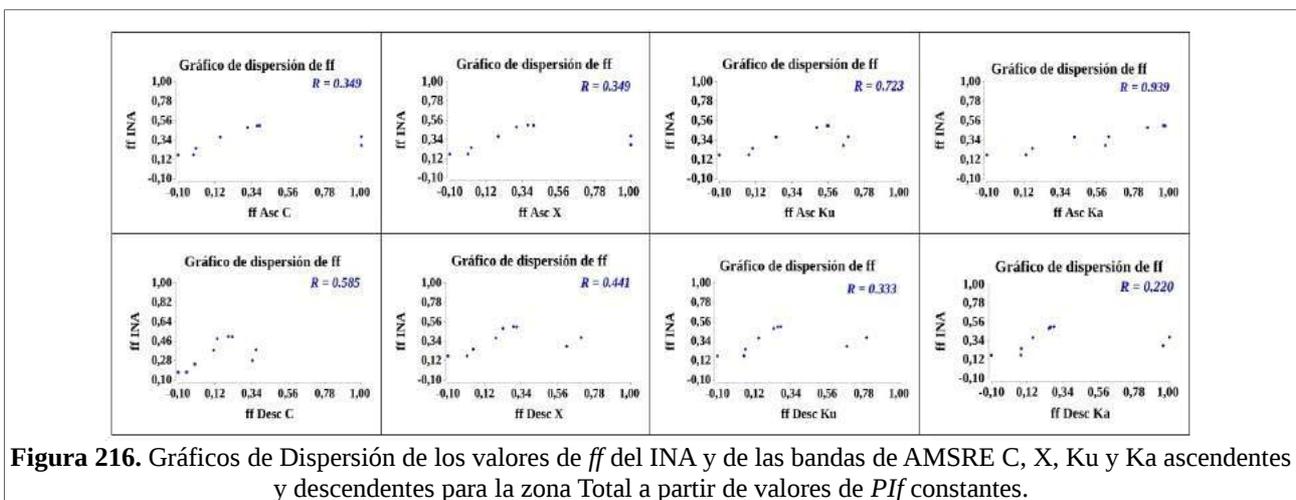
En la figura 215, se indica el gráfico de cajas generado donde se puede hacer una primera comparación entre los diferentes valores de ff . Las bandas ascendentes presentan mayor variabilidad en sus datos en comparación al ff de las bandas descendentes y del ff del INA; los ff del INA no presenta mucha diferencias con las bandas ascendentes en el valor de la mediana; mientras que presenta mayor diferencia con las bandas descendentes. Las bandas C y X ascendentes son muy

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

similares, a diferencia de la banda Ku ascendente que presenta mayor variabilidad y la banda Ka ascendente es la que mayor variabilidad presenta en comparación con todas las demás bandas; finalmente se observa que las bandas descendentes tienen rangos de valores similares sin tomar en cuenta los valores extremos de las bandas Ku y Ka.



En la figura 216, se indica los gráficos de dispersión. Visualmente se puede apreciar que todas las bandas presentan en mayor o menor grado correlación lineal.



En la tabla 45, se indica las estadísticas del coeficiente de correlación. La H_0 plantea que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas y el ff del INA. Se observa que solamente para la clase Asc Ka presenta un p-valor menor al nivel de significación de 0.05 por lo que para esta clase no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , lo que indicaría que se ha encontrado indicios de que existe una correlación estadísticamente significativa con el ff del INA, además el valor r indica una asociación lineal excelente. Para el resto de clases presentan un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05 por lo que se acepta la H_0 con lo que se concluye que no existe una significativa correlación lineal entre los ff

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

de las bandas C, X, Ku ascendentes y C, X, Ku y Ka descendentes y el *ff* del INA, además para las clases Asc Ku y Desc C presentan una asociación lineal regular, mientras que para las clases Asc C, Asc X, Desc X, Desc Ku y Desc Ka presentan una asociación lineal mala.

Tabla 45. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *Pif* constante.

Clases a comparar	Valor estadístico t	Grados de libertad	p-valor	Intervalo de confianza al 95%		Valor de correlación de Pearson (r).	Asociación lineal
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	0.986	7	0.357	0.409	0.823	0.349	Mala
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	0.985	7	0.357	-0.410	0.823	0.349	Mala
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	2.767	7	0.028	0.113	0.937	0.723	Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka	7.258	7	0.0002	0.732	0.987	0.939	Excelente
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	1.910	7	0.098	-0.129	0.900	0.585	Regular
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	1.299	7	0.235	-0.316	0.855	0.441	Mala
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	0.934	7	0.381	-0.425	0.817	0.333	Mala
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka	0.596	7	0.570	-0.520	0.771	0.220	Mala

D.2 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de *Pif* interpolado.

Tabla 46. Zona Total, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *Pif* interpolado.

Período	Fecha	Información INA.	Información Tesis.							
		Fracción de área inundada (<i>ff</i>)	Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Ascendentes				Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Descendentes.			
			C	X	Ku	Ka	C	X	Ku	Ka
Segundo	29/08/2009	0.247	0.007	0.032	0.103	0.173	0.0002	0.053	0.068	0.085
	01/11/2009	0.375	0.159	0.204	0.251	0.425	0.116	0.196	0.154	0.164
	20/01/2010	0.499	0.490	0.514	0.639	0.963	0.268	0.384	0.327	0.339
	25/03/2010	0.503	0.643	0.561	0.693	0.948	0.273	0.417	0.417	0.445
	10/04/2010	0.482	0.561	0.483	0.631	0.852	0.190	0.343	0.371	0.420
	03/10/2010	0.172	-0.056	0.047	0.142	0.130	-0.100	0.044	0.204	0.372
	23/01/2011	0.171	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100
	28/03/2011	0.280	1.000	1.000	0.654	0.612	0.346	0.615	0.679	0.961
	13/04/2011	0.379	1.000	1.000	0.684	0.631	0.368	0.702	0.798	1.000

