



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA

Estimación de la evolución de humedad en la cubierta del suelo, mediante el índice de sequía de Keetch-Byram e imágenes de RADARSAT-2 en la zona norte de Calakmul, Campeche

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

BRENDA LIZETH ISLAS TREJO

Director de tesis
Dr. Stéphane Robert André Couturier
Instituto de Geografía UNAM

Ciudad Universitaria, Cd Mx., marzo, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa, recordarme cada día que las cosas más difíciles son las que se disfrutan mejor y como dijo el poeta estadounidense William Faulkner “La sabiduría suprema es tener sueños bastante grandes para no perderlos de vista mientras se persiguen”.

A mis padres José Ramón Islas Hernández y María Eugenia Trejo Corona por ser mi ejemplo de fortaleza, honestidad y perseverancia. Gracias por estar en los momentos más difíciles en mi vida, nunca tendré palabras suficientes para expresarles mi admiración y agradecimiento por no permitir que las adversidades mermaran las ganas de salir adelante. Ustedes son mis dos grandes pilares en la vida y mi máximo ejemplo a seguir.

A mis hermanas Nely y Kika, por apoyarme en este camino tan difícil, dándome amor, paciencia, alegrías y su motivación diaria a terminar este documento, son al igual que mis padres mi gran motor de vida y forman parte de mis grandes amores.

A mi compañero de vida Rene Morales Villafaña que se ha convertido también en mi más grande fuerza y motor para seguir adelante. Ha sido una pieza fundamental e indispensable en la culminación de este proyecto, por siempre estar conmigo en los momentos buenos, malos y peores sin pedir ni esperar nada a cambio. Gracias por tu amor, comprensión, ternura y por ser mi conciencia recordándome que tengo que terminar esta etapa. Te amo y sin tu apoyo no lo hubiera logrado

A mi nueva familia Doña Mari Villafaña, Don Ignacio Morales, Beto, Perla, Oma y Maly Morales Villafaña, por apoyarme con sus palabras y consejos para terminar esta tesis. Son personas que admiro mucho por su inteligencia y ganas de salir adelante.

A mis amigos Kary, Kenia, Erika y Víctor por todo su cariño, consejos y regaños. Son personas realmente admirables y que siempre luchan por ser una versión mejor de ellos mismos e impulsan a los que los rodean por serlo también.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Geografía de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo intelectual y económico para realizar esta Maestría en Geografía.

A mi asesor de tesis el Dr. Stéphane Robert André Couturier por su dirección y apoyo económico en las salidas a campo vinculadas al proyecto PAPIIT IN302417, titulado: "Seguridad alimentaria versus preservación ambiental: diseño de una plataforma cartográfica nacional para analizar su compatibilidad de forma multiescalar"

Al Dr. Alejandro Monsiváis Huertero (ESIME Ticomán- IPN) por brindarme su amistad y sus conocimientos. Gracias por darme la oportunidad de ser parte de sus alumnos ya que sin sus cátedras no hubiera logrado comprender la funcionalidad del radar.

Al M. en C. Antonio Gonzáles Hernández (INIFAP) por su invaluable amistad y sus conocimientos, porque sin su apoyo el procesamiento de las imágenes de radar no hubiera sido tan rápido.

Al Dr. Martín Enrique Romero Sánchez (INIFAP) por su amistad y sus excelentes comentarios para mejorar este documento.

A la Dra. Leticia Gómez Mendoza (FFy L) por sus excelentes comentarios en la tesis, especialmente en la parte climatológica.

Al Dr. Jorge Lira Chávez (Instituto de Geofísica) por sus excelentes cátedras y apoyo en la comprensión y manejo de las imágenes de radar. Gracias por brindarme un espacio en su cubículo y sus conocimientos sin esperar nada a cambio.

Al Dr. José Carlos Jiménez Escalona, Juan Carlos, Mauricio Galeana y a Licho por todo su apoyo en las brigadas de campo.

A los habitantes de la zona norte de Calakmul y a la Reserva de la Biosfera de Calakmul, por permitirme registrar las diferentes coberturas de vegetación.

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 PROBLEMÁTICA	7
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.3 HIPÓTESIS	9
1.4 ESTADO DEL ARTE	9
CAPÍTULO 2.....	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	35
2.2 METODOLOGÍA.....	39
2.2.1 CLIMA.....	39
2.2.2 ESTIMACIÓN DE ÍNDICE DE SEQUÍA DE KEETCH BYRAM (KBDI) MODIFICADO PARA VEGETACIÓN TROPICAL	40
2.2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO.....	41
2.2.4 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES RADARSAT-2 PARA LA ADQUISICIÓN DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN	43
2.2.5 IDENTIFICACIÓN DE LA SEQUÍA CON EL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN (SIGMA CERO) 45	
2.2.6 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	45
CAPÍTULO 3.....	46
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1. CLIMA.....	47
3.2 ÍNDICE DIARIO DE SEQUÍA (KBD)	67
3.3 Coeficiente de retrodispersión VS índice diario de sequía de Keetch-Byram	73
CAPITULO 4.....	132
CONCLUSIONES.....	132
PROPUESTAS.....	133
BIBLIOGRAFÍA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 1. Esquema de una onda electromagnética (Chuvieco, 2008).....	21
Figura 2. Espectro electromagnético (Thomas y Paris, 2008).....	22
Figura 3. RADARSAT-2 (Canadian Space Agency, 2017).....	25
Figura 4. Interacción de la señal de radar con los objetos de estudio (Kornelsen y Coulibaly, 2013).....	26
Figura 5. Ocho ventanas para el cálculo del filtrado. Imagen tomada de Lee y Pottier, 2009.....	33
Figura 6. Área de estudio. Fuente de elaboración propia.....	35
Figura 7. Uso de suelo y vegetación.....	41
Figura 8. Zona norte de Calakmul, Campeche.....	46
Figura 9. Anomalía de temperatura máxima diaria en Zoh Laguna, 2010-2011.....	50
Figura 10. Anomalía de precipitación diaria de Zoh -Laguna, 2010-2011.....	53
Figura 11. Anomalía de temperatura máxima diaria en Xpujil, 2010-2011.....	56
Figura 12. Anomalía de precipitación diaria de Xpujil, 2010-2011.....	59
Figura 13. Anomalía de temperatura en Nicolás Bravo, 2010-2011.....	63
Figura 14. Anomalía de precipitación diaria en Nicolás Bravo, 2010-2011.....	66
Figura 15. Climograma mensual de Zoh – Laguna, 2010-2013.....	67
Figura 16. Climograma mensual de Xpujil, 2010-2013.....	68
Figura 17. Índice Diario de Sequía de Keetch Byram, 2010-2011.....	69
Figura 18. Índice Diario de Sequía de Keetch Byram, 2012-2013.....	70
Figura 19. Climograma mensual de Nicolás Bravo, 2014.....	71
Figura 20. Climograma mensual de Calakmul II, 2014.....	72
Figura 21. Índice Diario de Sequía Keetch Byram, 2014.....	72
Figura 22. Zona norte de Calakmul con polarización HH.....	84
Figura 23. Evaluación visual con definición de bordes, corte noroeste de la zona de estudio.....	85
Figura 24. Evaluación visual (Brillo) zona norte de la zona de estudio.....	86
Figura 25. Evaluación visual (contraste) zona norte de la zona de estudio.....	87
Figura 26. Evaluación visual (diferencia) zona norte de la zona de estudio.....	88
Figura 27. Histograma con polarización HH.....	90
Figura 28. Histograma de imagen original e imágenes filtradas en polarización HH.....	91
Figura 29. Perfiles de imagen original VS imágenes filtradas.....	92
Figura 30 Selva baja al noroeste de la zona de estudio. Nueva Vida 2.....	97
Figura 31. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión.....	99
Figura 32. Evolución visual del coeficiente de retrodispersión en polarización VV para los años 2010, 2013 y 2014.....	100
Figura 33. Evolución visual del coeficiente de retrodispersión en polarización VV para 2014.....	101
Figura 34. Sitio Nueva vida 1. a) cara este del polígono. b) cara sur del polígono.....	102
Figura 35 Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización HV.....	104

Figura 36 Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización HV.....	105
Figura 37 Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización HV	106
Figura 38. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VH	107
Figura 39. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VH	108
Figura 40. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización VH	109
Figura 41. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización HH.....	110
Figura 42. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización HH	111
Figura 43. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización HH	112
Figura 44. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VV	113
Figura 45. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VV	114
Figura 46. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización VV	115
Figura 47. Potrero Nueva vida 6. a) Zona Sureste, b) Zona noreste	116
Figura 48. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VH	118
Figura 49. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VH	119
Figura 50. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el periodo 2010-2014 en polarización VH.....	120
Figura 51. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización HV	121
Figura 52. Coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización HV	122
Figura 53. Coeficiente de retrodispersión para el año 2014 en polarización HV	123
Figura 54. Potrero Nueva Vida 4, a) zona este del potrero y b) zona oeste del potrero...	124
Figura 55. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VH.....	125
Figura 56. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VH	126
Figura 57. Evolución del coeficiente de retrodispersión para el año 2014 en polarización VH.....	127

Cuadro 1. Variables de estaciones meteorológicas	19
Cuadro 2. Nomenclatura de bandas para la región espectral de las microondas (Lillesand, et al., 2004).....	23
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas.....	40
Cuadro 4. Sitios de muestreo.....	42
Tabla 5. Características de las imágenes de RADARSAT-2	43
Cuadro 6. Normales climatológicas de Zoh Laguna, 1951-2010	47
Cuadro 7. Anomalía de temperatura, Zoh -Laguna, 2010	48
Cuadro 8 Anomalía de temperatura, Zoh- Laguna, 2011	49
Cuadro 9. Anomalía de precipitación, Zoh Laguna, 2010.....	51
Cuadro 10. Anomalía de precipitación de Zoh-Laguna, 2011.....	52
Cuadro 11. Anomalías de temperatura máxima para Xpujil, 2010	54
Cuadro 12. Anomalía de temperatura máxima para Xpujil, 2011.	55
Cuadro 13. Anomalías de precipitación para Xpujil, 2010	57
Cuadro 14. Anomalías de precipitación para Xpujil, 2011.	58
Cuadro 15. Normales climatológicas para Nicolás Bravo, 1981-2010	60
Cuadro 16. Anomalías de temperatura en Nicolás Bravo, 2010.....	61
Cuadro 17. Anomalías de temperatura máxima en Nicolás Bravo, 2011	62
Cuadro 18. Anomalías de precipitación en Nicolás Bravo, 2010	64
Cuadro 19. Anomalía de precipitación en Nicolás Bravo, 2011	65
Cuadro 20. Evaluación general de los filtros	96
Cuadro 21. Coeficiente de correlación de Pearson	97
Cuadro 22. Sigma cero vs KBDI	98
Cuadro 23. Coeficiente de correlación vs KBDI HV	104
Cuadro 24. Coeficiente de retrodispersión en VH vs KBDI	107
Cuadro 25. Coeficiente de retrodispersión en HH vs KBDI	110
Cuadro 26. Coeficiente de retrodispersión vs KBDI	113
Cuadro 27. Coeficiente de retrodispersión vs KBDI	118
Cuadro 28. Coeficiente de retrodispersión en HV vs KBDI.....	121
Cuadro 29. Coeficiente de retrodispersión vs KBDI	125

RESUMEN

La Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC), Campeche se destaca por ser uno de los principales pulmones del mundo y tener el área forestal más extensa y variada del trópico mexicano. La vegetación arbórea es de tipo subcaducifolia, se desarrolla dentro de las condiciones más secas del clima húmedo, presenta una gran vulnerabilidad a la presencia de incendios forestales y a un déficit mayor de la precipitación, razón por la cual en este trabajo se estudió la susceptibilidad de la vegetación a la sequía meteorológica como precursora de un incendio forestal a fin de establecer un sistema de alerta temprana para incendios forestales o bien un atlas de riesgo para sequía a nivel local. Para ello se construyó el Índice Diario de Sequía de Keetch Byram (KBDI), con ayuda de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, y el coeficiente de retrodispersión (σ^0) de 12 imágenes de RADARSAT-2 para el año 2010, 2013 y 2014. Teniendo esta información se buscó alguna correlación entre el KBDI y la retrodispersión en seis tipos de suelo (agricultura, acahual, pastizal, selva baja, selva mediana y cuerpos de agua). Se aplicó una prueba estadística de Pearson y los resultados arrojaron correlaciones de hasta 0.77 correspondientes a la selva baja en polarización de tipo VV, seguido por una correlación de 0.72, 0.64 y 0.63 en polarizaciones HV, VH, VV y HH respectivamente en una zona agrícola dominada por cultivo de maíz y finalmente dos sitios con uso de suelo de potrero; el primero con una correlación de 0.71 (VH) y 0.69 (HV), y el segundo con una correlación de 0.60 en polarización VH, todos estos sitios pertenecen a la localidad de “Nueva Vida” ubicada al noroeste del área de estudio.

Estas correlaciones indicaron la detección de estrés hídrico en la vegetación, así como también se demostró que las imágenes de RADARSAT-2 son un insumo viable para detectar susceptibilidad a la sequía en selvas donde la vegetación es más homogénea (potreros y parcelas agrícolas), es decir, donde el dosel arbóreo no es abundante y no está tan cerrado.

En las zonas de selva y acahuales donde no se obtuvo correlaciones fue probablemente porque la señal de radar no penetra lo suficiente. En los potreros y las zonas agrícolas donde las correlaciones fueron bajas, pudo haber sido porque el contenido de humedad en zonas aledañas de riego ha evitado posiblemente una situación de estrés hídrico en la vegetación.

Esta investigación basada en datos meteorológicos y en la respuesta del radar al estrés hídrico en el dosel arbóreo, intenta ser un preliminar para investigar la incidencia de la sequía meteorológica como precursor de incendios forestales en zonas con vegetación tropical.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el desarrollo y “éxito” de la raza humana han traído como consecuencia un incremento en la demanda de los recursos naturales, y un aumento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como son el metano, duración aproximada en la atmosfera de 15 años; óxido nitroso (120 años) y el dióxido de carbono (150 años) (Barros, 2005). Este incremento en las emisiones de dióxido de carbono ha sido en primera instancia por el uso de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo, es decir, el hombre convirtió las selvas naturales en selvas de asfalto, cambió los grandes bosques por cultivos de maíz, frijol, café, entre otros. Esta modificación en los biomas ha traído como consecuencia el aumento en la temperatura superficial del mar de al menos 6°C y de la superficie terrestre de 0.72 a 0.85 °C durante los periodos 1850-1900 y 2003-2012 (IPCC, 2007), así como la ampliación del cinturón tropical, la disminución del hielo marino en el Ártico en el periodo 1979-2012 y el pronóstico del decremento no uniforme en la precipitación media a nivel global, ya que es probable que en las regiones situadas a altas latitudes registren un mayor volumen de precipitación debido a la gran capacidad de almacenamiento de agua en una troposfera más cálida; mientras que en regiones áridas y semiáridas de latitud media y subtropicales, el nivel de precipitación sea menor (Stocker, *et al.*, 2016).

En este sentido y al hablar sobre un déficit de la precipitación con respecto a lo normal, se hace referencia a la definición general del fenómeno hidrometeorológico “Sequía” (UNESCO, 2010).

El estudio de las sequías en México no es nuevo, pues García, (1974) propuso que la sequía que probablemente empezó en los años 700 o 750 d.C fue una de las principales causas de la caída de la cultura teotihuacana. Florescano y

Swan, 1995 citados en Hernández, *et al.*, (2007) plantean una sequía muy importante para todo México a lo largo de tres siglos (1521 a 1821), en donde resaltan que la variabilidad en el clima mas intensa fue en los años de 1807 a 1810, pues hubo escases de alimentos y se mezclo con eventos politicos importantes en 1810. Durante el periodo de 1822-1823 y 1834-1835 se registraron sequías muy severas para la península de Yucatán provocando alta mortalidad y migración (García, 1993). Por su parte Garcia *et al.* (2002) reportan que la sequía de 1998 dejo grandes secuelas para todo el país en los siguientes dos años, como fue la remoción de grandes superficies de vegetación debido a la incidencia de 14 mil incendios que afectaron unas 530000 ha, 21 % de las cuales correspondieron a zonas forestales, y el restante 79 % a zonas cubiertas de matorrales y pastos. En estos años también se incrementó la frecuencia de ondas de calor, dando como resultado temperaturas máximas históricas.

La incidencia y severidad de la sequía meteorológica en zonas tropicales de México influye directamente en la conservación de los ecosistemas por lo que es importante desarrollar estrategias de monitoreo que deriven en la implementación de un sistema de alerta temprana para incendios o un atlas de riesgo para sequía. Este trabajo se centró en la detección de la susceptibilidad de la vegetación a la sequía meteorológica como precursora de la propagación de un incendio forestal. Para ello se utilizó el índice de sequía de Keetch Byram (KBDI) el cual fue creado por el servicio forestal de los Estados Unidos y modificado por Hoffman para zonas Tropicales, mismo que suele indicar la incidencia de la sequía en la capa superficial de suelo y humus, siendo este factor como un buen indicador de la probabilidad de propagación de un incendio forestal. Este índice a diferencia de otros indica el nivel de sequía diaria de manera local en regiones tropicales. Este índice se intentó correlacionar con el coeficiente de retrodispersión obtenido por las imágenes de RADARSAT-2 en diferentes polarizaciones (HH, V, HV y VH).

Capítulo 1

En este capítulo, se hace una reseña de cómo influye la cobertura vegetal en el incremento en la temperatura del suelo, una breve reseña de lo que son las sequías y como han influido en el país. Por último se menciona la problemática, objetivos e hipótesis que hicieron posible esta investigación.

Capítulo 2

En esta sección, se aborda el marco teórico. En él se explica a detalle todos los temas como son: el clima, las sequías, el KBDI, la percepción remota (PR), las imágenes de Radar y el coeficiente de retrodispersión. Todo esto a manera de dar un sustento bibliográfico y que sea la parte medular de esta investigación.

Por otro lado, se detalla la metodología empleada para esta investigación. Esta metodología se divide en dos etapas: la primera consta de realizar un análisis estadístico de las bases de datos obtenidas de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Zoh Laguna, Xpujil, Nicolás Bravo y Calakmul II) y la elaboración del KBDI con ayuda del software Excel ® 2003. La segunda etapa consistió en elaborar la cartografía de los sitios de estudio con puntos obtenidos en campo, con ayuda del software ArcGis V.10.3. Posteriormente se evaluó el filtrado de las imágenes de radar y se procesaron estas mismas, para obtener el coeficiente de retrodispersión de cada imagen en las diferentes polarizaciones (HH, VV, HV y VH).

Con el cálculo del KBDI por día y la obtención del coeficiente de retrodispersión de las imágenes de radar, se aplicó la prueba estadística de Pearson con la finalidad de dar sustento estadístico a los resultados.

Capítulo 3

En este capítulo, se muestran las normales climatológicas, los climogramas y las anomalías diarias de temperatura y precipitación para cada estación meteorológica estudiada, esto con la finalidad de compararlo y dar un sustento más al KBDI que se obtuvo de manera diaria.

Ya con los resultados del KBDI y los coeficientes de retrodispersión de cada imagen, se obtuvieron las siguientes correlaciones: selva baja (0.77) en una polarización de tipo VV; agricultura (0.72, 0.64, y 0.63) en las polarizaciones HV, VH, VV y HH respectivamente y en la zona de potrero (0.71, 0.96 y 0.60) con polarizaciones VH, HV y VH respectivamente.

Por último se dividió el KBDI en tres niveles de vulnerabilidad de la vegetación al estrés hídrico: nivel bajo (0 a 1000) medio (1001 a 1500) y alto (1501 a 2000), en estos niveles se catalogaron las fechas de las imágenes en donde se obtuvo correlación y los resultados fueron los siguientes: Nivel alto (febrero, marzo, abril y agosto), nivel medio (mayo, julio y septiembre) y nivel bajo (octubre y diciembre). Estos resultados concuerdan con los propuestos por Márdero *et al.*, (2012) en donde mencionan que las sequías locales en la Península de Yucatán se presentan en dos periodos, el primero que es la sequía pre-estival que va de enero a abril y la sequía intra estival o canícula que se presenta en los meses de julio y agosto.

Capítulo 4

En esta sección se abordan las conclusiones con base en los objetivos y la hipótesis propuesta en el primer capítulo, así como también se dan algunas propuestas para poder retomar este trabajo con mayores insumos e ideas.

1.1 PROBLEMÁTICA

La vegetación juega un papel muy importante en los procesos biogeoquímicos y en los flujos entre la superficie terrestre y la atmósfera (Martínez y Galindo, 2002). En este sentido, México ha instaurado como parte de las medidas de mitigación al deterioro de los ecosistemas diversos mecanismos como son las Áreas Naturales Protegidas (ANP), dentro de las cuales se encuentra la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC) (Mosqueda, 2013), misma que destaca por tener cerca del 7% del total de la riqueza biológica; ya que junto con el Petén Guatemalteco y las selvas de Quintana Roo, Belice y Chiapas, constituyen uno de los macizos forestales más importantes de Mesoamérica considerados como uno de los pulmones más importantes del mundo con más de 30,000 Km² (García y Pat, 2001; Reyna *et al.*, 2010).

La RBC fue decretada años después de su colonización cuando ya había ocurrido una disminución considerable en la vegetación y cuerpos de agua (Reyna *et al.*, 2010), síntomas alarmantes que han motivado a diversas instituciones a colaborar con múltiples investigaciones para la elaboración de planes de manejo, estudios sobre la afectación de la sequía en la vegetación endémica y actividades productivas (Gil *et al.*, 1996).

La RBC también se encuentra catalogada como zona de conflicto ya que presenta gran diversidad de procesos sociales y ambientales entre los que destacan el cambio del uso de suelo y la disminución de la humedad del mismo, debido al establecimiento de aserraderos, a la expansión de la frontera agropecuaria y a la creciente presión antrópica ejercida por grupos de campesinos procedentes de diversos estados de la república (García y Pat, 2001; Pat y Ku, 2000). La región de la selva Maya que incluye a la RBC, se ubica en una zona de gran variabilidad climática en donde se pueden presentar tanto huracanes como sequías (Martínez y Galindo, 2002). La sequía es considerada actualmente como una de las mayores amenazas para la humanidad, pues ha sido condicionante de grandes incendios forestales que han impactado de manera considerable en la

cobertura vegetal a nivel nacional (CONAFOR, 2017). Un sistema de alerta temprana basados en imágenes satelitales podría prevenir desastres tales como incendios forestales; sin embargo, la región de la selva maya es difícil de monitorear con imágenes satelitales ópticas ya que las nubes y el denso dosel arbóreo impiden que la señal penetre debajo de ellas (Chuvienco, 2008). Sin embargo las imágenes del radar polarimétrico permiten aumentar el espacio de observación, además de relacionar la amplitud y fase de la señal reflejada con las propiedades electromagnéticas de los objetos y sus entornos a estudiar (Ferro-Famil y Pottier, 2014).

1.2 OBJETIVO GENERAL

Identificar la incidencia de la sequía meteorológica en las diferentes coberturas vegetales mediante las imágenes de RADARSAT-2 y el Índice de Sequía modificado de Keetch-Byram (KBDI) a fin de investigar la viabilidad de las imágenes como insumo a un sistema de alerta temprana de incendios.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la sequía meteorológica como condicionante de la propagación de un incendio forestal mediante el Índice de Sequía de Keetch Byram.
- Analizar la evolución del coeficiente de retrodispersión de un conjunto de cubiertas del suelo al norte de Calakmul mediante las imágenes de RADARSAT-2 para los años 2010, 2013 y 2014.
- Analizar la correlación entre la retrodispersión radar y el índice de sequía meteorológica, y la presencia de estrés hídrico en cada tipo de vegetación.

1.3 HIPÓTESIS

- Debido al uso histórico de los recursos naturales de la selva, la colonización y fragmentación creciente en la parte norte de la zona de estudio, se ha modificado la disponibilidad del recurso hídrico en el suelo y en la vegetación, por lo tanto se deduce que existe presencia de estrés hídrico en la vegetación al norte de la RBC y que este puede llegar a ser un condicionante para la propagación de un incendio forestales.
- Las imágenes de RADARSAT-2, banda C (5.5 cm), son una opción adecuada para la detección del estrés hídrico en diferentes tipos de suelo.
- Las imágenes de RADARSAT-2 permiten interpretar y clasificar zonas con gran nubosidad, particularmente áreas de la Reserva de la Biosfera de Calakmul.

1.4 ESTADO DEL ARTE

Sequías

Se define como el déficit de precipitación con respecto a lo normal para cada región y cuando se extiende a través de una estación o más tiempo es insuficiente para abastecer las necesidades humanas y del ambiente (UNESCO, 2010). Las sequías que se han presentado de una forma más constante y cada vez más extrema especialmente en los trópicos y subtrópicos. A partir de la década de 1970, se ha observado un aumento en la desecación vinculado a las altas temperaturas y la disminución de precipitación (IPCC, 2007; Allwood, 2014)

Márdero *et al.* (2012) analizaron la variabilidad espacial y temporal de la precipitación al sur de la península de Yucatán en un periodo de 1953 a 2007. Los resultados mostraron una considerable variabilidad espacial y temporal con

mayores valores de precipitación y anomalías en la costa y que van disminuyendo hacia el Centro-Oeste de la zona de estudio.

CONAGUA (2017b) reportó sequedad anormal (D0) en la Península de Yucatán en enero del 2013.

Hernández, *et al.*, (2000) mencionan a Quintana Roo y Campeche como dos estados cuya vulnerabilidad ante la sequía es inminente ya que más del 75% del territorio se ve afectado. La incidencia de este fenómeno meteorológico hace que la península se divida en dos regiones, la primera que se encuentra al norte con presencia de sequía severa y al sur con sequía fuerte.

En el 2003, Calakmul presentó una sequía severa que puso en riesgo la cosecha del ciclo agrícola, la región registró una precipitación de apenas 746 mm, las plagas aumentaron, cultivos como maíz y chile sufrieron mayor depredación (Billie, 2003, citado en Vallejo *et al.*, 2011).

El IPCC (2007) menciona que la selva de Calakmul pasó por un periodo oscilante de sequía severa por el déficit de precipitación, este estudio también pronosticó un incremento en la temperatura de la selva de entre 2 y 3°C y un déficit de precipitación anual de entre 10 y 20% para el año 2090.

Por su parte, Márdero *et al.* (2012) observaron que para la región que se encuentra cerca de la estación climatológica Chachobben la disminución de la precipitación alcanzó los 12 mm anuales, mientras que para la estación de Zoh Laguna se encontró un aumento en los años de sequía que van desde leve hasta extrema.

Imágenes SAR

A continuación, se mencionan algunos estudios utilizando el coeficiente de retrodispersión de las imágenes de radar para identificar coberturas vegetales con estrés hídrico.

Couturier *et al.* (2001) examinaron el potencial de las imágenes de radar European Radar Satellite [ERS]-2 [SAR] para monitorear los tipos de vegetación que son propensos al fuego, correlacionando el KBDI con el coeficiente de

retrodispersión (σ^0) de la banda C. Esta correlación resulto ser de 0.7 en donde hay poca vegetación y suelo desnudo, seguido por el Bosque de *Dipterocarpus* con alteración relativamente alta (0.6) y Bosque de *Dipterocarpus* con alteraciones de baja a moderada (0.5).

Podest y Saatchi (2002) demostraron que las imágenes SAR del satélite JERS-1 en banda L y polarización HH son funcionales para monitorear y cartografiar los tipos de cobertura de la selva tropical en la cuenca del Amazonas , principalmente la parte inundada.

Hernández, *et al.*, 2016, presentaron un estudio sobre la validación y calibración de las imágenes del satélite Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) en banda L, de la Agencia Espacial Europea para trabajar en zonas de vegetación heterogénea como lo son las selvas de la región de Calakmul.

Jinsong, *et al.*, (2009) investigaron la relación entre el área foliar (LAI) del arroz y el coeficiente de retrodispersión en polarización vertical/horizontal del radar ENVISAT utilizando cuatro imágenes ASAR de polarización alternante en banda C sobre arrozales, en donde se adoptó un modelo teórico de transferencia radiativa para analizar la relación.

Beriaux *et al.* (2013) estudiaron el crecimiento de los cultivos, mediante la inversión del modelo de nube de agua, WCM por sus siglas en inglés, para la estimación del índice de área foliar con ayuda de los datos SAR en banda C y polarización VV. Estos resultados mostraron que a niveles intermedios de humedad, las contribuciones del suelo y de las plantas a la respuesta SAR son confusas, pues el suelo y la vegetación se confunden en un 21% de contenido de agua. Estos resultados demostraron la capacidad de transferir la calibración del modelo a temporadas después de cultivar

Steven *et al.* (2000) demostraron que las imágenes de Radarsat (banda C) pueden utilizarse para detectar la deshidratación del dosel arboreo de bosques templados en condiciones de estrés hídrico.

Rodríguez (2014) realizó un estudio sobre la humedad del suelo en la zona sur de Calakmul, en donde encontró que el coeficiente de retrodispersión en banda C varía en función de las estaciones del año y del ángulo de incidencia del radar. Con la composición RGB de las componentes de Freeman–Durdén. Además, los autores resaltan el coeficiente de retrodispersión como una herramienta aplicable al monitoreo de la formación de cuerpos de agua y de zonas afectadas por la deforestación de bosques tropicales.

Por su parte, Hernández *et al.* (2016) observaron cambios singnificativos en la vegetación de Calakmul en la estación de secas y lluvias con ayuda de las imágenes de Radarsat-2 (banda C) y estaciones meteorológicas.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Definición de sequía

El IPCC (2013), la define de forma general como el periodo de condiciones anormalmente secas en un tiempo determinado que causan un desequilibrio hidrológico grave.

Según la National Drought Mitigation Center (NDMC) (2017), la define como un fenómeno progresivo de la naturaleza que se origina por un déficit en la precipitación durante un periodo de tiempo considerable y sus efectos varían de acuerdo a cada región.

El término de sequía es relativo y cambiante, es por ello por lo que actualmente se tienen más de 150 definiciones y todas convergen en que es un déficit hidrológico en un tiempo determinado (Whilhite y Glantz, 1985 citado en Valiente, 2001; Ortega, 2013). La sequía es producida por cuatro mecanismos diferentes: sistema océano- atmósfera, anomalías de la temperatura superficial del océano, relaciones tiempo atmosférico- actividad solar y por procesos de origen de los huracanes y sus anomalías (Campos, 2013; Vargas, 2016). Las sequías se diferencian de otros fenómenos naturales en que sus efectos son paulatinos, por lo que es complicado determinar su inicio y término. Ante estas características diversos autores han identificado cuatro grandes grupos de sequías: meteorológica, hidrológica, agrícola y económica. Las tres primeras clases identifican a la sequía como un fenómeno físico, mientras que en la última, se aborda desde la perspectiva socioeconómica.

Sequía meteorológica

Es la falta de precipitación sobre una región durante un tiempo, basándose en la desviación de la precipitación normal con respecto a la media, con base en datos climatológicas regionales (Valiente, 2001).

Por su parte Valiente (2001), define a este tipo de sequía como el intervalo de tiempo con una duración que va desde meses hasta años en el que el suministro de humedad en un determinado sitio se encuentra por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado.

En la mayoría de los casos, las definiciones de sequía meteorológica se remontan a la información regional o local del área de estudio y que, por lo tanto, es imposible extrapolar (Valiente, 2001).

Sequía Agrícola

Es la deficiencia de humedad del suelo y la consecuente pérdida de los cultivos. Este tipo de sequía se manifiesta posterior a la sequía meteorológica y puede identificarse antes de la sequía hidrológica (NDMC, 2017), ya que la cantidad de agua para cada cultivo es diferente y no es posible establecer umbrales de sequía generales. Si los niveles de humedad en el suelo son suficientes para proporcionar un adecuado desarrollo del cultivo durante el periodo que se presente la sequía meteorológica, no llega producirse la sequía agrícola (Valiente, 2001).

Sequía Hidrológica

Es el periodo con disponibilidad de escurrimiento insuficiente para satisfacer las demandas. Se mide en los diferentes cuerpos de agua que se encuentran alrededor del área con déficit del líquido (NDMC, 2017). Estas mediciones ayudan a determinar la intensidad con la que se presenta el fenómeno. Este tipo de sequía puede tardar hasta un mes en manifestarse, posterior a que se presenta. La sequía agrícola, la sequía hidrológica depende de los depósitos naturales o

artificiales de agua y de la forma en que se emplea el agua embalsada (Valiente, 2001).

Sequía Socio-económica

Es el deterioro en el sistema de recursos hidráulicos que abastece las demandas y por lo tanto origina problemas sociales y daños en las actividades económicas (Whilhite y Glantz, 1985 citado en Valiente, 2001; Campos, 2013).

La sequía es también considerada como una de las amenazas individuales y naturales más grandes del mundo que pueden llegar a convertirse en desastre si no se tiene un plan adecuado para su amortiguamiento (Patrick, 2003).

Es importante mencionar que ninguna de las definiciones es general para todos los lugares, ni en todas las circunstancias. Actualmente, la mayoría de los planificadores de la sequía se basan en índices matemáticos.

Intensidad de sequías

Según el Servicio Meteorológico Nacional (2014), existen diferentes niveles de sequía, entre los que se encuentran:

- Anormalmente Seco (D0): Se presenta al inicio o al final de un periodo de sequía. Al inicio de un período de sequía; debido a la sequedad de corto plazo, puede ocasionar el retraso de la siembra de los cultivos anuales, un limitado crecimiento de los cultivos o pastos y existe el riesgo de incendios. Al final del período de sequía; puede persistir déficit de agua, los pastos o cultivos pueden no recuperarse completamente.
- Sequía Moderada (D1): Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos. Existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos. En este tipo de sequía, se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.
- Sequía Severa (D2): Probables pérdidas en cultivos o pastos y alto riesgo de incendios. Es común la escasez de agua, por lo que se deben imponer restricciones en el uso del agua.

- Sequía Extrema (D3): Pérdidas mayores en cultivos y pastos, el riesgo de incendios forestales es extremo y se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.
- Sequía Excepcional (D4): Pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos. Esto provoca una probable una situación de emergencia debido a la ausencia de agua.

Índices aplicados a la sequía meteorología

El índice de sequía se entiende como un valor calculado con relación a algunos efectos acumulativos de una prolongada y anormal deficiencia de humedad (Hurtado y Cadena, 2002)

Índice de Aridez Anómala (AAI)

Se desarrolló por el Departamento de Meteorología de la India. Se aplica en tiempo real y se considera el balance hídrico, se calcula para periodos de una o dos semanas. Los valores negativos indican un exceso de humedad, mientras que los valores positivos indican el estrés por humedad. Los parámetros que se usan son: evapotranspiración real y evapotranspiración potencial calculada, que requieren valores de temperatura, viento y radiación solar. Se aplican para calcular la sequía agrícola, especialmente en los trópicos donde las estaciones de sequedad y humedad son evidentes y forman parte del régimen climático. Los cálculos son simples y las descripciones de la sequía (leve, moderada o severa) se basan en la salida de la normalidad (WMO y GWP, 2016).

Índice de quintiles

Se usa para categorizar las precipitaciones de cada año con base en 6 categorías. Consiste en ordenar de menor a mayor los valores de la precipitación anual dividiendo la cantidad de años disponibles entre 5 y los rangos son los siguientes: sequía extrema, moderada, leve, año normal, año lluvioso y año muy lluvioso (Márdero *et al.*, 2012).

Índice de Porcentaje Normal de Precipitación

Se originó para identificar las principales anomalías de precipitación, es un cálculo simple que se puede utilizar para comparar cualquier período de tiempo en cualquier ubicación y es ideal para calcular precipitaciones de más de 30 años (WMO y GWP, 2016)

Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Fue el primer índice establecido por la OMM para identificar y monitorear la sequía meteorológica a nivel mundial. Este índice fue creado en la universidad Estatal de Colorado, USA por McKee *et al.* (1993). Utiliza registros históricos de precipitación para cualquier lugar para desarrollar una probabilidad de precipitación que se puede calcular en cualquier escala de tiempo. El SPI se puede calcular en 20 años de datos, pero idealmente la serie temporal debe tener un mínimo de 30 años de datos. Estas series de lluvia se ajustan a una distribución normal de la forma que el valor medio sea cero, de esta manera los valores positivos indican lluvias mayores a la mediana, mientras que los valores negativos serán valores menores a la mediana. De esta forma, un evento de sequía es identificado cuando el SPI presenta valores negativos, la magnitud acumulada puede ser utilizada como una medida de un evento seco. Este índice refleja los cambios a corto plazo; se debe tener precaución en zonas donde la precipitación normal es baja ya que pueden resultar valores negativos o positivos grandes, aunque la desviación con respecto a la normal sea relativamente pequeña (Hurtado y Cadena, 2002)

Índice de Precipitación Estandarizada y Anomalía Ponderada

Se desarrolló por Lyon para monitorear la precipitación en la región tropical del Ecuador. Se basa únicamente en datos de precipitación mensuales. Su cálculo se basa en los promedios de las precipitaciones mensuales y se usa principalmente en las regiones tropicales húmedas para monitorear sequías. Cuenta los períodos definidos de humedad y sequía en el régimen climático; sin embargo, no funciona tan bien en las regiones desérticas (WMO y GWP, 2016).

Las sequías están ligadas a dos factores; uno de tipo natural que se refiere a las naturales, como son las modificaciones en los patrones de circulación atmosférica; la actividad solar y los fenómenos de interacción entre el océano y la atmósfera como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), y en segundo lugar por la actividad antropogénica (Ortega, 2013).

Factores naturales

Patrones de circulación atmosférica

Es un fenómeno impulsado y sostenido por el desigual calentamiento entre el Ecuador y los polos, depende del movimiento de rotación de la Tierra, la configuración de tierra y mar y las propiedades fisicoquímicas del planeta. Así mismo, constituye un continuo intercambio de energía, que permite mantener el equilibrio calorífico del planeta (Magaña, *et al.*, 1998; Masera, 1992).

La Península de Yucatán presenta patrones de circulación atmosférica propios de las zonas tropicales que se encuentran en el límite con las zonas áridas. Tiene lluvias de tipo convectivas y por influencia de los vientos alisios que traen humedad del Atlántico; es una región con pequeñas irregularidades orográficas, donde se da un proceso de precipitación debido a la insolación que recibe. En el verano, la presencia de huracanes en el Atlántico genera lluvias en la costa y se debilita gradualmente a medida que el centro de baja presión avanza hacia el interior de la península. Se presentan dos periodos de sequía: la pre-estival o de primavera que va de enero a abril y la intraestival o canícula que se presenta durante julio y agosto. Esta última se debe al debilitamiento de los alisios, por el sobrecalentamiento en el oriente del Pacífico tropical, por debajo de la Zona Intertropical de Convergencia (ZCIT). Las manchas solares alteran la cantidad de energía que llega a la Tierra (Magaña *et al.*, 1998).

Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC)

Este software facilita la extracción de información contenida en la base de datos CLICOM, el banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico

Nacional de la CONAGUA. La información que reporta el ERIC son índices diarios de estaciones climatológicas tradicionales con las siguientes variables (Cuadro 1)

Cuadro 1. Variables de estaciones meteorológicas

VARIABLES	UNIDADES
Temperatura observada	°C (a las 8 hrs)
Temperatura mínima	°C
Temperatura máxima	°C
Precipitación 24 hrs	mm (de 8 a.m a 8 a.m)
Evaporación 24 hrs	mm (de 8 a.m a 8 a.m)
Tormenta	0=no hubo; 1= sí hubo
Granizo	0=no hubo; 1= sí hubo
Niebla	0=no hubo; 1= sí hubo
Cobertura del cielo	0=despejado; 1= medio nublado; 2= nublado

Índice Diario de Sequía de Keetch-Byram (KBDI)

Desarrollado a finales de los años 60's por Keetch y Byram en el Departamento de Agricultura de la División de Servicios Forestales para medir específicamente la incidencia de la sequía en la capa superficial del suelo y humus. Este índice fue desarrollado como un sistema de alerta para incendios forestales por medio de un método uniforme para la identificación de sequías meteorológicas de una región en específico. Se basa en datos de precipitación y temperatura, al final expresa la deficiencia de la humedad según el máximo contenido de humedad posible en el suelo. Los límites de intervalos del índice determinan el estado de la capa de suelo superficial y su contribución a la intensidad de los incendios forestales.

Los límites son los siguientes:

- 0 a 200. La humedad en el suelo y el combustible son elevados, característica de la entrada de la primavera.

- 200 a 400. Caracteriza el final de la primavera en donde las capas de humus y detritus se secan y se empieza a contribuir en el material para la ignición.
- 400 a 600. Caracteriza el final del verano e inicio del otoño en donde las capas de humus y detritus se encuentran en completa actividad como material de combustible en la ignición.
- 600 a 800. En este rango se presentan las sequías severas en donde el combustible vivo ardera activamente. (WMO y GWP, 2016; Valiente, 2001)

Percepción remota

También denominada teledetección se define como la ciencia o arte de adquirir información de un objeto o superficie sin estar en contacto con él, mediante el conjunto de técnicas basadas en la medición de radiación electromagnética proveniente de una fuente de radiación natural o artificial. La interacción electromagnética entre un elemento físico de la escena llamado campo instantáneo de vista (CIV) y el sensor genera una serie de datos que son procesados para obtener información de los objetos que se encuentran dentro de la zona de estudio (Aguirre, 2009).