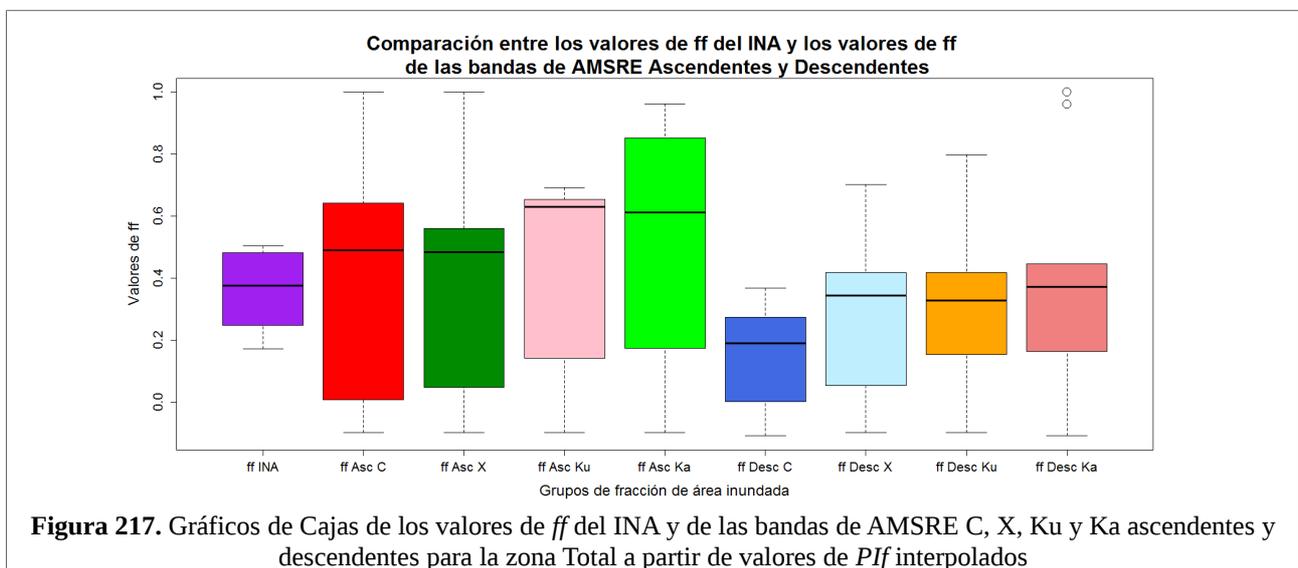
ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

Tabla 47. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Total con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* interpolado.

Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	0.289	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	0.509	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	0.229	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	0.108
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	0.227	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	0.188	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka	0.211	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka	0.149

Realizando un análisis de los datos en la prueba de normalidad realizada, se obtuvo un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta para todos los casos la hipótesis H_0 , por lo tanto se concluye que las clases se ajustan a una distribución normal.

En la figura 217, se indica el gráfico de cajas generado donde se puede hacer una primera comparación entre los diferentes valores de *ff*. Las bandas ascendentes presentan mayor variabilidad en sus datos en comparación al *ff* de las bandas descendentes y del *ff* del INA; los *ff* del INA presenta poca diferencia con las bandas ascendentes en el valor de la mediana; mientras que presenta mayor diferencia con las bandas descendentes. Las bandas C y X ascendentes son muy similares, a diferencia de la banda Ku y Ka ascendente, la banda Ka ascendente es la que mayores valores de *ff* presenta en comparación con todas las demás bandas; finalmente se observa que las bandas descendentes presentan los menores valores de *ff* en comparación a los valores de *ff* del INA y de las bandas ascendentes y tienen rangos de valores similares sin tomar en cuenta los valores extremos de las bandas Ku y Ka.



En la figura 218, se indica los gráficos de dispersión. Visualmente se puede apreciar que todas las bandas presentan en mayor o menor grado correlación lineal.

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

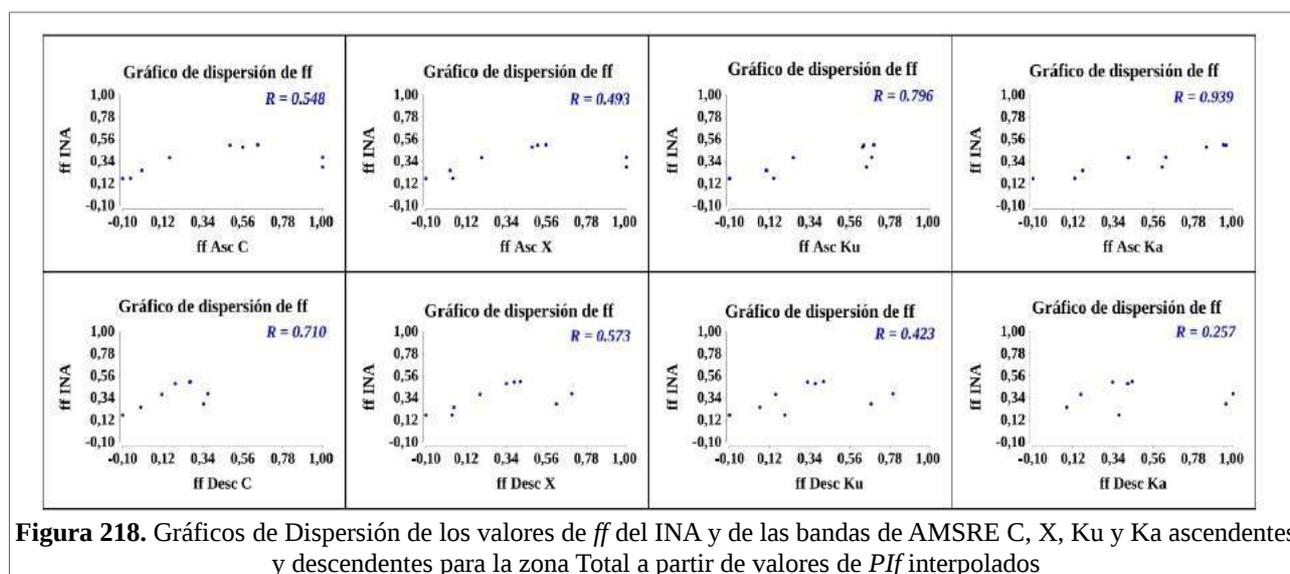


Figura 218. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Total a partir de valores de Pf interpolados

En la tabla 48, se indica las estadísticas del coeficiente de correlación. La H_0 plantea que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas y el ff del INA. Se observa que solamente para la clase Asc Ka presenta un p-valor menor al nivel de significación de 0.05 por lo que para esta clase no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , lo que indicaría que se a encontrado indicios de que existe una correlación estadísticamente significativa con el ff del INA, además el valor r indica una asociación lineal excelente. Para el resto de clases presentan un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05 por lo que se acepta la H_0 con lo que se concluye que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas C, X, Ku ascendentes y C, X, Ku y Ka descendentes y el ff del INA, además para las clases Asc C, Desc C y Des X presentan una asociación lineal regular, mientras que para las clases Asc X, Desc Ku y Desc Ka presentan una asociación lineal mala.

Tabla 48. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Total para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de Pf interpolado.

Clases a comparar	Valor estadístico t	Grados de libertad	p-valor	Intervalo de confianza al 95%		Valor de correlación de Pearson (r).	Asociación lineal
ff INA - ff Asc C	1.734	7	0.127	-0.182	0.889	0.548	Regular
ff INA - ff Asc X	1.499	7	0.177	-0.254	0.872	0.493	Mala
ff INA - ff Asc Ku	3.477	7	0.010	0.279	0.955	0.796	Regular
ff INA - ff Asc Ka	7.197	7	0.0002	0.729	0.987	0.939	Excelente
ff INA - ff Desc C	2.670	7	0.032	0.087	0.934	0.710	Regular
ff INA - ff Desc X	1.851	7	0.107	-0.147	0.896	0.573	Regular
ff INA - ff Desc Ku	1.234	7	0.257	-0.336	0.849	0.423	Mala
ff INA - ff Desc Ka	0.702	7	0.505	-0.491	0.787	0.257	Mala

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

D.3 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de *PIf* constante.

Tabla 49. Zona Sur, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de los cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* constante.

Período	Fecha	Información INA.	Información Tesis.							
		Fracción de área inundada (<i>ff</i>)	Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Ascendentes				Fracción de área inundada (<i>ff</i>) Bandas Descendentes.			
			C	X	Ku	Ka	C	X	Ku	Ka
Segundo	29/08/2009	0.286	-0.007	0.012	0.056	0.066	-0.026	0.050	0.064	0.086
	01/11/2009	0.368	0.086	0.094	0.072	0.081	0.054	0.148	0.109	0.118
	20/01/2010	0.438	0.234	0.230	0.254	0.295	0.114	0.242	0.201	0.214
	25/03/2010	0.466	0.335	0.222	0.277	0.326	0.087	0.219	0.228	0.242
	10/04/2010	0.450	0.316	0.204	0.246	0.271	0.058	0.181	0.191	0.214
	03/10/2010	0.187	0.036	0.033	0.068	0.056	-0.063	0.027	0.069	0.093
	23/01/2011	0.184	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100
	28/03/2011	0.275	0.980	0.575	0.415	0.461	0.101	0.451	0.573	1.000
	13/04/2011	0.333	0.820	0.568	0.373	0.392	0.122	0.455	0.587	1.000

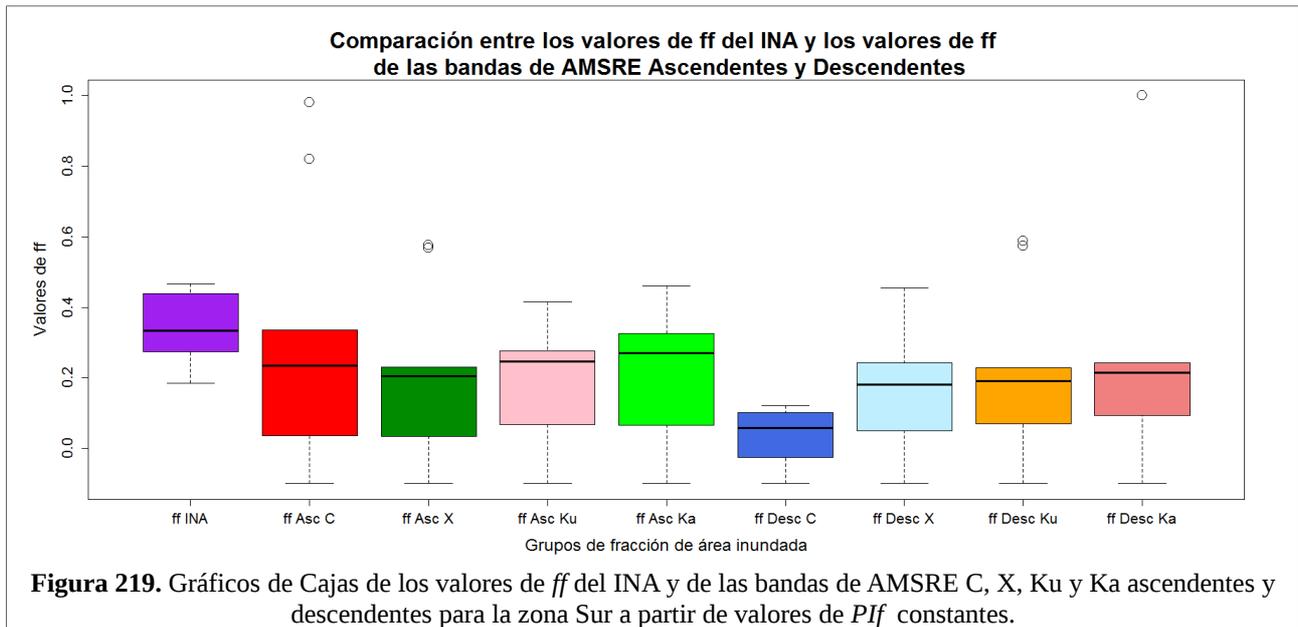
Tabla 50. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Sur con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* constante

Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	0.093	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	0.791	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	0.201	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	0.113
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	0.122	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	0.244	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka	0.188	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka	0.325

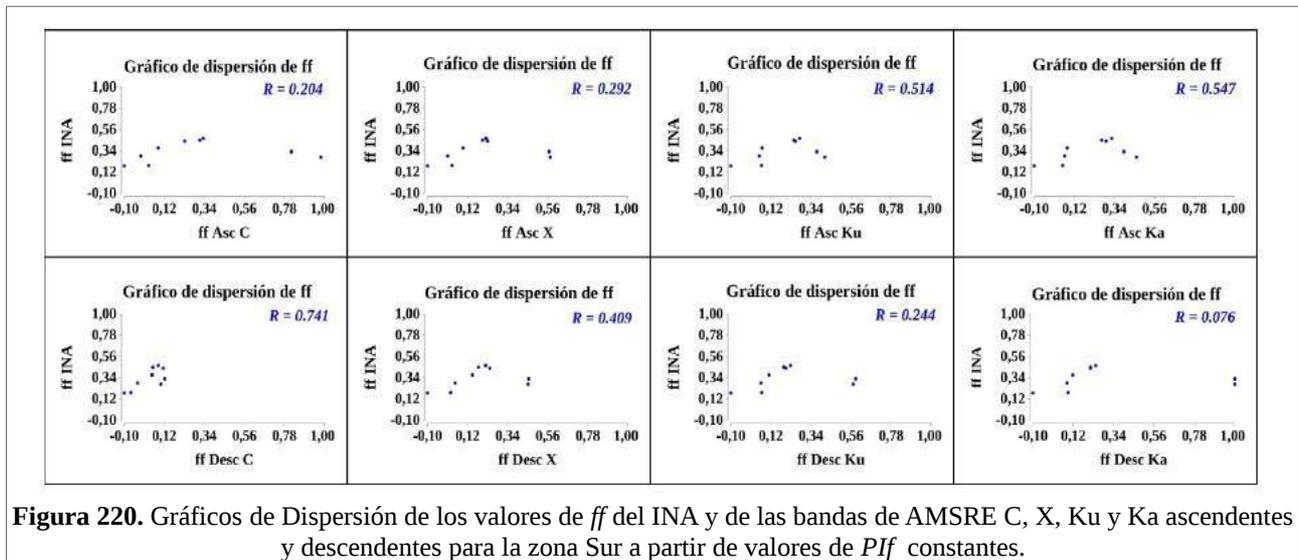
Realizando un análisis de los datos en la prueba de normalidad realizada, se obtuvo un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta para todos los casos la hipótesis H_0 , por lo tanto se concluye que las clases se ajustan a una distribución normal.