La información de la energía o longitud de onda proporcionada por el sensor no necesariamente es igual a la que incide originalmente, de acuerdo con la geometría particular de las interacciones de la fuente que emite radiación el CIV y del sensor receptor, una parte de la radiación emitida, reflejada o transmitida por el CIV es captada sobre un cierto ángulo sólido, por unidad de tiempo, en una dirección predeterminada, por un arreglo de sensores (detectores) que poseen un subsistema de enfoque de conducción de radiación (Lira, 2010).

Principios físicos

Las propiedades de la radiación electromagnética (EM) se pueden explicar mediante dos teorías. La teoría ondulatoria de Huygens y la de Maxwell, en donde mencionan que la radiación EM se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: la eléctrica y la magnética.

Estas dos están definidas en función de su longitud y una frecuencia n . Estas se relacionan inversamente entre sí por la siguiente expresión (Chuvienco, 2008):

$$C = \lambda F$$

Dónde:

C: Velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ : Longitud de onda

F: Frecuencia en Herzios, ciclos por segundo

La segunda teoría menciona la emisión de la energía como una suceción de unidades discretas de energía con masa igual a cero, es decir un cuerpo negro funge como absorbedor y emisor de energía y radiación perfecto (Figura 1). Con la teoría cuántica se puede calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia y si se sustituye en la ecuación anterior quedaría de la siguiente forma:

$$Q = h (c / \lambda)$$

Donde:

Q= Energía radiante de un fotón (julios)

h= Constante de Planck (6.6×10^{-34} J s)

C: Velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ : Longitud de onda

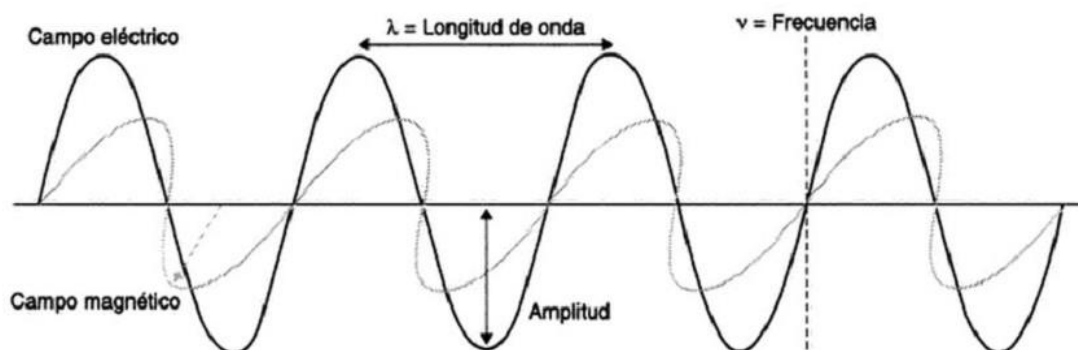


Figura 1. Esquema de una onda electromagnética (Chuvienco, 2008)

Espectro electromagnético

Está constituido por una serie de ondas de diferentes características, las cuales se diferencian por su longitud (λ), frecuencia y energía. Comprende desde las longitudes de onda más cortas las cuales se miden en micrómetros hasta las kilométricas que se miden en centímetros o metros. Éstas últimas se les designan valores en Gigahertz.

A continuación, se muestran los valores de las bandas del espectro electromagnético (Figura 2):

- El espectro visible (0.4 a 0.7 μm), en esta sección se pueden distinguir tres bandas: azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).
- Infrarojo cercano (IRC: 0.7 a 1.3 μm), esta banda es especial para identificar coberturas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (IRM: 1.3 a 8 μm), esta región se divide en dos: Infrarrojo de onda corta (1.3 a 2.5 μm), en dónde se puede estimar el contenido de humedad de la vegetación y el suelo; La segunda banda se denomina infrarrojo medio (3 y 5 μm) y se usa para la detección de incendios o volcanes activos.
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm), en esta banda se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las coberturas terrestres. (Chuvienco, 2008)
- Microondas (M: por encima de 1 mm), la radiación solar atraviesa la atmosfera sin ninguna distorción, por lo cual estos sensores pueden operar en cualquier tipo de condición atmosférica.

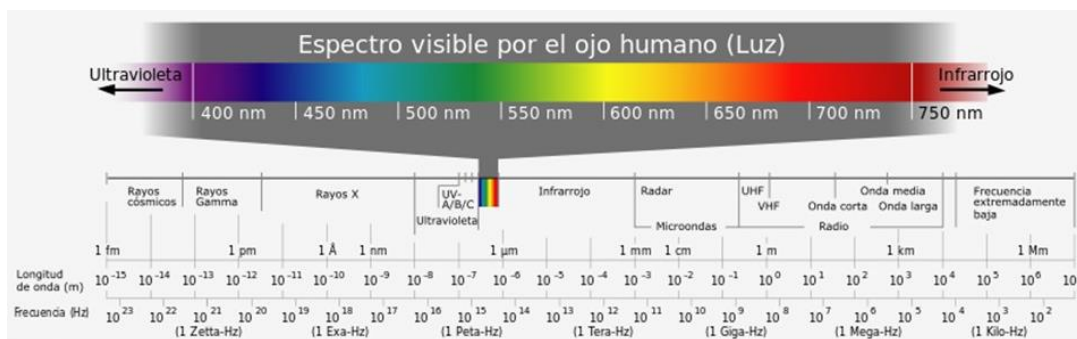


Figura 2. Espectro electromagnético (Thomas y Paris, 2008)

Cuadro 2. Nomenclatura de bandas para la región espectral de las microondas (Lillesand, et al., 2004)

BANDA	LONGITUD DE ONDA λ (cm)	FRECUENCIA $\nu = c\lambda^{-1}$ [MHz (10^6 c/seg $^{-1}$)]
Ka	0.75-1.1	40 000 - 26 500
K	1.1 - 1.67	26 500 - 18 000
Ku	1.67 - 2.4	18 000 - 12 500
X	2.4 - 3.75	12 500 - 8 000
C	3.75 -7.5	8 000 - 4 000
S	7.5 - 15	4 000 - 2 000
L	15 - 30	2 000 - 1000
P	30 -100	1 000 - 300

Tipos de sensores

En teledetección se encuentran dos tipos de sensores más comunes, definidos con base en su fuente de iluminación: controlada y no controlada. Los sistemas que presentan una fuente de iluminación no controlada son denominados sistemas pasivos y utilizan al Sol y otra fuente externa como fuente de iluminación. Estos sistemas presentan un tipo de orbita diseñada para funcionar con base en la rotación y translación de la Tierra. Por otro lado, existen los llamados sistemas activos, los cuales funcionan con una fuente de iluminación propia, de entre los sistemas activos destaca el RADAR, que emplea radiación electromagnética en la region microondas del espectro (Lira, 2010; Lindenlaub, 1976)

RADAR

El sistema de RADAR (Radio Detection And Ranging) emplea radiación coherente en la región de microondas y van desde algunos milímetros hasta decenas de centímetros. Este sistema trabaja con un dispositivo de generación y registro de imágenes que controla la radiación para iluminar la escena de interés en la tierra (Lira, 2010).

Formación de una imagen de Radar

Los satélites toman imágenes en órbita ascendente o descendente, con la mirada a la derecha o a la izquierda y con distintos ángulos de iluminación a través de la medida de los pulsos generados por una antena, los pulsos retornados son procedentes de la escena de interés, la cual es iluminada por un haz de radiación coherente. El haz está formado por un tren de pulsos de corta duración en el tiempo y con una frecuencia de repetición muy alta en algunas de las bandas C, L y X. Los pulsos retrodispersados por el terreno a lo largo de un barrido, son registrados en un medio magnético y procesados para posteriormente formar una línea de píxeles de la imagen de radar que se acomodan dando como resultado un mosaico de píxeles. Cada uno de estos píxeles contiene mediciones de la fase y la amplitud de la radiación reflejada desde la superficie de la Tierra hacia el radar (Hernández, 2012).

La relación fundamental entre las características del radar, el objeto observado y la señal recibida está definida en la ecuación de radar, que expresa la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida por el sensor. La magnitud del pulso retrodispersado por cada campo instantáneo de vista (CIV) depende de la sección diferencial de su dispersión, por unidad de ángulo sólido y por unidad de tiempo.

Esta sección depende a su vez de una serie de factores (Lira, 2010):

$$\sigma^{\circ} = f(\alpha, \lambda, \beta, P, \epsilon, \Gamma_1, \Gamma_2, K)$$

Los parámetros de los cuales depende σ° son:

λ = longitud de onda de operación del radar

β = ángulo de depresión de la señal de radar

P = polarización de la onda incidente

Los parámetros del terreno

α = ángulo de pendiente del terreno

ϵ = constante dieléctrica volumétrica

Γ_1 = rugosidad de la superficie sobre una escala mayor que $\lambda/10$ de la frontera aire/superficie.

Γ_2 = sub-superficie de una segunda capa donde la señal puede penetrar la primer capa en un grado significativo.

K = coeficiente complejo de dispersión volumétrica en un medio homogéneo.

Los atributos generales de las imágenes de radar: tono, textura y patrón dan cuenta de las propiedades físicas del territorio observado en tanto reflejan cómo la superficie ha dispersado la energía electromagnética recibida en función de las interacciones producidas.

Radar de Apertura Sintética (SAR)

El termino Radar de Apertura Sintética (SAR) (Figura 3) se refiere a la simulación de una antena de mayores dimensiones, lo cual se logra gracias al movimiento del satélite, que recorre una distancia dada mientras la antena recolecta información sobre una escena específica (Hernández, 2012). Este sistema está basado en el desplazamiento relativo entre la antena y un punto dado en la escena. Se mide la variación de rango y el corrimiento doppler para un intervalo acotado de la dirección.

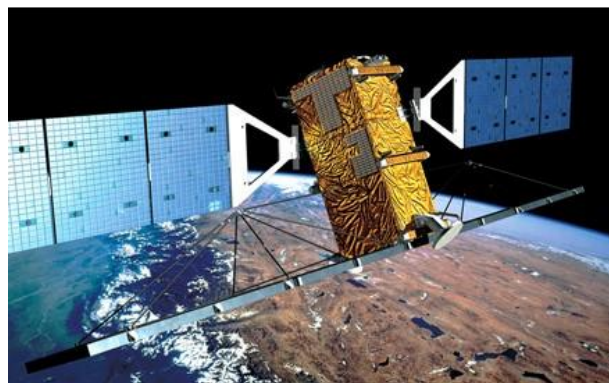


Figura 3. RADARSAT-2 (Canadian Space Agency, 2017)

En un sistema radar de apertura sintética, la información del corrimiento doppler del pulso retrodispersado es utilizada simultáneamente con el cambio en el rango para generar la imagen de radar de la escena. En este sistema, la antena apunta a un costado de la plataforma con un ángulo de squint cercano a los 90° con respecto a la dirección azimutal. La antena produce un tren de pulsos de energía electromagnética coherente hacia la superficie de la escena. Los pulsos son de una duración pequeña y son emitidos a una frecuencia de repetición alta. En este sistema, la resolución depende de la capacidad del sistema para medir el tiempo de vuelo y el cambio de frecuencia debido al corrimiento doppler y el límite para medir estas dos cantidades es el impuesto por la longitud de onda empleada (Lira, 2010).

Las imágenes de radar logran proporcionar una buena información visual sin importar las condiciones climáticas, debido a que el radar es un sistema activo que emite un haz de radiación electromagnética en la región de microondas. Éste registra la energía retrodispersada, luego de que ésta interactúa con la superficie terrestre y con los objetos de una escena dada. El radar trabaja en una banda comprendida entre 1 y 100 cm del espectro electromagnético. Debido a la geometría particular de formación de imagen, este sistema es capaz de detectar la riqueza textural de la escena de interés. En este sistema SAR, se consiguen tener resoluciones laterales bien definidas, ya que el sistema presenta una nueva dimensión que es paralela al terreno capturado (Figura 4) (Sensat, 2015).

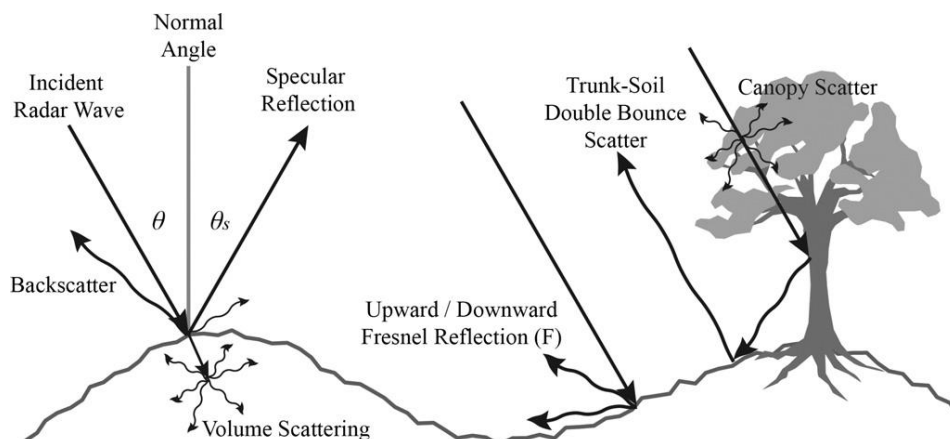


Figura 4. Interacción de la señal de radar con los objetos de estudio (Kornelsen y Coulibaly, 2013)

Coefficiente de retrodispersión

El coeficiente de retrodispersión resulta de la interacción de los paquetes de onda con los elementos de una escena. Estas interacciones del campo eléctrico se pueden presentar en cuatro diferentes polarizaciones: campo incidente vertical-campo disperso vertical (VV); campo incidente vertical- campo disperso horizontal (VH); campo incidente horizontal-campo disperso vertical (HV) y campo incidente horizontal-campo disperso horizontal (HH) (Hernández *et al.*, 2016). Estos cuatro diferentes canales de polarización permiten analizar de forma más adecuada y específica los mecanismos de dispersión (Figura 4) (Lee y Pottier, 2009).

Aspectos geométricos de las imágenes de Radar

Dirección de iluminación

Está formado por el ángulo de vision (ϕ) o bien ángulo de iluminación (β). Este ángulo se forma a partir de la línea formada por el haz con respecto a su vertical. En algunas ocasiones, β es considerado como el complemento del ángulo de vista ($90^\circ - \phi$). La relación entre el haz y la superficie terrestre iluminada por éste da lugar al ángulo de incidencia, que es el ángulo formado entre el haz del radar (línea de vista) y la vertical formada con respecto a un objeto iluminado en superficie. A su vez, esta vertical depende del ángulo de incidencia local formado entre el haz del radar al objeto iluminado y la normal a la superficie para cada punto de incidencia iluminado (Dávila, 2011). A manera de resumen, la dirección de iluminación hace referencia a la dirección en que la antena ilumina la zona de estudio.

Perspectiva

Este efecto es el resultado de la distorsión en cuanto a la colocación de un pixel en el área de estudio, el cual se ve desplazado hacia el origen en la imagen de radar. La magnitud y el sentido de desplazamiento varían dependiendo de la pendiente de la escena y el ángulo de depresión. Este efecto se puede corregir mediante un modelo digital de elevación (Lira, 2010).

Sombras y relieve

Cuando las pendientes del terreno son mayores que el ángulo de depresión, las verdaderas sombras de radar ocultan características en el rango, es decir las pendientes que se encuentran fuera del ángulo de observación retornan con un valor cero y esto daría lugar a áreas oscuras o negras en la imagen. En áreas de alto relieve como el ángulo de depresión es más bajo, la longitud de la sombra aumenta con el rango. Cuanto más bajo es el ángulo de depresión en el terreno, mayor información podrá perderse cuando el relieve es abrupto, pero no así en escenas con terrenos suaves, estos pueden ser observados con ángulos de depresión menores (Lira, 2010; Clemente, 2012)

Escorzo

Este tipo de distorsión espacial se refiere a la compresión de la falda de colinas o montañas, mientras que la ladera opuesta se elonga, la mayor cantidad de acortamiento ocurre donde la pendiente es perpendicular a la incidencia de la señal del radar.

Inversión de relieve

Este efecto está directamente relacionado con la rugosidad del terreno y el ángulo de depresión β . En este caso, la cima de una montaña puede aparecer traslapada sobre el pie de la montaña; es decir, que la imagen de un objeto aparece inclinado hacia la dirección de la antena de radar, esto se debe a que las cimas de los objetos o de las cuestas son retornadas antes que sus bases. Los efectos de inversión son más grandes sobre el lado del alcance cercano de las imágenes. Cuando el rango de la cima es igual al del pie de la montaña los pixeles correspondientes aparecen en la imagen en la misma posición. Cuando el lado de la montaña es aproximadamente perpendicular al haz de radar y con un ángulo de incidencia cercano a cero su apariencia en la imagen es comprimida con respecto al otro lado (Lira, 2010; Marchionni, 2014)

Cuerpos de agua

Los cuerpos de agua tienen que ver con la constante dieléctrica, pues esta afecta críticamente la señal retrodispersada ya que inciden directamente en la absorción y propagación de las ondas electromagnéticas. El valor de la constante dieléctrica depende del contenido de agua de la superficie, es decir la penetración de la señal electromagnética es mayor y la reflexión de la misma es menor para un bajo contenido de humedad. Inversamente, la penetración es menor y la reflexión es mayor cuando la humedad es alta.

Carreteras y vías de ferrocarril

Para la identificación de estos objetos en la escena, se deben observar las texturas, ya que ésta se encuentra determinada por la rugosidad de la superficie del terreno que es uno de los factores básicos que definen la intensidad de los pulsos retrodispersados. La rugosidad del terreno siempre se determina con relación a la longitud de onda de la señal electromagnética empleada por el radar. Una superficie con rugosidad suave produce reflexión especular sin retrodispersión a la antena, una rugosidad intermedia produce retrodispersión moderada, una superficie rugosa produce retrodispersión difusa o isotrópica. En cuanto a los barcos, plataformas marinas, líneas de alta tensión o líneas de ferrocarril, producen señales retrodispersadas de alta intensidad debido a su alta conductividad.

La potencia a la cual se transmite los pulsos que forman el haz de radiación del radar junto con las características del terreno determina la intensidad de la señal retrodispersada. La intensidad del pulso retrodispersado por cada CIV depende de la sección diferencial de dispersión, por unidad de ángulo sólido por unidad de tiempo. En este trabajo se realizó un análisis del coeficiente de retrodispersión (σ°), el cual depende de los parámetros del radar: λ -Longitud de onda de operación del radar, β - ángulo de depresión de la señal de radar y P- polarización de la onda incidente.

Aspectos físicos de las imágenes de RADAR

Speckle y Clutter

Las imágenes de Radar producen un ruido de tipo multiplicativo denominado *speckle*, este es el resultado de la interacción coherente de los paquetes de onda retrodispersados por los elementos que intervienen en el campo instantáneo de vista. Este fenómeno se puede distinguir en la imagen de radar como un ruido sobrepuesto de manera multiplicativa a la imagen, cuyo aspecto visual es similar a una textura de tipo granulosa en una fotografía (Lira, 2010).

Los pulsos retrodispersados son el resultado de la adición coherente de los ecos de los elementos que se encuentran en la escena. Tal adición consiste en la suma vectorial de las señales retrodispersadas por los elementos, donde cada señal presenta una amplitud A_i y una fase ϕ_i . El pulso retrodispersado está dado por la siguiente suma

$$A = \sum_{i=1}^N A_i e^{j\phi_i}$$

Con la suma vectorial antes mencionada, se puede inferir que una zona homogénea con una sección de dispersión constante estaría representada en la imagen por una colección de pixels de valores diferentes. La señal observada está afectada por el fenómeno de interferencia debido a las diferentes señales provenientes de cada elemento dispersor, lo que conlleva a definir el *speckle* como el resultado de un fenómeno físico producido por la interacción coherente de la radiación empleada para iluminar la escena de interés que puede ser modelado como un ruido de tipo multiplicativo. En las imágenes radar el *speckle* añade un tipo de textura que no tiene que ver con la escena (Lira, 2010). El clutter es similar al *speckle*, sólo que este fenómeno aparece en zonas donde la cobertura forestal es muy densa.