En la figura 219, se indica el gráfico de cajas generado donde se puede hacer una primera comparación entre los diferentes valores de *ff*. Las bandas ascendentes presentan mayor variabilidad en sus datos en comparación al *ff* de las bandas descendentes y del *ff* del INA; los *ff* del INA no presenta mucha diferencias con las bandas ascendentes en el valor de la mediana; mientras que presenta mayor diferencia con las bandas descendentes. La banda Desc C es la que presenta mayor diferencia con el *ff* del INA. Las bandas Desc X, Desc Ku y Desc Ka presentan comportamientos muy similares sin tomar en cuenta los valores extremos de las bandas descendentes Ku y Ka.

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.



En la figura 220, se indica los gráficos de dispersión. Visualmente se puede apreciar que todas las bandas presentan en mayor o menor grado correlación lineal.



En la tabla 51, se indica las estadísticas del coeficiente de correlación. La H_0 plantea que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas y el ff del INA. Se observa que solamente para la clase Desc C presenta un p-valor menor al nivel de significación de 0.05 por lo que para esta clase no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , lo que indicaría que se a encontrado indicios de que existe una correlación estadísticamente significativa con el ff del INA, además el valor r indica una asociación lineal regular. Para el resto de clases presentan un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05 por lo

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

que acepta la H_0 con lo que se concluye que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y X, Ku y Ka descendentes y el ff del INA, además para las clases Asc Ku y Asc Ka presentan una asociación lineal regular, mientras que para las clases Asc C, Asc X, Desc X, Desc Ku y Desc Ka presentan una asociación lineal mala.

Tabla 51. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de Pif constante.

Clases a comparar	Valor estadístico t	Grados de libertad	p-valor	Intervalo de confianza al 95%		Valor de correlación de Pearson (r).	Asociación lineal
ff INA - ff Asc C	0.550	7	0.599	-0.533	0.764	0.204	Mala
ff INA - ff Asc X	0.807	7	0.446	-0.462	0.801	0.292	Mala
ff INA - ff Asc Ku	1.584	7	0.157	-0.228	0.878	0.514	Regular
ff INA - ff Asc Ka	1.731	7	0.127	-0.183	0.889	0.547	Regular
ff INA - ff Desc C	2.923	7	0.022	0.152	0.942	0.741	Regular
ff INA - ff Desc X	1.187	7	0.274	-0.350	0.844	0.409	Mala
ff INA - ff Desc Ku	0.666	7	0.527	-0.501	0.782	0.244	Mala
ff INA - ff Desc Ka	0.203	7	0.845	-0.619	0.705	0.076	Mala

D.4 Resultados Estadísticos del cálculo del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada del INA y de las bandas de AMSRE a partir de Pif interpolado.

Tabla 52. Zona Sur, valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras de los cuerpos de agua del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de Pif interpolado.

Período	Fecha	Información INA.	Información Tesis.							
		Fracción de área inundada (ff)	Fracción de área inundada (ff) Bandas Ascendentes				Fracción de área inundada (ff) Bandas Descendentes.			
			C	X	Ku	Ka	C	X	Ku	Ka
Segundo	29/08/2009	0.286	-0.007	0.012	0.056	0.066	-0.026	0.050	0.064	0.086
	01/11/2009	0.368	0.090	0.098	0.074	0.083	0.055	0.153	0.114	0.123
	20/01/2010	0.438	0.302	0.289	0.307	0.353	0.134	0.293	0.253	0.278
	25/03/2010	0.466	0.533	0.333	0.386	0.447	0.116	0.309	0.342	0.389
	10/04/2010	0.450	0.533	0.323	0.356	0.386	0.080	0.265	0.303	0.366
	03/10/2010	0.187	0.189	0.122	0.177	0.135	-0.100	0.072	0.256	0.518
	23/01/2011	0.184	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100
	28/03/2011	0.275	0.980	0.575	0.415	0.461	0.101	0.451	0.573	1.000
	13/04/2011	0.333	0.820	0.568	0.373	0.392	0.122	0.455	0.587	1.000

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

Tabla 53. Determinación de Normalidad de los datos aplicando el test Shapiro-Wilks para la zona Sur con valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos de las máscaras del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de *PIf* interpolado.

Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor	Clases a comparar	p-valor
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc C	0.125	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc C	0.611	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ku	0.089	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ku	0.149
<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc X	0.142	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc X	0.267	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Asc Ka	0.226	<i>ff</i> INA - <i>ff</i> Desc Ka	0.434

Realizando un análisis de los datos en la prueba de normalidad realizada, se obtuvo un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05, por lo que se acepta para todos los casos la hipótesis H_0 , por lo tanto se concluye que las clases se ajustan a una distribución normal.

En la figura 221, se indica el gráfico de cajas generado donde se puede hacer una primera comparación entre los diferentes valores de *ff*. Las bandas Asc C y Desc Ka presentan comportamientos similares y son las que mayor variabilidad con respecto al resto de bandas y los valores de *ff* del INA. La banda Desc C tiene valores inferiores a todas las demás bandas y presenta la mayor diferencia con respecto al *ff* del INA. Las bandas Asc X, Asc Ku y Asc Ka tienen rangos de valores similares así como las bandas Desc X y Desc Ku.

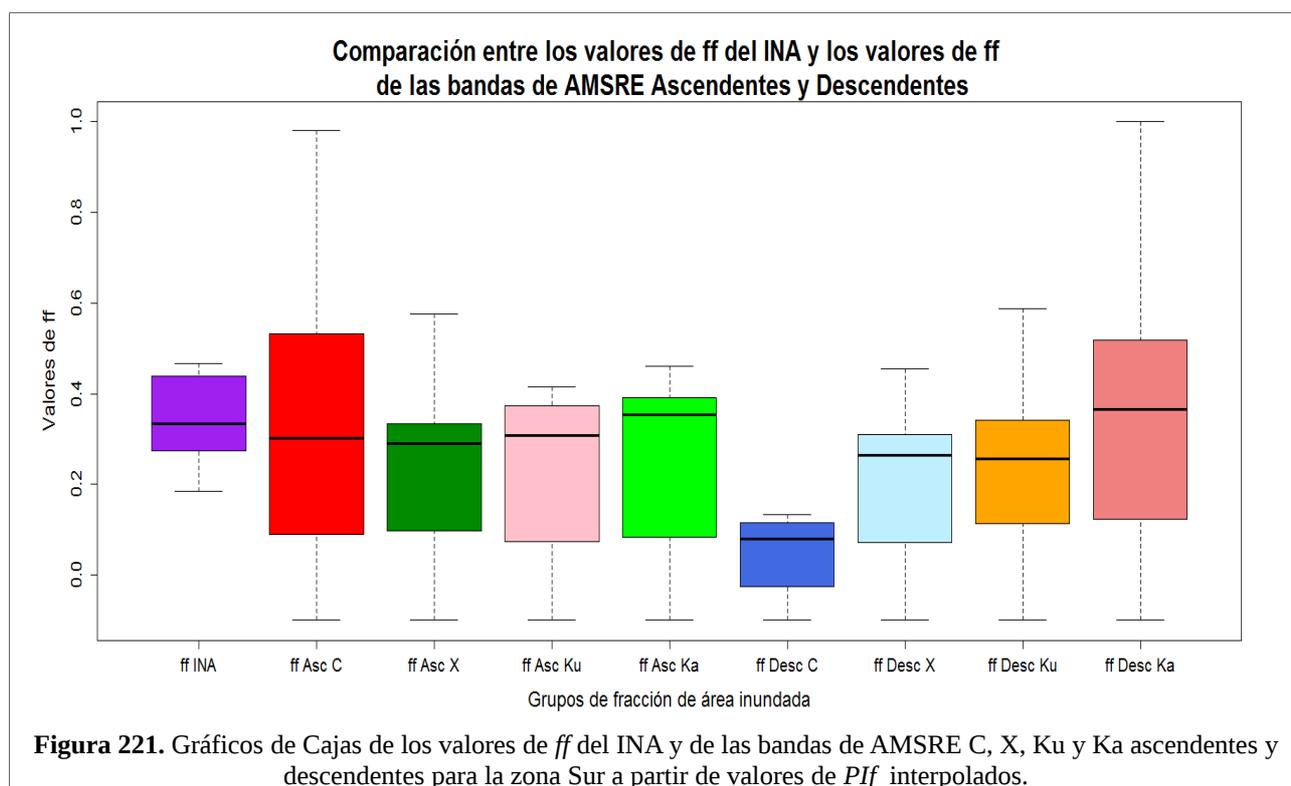


Figura 221. Gráficos de Cajas de los valores de *ff* del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Sur a partir de valores de *PIf* interpolados.

En la figura 222, se indica los gráficos de dispersión. Visualmente se puede apreciar que todas las bandas presentan en mayor o menor grado correlación lineal.

ANEXO D. Evaluación de la correlación de la información de fracción de área inundada de Microondas Pasivas con información externa para comparación. Para la zonas Total y Sur.

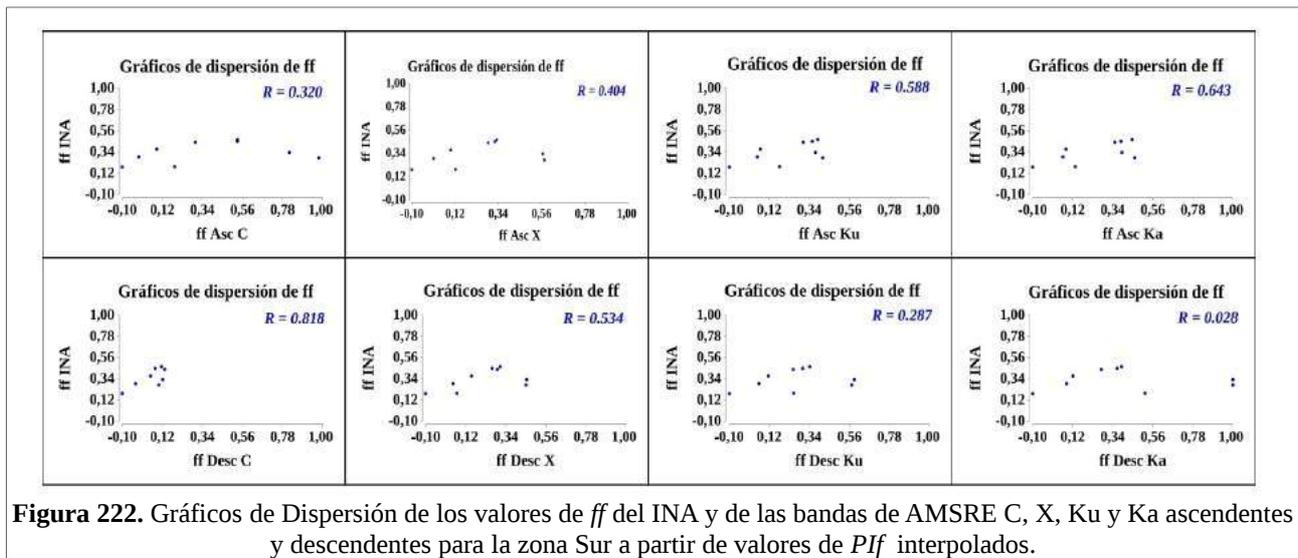


Figura 222. Gráficos de Dispersión de los valores de ff del INA y de las bandas de AMSRE C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes para la zona Sur a partir de valores de Pif interpolados.

En la tabla 54, se indica las estadísticas del coeficiente de correlación. La H_0 plantea que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas y el ff del INA. Se observa que solamente para la clase Desc C presenta un p-valor menor al nivel de significación de 0.05 por lo que para esta clase no existe evidencia estadísticamente suficiente para aceptar la hipótesis H_0 , en su lugar se acepta la H_1 , lo que indicaría que se a encontrado indicios de que existe una correlación estadísticamente significativa con el ff del INA, además el valor r indica una asociación lineal Buena. Para el resto de clases presentan un p-valor mayor al nivel de significación de 0.05 por lo que acepta la H_0 con lo que se concluye que no existe una significativa correlación lineal entre los ff de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y X, Ku y Ka descendentes y el ff del INA, además para las clases Asc Ku, Asc Ka y Desc X presentan una asociación lineal regular, mientras que para las clases Asc C, Asc X, Desc Ku y Desc Ka presentan una asociación lineal mala.

Tabla 54. Estadísticas del coeficiente de correlación para la zona Sur para valores de fracción de área inundada de los datos obtenidos del INA y de las bandas C, X, Ku y Ka ascendentes y descendentes de AMSRE a partir de Pif interpolado.

Clases a comparar	Valor estadístico t	Grados de libertad	p-valor	Intervalo de confianza al 95%		Valor de correlación de Pearson (r).	Asociación lineal
ff INA - ff Asc C	0.895	7	0.401	-0.437	0.812	0.320	Mala
ff INA - ff Asc X	1.168	7	0.281	-0.356	0.842	0.404	Mala
ff INA - ff Asc Ku	1.921	7	0.096	-0.126	0.900	0.588	Regular
ff INA - ff Asc Ka	2.219	7	0.062	-0.037	0.916	0.643	Regular
ff INA - ff Desc C	3.762	7	0.007	0.337	0.960	0.818	Buena
ff INA - ff Desc X	1.671	7	0.139	-0.202	0.884	0.534	Regular
ff INA - ff Desc Ku	0.792	7	0.454	-0.466	0.799	0.287	Mala
ff INA - ff Desc Ka	0.075	7	0.942	-0.648	0.680	0.028	Mala