Filtros

Métodos físicos. *Multilook*

Los filtros que operan en el dominio espacial trabajan desplazándose sobre cada pixel de la imagen, un templete de tamaño impar, en cada posición del templete sobre la imagen, se aplica una operación llamada *kernel*. El templete se mueve a lo largo de cada renglón y columna, hasta completar la imagen. Al calcular la operación sobre los pixels del templete se obtiene un suavizamiento de la imagen fina, donde el *speckle* es reducido. La técnica *Multilook* realiza un promedio de varias imágenes de la misma escena para reducir el *speckle* antes de la elaboración de un interferograma (Lira, 2010; Hernández, 2012)

Métodos digitales

Frost

Es un filtro adaptativo, maneja estadísticas locales de la imagen en el proceso de filtrado y supone una distribución exponencial negativa para el *speckle*. Este filtro opera al asignar un promedio ponderado de los valores de los pixels en una ventana que se desliza sobre toda la imagen, se asignan factores de peso que son determinados por medio de estadísticas locales y sus valores sirven para minimizar el error cuadrático medio de la imagen estimada (Lira, 2010).

Gamma

Este filtro también es considerado como semilineal, supone que la variación de los pixels es el resultado del *speckle* y que la distribución de estos valores sigue una función gaussiana. Para cada posición de la ventana, se obtiene el valor promedio de aquellos pixels cuyo valor se encuentra dentro de una desviación estándar σ con respecto al valor del pixel central de la ventana. El pixel central no es considerado en la operación de promedio (Lira, 2010).

El filtro de Sigma puede reducir el *speckle*, pero ocasiona una borrosidad de bordes en la imagen. Este filtro supone que la desviación estándar del ruido es constante en la imagen entera. Los pixels aislados con valores extremos no son

promediados en el filtro Sigma. Si el número de pixels dentro de los límites de la desviación estándar es menor a un umbral prefijado, el valor del pixel central de la ventana es reemplazado por un simple promedio de los pixels, el tamaño de la ventana se inicia en 3 x 3 pixels, incrementándose en tamaños impares (López, 2004; Lira, 2010)

Geométrico

Está basado en la transformación morfológica hit-or-miss (intersecta o no intersecta) y puede ser aplicado de manera iterativa en la reducción del speckle, sólo dos iteraciones bastan para decrementar este ruido multiplicativo. La operación de hit-or-miss es una operación morfológica binaria, a partir de la cual todas las demás operaciones morfológicas pueden ser derivadas. Trabaja sobre una imagen binaria con un elemento estructural, produciendo otra imagen binaria como resultado de esta operación. El elemento estructural utilizado en la transformación hit-or-miss contiene un patrón de unos y ceros que es comparado con el patrón de valores de los perfiles de pixeles de los renglones, columnas y diagonales de la imagen. Esta operación traslada el origen del elemento estructural en todos los puntos de la imagen y realiza una comparación del mismo con los pixeles de la imagen. Si los pixeles de la imagen y su complemento coinciden con el patrón de pixeles del elemento estructural, el pixel de la imagen correspondiente al centro del elemento estructural cambia su estado lógico, si no coincide, el pixel conserva su valor original (López, 2004; Lira, 2010).

Multiplicativo de Lee

El filtro de Lee es un filtro semilineal, emplea la media y la varianza local alrededor de una vecindad fija predeterminada. Este filtro supone un ruido gaussiano aditivamente sobrepuesto a la imagen, con la media igual a cero y una cierta varianza σ^2 . Este filtro produce como resultado un valor cercano a la media local para áreas uniformes y un valor cercano al del valor del píxel original en regiones de alto contraste. Este filtro tiene un buen comportamiento en el ruido multiplicativo (Lee, 1980; Lira, 2010).

Refined Lee

Este filtro es funcionalmente muy similar al multiplicativo de Lee; sin embargo, el de Lee Refinado utiliza un sólo canal con una ventana impar con bordes alineados basados en estadísticas locales aplicados a la matriz de covarianza. Si se seleccionara una ventana cuadrada, contendría píxeles de medios de dispersión mixtos y la imagen quedaría borrosa. En la figura 5, se muestra como el algoritmo elige alguna de las ocho ventanas lineales para el filtrado de la escena (Lee y Pottier, 2009; Mousavi, *et al.*, 2015)

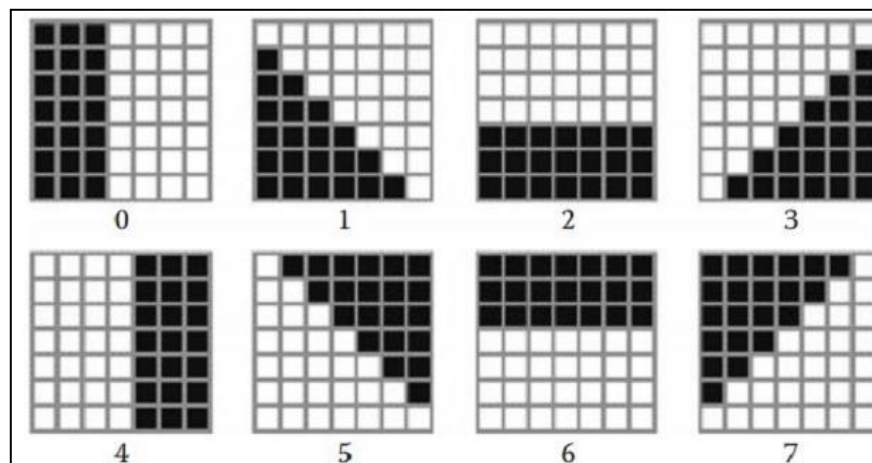


Figura 5. Ocho ventanas para el cálculo del filtrado. Imagen tomada de Lee y Pottier, 2009

Coefficiente de correlación de Pearson

Es una prueba paramétrica que mide el grado de asociación de dos variables relacionadas linealmente. Este índice oscila entre -1 y 1. La magnitud de la relación está especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando en el signo la dirección de tal valor; es decir, si el signo es +1 la relación será perfectamente positiva y si es -1 la relación será perfectamente negativa. El coeficiente está definido por la siguiente ecuación (Rodríguez-Salazar, *et al.*, 2001):

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

Donde

n = número de variables

x_i = la medida individual de un descriptor o variable en la primera muestra

y_i = la medida individual de una variable en la segunda muestra

\bar{x} y \bar{y} = los promedios de x_i y y_i , respectivamente

2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

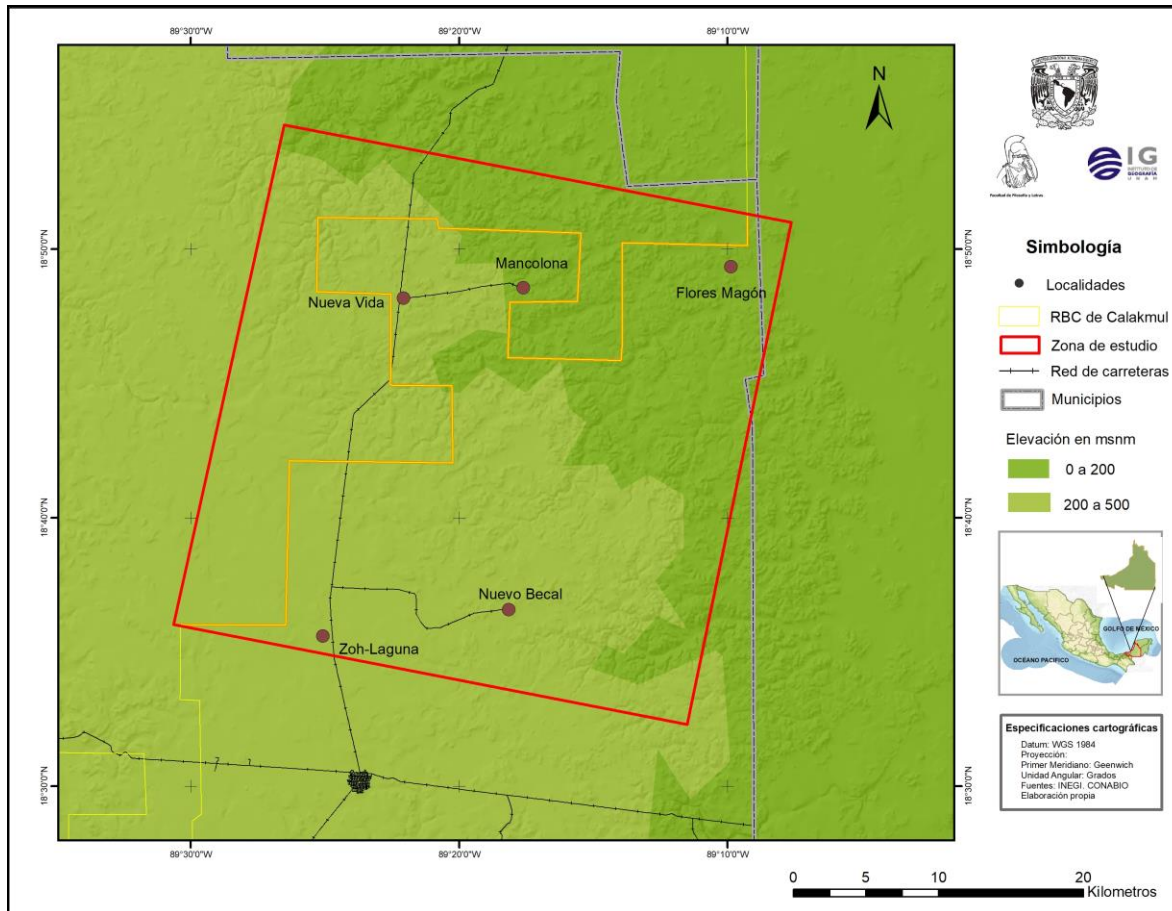


Figura 6. Área de estudio. Fuente de elaboración propia

La zona de estudio se localiza al sureste del estado de Campeche, en el municipio de Calakmul, limita al este con el estado de Quintana Roo y al sur con la República de Guatemala, las coordenadas geográficas extremas son 18° 51' 0.6"; 18° 55' 0.4"; 18° 36' 49.21"; 18° 32' 53" latitud Norte y 89° 08' 32.04"; 89° 26' 21.9"; 89° 30' 49.23"; 89° 11' 37.32" longitud Oeste (Figura 6)

Vegetación

Según la serie V de uso de suelo y vegetación del INEGI (2015). De los 12 tipos de vegetación descritos para la península de Yucatán, la región de Calakmul presenta seis, mientras que la zona de estudio alberga solo 4 que a continuación se describen.

a) Vegetación secundaria arbórea de selva mediana y selva mediana subperennifolia

Las selvas medianas presentan un estrato arbóreo dominante de entre 15 y 25 m de altura Martínez y Galindo (2002) mencionan que las comunidades con condición subperennifolia se han asociado con las selvas altas debido a que la materia orgánica y la humedad del suelo son bajas, las selvas altas no alcanzan la altura que alcanzarían en otras localidades. Las selvas medianas presentan un número menor de especies. Las asociaciones entre las selvas altas y las medianas son las siguientes: Las selvas de chicle (*Manilkara azpota*) y de ramón (*Brosimum alicastrum*), las selvas de pukte' (*Bucida buceras*) y peel ma'ax o bayo (*Aspidosperma cruentum* y *A. megalocarpon*) y por último las selvas de machiche (*Lonchocarpus castilloi*)

b) Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia y selva baja espinosa subperennifolia

Comunidades arbóreas de entre 5 y 15 m de altura. Éstas se pueden dividir, en por lo menos, cuatro asociaciones primarias y tres de origen secundario. La selva baja caducifolia, la selva de ja'abin y las selvas de yaytil y chicle.

c) Bajos

Comunidades subperennifolias a caducifolias de árboles o arbustos de 4 a 8 m de altura promedio, en sitios periódicamente inundados durante dos a seis meses. El bajo mixto ocupa la mayor extensión en la meseta y en la ladera occidental, mientras que los bajos del pukte' están restringidos a las planicies nororiental, suroriental y suroccidental. El bajo de ts'iits'il che' se encuentra en la

ladera centro y noroccidental, en manchones aislados, mientras que el bajo del chechem negro se distribuye en la planicie oriental.

d) Pastizales, acahuales y zonas donde se practica agricultura de temporal

Los acahuales son comunidades sucesiones de diferentes edades que se encuentran en sitios que presentan disturbios por la agricultura, tala e incendios.

Geomorfología

La geomorfología de este lugar es el resultado de la actividad tectónica y ostenta rocas calcáreas provenientes de Paleozoico, presenta una meseta central denominada “Meseta de Zoh-Laguna” con una altitud promedio de entre 200 y 250 msnm (Martínez y Galindo, 2002). Se compone de lomeríos que van de 100 a 360 msnm con rocas calizas del Cenozoico, afloramientos de Paleoceno que conforman el relieve con mayor altitud. La morfología cárstica de la planicie le confiere un desarrollo hidrológico subterráneo y superficial de depresiones inundables referentes a fallas y fracturas, las cuales ayudan a la infiltración y a la desintegración de las rocas calcáreas. Este lugar presenta una morfología kárstica de mesetas con colinas de entre 20 y 50 m con procesos cársticos y fluviales, valles cársticos de disolución y dolinas de distintas dimensiones (Lugo, 1991).

Hidrología

En Calakmul se pueden distinguir tres tipos de superficies: las superficies de permeabilidad nula que corresponden a cuerpos lacustres y dolinas inundadas (aguadas). Este tipo de superficies reciben aguas pluviales y forman depresiones lacustres y palustres. Superficies de permeabilidad baja, éstas se forman durante la estación húmeda anual, son de tipo temporal, se forman por el escurrimiento superficial. La tercer superficie es la de permeabilidad alta, este tipo de superficie es la que predomina mayormente en el área de estudio, este tipo de superficie proviene de la litología superficial de rocas calizas solubles fracturadas (García, *et al.*, 2002)

Edafología

En superficie dominan formas de disolución del mismo origen formado por mesetas, planicies y valles. Los suelos de las laderas y de las partes altas corresponden a una asociación de litosoles y rendzinas, con profundidades de 10 y 30 cm (García, 2001; García *et al.*, 2002). También se pueden encontrar suelos de tipo vertisoles que son los más profundos y se conocen localmente como ak'alches; gleysoles cálcicos que se encuentran en sitios inundables; fluvisoles cálcicos al margen de los escurrimientos superficiales; litosoles, estos suelos se encuentran en relieves de tipo positivo como son mesetas, colinas, laderas y por último las redzinas que son suelos típicos de sustratos calizos (García, *et al.*, 2002).

Clima

El clima es cálido subhúmedo, el patrón climático pertenece a la región del Golfo de México, el cual está determinado por dos sistemas de vientos predominantes, en verano y otoño los Alisios, las ondas del este y los ciclones tropicales; y en el invierno los "Nortes" (García, 1988). Es un tipo de clima Ganges, es decir, la temperatura más alta se presenta antes del solsticio de verano, las lluvias se concentran de junio a noviembre (García, 2004).

Temperatura y Precipitación

La temperatura media anual es de 22° a 26 °C, la precipitación media anual varía entre 1200 y 1500 mm (UNIATMOS, 2016). Presenta un periodo de lluvias que va de mayo a noviembre y uno de secas que va de diciembre a abril. En el periodo de lluvias se ha observado un periodo que lleva por nombre sequía medio-verano o intraestival también llamado canicula, la cual se caracteriza por un disminución significativa y no uniforme de los días de lluvia y un aumento de las temperaturas máximas en los meses de julio y agosto.

2.2 METODOLOGÍA

2.2.1 CLIMA

Se realizó una búsqueda de las estaciones climatológicas que cumplieran con dos requisitos: que estuvieran cercanas a la zona de estudio y contasen con datos completos para el periodo 2010 al 2014. Esta búsqueda se realizó mediante la georreferenciación de todas las estaciones del estado de Campeche y algunas de Quintana Roo dando como resultado 4 estaciones: “Zoh Laguna”, “Xpujil” para el primer periodo; “Nicolás Bravo” y Calakmul II para el segundo periodo (Figura 6)

La información obtenida se depuró con ayuda del software Excel® 2003, obteniendo los climogramas de temperatura máxima, media y precipitación mensual; así como las máximas diarias y mensuales de temperatura, humedad y precipitación. Con ayuda del software Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) III V2, se graficaron las anomalías diarias de temperatura máxima y precipitación para los años 2010 y 2011.

Para finalizar la parte climatológica, se obtuvieron los resultados del Índice de Sequía Estandarizado de Palmer para el periodo 2010-2014 de Calakmul, esto con el fin de dar un sustento más a la investigación que se realizó. Esta información se obtuvo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

2.2.2 ESTIMACIÓN DE ÍNDICE DE SEQUÍA DE KEETCH BYRAM (KBDI) MODIFICADO PARA VEGETACIÓN TROPICAL

El KBDI se basa en un equilibrio entre la precipitación y la humedad del suelo, varía de 0 a 800, donde el 0 representa humedad y 800 representa un índice de sequedad absoluta. Actualmente este índice se derivó de las estimaciones de temperatura y precipitación de las 4 estaciones meteorológicas (Cuadro 3) Zoh-Laguna, Xpujil, Nicolás Bravo y Calakmul II (Valiente, 2001).

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas

ESTACIÓN	CLAVE	MUNICIPIO	PERIODO
ZOH LAGUNA	4037	CALAKMUL	2010-2014
XPUJIL	4036	CALAKMUL	2010-2014
NICOLÁS BRAVO	23016 SMN	CALAKMUL	2010-2014
CALAKMUL II	EMAS	CALAKMUL	2012-2014

El KBDI se calculó mediante el siguiente algoritmo (Couturier, *et al.*, 2001) con ayuda del software Excel 2003:

$$E_n = \frac{(2000 - (DDIn-1 - 10P_n) * (0.9676 * EXP(0.0875 * T_n + 1.552)) * (8.229) * 0.001)}{(1 + 10.88 * EXP(0.00175 * P_{annual}))} + 0.5$$

En dónde:

DDIn-1: Índice diario de sequía

DDIn = DDIn-1 - 10Pn + En

Pn: Lluvia acumulada en un día en mm

En: Evapotranspiración por día

Tn: Temperatura máxima por día

Pannual: Precipitación anual acumulada en un periodo de 10 años

La **Pannual**, **Pn** y la **Tn** se determinaron mediante las estaciones meteorológicas más cercanas a los sitios de muestreo. El KBDI fue estimado para un periodo de

enero del 2010 hasta diciembre de 2014 ya que este periodo es el que corresponde al de las imágenes de RADARSAT-2 proporcionadas por la Agencia Espacial Canadiense.

2.2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

Se adquirieron imágenes RapidEye del 2013 proporcionadas por CONABIO, derivado de ello se creó un mosaico en color verdadero para sobreponer la serie V de INEGI y así identificar los tipos de vegetación registrados oficialmente. Posterior a ello se seleccionaron los sitios de muestreo en campo.

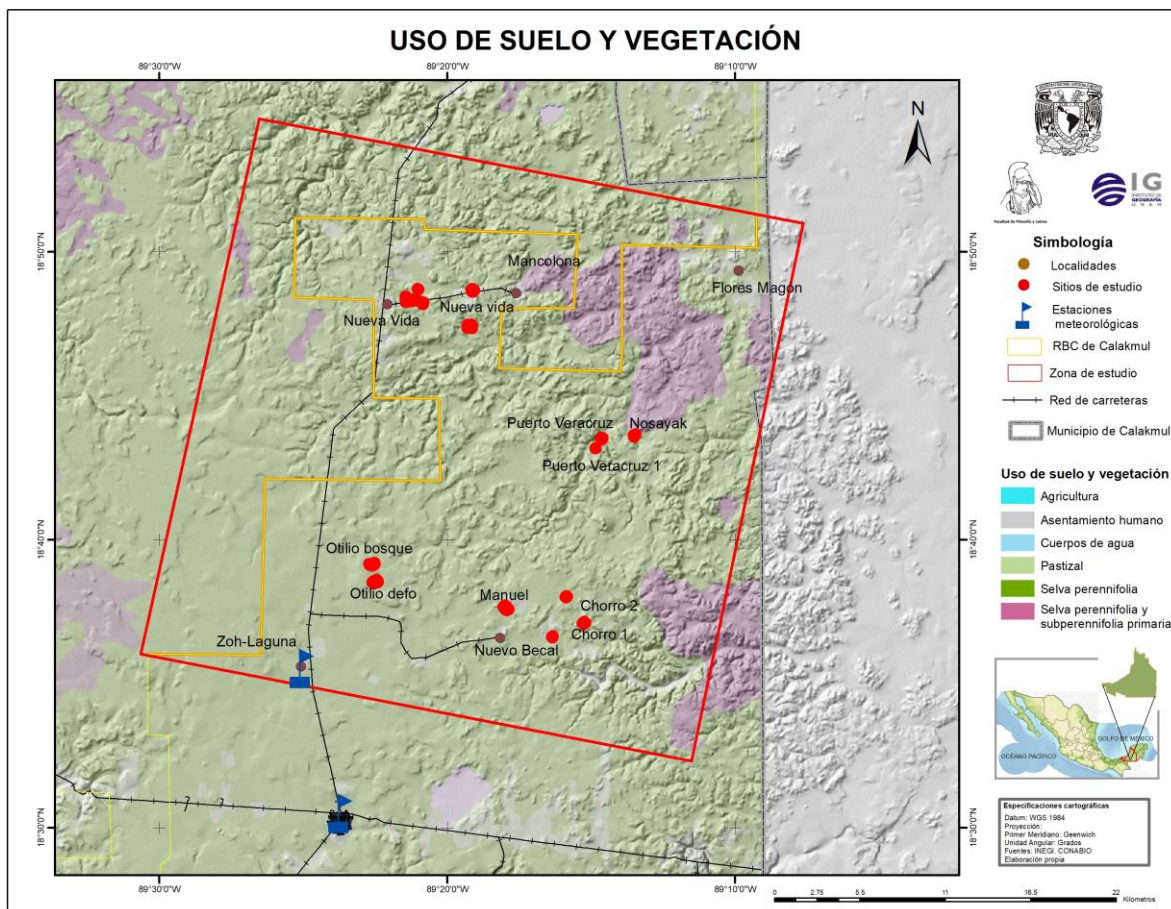


Figura 7. Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con los datos auxiliares y recorridos de campo, se identificaron seis categorías de uso de suelo y vegetación (acahual, agricultura, pastizal, cuerpos de agua, selva mediana y selva baja o bajos inundables y no inundables). Estos sitios se eligieron con base en las siguientes características:

- El sitio debería tener sólo un cultivo en caso de agricultura.
- En caso de la selva, ésta debía estar lo menos impactada.
- El área mínima cartografiable debía ser 10,000 m².

Sitios de muestreo

Derivado de la Serie V de INEGI y la verificación en campo, se obtuvieron 18 sitios de muestreo divididos en seis clases (Cuadro 4) mismos que se cartografiaron (Figura 7), para posteriormente extraer el coeficiente de retrodispersión de las imágenes de RADARSAT-2.

Cuadro 4. Sitios de muestreo

NOMBRE DEL LUGAR	USO DE SUELO y VEGETACIÓN
CHORRO	ACAHUAL
OTILIO	ACAHUAL
CHORRO	ACAHUAL
NUEVA VIDA	AGRICULTURA
OTILIO	AGRICULTURA
NUEVA VIDA 2	AGRICULTURA
ZUCHE	CUERPOS DE AGUA
NUEVA VIDA	CUERPOS DE AGUA
NOSAYAK	CUERPOS DE AGUA
NUEVO BEC MANUEL	POTRERO
NUEVA VIDA 6	POTRERO
NUEVA VIDA 4	POTRERO
NUEVA VIDA 2	SELVA BAJA
NUEVO BECAL OTILIO	SELVA BAJA
PUERTO VERACRUZ 1	SELVA BAJA
NUEVO BECAL OTILIO BOSQUE	SELVA MEDIANA
PUERTO VERACRUZ	SELVA MEDIANA
NUEVO BECAL CHORRO	SELVA MEDIANA

2.2.4 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES RADARSAT-2 PARA LA ADQUISICIÓN DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN

En colaboración con la ESIME–Ticomán IPN y la Universidad de Sherbrooke en Quebec, se obtuvieron 43 imágenes de RADARSAT-2, del periodo 2010-2011 y 2013-2014. Estas imágenes fueron proporcionadas por la Agencia Espacial Canadiense en el marco del proyecto académico SOAR-EI. De estas 43 imágenes, se eligieron 12 que tuvieran las siguientes características (Tabla 5).

Tabla 5. Características de las imágenes de RADARSAT-2

TIPO DE PRODUCTO	SINGLE COMPLEX (SLC)
TIPO DE ADQUISICIÓN	FQ 16
FORMATO DEL ARCHIVO	ASCII
NÚMERO DE BANDAS	4 BANDAS (HH, HV, VH Y VV)
PUNTO DE LA IMAGEN	DERECHA
BITS POR PIXEL	16 BITS
MODELO DE PROYECCIÓN	WGS84
MODELO ELIPSOIDAL ESPACIAMIENTO DE LÍNEA Y RENGLÓN	ESPECIFICADO POR EL USUARIO $\Delta x = 5.163 \text{ m}$, $\Delta y = 4.733$
PLATAFORMA DE LA IMAGEN	RADARSAT
MISIÓN	RS2
SENSOR DE LA IMAGEN	SAR
DIRECCIÓN DE ORBITA	DESCENDENTE
LOOKS EN RANGO Y AZIMUTH	1
ÁNGULO DE INCIDENCIA	36.24 – 36.25
UBICACIÓN	NORTE

Las 12 imágenes que se utilizaron en esta investigación fueron del tipo amplitud. Para saber que las imágenes son de amplitud se obtuvieron los histogramas de cada una (Lira, 2010). Posteriormente se eligieron imágenes que tuvieran un ángulo de incidencia (36°), ya que se ha observado que esta característica llega a modificar la retrodispersión de la estructura forestal hasta incluso la rugosidad y humedad del suelo (Lang, *et al.*, 2008; Rojas, 2014)

Filtrado de las imágenes

Al tener las 12 imágenes con las mismas especificaciones técnicas, se procedió a filtrarlas con ayuda del software SNAP, (2017). La metodología que se siguió fue de Escalante-Ramírez y Lira-Chavéz, (1996).

Los filtros que se utilizaron fueron los siguientes:

- Frost
- Gamma
- Lee
- Refined Lee
- Multilook 1 y 2

Evaluación de los métodos de filtrado

Para la evaluación de los filtros se utilizaron distintos métodos, tanto cualitativos como cuantitativos. Los métodos cualitativos que se utilizaron fue la diferencia entre la imagen original menos la filtrada, contraste y brillantez. Los métodos cuantitativos que se usaron fueron: la observación de los histogramas de cada imagen (original y filtrada), cambio en *looks*, estadísticas en los perfiles (media y desviación estándar).

Calibración de las imágenes

La calibración se realizó con una ayuda del software SNAP y consiste en proporcionar imágenes en las que los valores de píxel puedan estar directamente relacionados con el coeficiente de retrodispersión del CIV. La corrección radiométrica es necesaria para la comparación de las imágenes adquiridas a partir del mismo sensor, pero en diferentes modos. El operador realiza una calibración radiométrica absoluta aplicando las ecuaciones proporcionadas por el distribuidor (ESA, 2016).

Corrección geométrica

Posterior a la calibración se realizó una corrección geométrica con ayuda del software SNAP V.5.0, la cual consiste en generar imágenes ortorrectificadas

utilizando una interpolación con el DEM de la región a estudiar. El software SNAP se conecta al servidor, busca la malla correspondiente a la zona de estudio, lo descarga en la carpeta del software y ortorrectifica la imagen con un elipsoide geodésico (WGS84)

Polígonos de estudio

Se realizaron mosaicos de referencia a partir de imágenes RapidEye (resolución 5 m), la georreferenciación de los mosaicos fue con base en puntos de control de la red de vías proporcionada por INEGI (2014). Cabe señalar que en estos mosaicos se georreferenciaron los polígonos representantes a los 6 diferentes usos de suelo y vegetación que se analizaron (Couturier *et al.*, 2001).

2.2.5 IDENTIFICACIÓN DE LA SEQUÍA CON EL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN (SIGMA CERO)

A partir de las imágenes RADARSAT-2, radiométricas y geoméricamente corregidas, se generaron series temporales 2010-2014 para la zona de estudio. Posteriormente se sobrepusieron los polígonos de las diferentes clases de vegetación y uso de suelo ya identificados en las imágenes SAR, con ello se extrajo la media de cada polígono en los diferentes tipos de polarización. Se realizó un estudio estadístico de la variación temporal de la retro dispersión en las áreas de estudio, entre la época de secas y la época húmeda utilizando el software libre SNAP (Couturier, *et al.*, 2001; Makoto y Hiroshi, 2004).

2.2.6 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Este coeficiente fue calculado utilizando datos de la media de cada polígono de las imágenes SAR por polarización y el KBDI, utilizando la siguiente formula:

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

CAPÍTULO 3**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Figura 8. Zona norte de Calakmul, Campeche.

En este apartado se muestran los resultados y el análisis derivado de la información de las estaciones meteorológicas, el KBDI para los años 2010, 2013 y 2014; por último, se analizan la correlación entre el índice y el coeficiente de retrodispersión obtenido de las imágenes de RADARSAT-2 para 18 sitios de la zona norte de Calakmul, Campeche (Figura 8).

3.1. CLIMA

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para la estación de Zoh-Laguna (Cuadro 6) los meses normalmente más cálidos fueron agosto (33.3°C), abril (32.6°C) y junio (32.1°C), esto para un periodo de 1980 -2010.

Cuadro 6. Normales climatológicas de Zoh Laguna, 1951-2010

NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: CAMPECHE												PERIODO: 1951-2010	
ESTACION: 00004037	ZOH LAGUNA			LATITUD: 18°35'32" N.				LONGITUD: 089°25'0 2" W.			ALTURA: 265.0 msnm		
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MÁXIMA													
NORMAL	27.3	28.5	30.8	32.6	33.3	32.1	31.5	31.6	30.9	29.8	28.1	27.2	30.3
MAXIMA MENSUAL	32.3	33.7	36.5	36.8	38.8	37.2	36.9	36.3	35	33	32.5	31.7	
AÑO DE MAXIMA	1962	2003	2003	2006	2003	1975	2003	1982	1982	1987	2004	2004	
MAXIMA DIARIA	37	38	47	42.0	41.0	40.0	39	39	39	39	37.0	38.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	02/2000	26/1971	23/1987	5/1987	27/1957	01/1975	10/1972	25/1951	02-1982	03-1963	25/1957	31/1953	
AÑOS CON DATOS	51	51	49	51	50	50	51	51	51	53	53	54	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	21.4	22.2	24	25.7	26.7	26.2	25.7	25.6	25.3	24.2	22.4	21.4	24.2
AÑOS CON DATOS	51	51	49	51	50	50	51	51	51	53	53	54	
PRECIPITACIÓN													
NORMAL	48	25.8	20.5	40.3	91.8	129.1	115.2	120.9	179.5	119.3	58.0	46.2	994.6
MAXIMA MENSUAL	240	100	69	289.0	385.1	352.0	312	358	497.2	274	130.0	128.3	
AÑO DE MAXIMA	1962	1961	1966	1954	1958	1954	1958	1973	1969	1955	1958	2002	
MAXIMA DIARIA	87	46	65	115.0	117.0	122.0	62	220	144	120.3	91.0	100.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	15/1962	03-1961	24/1966	0/1954	20/1969	14/1967	4-1955	20/1973	28/1956	01-2000	28/1973	28/1957	
AÑOS CON DATOS	51	51	49	51	50	50	51	51	51	53	53	54	

Anomalía de temperatura para Zoh-Laguna en el 2010

En el siguiente cuadro (7) se observa en color rosa y en negritas los días que presentaron temperaturas máximas anómalas durante el año 2010, estos meses fueron marzo (1.6°C), abril (0.9 °C), junio (0.4 a 1.3°C), julio (0.2 °C) y noviembre (0.1 a 1.1 °C)

Cuadro 7. Anomalía de temperatura, Zoh -Laguna, 2010

Anomalías diarias de temperatura máxima												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-3.2	-4.9	-3.6	-4.7	-1	-2.7	-0.8	-2.6	-4.3	-4.4	-1	-0.7
2	-3.3	-5	-6.7	-3.8	-3	-1.7	-1.8	-4.6	-3.3	-4.4	-1.9	-1.6
3	-4.3	-1	-7.7	-4.8	-1	1.3	-1.8	-4.6	-4.3	-3.3	-3.8	-1.6
4	-5.3	-2	-6.8	-4.9	-1.1	0.4	0.2	-3.6	-1.3	-5.3	-5.8	-3.6
5	-5.3	-5.1	-5.9	-6	-3.1	0.4	-1.8	-2.6	-0.2	-4.3	-6.7	-2.5
6	-6.3	-5.1	-7	-4	-6.1	-1.5	-1.7	-6.6	-3.2	-3.2	-6.7	-1.5
7	-4.3	-6.2	-4.1	-2.1	-1.2	-2.5	-2.7	-4.6	-3.2	-3.2	-6.6	-1.5
8	-4.3	-4.2	-3.1	0.9	-2.2	-2.5	-2.7	-2.6	-2.2	-4.1	-4.6	-3.4
9	-9.3	-1.2	-3.2	-0.2	-3.2	-2.4	-2.7	-1.6	-4.2	-4.1	-2.5	-4.4
10	-9.3	-6.3	-2.3	-2.3	-3.2	0.6	-1.7	-0.7	-5.1	-4.1	-4.5	-2.4
11	-11.3	-5.3	1.6	-2.3	-3.3	-2.3	-1.6	-1.7	-4.1	-3	-2.4	-3.3
12	-14.3	-6.4	-0.5	-1.4	-5.3	-1.3	-2.6	-1.7	-4.1	-3	-2.4	-1.3
13	-8.3	-6.4	-3.5	-5.4	-6.3	-3.3	-3.6	-1.7	-3.1	-1.9	-1.3	-3.3
14	-8.3	-5.4	-3.6	-2.5	-6.3	-3.2	-1.6	-2.7	-2	-3.9	-3.2	-1.2
15	-3.3	-4.5	-6.7	-1.6	-1.4	-1.2	-4.6	-3.7	-4	-4.9	-1.2	-1.2
16	-4.3	-5.5	-7.8	-5.6	-3.4	-1.1	-1.6	-3.7	-4	-5.8	-1.1	-1.2
17	-5.4	-8.6	-10.7	-5.6	-5.3	-2.1	-2.6	-4.7	-4	-3.8	-2.1	-3.2
18	-4.4	-6.7	-7.9	-6.7	-9.3	-2.1	-2.6	-3.6	-3.9	-3.7	-4.1	-1.2
19	-3.4	-5.8	-4	-5.7	-6.3	-0.1	-5.6	-4.6	-1.9	-2.7	-1	-5.2
20	-4.5	-5.8	-4	-0.7	-3.2	-1.1	-5.6	-5.6	-3.8	-2.6	-1	-6.2
21	-5.5	-4.9	-8.1	-1.7	-3.2	-1	-5.6	-4.6	-2.8	-3.6	-1	-4.2
22	-5.5	-3	-5.1	-2.8	-6.1	-1	-7.6	-4.5	-3.8	-2.5	0.1	-3.2
23	-4.6	-2.1	-7.2	-1.8	-6.1	-3	-4.6	-4.5	-2.7	-2.4	-0.9	-1.2
24	-5.6	-6.2	-4.3	-0.8	-6.1	-3	-3.6	-4.5	-4.7	-2.4	1.1	-1.2
25	-4.7	-6.2	-4.3	-2.8	-5	-5	-2.6	-5.5	-4.7	-1.3	-0.8	-2.2
26	-3.7	-8.3	-5.4	-1.9	-6	-6.9	-1.6	-4.5	-5.6	-3.3	-0.8	-1.2
27	-3.7	-6.4	-4.4	NO_D	-2.9	-8.9	-2.6	-4.4	-3.6	-4.2	-0.8	-0.2
28	-3.8	-3.5	-5.5	NO_D	-3.9	-6.9	-2.6	-4.4	-3.5	-2.2	0.2	-0.2
29	-4.8		-4.6	NO_D	-3.9	-1.9	-1.6	-3.4	-3.5	-1.1	NO_D	-1.2
30	-3.9		-4.6	NO_D	-2.8	-0.9	-1.6	-4.4	-4.5	-2.1	NO_D	-0.2
31	-3.9		-4.7		-2.8		-1.6	-4.4		-2		-0.2

NO_D : No hubo suficientes datos para calcular la anomalía diaria

Anomalía de temperatura para el 2011 en Zoh-Laguna

Para el año 2011 se obtuvieron anomalías de temperatura máxima para los meses de enero (0.3 y 0.7°C), febrero (0.1°C), abril (0.1 a 3.1), mayo (0.1 a 2.7°C), junio (0.3 a 0.8 °C), julio (0.4 y 1.4), agosto (0.3 a 1.3°C), septiembre (0.2, a 1.7°C) y octubre (1 a 1.9°C) (Cuadro 8).

Cuadro 8 Anomalía de temperatura, Zoh- Laguna, 2011

Anomalías diarias de temperatura máxima para el 2011												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-0.2	0.1	-1.6	-1.7	-1	-0.7	-4.8	-2.6	0.7	-0.4	-5	-5.7
2	-0.3	-1	-1.7	-2.8	-3	-0.7	-4.8	-1.6	1.7	-2.4	-2.9	-4.6
3	-1.3	-1	-2.7	-4.8	-2	0.3	-3.8	-2.6	0.7	-2.3	-1.8	-3.6
4	-0.3	-2	-1.8	-4.9	-1.1	0.4	-4.8	-1.6	1.7	-3.3	-1.8	-2.6
5	0.7	-0.1	-1.9	-6	-1.1	-0.6	-3.8	-1.6	0.8	-4.3	0.3	-3.5
6	-0.3	-1.1	-1	-5	-2.1	-0.5	-4.7	-0.6	-1.2	-1.2	0.3	-3.5
7	-1.3	-3.2	-1.1	-5.1	-3.2	0.5	-4.7	-1.6	-1.2	1.8	-1.6	-4.5
8	-3.3	-1.2	-2.1	-3.1	-1.2	-0.5	-4.7	0.4	-2.2	1.9	-2.6	-4.4
9	-2.3	-1.2	-3.2	-1.2	-0.2	0.6	-5.7	0.4	-4.2	1.9	-2.5	-3.4
10	-2.3	-4.3	-3.3	-0.3	0.8	-0.4	-5.7	1.3	-2.1	-0.1	-4.5	-3.4
11	-3.3	-6.3	-4.4	-0.3	-0.3	-0.3	-5.6	1.3	-2.1	1	-4.4	-4.3
12	-4.3	-5.4	-4.5	0.6	-1.3	-2.3	-4.6	0.3	-4.1	0	-2.4	-5.3
13	-4.3	-4.4	-1.5	-0.4	-1.3	-0.3	-4.6	0.3	-4.1	-5.9	-1.3	-3.3
14	-3.3	-5.4	-1.6	-2.5	-3.3	0.8	-3.6	-0.7	-5	-5.9	-1.2	-4.2
15	-1.3	-3.5	-2.7	-1.6	0.6	0.8	-3.6	0.3	-4	-2.9	0.8	-3.2
16	-2.3	-2.5	-3.8	-0.6	2.6	-1.1	-4.6	-0.7	-4	-2.8	0.9	-4.2
17	-3.4	-1.6	-3.9	-2.6	2.7	-4.1	-5.6	0.3	-3	-2.8	-1.1	-4.2
18	-1.4	-1.7	-4.9	-2.7	-0.3	-5.1	-0.6	0.4	-3.9	-5.7	-1.1	-3.2
19	-0.4	-2.8	-4	-1.7	-1.3	-6.1	-1.6	-0.6	-3.9	-6.7	-3	-2.2
20	-0.5	-1.8	-3	-1.7	-1.2	-5.1	0.4	-1.6	-0.8	-6.6	-2	-1.2
21	-1.5	-1.9	-3.1	-2.7	-2.2	-2	0.4	-4.6	1.2	-6.6	-1	-1.2
22	-2.5	0	-4.1	-0.8	-0.1	-2	1.4	-4.5	0.2	-7.5	-4.9	-1.2
23	-2.6	-3.1	-5.2	0.2	1.9	-1	-1.6	-4.5	-0.7	-5.4	-2.9	-2.2
24	-1.6	-2.2	-4.3	-0.8	1.9	0	-1.6	0.5	-0.7	-5.4	-2.9	-1.2
25	-0.7	-2.2	-4.3	-2.8	-1	0	-0.6	0.5	-0.7	-6.3	-3.8	-1.2
26	-0.7	-2.3	-4.4	3.1	2	-1.9	-4.6	-1.5	-2.6	-5.3	-3.8	-2.2
27	0.3	-1.4	-2.4	2.1	0.1	-3.9	-3.6	-0.4	-0.6	-5.2	-4.8	-4.2
28	-0.8	-0.5	-3.5	0.1	1.1	-4.9	-1.6	0.6	0.5	-2.2	-4.8	-4.2
29	-0.8		-2.6	0.1	0.1	-4.9	0.4	0.6	1.5	-3.1	-3.7	-3.2
30	-1.9		-1.6	-1	0.2	-4.9	0.4	-1.4	1.5	-3.1	-4.7	-1.2
31	-0.9		-2.7		-0.8		-1.6	-1.4		-3		-1.2

La siguiente figura (9) muestra la comparación entre anomalías de temperaturas máximas diarias para los años 2010 y 2011 de la estación de Zoh - Laguna; en color azul rey se muestran las temperaturas del 2010 y en verde agua las del 2011, en esta grafica se puede apreciar que el 2010 fue un año relativamente menos caluroso que el 2011, ya que en este último se presentaron más días con anomalías térmicas que en el 2010, las temperaturas más altas se presentaron en el periodo de abril a noviembre, destacando así los meses de abril y mayo como los más calurosos. La CONAGUA, 2017 mencionó que para el segundo trimestre del año 2011 la temperatura aumento hasta en 2° y se tuvieron olas de calor de hasta 45 días en la Península de Yucatán.