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

NOTA: Se indica los códigos de procesamiento para la zona Total, para procesar la zona Norte y Sur, se mantiene el mismo código, con la diferencia que solo se cambia el nombre de la zona.

```
#!/bin/bash
#PROCESAMIENTO DE DATOS AMSRE.
## hacer un hipervínculo del archivo shp del area de estudio a cada carpeta para que se pueda
realizar el clip de los datos en el proximo paso.

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *SC*`
do
cd $carpetas/ARCGIS
ln -s ~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/AMSRE/shp_area_estudio/*area_estudio*
~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/AMSRE/$carp/$carpetas/ARCGIS
cd ../..
done
cd ..
done
## Se procede hacer el clip de los datos de Microondas pasiva con el area de estudio.
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *SC*`
do
cd $carpetas/ARCGIS
for archivos in `ls AMSRE*.shp`
do
ogr2ogr -clipsrc area_estudio_zona_total_pr.shp c_$archivos $archivos
done
cd ../..
done
cd ..
done
## convertir un archivo shp a txt.
## ogrinfo -al file1.shp >> file1.txt
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *SC*`
do
cd $carpetas/ARCGIS
for archivos_clip in `ls c_AMSRE*.shp`
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```

do
ogrinfo -al $archivos_clip > $archivos_clip.txt
done
cd ../..
done
cd ..
done
## con awk, copiar el nombre, fecha y calcular las estadísticas de los diferentes Delta y PI.
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *SC*`
do
cd $carpetas/ARCGIS
for texto in `ls c_*.txt`
do
awk '/name/' $texto > $texto.1
awk '{ print(substr($3,3)) }' $texto.1 >> $texto.2
awk '/name/&&/Asc_/ { print(substr($3,16,8)) }' $texto.1 >> $texto.2
awk '/name/&&/Desc_/ { print(substr($3,17,8)) }' $texto.1 >> $texto.2
## DeltaT_C.
awk '/DeltaT_C/' $texto > $texto.3
## sed '1d' $texto.3 para borrar la primera fila del archivo $texto.3 y poder calcular la media
y la desviación estandar, el mismo procedimiento es para el resto de archivos.
sed '1d' $texto.3 > $texto.4
# Media DeltaT_C.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.4 >> $texto.2
# Desviación estandar DeltaT_C.
# Nota: en el caso de que al procesar el signo elevado (**) cause problemas reemplazar por
el signo ^
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.4 >>
$texto.2
## PI_C
awk '/PI_C/' $texto > $texto.5
sed '1d' $texto.5 > $texto.6
# Media PI_C.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.6 >> $texto.2
# Desviación estandar PI_C.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.6 >>
$texto.2
## DeltaT_X
awk '/DeltaT_X/' $texto > $texto.7
sed '1d' $texto.7 > $texto.8
# Media DeltaT_X.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.8 >> $texto.2
# Desviación estandar DeltaT_X.

```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```

awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.8 >>
Stexto.2
## PI_X
awk '/PI_X/' $texto > $texto.9
sed '1d' $texto.9 > $texto.10
# Media PI_X.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.10 >> $texto.2
# Desviacion estandar PI_X.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.10
>> $texto.2
## DeltaT_Ka
awk '/DeltaT_Ka/' $texto > $texto.11
sed '1d' $texto.11 > $texto.12
# Media DeltaT_Ka.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.12 >> $texto.2
# Desviacion estandar DeltaT_Ka.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.12
>> $texto.2
## PI_Ka
awk '/PI_Ka/' $texto > $texto.13
sed '1d' $texto.13 > $texto.14
# Media PI_Ka.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.14 >> $texto.2
# Desviacion estandar PI_Ka.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.14
>> $texto.2
## DeltaT_Ku
awk '/DeltaT_Ku/' $texto > $texto.15
sed '1d' $texto.15 > $texto.16
# Media DeltaT_Ku.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.16 >> $texto.2
# Desviacion estandar DeltaT_Ku.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.16
>> $texto.2
## PI_Ku
awk '/PI_Ku/' $texto > $texto.17
sed '1d' $texto.17 > $texto.18
# Media PI_Ku.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.18 >> $texto.2
# Desviacion estandar PI_Ku.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.18
>> $texto.2
done