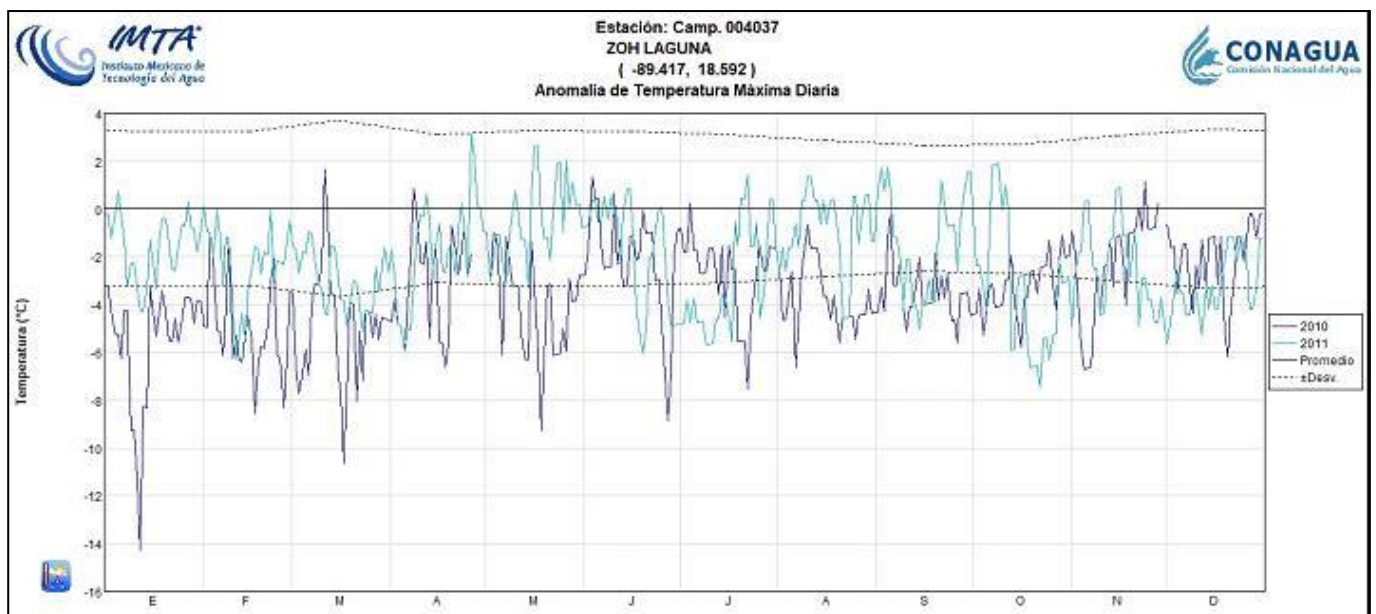


Figura 9. Anomalía de temperatura máxima diaria en Zoh Laguna, 2010-2011.

Anomalía de precipitación de Zoh-Laguna (2010)

En el siguiente cuadro (9) se puede observar anomalía negativa de precipitación prácticamente todo el año, teniendo a octubre, noviembre y diciembre como los meses más secos y los más lluviosos fueron julio, agosto y septiembre.

Cuadro 9. Anomalía de precipitación, Zoh Laguna, 2010

Anomalías diarias de precipitación 2010												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-1.5	-1.2	-0.8	-1	-2.1	-3.6	-4	9.5	-1.2	-4.8	-2.8	-1.7
2	-1.5	-1.2	-0.8	-1	-2.1	-3.7	-4	5.9	-4.9	-4.7	-2.7	-1.7
3	-1.5	-1.2	-0.8	-1	-2.2	-3.7	2.2	-3.8	-1.5	-4.6	1.1	-1.6
4	-1.5	-1.1	-0.8	-1.1	-2.2	-3.8	-0.4	5.5	-5	-4.6	-2.6	-1.6
5	-1.5	-1.1	-0.8	-1.1	-2.3	-3.8	-3.9	-0.3	-2.6	-4.5	-2.5	-1.6
6	-1.5	-1.1	-0.8	-1.1	-2.3	-3.9	-3.6	15.5	-4	-4.4	-2.5	-1.6
7	-1.5	-1.1	-0.7	-1.1	-2.4	-3.9	2.6	-1.2	-5.2	-4.4	-2.4	-1.6
8	-1.5	-1.1	-0.7	6.8	-2.4	-4	-0.7	-3.8	-5.3	-4.3	-2.4	-1.6
9	16.1	-1	-0.7	-1.2	-2.5	-4	-3.8	-3.8	-5.3	-4.2	-2.3	-1.6
10	-1.5	-1	-0.7	-1.2	-2.5	-4.1	-3.8	-3.8	-5.4	-4.2	-2.2	-1.6
11	-1.5	-1	-0.7	-1.2	-2.6	2.4	-3.8	-3.8	-5.5	-4.1	-2.2	-1.5
12	-1.5	-0.5	-0.7	-1.2	-2.7	-4.2	-0.9	-3.8	14.2	-4	-2.1	-1.5
13	-1.5	-1	-0.7	-1.2	10.5	-3	-3.7	-3.8	-2.1	-4	-2	-1.5
14	-1.5	-1	-0.7	-1.3	-2.8	-2.4	-3.7	4.4	-1.5	-3.6	-2	-1.5
15	-1.5	-0.9	-0.7	2.9	-2.8	-4.3	-3.7	-3.3	62.3	-3.8	2	-1.5
16	-1.5	-0.9	6.8	-1.3	6.4	-4.4	7.5	0.1	34.2	-3.8	-0.4	-1.5
17	-1.5	-0.9	-0.7	-1.4	21	-4.3	13	-3.9	-2.7	-3.7	-1.8	-1.5
18	-1.5	-0.9	-0.7	-1.4	5.3	-4.3	3.2	-4	-5.7	-3.6	-1.1	-1.5
19	-1.4	2.3	-0.7	-1.5	-3	-4.3	7.8	2.5	7.2	-3.6	-1.8	-1.5
20	-1.4	-0.9	8.5	-1.5	-3.1	-4.3	12.2	4.2	-5.5	-3.5	-1.8	-1.5
21	-1.4	-0.9	-0.8	-1.6	-3.1	-4.2	16.5	2	15.9	-3.5	-1.8	-1.5
22	-1.4	-0.9	-0.8	-1.6	6.1	-4.2	3.8	3.7	-2.7	-3.4	-1.8	-1.5
23	-1.4	25.3	-0.8	-1.7	13.2	-4.2	0	8.3	10.7	19.4	-1.5	-1.5
24	-1.3	3.1	-0.8	-1.7	-3.2	-3.9	2.5	19.4	2	-3.3	-1.8	-1.5
25	-1.1	-0.8	-0.8	-1.5	-3.3	4.1	17.8	-4.4	4.3	-3.2	-1.7	-1.5
26	-1.3	-0.8	-0.9	-1.8	-3.3	41.4	3.5	6.3	2.8	-3.1	-1.7	-1.5
27	-1.3	-0.8	-0.9	-1.9	7.8	55.1	-3.7	-4.5	40.7	-3.1	-1.7	-1.5
28	-1	-0.8	-0.9	NO_D	4.1	-3.6	-3.7	-4.6	14.3	-0.5	-1.7	-1.5
29	-1.3		-0.9	NO_D	-3.5	-4.1	-3.7	-4.7	15.6	-3	-1.7	-1.5
30	1.3		-1	NO_D	-3.5	-4	-3.7	-4.7	-4.8	3.4	NO_D	-1.5
31	0		-1		-3.6		-3.7	-0.6		-2.8		-1.5

Anomalía de precipitación de Zoh-Laguna (2011)

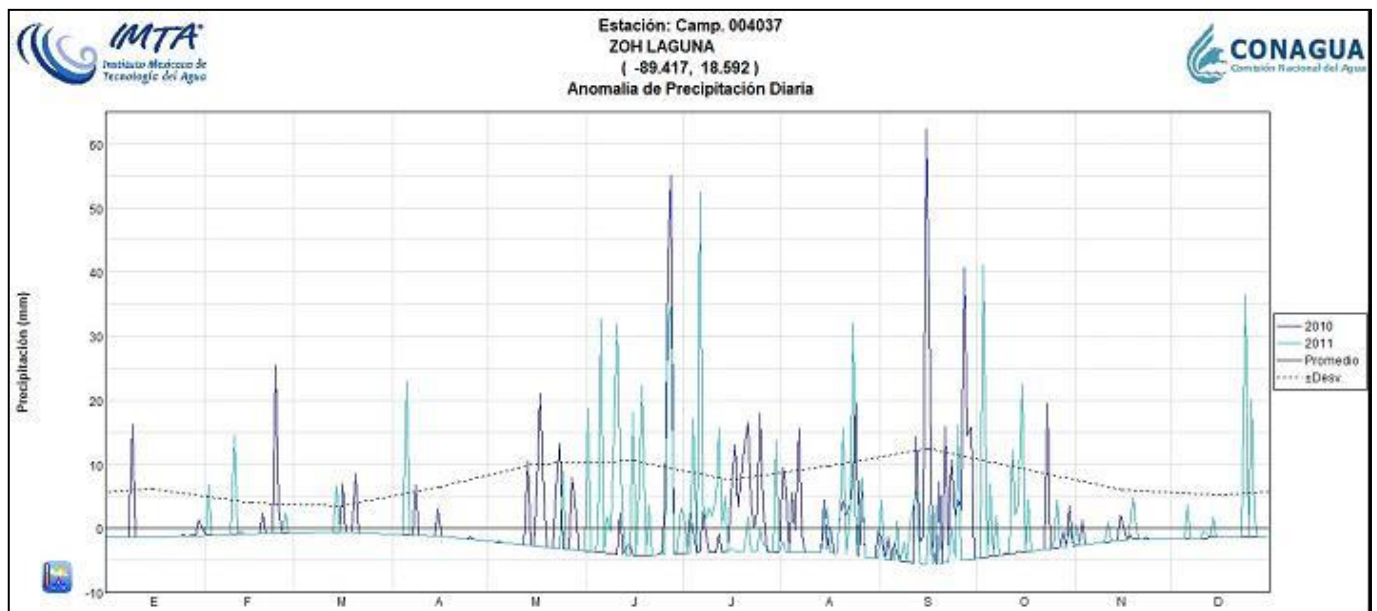
En cuadro 10 se puede observar que el déficit en precipitación va de un rango de entre -5.7 a -0.7 mm diarios en los meses más secos (enero, marzo, mayo, agosto septiembre y noviembre). La notable diferencia con 2010 demuestra la gran variabilidad en el tiempo climático para la estación de Zoh-Laguna.

Cuadro 10. Anomalía de precipitación de Zoh-Laguna, 2011.

Anomalías diarias de precipitación, 2011												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-1.5	-1.2	-0.8	-1	-2.1	18.7	2.2	-2	4.4	-4.8	0.4	-1.7
2	-1.5	6.7	-0.8	-1	-2.1	-3.7	-4	-3.8	-4.9	-4.7	-2.7	-1.7
3	-1.5	-1.2	-0.8	-1	-2.2	-3.7	-4	-3.8	-5	41.1	-2.7	-1.6
4	-1.5	-1.1	-0.8	-1.1	-1.9	-1.8	17.1	-3.8	-5	-4.6	-2.6	-1.6
5	-1.5	-1.1	-0.8	22.8	-2.3	32.7	-3.4	-3.8	-5.1	6.8	-2.5	-1.6
6	-1.5	-1.1	-0.8	-1.1	-2.3	-3.9	52.4	-3.8	1	-4.4	-2.5	3.6
7	-1.5	-1.1	-0.7	-1.1	-2.4	1.7	3.7	-3.8	-5.2	1.8	-2.4	-1.6
8	-1.5	-1.1	-0.7	-1.1	-2.4	-0.5	1.4	-3.8	-2.3	-4.3	-2.4	-1.6
9	-1.5	-1	-0.7	-1.2	-2.5	15.7	3.1	-3.8	-5.3	-4.2	-2.3	-1.6
10	-1.5	14.5	-0.7	-1.2	-2.5	31.8	1.9	-3.8	0.8	-3.8	-2.2	-1.6
11	-1.5	-1	-0.7	-1.2	-2.6	12.4	4.4	-3.8	3	-4.1	0.8	-0.5
12	-1.5	-1	-0.7	-1.2	-2.7	0.8	15.6	-3.8	5.7	12.2	-2.1	-0.8
13	-1.5	-1	-0.7	-1.2	-2.7	-4.2	0.5	-3.8	-5.6	1.9	-2	-1.5
14	-1.5	-1	6.6	-1.3	-2.8	-4.3	4.8	-0.3	-5.7	3.6	-2	1.7
15	-1.5	-0.9	-0.7	-1.3	-2.8	18	-3.7	3.1	-5.7	22.5	-1.9	-1.5
16	-1.5	-0.9	-0.7	-1.3	-2.9	-4.4	-3.2	-3.8	3.5	-3.8	-1.9	-1.5
17	-1.5	-0.9	-0.7	-1.4	-2.9	5.9	-3.7	-3.9	-5.7	4.3	-1.8	-1.5
18	-1.5	-0.9	-0.7	-1.4	-3	22.2	-3.7	-4	3.5	-3.6	1.2	-1.5
19	-1.4	-0.9	-0.7	-1.5	-3	-4	-3.7	2.3	-5.6	-3.6	4.7	-1.5
20	-1.4	-0.9	-0.7	-1.5	-3.1	3.6	-3.7	15.5	-5.5	-3.5	0.2	-1.5
21	-1.4	-0.9	-0.8	-1.6	-3.1	-4.2	1.6	-4.2	-5.4	-3.5	-1.8	-1.5
22	-1.4	-0.9	-0.8	-1.6	-3.1	-4.2	-3.7	3.3	-5.4	-3.4	-1.8	-1.5
23	-1.4	-0.9	-0.8	-1.7	-3.2	-4.2	-3.7	31.9	0	-3.3	-1.8	-1.5
24	-1.3	-0.8	-0.8	-1.7	8.8	-4.2	-3.7	-4.3	-4.5	-3.3	-1.8	36.4
25	-1.3	-0.8	-0.8	-1.8	-3.3	-4.1	-0.2	5.1	16.1	-3.2	-1.7	-1.5
26	-1.3	2.4	-0.9	-1.8	-3.3	32.1	-2.5	7.8	-5.1	4.4	-1.7	20
27	-1.3	-0.8	-0.9	-1.9	-3.4	34.5	-3.2	-4.5	-5	-3.1	-1.7	2.2
28	-1.3	-0.8	-0.9	-1.9	-3.4	-4.1	-3.7	-4.6	-5	-3	-1.7	-1.5
29	-1.3		-0.9	-2	-3.5	-4.1	-3.7	-4.7	-4.9	-3	-1.7	-1.5
30	-1.2		-1	-2	-3.5	3.2	13.6	-4.7	-4.8	0.1	-1.7	-1.5
31	-1.2		-1		-3.6		-3.7	-4.8		-2.8		-1.5

Anomalía de precipitación de Zoh-Laguna (2010-2011)

Al realizar la comparación entre las anomalías de precipitación acumulada en el 2010 y 2011, se observó que este último fue 20.2 mm más seco. Para el 2010 se obtuvieron los meses con mayor déficit de precipitación: octubre, noviembre y diciembre con -84.8, -45.5 y -45.9 mm por debajo de la media; mientras en el 2011 prácticamente todo el año permaneció con un déficit de precipitación (enero, marzo, abril, mayo, agosto, septiembre y noviembre) con -46.5, -13.2, -15.2, -76.3, -14.8, -83.5 y -38 mm respectivamente (Figura 10). Estos resultados demuestran que el mes más seco durante estos dos años fue en noviembre, es importante señalar que los días con mayor déficit pluviométrico acumulado, se presentaron en mayo, septiembre y noviembre.



Anomalía de temperatura máxima para Xpujil, 2010

En cuadro 11, se puede observar que los meses más calurosos en promedio se presentaron en mayo, agosto y septiembre, el rango en que se encontraron las anomalías térmicas varía desde 0.1 hasta 5.7°C.

Cuadro 11. Anomalías de temperatura máxima para Xpujil, 2010

Anomalías diarias de temperatura máxima (2010)												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-2.6	1.1	0	-0.6	3.6	1.8	4.1	1.5	1.5	-0.7	-0.7	-5.3
2	-2.6	1.1	-0.1	0.4	2.5	0.8	1.2	-0.5	0.5	0.3	0.4	-3.2
3	-0.7	2.1	-4.2	0.3	1.5	1.9	3.2	-1.5	0.5	-1.6	0.4	0.9
4	-4.7	-2.9	-4.3	1.2	2.4	2	3.2	-0.5	0.5	-1.6	0.4	-0.1
5	-5.7	0.1	-3.4	-0.9	0.4	3	1.3	1.5	1.5	-1.5	-7.6	-3
6	-5.7	0.1	-1.4	-2	-0.7	3.1	1.3	1.5	0.6	-1.5	-2.5	-2.9
7	-5.8	1.1	-2.5	0	1.3	0.1	-4.7	0.5	-0.4	-2.4	-4.5	0.1
8	0.2	-0.9	-3.6	-0.1	2.2	1.2	0.4	1.5	-0.4	-0.4	-3.5	-2.8
9	-2.8	1.1	-3.7	-0.2	2.2	-0.8	-3.6	0.5	-0.4	-1.4	-2.5	-1.7
10	-1.8	-2.9	-2.8	0.7	-0.9	2.3	-1.6	1.5	-1.4	0.7	-1.4	-1.6
11	-0.8	-1.9	-3.9	0.6	-0.9	1.4	0.5	3.4	0.6	-1.3	-2.4	-2.6
12	-0.9	-1.9	-4	0.6	-0.9	2.4	0.5	2.4	0.6	-0.2	0.6	-1.5
13	-3.9	-0.9	-5	-4.5	0	-0.5	0.5	1.4	1.6	-0.2	0.6	-6.4
14	-4.9	1.1	-5.1	-2.6	0	0.5	-0.5	0.4	-0.4	-1.1	-0.3	-2.4
15	0.1	0.1	-6.2	-2.7	-0.1	2.6	0.6	1.4	-1.4	-0.1	-0.3	-3.3
16	-2	-1.9	-7.3	-1.8	-1.1	0.7	1.6	-0.6	-1.4	1	0.7	-1.2
17	-2	-4	-9.4	-1.8	-1.1	2.7	0.6	-4.6	-1.3	0	-0.2	NO_D
18	-3	-3.1	-5.5	3.2	-2	1.7	1.6	-0.6	-0.3	-1	0.8	NO_D
19	-1	-4.2	-5.5	3.1	0	1.7	0.6	1.4	0.8	0	-2.1	NO_D
20	0	-3.2	-6.6	2.1	-0.9	2.8	1.6	1.4	0.8	0.1	0	NO_D
21	2	-2.3	-6.7	1	-0.8	1.8	-1.4	0.4	0.8	0.1	0.1	NO_D
22	-7	-0.4	-5.8	1	-1.8	3.8	-5.4	-0.5	0.9	0.1	-0.9	NO_D
23	-2	-0.5	-5.8	1.9	2.3	3.9	-2.4	-3.5	1.9	1.1	-2.8	NO_D
24	-2	-2.6	-0.9	2.9	-1.7	0.9	-1.4	-0.5	2	0.2	-0.7	NO_D
25	-1.9	-2.7	1	1.8	-0.6	0.9	-1.4	-2.5	0	-1.8	-0.7	NO_D
26	1.1	-1.8	-0.1	1.8	-1.6	1	0.5	0.5	-0.9	-0.8	0.4	NO_D
27	1.1	-2.8	-1.2	0.7	-0.5	-3	-7.5	-0.5	0.1	1.2	1.5	NO_D
28	-1.9	-3.9	1.8	-1.3	1.6	-4	-2.5	0.5	0.2	0.2	0.5	NO_D
29	1.1		-1.3	-0.4	0.6	1.1	-0.5	-0.5	0.2	-2.7	-0.4	NO_D
30	0.1		-3.4	-0.4	4.7	-0.9	0.5	-0.5	-1.8	0.3	0.7	NO_D
31	0.1		-1.5		5.7		0.5			-1.7		NO_D

Anomalía de temperatura máxima para Xpujil, 2011

En el cuadro 12 se observa que en todo el año se presentaron temperaturas anómalas exceptuando mayo que no cuenta con datos y al compararla con la estación de Zoh-Laguna, es claro que el lugar en donde se encuentra esta estación presenta temperaturas mayores por lo menos para el año 2011. El rango va desde 0.1 a 4.8°C.

Cuadro 12. Anomalía de temperatura máxima para Xpujil, 2011.

Anomalías diarias de temperatura máxima (2011)												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1.4	1.1	3	3.4	NO_D	1.8	-1.9	-1.5	-0.5	1.3	-0.7	-3.3
2	1.4	-1.9	2.9	4.4	NO_D	1.8	-2.8	-1.5	1.5	0.3	-1.6	-1.2
3	3.3	2.1	1.8	1.3	NO_D	0.9	0.2	-0.5	0.5	3.4	-0.6	0.9
4	2.3	1.1	0.7	2.2	NO_D	3	-0.8	1.5	1.5	-0.6	0.4	-2.1
5	0.3	0.1	-0.4	4.1	NO_D	2	-1.7	-0.5	2.5	-0.5	-0.6	-2
6	0.3	2.1	-0.4	0	NO_D	-0.9	0.3	0.5	-0.4	0.5	-1.5	-1.9
7	2.2	1.1	0.5	0	NO_D	0.1	0.3	1.5	-2.4	-0.4	-1.5	-0.9
8	1.2	0.1	1.4	-2.1	NO_D	2.2	-1.6	0.5	-1.4	1.6	-1.5	-3.8
9	0.2	2.1	3.3	-0.2	NO_D	2.2	-0.6	2.5	0.6	0.6	-0.5	0.3
10	2.2	0.1	0.2	0.7	NO_D	NO_D	0.4	2.5	1.6	1.7	-2.4	-0.6
11	1.2	1.1	-0.9	0.6	NO_D	NO_D	-4.5	2.4	-0.4	-0.3	0.6	-2.6
12	-1.9	2.1	0	1.6	NO_D	-6.6	-6.5	3.4	-3.4	-0.2	-0.4	-2.5
13	-5.9	-4.9	-1	0.5	NO_D	-0.5	-1.5	-0.6	-2.4	-3.2	-2.4	-0.4
14	0.1	-2.9	-0.1	-0.6	NO_D	NO_D	-0.5	1.4	-0.4	0.9	-1.3	-3.4
15	-1.9	-0.9	1.8	-1.7	NO_D	0.6	-1.4	-0.6	0.6	-0.1	0.7	-1.3
16	-2	-3.9	-1.3	-0.8	NO_D	1.7	0.6	-0.6	-1.4	-1	0.7	NO_D
17	0	0	-1.4	0.2	NO_D	NO_D	0.6	0.4	-0.3	-1	-0.2	NO_D
18	1	-1.1	0.5	0.2	NO_D	NO_D	0.6	1.4	0.7	-1	0.8	-1.3
19	1	0.8	-1.5	-0.9	NO_D	1.7	0.6	0.4	-1.2	-4	1.9	-1.3
20	2	-5.2	-0.6	1.1	NO_D	1.8	0.6	1.4	0.8	-3.9	-1	-0.3
21	1	1.7	0.3	0	NO_D	-7.2	-0.4	-0.6	0.8	-1.9	0.1	-1.4
22	0	2.6	-0.8	-1	NO_D	-0.2	-0.4	-0.5	1.9	-0.9	-0.9	-0.4
23	1	1.5	0.2	-2.1	NO_D	0.9	0.6	1.5	-1.1	-2.9	-1.8	NO_D
24	-1	0.4	1.1	-0.1	NO_D	NO_D	1.6	0.5	1	-2.8	-1.7	NO_D
25	2.1	1.3	0	-1.2	NO_D	NO_D	1.6	0.5	2	-2.8	-0.7	0.6
26	-3.9	0.2	-1.1	1.8	NO_D	-2	1.5	0.5	1.1	-2.8	0.4	-0.5
27	-3.9	2.2	3.8	3.7	NO_D	-7	1.5	0.5	1.1	-1.8	-0.5	-0.5
28	0.1		4.8	1.7	NO_D	-3	-1.5	2.5	2.2	-1.8	-7.5	NO_D
29	1.1		3.7	-1.4	NO_D	-2.9	0.5	-1.5	1.2	0.3	-6.4	NO_D
30	-0.9		4.6	NO_D	NO_D	NO_D	1.5	0.5	NO_D	-0.7	-5.3	NO_D
31	1.1		NO_D		NO_D		NO_D	NO_D		0.3		NO_D

Anomalías de temperatura máxima para Xpujil, 2010-2011

El siguiente gráfico (Figura 11) muestra el comportamiento térmico de la presente estación para los años 2010 y 2011. Los registros de temperatura del 2010 se muestran en color azul marino y los del 2011 en azul cielo, destacando para los dos años los picos anormales registrados por día en los meses de marzo, abril y octubre en un rango que va de los 2.2 a 4.8°C. Comparando los dos años se observó, que el 2011 fue considerablemente más caluroso que el 2010, cabe señalar que los meses en promedio más calurosos para los dos años fueron agosto y septiembre.

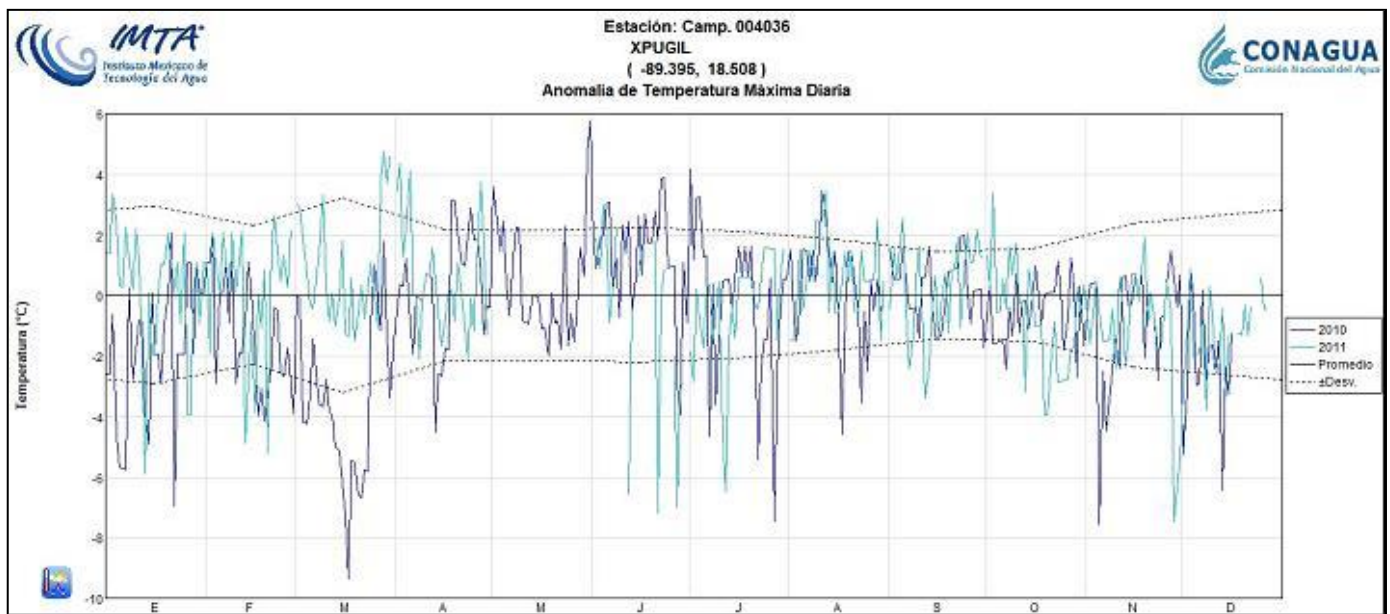


Figura 11. Anomalía de temperatura máxima diaria en Xpujil, 2010-2011

Anomalías de precipitación para “Xpujil”, 2010

En el cuadro 13 se presentan los días con precipitaciones anómalas para la estación de Xpujil en el 2010. Aquí se debe resaltar que los meses con menor precipitación (pp) acumulada fueron: enero, febrero, abril, mayo, octubre y noviembre con -4.2, -16.8, -13.6, -75.3, -55 y -30.1 mm de precipitación respectivamente.

Cuadro 13. Anomalías de precipitación para Xpujil, 2010

Anomalías diarias de precipitación 2010												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.1	-1.2	-0.5	-0.5	-2.8	-5	-5	-1.1	-5.1	-3.7	-2.6	-1.9
2	-1.8	-1.2	-0.5	-0.5	-2.9	-5	-5	22.4	-5	-3.7	-2.5	-1.9
3	21.2	-1.2	-0.5	-0.5	-3.1	-5	-5	4.3	-5	-3.6	-2.5	-1.9
4	-1.8	-1.1	-0.4	-0.5	-3.2	-5	-5	-5.7	-4.9	-3.6	1.1	-1.9
5	-1.8	-1.1	-0.4	-0.5	-3.3	-5	-4	29.2	-4.8	-3.6	-2.4	-1.9
6	-1.8	-1.1	-0.4	-0.6	-3.5	-5	1	-3.8	-4.8	-3.6	-2.3	-2
7	-1.8	-1	-0.4	-0.6	-3.6	-5	-4.2	-5.8	-4.7	-3.5	-2.3	-2
8	20.2	-1	-0.3	-0.6	-3.7	-5	15	16.1	-2.6	-3.5	-2.2	-2
9	-1.8	-1	-0.3	-0.6	-3.9	-5	-3.9	-5.9	-3.2	-3.5	-2.2	-2
10	-1.8	-1	-0.3	-0.6	-4	-5	-4.9	-6	14.6	-3.4	-2.2	-2
11	-1.8	-0.9	-0.3	-0.6	-4.2	3	-4.9	-4.5	8.6	-3.4	-2.1	-2
12	-1.8	-0.9	-0.3	-0.7	-4.3	-5.1	-3.9	-6	-4.4	-3.4	-2.1	-2
13	-1.8	-0.9	-0.2	-0.7	-4.4	-2.1	2.1	-6.1	-4.3	-3.4	-2	-2
14	-1.7	-0.8	-0.2	-0.7	-4.6	-0.1	-4.9	-6.1	-4.2	-3.3	-2	-2
15	-1.7	-0.8	-0.2	-0.7	-4.7	-3.1	-4.9	-4.2	-4.2	-3.3	-1.9	-2
16	-1.7	-0.8	-0.2	-0.7	13.2	-5.1	-4.9	7.8	-4.1	-3.3	-1.9	-2
17	-1.7	-0.7	-0.2	-0.9	-1.8	-5.1	-5	-6.1	-4.1	-3.2	-1.9	-2
18	-1.7	0.3	-0.2	-1	12.2	-5.1	-5	-5.1	-0.4	-3.2	4.1	NO_D
19	-1.6	3.3	0.3	-1.1	-2.4	-5.1	83	-1	18	-3.2	1.1	NO_D
20	-1.6	-0.7	11.7	-1.3	-4.9	-5.1	9.9	-5.9	24	-3.1	5.1	NO_D
21	-1.6	-0.7	-0.3	-1.4	-4.9	-5.1	92.9	-5.9	29	-3.1	3.1	NO_D
22	-1.5	-0.6	-0.3	-1.6	-3.9	-5	24.3	14.2	17.1	-3	-1.9	NO_D
23	-1.5	-0.6	-0.3	-1.7	25.1	-5	-4.2	29.3	7.1	2	-0.9	NO_D
24	-1.5	-0.6	-0.3	-1.8	-1.9	10	3.8	14.3	2.1	12.1	-0.9	NO_D
25	-1.5	-0.6	-0.3	-2	-4.9	2	4.7	-5.6	-3.8	-1.9	-1.9	NO_D
26	-1.4	-0.6	-0.4	-2.1	-4.9	25	4.2	-5.5	-1.7	-2.8	-1.9	NO_D
27	-0.9	-0.5	-0.4	-2.2	-4.9	97	-2.4	-5.5	10.2	-2.8	-1.9	NO_D
28	0.6	-0.5	-0.4	6.1	-4.9	-4	-4.4	-5.4	-1.8	-1.7	-1.9	NO_D
29	-1.3		-0.4	-2.5	-4.9	-5	-5.5	-0.8	-0.9	17.3	-1.9	NO_D
30	-1.3		-0.4	-2.6	-4.9	-5	-5.5	-5.3	-2.7	2.3	-1.9	NO_D
31	-1.3		-0.5		-5		-5.5	NO_D		-2.6		NO_D

Anomalía de precipitación para “Xpujil”, 2011

En el siguiente cuadro (14) se destaca el déficit de precipitación en marzo, ya que prácticamente todo el mes se registraron anomalías negativas en la precipitación. Por otro lado, se comparó esta estación con la de Zoh Laguna para el mismo año y se obtuvo que varían por dos días, es decir en Zoh-Laguna se presentaron 297 días con precipitaciones negativas y en Xpujil 295 días con déficit de precipitación, teniendo los meses más secos en enero, febrero, marzo, julio, noviembre y diciembre con -21.7, -4.8, -5.6, -8.2, -6.6 y 31.5 mm de pp respectivamente.

Cuadro 14. Anomalías de precipitación para Xpujil, 2011.

Anomalías diarias de precipitación (2011)												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-1.9	-1.2	-0.5	-0.5	NO_D	13	-5	-1.6	-1.1	-3.7	2.4	-1.9
2	-1.8	-1.2	-0.5	-0.5	NO_D	-5	3	-4.6	-5	11.3	10.5	-1.9
3	-1.8	-1.2	-0.5	-0.5	NO_D	0	10	-5.7	-5	11.4	-2.5	-1.9
4	-1.8	-1.1	-0.4	36.5	NO_D	3	-2	-5.7	-4.9	-3.6	-2.4	1.1
5	-1.8	-1.1	-0.4	-0.5	NO_D	5	0	-5.8	1.2	-1.6	-2.4	-1.9
6	-1.8	-1.1	-0.4	-0.6	NO_D	-5	35	-5.8	2.2	0.4	-2.3	0
7	-1.8	-1	-0.4	-0.6	NO_D	-5	-3	2.2	3.3	17.5	-2.3	-2
8	-1.8	5	-0.3	-0.6	NO_D	75	-5	-5.9	-4.6	-3.5	-2.2	-2
9	-1.8	-1	-0.3	-0.6	NO_D	0	-4.9	-5.9	-4.6	-3.5	-2.2	-2
10	-1.8	6	-0.3	-0.6	NO_D	NO_D	1.1	-6	-4.5	16.6	2.8	-2
11	0.2	3.1	-0.3	-0.6	NO_D	NO_D	-1.4	-6	5.6	-3.4	-2.1	-1
12	28.2	-0.9	-0.3	-0.7	NO_D	17.9	9.1	-6	-3.4	16.6	-2.1	2
13	-1.8	-0.9	-0.2	-0.7	NO_D	-2.1	-1.4	-6.1	30.7	5.6	-2	0
14	-1.7	-0.8	-0.2	-0.7	NO_D	NO_D	-4.9	14.9	-0.2	6.7	-2	3
15	-1.7	-0.8	-0.2	-0.7	NO_D	-5.1	-4.9	-5.2	1.3	6.7	-1.9	-1
16	-1.7	-0.8	-0.2	-0.7	NO_D	-5.1	-2.9	-6.2	-1.1	11.7	-1.9	-2
17	-1.7	-0.7	-0.2	-0.9	NO_D	NO_D	-5	9.9	3.9	-0.2	5.1	-2
18	-1.7	-0.7	-0.2	-1	NO_D	NO_D	-5	-6.1	8	-2.2	-1.9	-2
19	-1.6	-0.7	-0.2	-1.1	NO_D	4.9	1	-6	-4	-3.2	8.1	-2
20	-1.6	-0.7	-0.3	-1.3	NO_D	-0.1	-5.1	0.6	-4	-3.1	-1.9	-2
21	-1.6	-0.7	-0.3	-1.4	NO_D	-5.1	-5.1	3.6	-4	-3.1	5.1	-1.9
22	-1.5	-0.6	-0.3	-1.6	NO_D	-5	-3.2	1.2	-3.9	-3	-1.9	-0.9
23	-1.5	-0.6	-0.3	-1.7	NO_D	-5	-5.2	32.8	-3.9	-3	-1.9	-1.9
24	-1.5	-0.6	-0.3	-1.8	NO_D	NO_D	-5.2	35.3	1.6	-2.9	-1.9	-1.9
25	-1.5	-0.6	-0.3	-2	NO_D	NO_D	15.7	-4.6	1.2	-2.9	-1.9	7.1
26	-1.4	-0.6	-0.4	-2.1	NO_D	17	6.7	-5.5	-3.8	2.2	-1.9	-1.9
27	-1.4	-0.5	-0.4	-2.2	NO_D	35	-4.4	29.5	-3.8	-2.8	1.1	0.1
28	-1.4	-0.5	-0.4	12.6	NO_D	1.5	-5.4	14.6	10.7	-2.7	-1.9	-1.9
29	-1.3		-0.4	-2.5	NO_D	-5	-5.5	-5.3	0.3	-0.7	-1.9	-1.9
30	-1.3		-0.4	-2.6	NO_D	NO_D	-5.5	2.2	NO_D	-2.7	-1.9	-1.9
31	-1.3		-0.5		NO_D		-5.5	NO_D		-2.6		-1.9

Anomalía de precipitación “Xpujil” (2010-2011)

Se muestra una gráfica (Figura 12) comparativa del comportamiento pluvial de la estación Xpujil en el 2010 y el 2011, denotando que la frecuencia con que se presentaron días con anomalías negativas fue mayor en el 2010 comparado con el 2011.

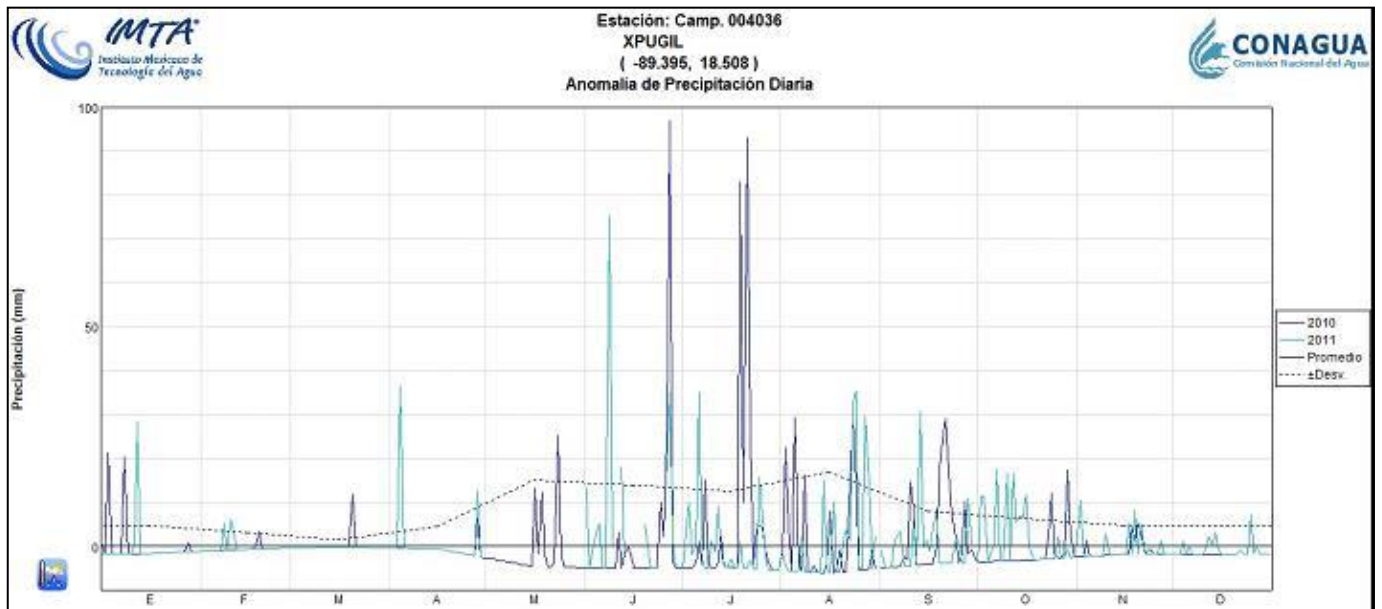


Figura 12. Anomalía de precipitación diaria de Xpujil, 2010-2011

Nicolás Bravo

Las normales climatológicas para la estación de “Nicolás Bravo” indican que los meses más caluroso en un periodo de 1980 a 2010 fueron mayo, abril, junio, agosto y septiembre con 33.6, 33.1, 32.8 y 32.5 °C respectivamente y los meses con menor precipitación de diciembre a abril (Cuadro 15)

Cuadro 15. Normales climatológicas para Nicolás Bravo, 1981-2010

NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
												PERIODO: 1981- 2010	
ESTACIÓN: 00023016	NICOLAS BRAVO KM7		LATITUD: 18°27'30" N					LONGITUD : 088°55' 56" W.				ALTURA: 109.0 msnm	
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	29.9	30.6	32	33.1	33.6	32.9	32.4	32.8	32.5	31.9	31	29.8	31.9
MAXIMA MENSUAL	32.6	33.6	34.8	35.6	37	35.6	33.8	36	34.3	33.6	33.4	33.4	
AÑO DE MAXIMA	2008	1995	2009	2008	1981	1997	1998	2008	1995	1997	2007	1995	
MAXIMA DIARIA	39	36	43	42	40	40	39.8	39.6	37	39.5	39.3	39	
FECHA MAXIMA DIARIA	09/1984	20/1988	09/2005	26/2005	06/1995	02/1995	30/1989	27/1990	28/1991	26/1989	22/1989	28/1995	
AÑOS CON DATOS	27	26	29	29	28	26	26	27	27	28	25	27	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	23.8	24.4	25.4	26.4	27.2	27.2	26.8	27	26.8	26.2	25.3	24	25.9
AÑOS CON DATOS	27	26	28	29	28	26	26	27	27	28	25	27	
PRECIPITACIÓN													
NORMAL	52.9	34.8	31	34.8	75.7	183.2	144.7	131.7	167.9	119.7	77.1	51.5	1,105.00
MAXIMA MENSUAL	129.2	92	112	158.8	267	784.8	425	375.2	461.5	305.9	228.8	123.1	
AÑO DE MAXIMA	1999	1985	1982	2005	2008	1993	1984	2001	1982	1998	1998	1991	
MAXIMA DIARIA	53	68	85	150	82	220	126	154.3	180	85	50	37	
FECHA MAXIMA DIARIA	31/1997	18/1985	26/1982	03/2005	28/2008	01/2008	11/1985	20/2001	20/1982	13/1983	23/1997	04/1982	
AÑOS CON DATOS	28	27	29	29	28	28	29	29	29	28	27	28	

Anomalías de temperatura para “Nicolás Bravo”, 2010

Los días con anomalías de temperatura máxima para el 2010, se encuentran en un rango de 0.1 a 5 °C marcados en rosa y negritas. También se observa que el mes más caluroso en promedio fue enero con 0.7°C (Cuadro 16).