rm *txt.1* *txt.3* *txt.4* *txt.5* *txt.6* *txt.7* *txt.8* *txt.9* *txt.10* *txt.11* *txt.12*
*txt.13* *txt.14* *txt.15* *txt.16* *txt.17* *txt.18*

```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
cd ../../
done
cd ..
done

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *SC*`
do
cd $carpetas/ARCGIS
for txt2 in `ls *txt.2`
do
# el archivo txt.2 con los datos almacenados que se encuentran en columna, se invierte para
que este en fila para poder realizar una union con los demas archivos txt.2
for i in `< $txt2`; do echo -n ${i} " ";done > $txt2.final
done
done
done
done

mkdir TOTAL_AMSRE
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *SC*`
do
cd $carpetas/ARCGIS
# Copio todos los archivos final a la carpeta TOTAL_AMSRE para realizar la union
for txt_final in `ls *final`
do
cp $txt_final ~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/AMSRE/TOTAL_AMSRE
done
done
done
done

cd TOTAL_AMSRE
# Realizo la union de todos los archivos final y los almaceno en el archivo AMSRE_final_total.csv.
Por ultimo abrir este archivo y reemplazar el "." por "," eso hacer manualmente, por ejemplo usar
gedit.
awk ' { print $0 } ' *final > AMSRE_final_total.csv
cd ..
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
#!/bin/bash
#PROCESAMIENTO DE DATOS AMSR2.
## hacer un hipervínculo del archivo shp del area de estudio a cada carpeta para que se pueda
realizar el clip de los datos en el proximo paso.

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *sc*`
do
cd $carpetas
ln -s ~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/AMSR2/shp_area_estudio/*area_estudio*
~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/AMSR2/$carp/$carpetas
cd ..
done
cd ..
done
## Se procede hacer el clip de los datos de Microondas pasiva con el area de estudio.
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *sc*`
do
cd $carpetas
for archivos in `ls AMSR*.shp`
do
ogr2ogr -clipsrc area_estudio_zona_total_pr.shp c_$archivos $archivos
done
cd ..
done
cd ..
done
## convertir un archivo shp a txt.
## ogrinfo -al file1.shp >> file1.txt
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *sc*`
do
cd $carpetas
for archivos_clip in `ls c_AMSR*.shp`
do
ogrinfo -al $archivos_clip > $archivos_clip.txt
done
cd ..
done
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
cd ..
done
## con awk, copiar el nombre, fecha y calcular las estadísticas de los diferentes Delta y PI.
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *sc*`
do
cd $carpetas
for texto in `ls c_*.txt`
do
awk '/name/' $texto > $texto.1
awk '{ print(substr($3,3)) }' $texto.1 > $texto.2
awk '{ print(substr($3,14,8)) }' $texto.1 >> $texto.2
## DTc.
awk '/DTc/|/tDTc/' $texto > $texto.3
## sed '1d' $texto.3 para borrar la primera fila del archivo $texto.3 y poder calcular la media
y la desviación estándar, el mismo procedimiento es para el resto de archivos.
sed '1d' $texto.3 > $texto.4
# Media DTc.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.4 >> $texto.2
# Desviación estándar Dtc.
# Nota: en el caso de que al procesar el signo elevado (**) cause problemas reemplazar por
el signo ^
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.4 >>
$texto.2
## PIc
awk '/PIc/|/tPIc/' $texto > $texto.5
sed '1d' $texto.5 > $texto.6
# Media PIc.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.6 >> $texto.2
# Desviación estándar PIc.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.6 >>
$texto.2
## DTx
awk '/DTx/|/tDTx/' $texto > $texto.7
sed '1d' $texto.7 > $texto.8
# Media DTx.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.8 >> $texto.2
# Desviación estándar DTx.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.8 >>
$texto.2
## PIx
awk '/PIx/|/tPIx/' $texto > $texto.9
sed '1d' $texto.9 > $texto.10
# Media PIx.
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.10 >> $texto.2
# Desviacion estandar PIx.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.10
>> $texto.2
## DTka
awk '/DTka/|/tDTKA/' $texto > $texto.11
sed '1d' $texto.11 > $texto.12
# Media DTka.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.12 >> $texto.2
# Desviacion estandar DTka.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.12
>> $texto.2
## PIka
awk '/PIka/|/PIKA/' $texto > $texto.13
sed '1d' $texto.13 > $texto.14
# Media PIka.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.14 >> $texto.2
# Desviacion estandar PIka.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.14
>> $texto.2
## tDTKU
awk '/tDTKU/' $texto > $texto.15
sed '1d' $texto.15 > $texto.16
# Media tDTKU.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.16 >> $texto.2
# Desviacion estandar tDTKU.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.16
>> $texto.2
## PIKU
awk '/PIKU/' $texto > $texto.17
sed '1d' $texto.17 > $texto.18
# Media PIKU.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.18 >> $texto.2
# Desviacion estandar PIKU.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.18
>> $texto.2
done

rm *txt.1* *txt.3* *txt.4* *txt.5* *txt.6* *txt.7* *txt.8* *txt.9* *txt.10* *txt.11* *txt.12*
*txt.13* *txt.14* *txt.15* *txt.16* *txt.17* *txt.18*
cd ..
done
cd ..
done

for carp in `ls -d *20*`
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *sc*`
do
cd $carpetas
    for txt2 in `ls *txt.2*`
    do
        # el archivo txt.2 con los datos almacenados que se encuentran en columna, se invierte para
        # que este en fila para poder realizar una union con los demas archivos txt.2
        for i in `< $txt2`; do echo -n ${i} " ";done > $txt2.final
    done
done
cd ..
done
cd ..
done

mkdir TOTAL_AMSR2
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for carpetas in `ls -d *sc*`
do
cd $carpetas
    # Copio todos los archivos final a la carpeta TOTAL_AMSR2 para realizar la union
    for txt_final in `ls *final`
    do
cp $txt_final ~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/AMSR2/TOTAL_AMSR2
    done
done
cd ..
done
cd ..
done

cd TOTAL_AMSR2
# Realizo la union de todos los archivos final y los almaceno en el archivo AMSR2_final_total.csv.
# Por ultimo abrir este archivo y reemplazar el "." por "," eso hacer manualmente, por ejemplo usar
# gedit.
awk ' { print $0 } ' *final* > AMSR2_final_total.csv
cd ..
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
#!/bin/bash
#PROCESAMIENTO DE DATOS SMOS
## hacer un hipervínculo del archivo shp del area de estudio a cada carpeta para que se pueda
realizar el clip de los datos en el proximo paso.

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
    ln -s ~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/SMOS/shp_area_estudio/*area_estudio*
~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/SMOS/$carp/$carpetas
cd ..
done

## Se procede hacer el clip de los datos de Microondas pasiva con el area de estudio.

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
    for archivos in `ls *SM*.shp`
    do
ogr2ogr -clipsrc area_estudio_zona_total_pr.shp c_$archivos $archivos
    done
cd ..
done

## convertir un archivo shp a txt.
## ogrinfo -al file1.shp >> file1.txt

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
    for archivos_clip in `ls c_SM*.shp`
    do
ogrinfo -al $archivos_clip > $archivos_clip.txt
    done
cd ..
done

## con awk, copiar el nombre, fecha y calcular las estadisticas de los diferentes Delta y PI.

for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
    for texto in `ls c_*.txt`
    do
awk '/name/' $texto > $texto.1
    done
done
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
awk '{ print(substr($3,3)) }' $texto.1 > $texto.2
awk '{ print(substr($3,6,8)) }' $texto.1 >> $texto.2
## DT.
awk '/DT/' $texto > $texto.3
```

sed '1d' \$texto.3 para borrar la primera fila del archivo \$texto.3 y poder calcular la media y la desviacion estandar, el mismo procedimiento es para el resto de archivos.

```
sed '1d' $texto.3 > $texto.4
# Media DT.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.4 >> $texto.2
# Desviacion estandar DT.
# Nota: en el caso de que al procesar el signo elevado (**) cause problemas reemplazar por
el signo ^
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.4 >>
$texto.2
## PI
awk '/PI/' $texto > $texto.5
sed '1d' $texto.5 > $texto.6
# Media PI.
awk '{ SUM+=$4 } END { print SUM/NR}' $texto.6 >> $texto.2
# Desviacion estandar PI.
awk '{sum+=$4; sumsq+=$4*$4} END {print sqrt(sumsq/NR - (sum/NR)**2)}' $texto.6 >>
$texto.2
done
rm *txt.1* *txt.3* *txt.4* *txt.5* *txt.6*
cd ..
done
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
for txt2 in `ls *txt.2*`
do
# el archivo txt.2 con los datos almacenados que se encuentran en columna, se invierte para
que este en fila para poder realizar una union con los demas archivos txt.2
for i in `< $txt2`; do echo -n ${i} " ";done > $txt2.final
done
cd ..
done

mkdir TOTAL_SMOS
for carp in `ls -d *20*`
do
cd $carp
# Copio todos los archivos final a la carpeta TOTAL_SMOS para realizar la union
for txt_final in `ls *final`
```

ANEXO E. Código de los programa para procesar datos de Microondas Pasivas.

```
do
cp $txt_final ~/PABLO/TESIS_PM/zona_total/SMOS/TOTAL_SMOS
done
cd ..
done
cd TOTAL_SMOS
# Realizo la union de todos los archivos final y los almaceno en el archivo SMOS_final_total.csv.
# Por ultimo abrir este archivo y reemplazar el "." por "," eso hacer manualmente, por ejemplo usar
# gedit.
awk ' { print $0 } ' *final > SMOS_final_total.csv
cd ..
```

ANEXO F. Niveles de confianza versus número equivalente de looks.

ANEXO F. Niveles de confianza versus número equivalente de looks.

Tabla 55. Niveles de confianza versus número equivalente de looks. Fuente: (Laur *et al.*, 2004)

dB 0.5	dB 1.0	dB 1.5	dB 2.0	dB 2.5	dB 3.0	dB 3.5	dB 4.0	dB 4.5	dB 5.0	dB 5.5	dB 6.0	: Error-dB
Nivel de confianza, %												ENL:
8	16	24	32	40	47	53	59	64	68	72	75	1
12	24	35	46	56	64	71	77	81	85	88	90	2
15	30	43	55	66	74	81	86	89	92	94	95	3
17	34	49	62	73	81	87	91	93	95	97	98	4
19	38	54	68	78	86	90	94	96	97	98	98	5
26	50	59	82	90	95	97	98	99	99	99	99	9
28	53	71	84	92	96	98	99	99	99	99	99	10
34	62	81	92	97	99	99	99	99	99	99	99	15
39	69	87	96	99	99	99	99	99	99	99	99	20
59	89	98	99	99	99	99	99	99	99	99	99	50
75	97	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	100
84	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	150
89	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	200
93	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	250

ANEXO G. Código de los comandos en el programa R para obtener las estadísticas para validar los datos de microondas pasivas.

ANEXO G. Código de los comandos en el programa R para obtener las estadísticas para validar los datos de microondas pasivas.

NOTA: Se indica los comandos de procesamiento para la zona Total con valores de *ff* a partir de *PIf* constante, para el resto de zonas sirve el mismo código cambiando los datos de entrada.

```
#Zona Total para calcular ff a partir de PIf constante.
# Ingreso de los valores de ff a R para la zona Total ff con PIf constante.
ff_INA<-c(0.247,0.375,0.499,0.503,0.482,0.172,0.171,0.280,0.379)
ff_Asc_C<-c(0.007,0.152,0.373,0.389,0.317,-0.008,-0.100,1.000,1.000)
ff_Asc_X<-c(0.032,0.196,0.410,0.375,0.307,0.013,-0.100,1.000,1.000)
ff_Asc_Ku<-c(0.103,0.245,0.561,0.554,0.492,0.080,-0.100,0.654,0.684)
ff_Asc_Ka<-c(0.173,0.425,0.971,0.961,0.865,0.134,-0.100,0.612,0.631)
ff_Desc_C<-c(0.0002,0.113,0.225,0.201,0.135,-0.049,-0.100,0.346,0.368)
ff_Desc_X<-c(0.053,0.190,0.315,0.295,0.233,0.016,-0.100,0.615,0.702)
ff_Desc_Ku<-c(0.068,0.148,0.262,0.281,0.238,0.060,-0.100,0.679,0.798)
ff_Desc_Ka<-c(0.085,0.157,0.265,0.286,0.256,0.083,-0.100,0.961,1.000)

#Generación de las regresiones lineales de los diferentes ff de las bandas para poder calcular el test de normalidad.
fit_ff_INA_ff_Asc_C<-lm(ff_INA~ff_Asc_C)
fit_ff_INA_ff_Asc_X<-lm(ff_INA~ff_Asc_X)
fit_ff_INA_ff_Asc_Ku<-lm(ff_INA~ff_Asc_Ku)
fit_ff_INA_ff_Asc_Ka<-lm(ff_INA~ff_Asc_Ka)
fit_ff_INA_ff_Desc_C<-lm(ff_INA~ff_Desc_C)
fit_ff_INA_ff_Desc_X<-lm(ff_INA~ff_Desc_X)
fit_ff_INA_ff_Desc_Ku<-lm(ff_INA~ff_Desc_Ku)
fit_ff_INA_ff_Desc_Ka<-lm(ff_INA~ff_Desc_Ka)

#Pruebas de test de normalidad de los datos aplicando Shapiro-Wilkss
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Asc_C))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Asc_X))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Asc_Ku))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Asc_Ka))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Desc_C))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Desc_X))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Desc_Ku))
Shapiro.test(rstandard(fit_ff_INA_ff_Desc_Ka))
```

ANEXO G. Código de los comandos en el programa R para obtener las estadísticas para validar los datos de microondas pasivas.

#Ploteo de diagramas de dispersión

```
plot(ff_Asc_C,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff ascendente C", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="red")
```

```
text(1,1,"r = 0.349",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Asc_X,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff ascendente X", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="green4")
```

```
text(1,1,"r = 0.349",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Asc_Ku,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff ascendente Ku", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="pink")
```

```
text(1,1,"r = 0.723",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Asc_Ka,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff ascendente Ka", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="green1")
```

```
text(1,1,"r = 0.939",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Desc_C,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff descendente C", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="royalblue")
```

```
text(1,1,"r = 0.585",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Desc_X,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff descendente X", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="lightblue1")
```

```
text(1,1,"r = 0.441",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Desc_Ku,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff descendente Ku", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="orange")
```

```
text(1,1,"r = 0.333",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

```
plot(ff_Desc_Ka,ff_INA,main ="Gráfico de dispersión de ff",ylab="ff INA",xlab="ff descendente Ka", xlim= c(-0,1),ylim=c(0,1),cex=1.5,cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, type="p",pch=19,col="lightcoral")
```

```
text(1,1,"r = 0.220",font=4,adj=2, cex = 1.5, col="blue")
```

#cex define el tamaño del punto; cex.main define tamaño del título; cex.axis define el tamaño del texto de los ejes; cex.lab define el tamaño de las leyendas de los ejes

#Ploteo de gráfico de cajas.

```
boxplot(ff_INA,ff_Asc_C,ff_Asc_X,ff_Asc_Ku,ff_Asc_Ka,ff_Desc_C,ff_Desc_X,ff_Desc_Ku,ff_Desc_Ka,xlab="Grupos de fracción de área inundada",ylab="Valores de ff",cex=2, cex.main=2,cex.lab=1.5,cex.axis=1.3,main="Comparación entre los valores de ff del INA y los valores de ff \n de las bandas de AMSRE Ascendentes y Descendentes",names=c("ff INA","ff Asc C","ff Asc X","ff Asc Ku","ff Asc Ka","ff Desc C","ff Desc X","ff Desc Ku","ff Desc Ka"),col=c("purple","red","green4","pink","green1","royalblue","lightblue1","orange","lightcoral"))
```

#Calcular los estadísticos de la correlación de Pearson

```
cor.test(ff_INA,ff_Asc_C)
```

```
cor.test(ff_INA,ff_Asc_X)
```

```
cor.test(ff_INA,ff_Asc_Ku)
```

```
cor.test(ff_INA,ff_Asc_Ka)
```

ANEXO G. Código de los comandos en el programa R para obtener las estadísticas para validar los datos de microondas pasivas.

```
cor.test(ff_INA,ff_Desc_C)
cor.test(ff_INA,ff_Desc_X)
cor.test(ff_INA,ff_Desc_Ku)
cor.test(ff_INA,ff_Desc_Ka)
```

#Cuando los datos no satisfacen el supuesto de normalidad se utiliza la correlación de Spearman

```
cor.test(ff_INA,ff_Asc_Ka, method = "spearman")
cor.test(ff_INA,ff_Desc_Ka, method = "spearman")
```