Cuadro 16. Anomalías de temperatura en Nicolás Bravo, 2010

Anomalías diarias de temperatura máxima 2010												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.1	-0.3	-1.4	2.2	-1.8	1.4	0.1	4.1	NO_D	-1.5	NO_D	1.6
2	-0.9	-0.4	-1.5	-0.9	-2.8	-2.6	0.1	-0.9	0	-1.4	NO_D	0.7
3	0.1	1.6	-0.5	-0.9	-3.8	-3.6	-1.8	2.1	2	2.6	-1.4	NO_D
4	4.1	-0.4	0.4	-3	-2.9	-2.6	2.2	-0.9	NO_D	1.6	NO_D	-2.3
5	3.1	-5.4	0.4	-3	-1.9	-3.5	-1.8	NO_D	0	-1.4	NO_D	-4.2
6	0.1	0.5	1.3	-3	-1.9	-1.5	-2.8	1	NO_D	-1.3	-0.3	0.8
7	-0.9	-0.5	NO_D	-4.1	-3.9	-1.5	-0.8	-2	-1.9	-0.3	-0.3	4.8
8	4.1	5.5	0.2	-4.1	0.1	-2.4	-0.7	-3	NO_D	1.7	NO_D	1.9
9	1.1	-1.5	-0.8	-4.2	0	-2.4	0.3	-1	NO_D	-0.3	NO_D	-3.1
10	3.1	-1.6	-0.9	-3.2	0	-1.4	-0.7	-0.1	NO_D	-1.2	NO_D	NO_D
11	1.1	-2.6	0.1	-1.2	-2	-2.3	-2.7	-0.1	NO_D	-2.2	NO_D	-5
12	-0.9	-1.6	1	-1.3	-1	-2.3	-0.6	-1.1	NO_D	1.8	1.9	-4
13	-0.9	-1.6	-0.1	-0.3	-1.1	1.7	-2.6	NO_D	NO_D	-0.2	NO_D	-15.9
14	-1.9	-0.7	0.9	-0.4	-2.1	-0.3	-1.6	NO_D	NO_D	-2.1	NO_D	-0.9
15	0.1	-0.7	0.8	-0.4	-0.1	-1.2	-0.6	NO_D	NO_D	-1.1	NO_D	0.1
16	1.1	0.3	-2.2	-1.4	-1.1	-1.2	-1.6	-2.2	NO_D	-2.1	NO_D	NO_D
17	2	-0.8	-0.3	1.5	-3.1	-1.2	-2.6	-1.2	-1.8	0.9	NO_D	NO_D
18	2	0.2	-2.3	-0.5	-3.1	-0.2	-1.6	-0.1	1.2	2	NO_D	1.2
19	1	0.1	-1.3	-2.5	0	-1.1	0.4	-2.1	NO_D	-2	NO_D	2.2
20	5	1.1	-2.4	0.5	-1	-1.1	-2.6	-0.1	NO_D	-1	NO_D	-4.8
21	2.9	NO_D	-3.4	-1.6	-1	-2.1	-0.7	-1.1	NO_D	NO_D	NO_D	0.1
22	-0.1	1	-3.5	0.4	0	-0.1	-0.7	NO_D	NO_D	-2.9	NO_D	0.1
23	-1.1	0.9	-3.5	-1.6	-0.9	-1	1.3	-1.1	NO_D	-1.8	NO_D	-0.9
24	-1.1	-0.1	-2.5	-0.6	-0.9	1	3.3	NO_D	-0.6	-0.8	NO_D	-0.9
25	-2.2	0.8	-1.6	1.4	-2.9	-3	1.3	NO_D	3.4	1.2	-0.6	-1.9
26	-1.2	1.7	-2.6	-0.7	-0.8	-2	0.2	3.9	-0.6	-2.7	NO_D	-0.9
27	-0.2	-0.3	-2.7	0.3	-0.8	-1	0.2	NO_D	0.4	-0.2	0.5	-0.9
28	-0.2	-1.4	-0.7	-0.7	0.2	0.1	NO_D	NO_D	-1.5	NO_D	NO_D	-1.9
29	0.7		-1.7	-0.7	-1.7	-0.9	NO_D	-2	0.5	NO_D	0.5	0.1
30	0.7		-2.8	-1.8	1.3	-0.9	NO_D	4	3.5	0.4	1.1	NO_D
31	-0.3		-0.8		1.3		NO_D	0		NO_D		NO_D

Anomalías de temperatura para “Nicolás Bravo”, 2010

En el 2011, los meses de abril a septiembre destacan como los más cálidos con 1.9, 1.2, 0.1, 2, 2 y 3.1°C respectivamente. Marcados en rosa y con negritas se muestran las anomalías térmicas durante el año (Cuadro 17).

Cuadro 17. Anomalías de temperatura máxima en Nicolás Bravo, 2011

Anomalías diarias de temperatura máxima para 2011												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	NO_D	1.7	NO_D	-0.8	0.2	2.4	2.1	NO_D	2	3.5	-3.5	NO_D
2	NO_D	-0.4	NO_D	-1.9	4.2	3.4	0.1	3.1	5	3.6	-2.5	NO_D
3	NO_D	-1.4	NO_D	-1.9	3.2	-0.6	1.2	5.1	3	4.6	-3.4	NO_D
4	NO_D	-1.4	NO_D	0	1.1	1.4	3.2	4.1	2	3.6	-4.4	NO_D
5	NO_D	-0.4	NO_D	0	0.1	-0.5	2.2	1	3	4.6	-0.4	NO_D
6	NO_D	-0.5	NO_D	-2	4.1	0.5	0.2	4	2.1	4.7	-5.3	NO_D
7	NO_D	NO_D	NO_D	-2.1	2.1	1.5	2.2	4	3.1	2.7	-2.3	NO_D
8	NO_D	-1.5	NO_D	-0.1	3.1	-0.4	1.3	3	2.1	2.7	-6.2	NO_D
9	NO_D	-0.5	NO_D	-0.2	1	1.6	2.3	3	5.1	2.7	-7.2	NO_D
10	NO_D	-0.6	NO_D	-0.2	3	-1.4	0.3	1.9	2.1	2.8	-2.2	NO_D
11	NO_D	-1.6	NO_D	0.8	1	-1.3	3.3	-1.1	3.1	4.8	-1.1	NO_D
12	NO_D	-0.6	NO_D	4.7	0	-0.3	0.4	NO_D	2.1	4.8	-2.1	NO_D
13	NO_D	-1.6	NO_D	7.7	0.9	-0.3	-0.6	0.9	4.1	4.8	-6.1	NO_D
14	NO_D	-0.7	NO_D	7.6	-0.1	2.7	3.4	2.9	5.1	5.9	-2	NO_D
15	NO_D	NO_D	NO_D	5.6	2.9	0.8	2.4	3.9	4.2	-10.1	-6	NO_D
16	NO_D	-0.7	NO_D	4.6	3.9	1.8	3.4	4.8	1.2	NO_D	0.1	NO_D
17	NO_D	NO_D	NO_D	-1.5	-0.1	-1.2	2.4	1.8	-0.8	-9.1	-2.9	NO_D
18	NO_D	-1.8	NO_D	2.5	-0.1	-3.2	2.4	4.9	4.2	-6	-6.9	NO_D
19	NO_D	NO_D	NO_D	4.5	1	-2.1	3.4	2.9	3.2	NO_D	-0.8	NO_D
20	NO_D	NO_D	NO_D	4.5	1	-0.1	2.4	4.9	5.3	-4	-2.8	NO_D
21	NO_D	NO_D	NO_D	2.4	2	0.9	0.3	-1.1	1.3	-6.9	-4.8	NO_D
22	NO_D	NO_D	NO_D	1.4	3	-1.1	NO_D	NO_D	3.3	-8.9	-1.7	NO_D
23	NO_D	NO_D	NO_D	2.4	2.1	0	2.3	NO_D	0.3	0.2	-3.7	NO_D
24	NO_D	NO_D	NO_D	1.4	0.1	1	2.3	4.9	4.4	-6.8	-1.6	NO_D
25	NO_D	NO_D	NO_D	1.4	-1.9	-1	2.3	2.9	5.4	-5.8	-4.6	NO_D
26	NO_D	NO_D	NO_D	2.3	0.2	-2	NO_D	3.9	3.4	NO_D	-6.6	NO_D
27	NO_D	NO_D	NO_D	4.3	1.2	-1	0.2	2.9	2.4	-3.7	NO_D	NO_D
28	NO_D	NO_D	NO_D	4.3	0.2	0.1	NO_D	5	5.5	-0.7	-3.5	NO_D
29	NO_D		NO_D	4.3	2.3	0.1	NO_D	2	1.5	0.4	-3.5	NO_D
30	NO_D		NO_D	2.2	1.3	0.1	NO_D	2	4.5	3.4	-2.9	NO_D
31	NO_D		NO_D		0.3		NO_D	4		2.5		NO_D

Anomalía de precipitación “Nicolás Bravo” (2010-2011)

El comportamiento térmico para Nicolás Bravo indica en color azul cielo (Figura 13), que el 2011 fue más caluroso que el 2010 denotado con azul rey, siendo el 13 de abril del 2011 el día más cálido de entre los dos años en estudio con una temperatura máxima promedio de 7.7°C.

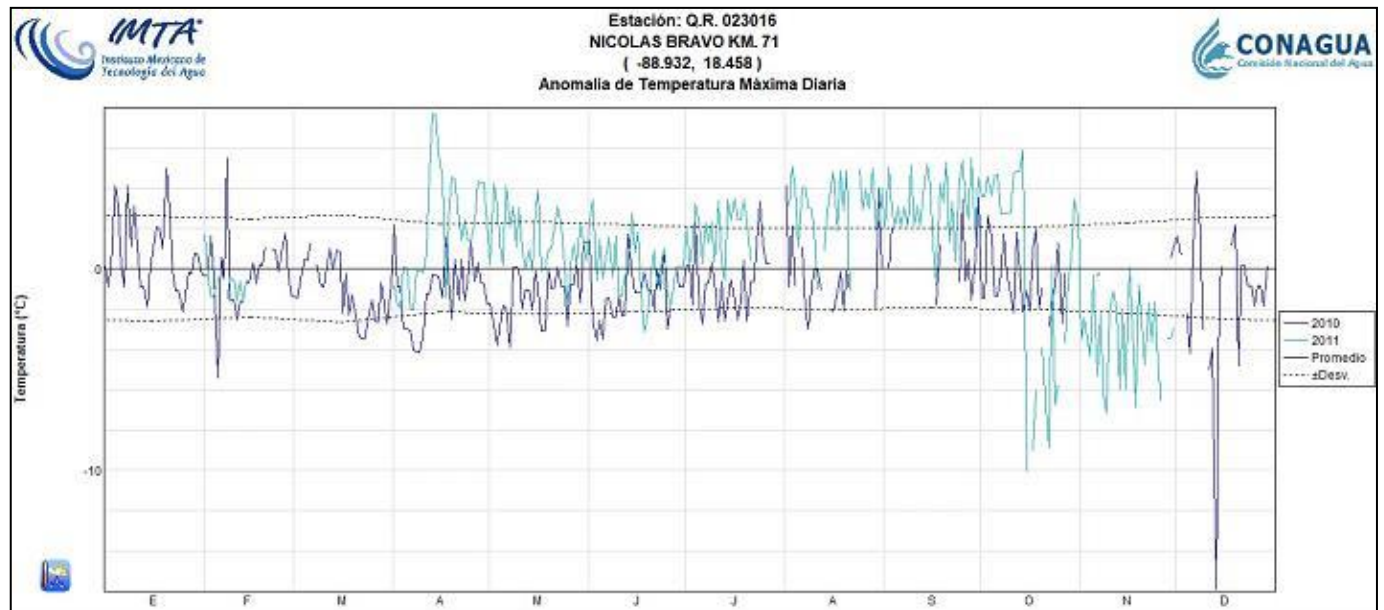


Figura 13. Anomalía de temperatura en Nicolás Bravo, 2010-2011

Anomalía de precipitación en “Nicolás Bravo”, 2010

Se observa en la siguiente tabla que los meses más lluviosos se presentaron de abril a septiembre con hasta más de 14 mm sobre la normal en el mes de septiembre (Cuadro 18).

Cuadro 18. Anomalías de precipitación en Nicolás Bravo, 2010

Anomalías diarias de precipitación para el 2010												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-1.8	-1.6	-1.2	-1.1	-2	-4.7	-5.8	0.4	-2.3	-5.3	-3.4	-2.2
2	-1.8	-1.6	-1.1	0.2	-2	-4.8	-5.8	-4.5	-3.3	-5.2	4.7	-2.1
3	-1.8	-1.5	-0.1	-0.1	-1.6	-5	-5.2	-4.5	-5.4	-5.2	-3.3	0.9
4	-1.8	-1.5	-0.1	0.4	-2.1	-5.1	-5.7	5.5	NO_D	-5.1	-3.2	-2.1
5	13.2	-1.5	-0.6	-1.2	-0.9	5.3	3.3	-4.4	-5.5	0	-3.1	-2.1
6	-1.8	0.2	0.4	0.1	-2.2	3.6	-1.5	-4.4	-0.6	-4.9	-3.1	-2
7	-1.9	-1.5	NO_D	-1.2	-2.3	-0.1	-5.5	-4.4	-5.7	-4.9	-3	-2
8	-1.9	-1.4	-0.8	-1.2	-2.3	-5.6	-4.9	-4.4	-5.8	-4.8	-3	-2
9	-1.9	-1.4	-1.1	0.7	-1.5	-5.7	-4.7	0.7	-5.8	-4.7	-2.9	-2
10	-1.9	-1.4	-1.1	-1.2	-2.4	-5.8	-5.3	-4.3	-0.9	-4.7	-2.9	2.1
11	6.1	-1.4	-1.1	-1.2	-2.5	-5.1	-5.3	-4.3	-6	-4.6	-2.8	-1.9
12	-1.9	0.1	-1	-0.2	-2.5	-6.1	-5.3	-4.2	-1	-4.5	-2.8	-1.9
13	-1.9	-1.3	-1	-0.4	-2.6	-6.2	-5.2	5.9	-0.1	-4.5	-2.7	0.2
14	-1.9	-1.3	-1	0.6	-2.6	-6.3	-4.4	-4.2	9.8	-4.4	-2.7	-1.8
15	-1.8	-1.3	-1	0.5	-1.4	-6.4	3.8	-4.1	121.7	-2.3	-2.6	-1.8
16	-1.4	-1.3	-1	0.1	-2.7	-1	6.3	-4.1	-1.3	-4.3	-0.5	-1.8
17	-1.9	-1.3	0.3	1.8	-2.8	-6.5	0.7	-4.2	-4.3	-4.2	-2.5	-1.8
18	-1.8	-1.3	-1	-0.3	-0.5	-6.5	3.3	-4.2	-3.2	-4.1	0.5	-1.8
19	-1.8	-1.3	0.9	-1.4	-3.1	-6.4	-0.2	10.7	-4.1	-4.1	2.5	-1.8
20	-1.8	-1.2	-1	-0.4	-3.2	-6.4	2.1	-4.4	-3.1	-4	-2.4	-1.8
21	-1.8	NO_D	-1	-0.2	-3.3	-2.8	-4.3	-4.5	-4	-4	-2.4	-1.8
22	-1.8	-1.2	1.5	-1.5	4.3	-6.3	-4.1	-4.5	-1.9	-3.9	-2.4	-1.8
23	-1.6	-1.2	-1.1	7.9	6.7	-6.2	-3.4	-4.6	-1.9	-3.9	-2.4	-1.8
24	-0.4	-1.2	-1.1	-0.6	-3.7	-5.6	-4.8	-4.7	-5.8	-3.8	39.7	-1.8
25	0	-1.2	-1.1	-1.7	-3.8	-4.1	-4.8	-4.7	-5.7	-3.8	-2.3	-1.8
26	-0.6	-1.2	-1.1	-1.7	-4	6.2	-4.8	-4.8	-5.6	-3.7	-2.3	-1.8
27	-1.7	-1.2	2.5	-1.8	-4.1	0.7	-4.4	-4.9	14.4	-3.6	-2.3	-1.8
28	-0.4	-1.2	-1.1	6.2	-4.2	-6	NO_D	-5	-5.5	-0.6	-2.2	-1.8
29	-1.1		-1.1	-1.9	-4.3	-5.6	NO_D	7	-5.4	-3.5	-2.2	-1.8
30	-1.6		-1.1	-1.9	-4.5	-5.9	NO_D	-5.1	-5.4	-3.5	-2.2	-1.8
31	1.8		2.8		-4.6		NO_D	-3.2		NO_D		-1.8

Anomalía de precipitación en “Nicolás Bravo”, 2011

En el cuadro 19, se muestra que los meses con anomalía de precipitación negativa fueron enero, febrero, abril, agosto, octubre y diciembre en un rango de -58.2 a -28 mm y la anomalía positiva en marzo, mayo, junio, julio y noviembre con 53.5, 12, 478.8, 31.4 y 9.9 mm respectivamente.

Cuadro 19. Anomalía de precipitación en Nicolás Bravo, 2011

Anomalías diarias de precipitación para el 2011												
Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	-1.8	-1.6	-1.2	-1.1	-2	-4.7	-0.8	-1.1	-5.3	-5.3	-3.4	-2.2
2	-1.8	-1.6	-1.1	-1.1	-2	-4.8	0.2	-4.5	-5.3	-4.8	11.7	-2.1
3	-1.8	-1.5	-1.1	-1.1	-2.1	-5	8.3	-4.5	-5.4	-4.7	6.7	-2.1
4	-1.8	6.8	-1.1	-1.1	-2.1	-5.1	-0.7	-2.7	-5.5	-5.1	-1.2	-2.1
5	-1.8	-1.5	-1.1	-1.2	-2.2	-5.2	29.4	-4.4	-5.5	-5	-3.1	-2.1
6	-1.8	-1.5	-1.1	-1.2	-2.2	-5.3	46.4	-4.4	-5.6	-4.3	-3.1	-2
7	NO_D	-1.5	-1.1	-1.2	-2.3	-5.4	-5.5	-4.4	-3.7	-4.4	-1	-2
8	NO_D	-1.4	-1.1	-1.2	-2.3	174.4	-4	-4.4	-5.8	-4.8	5	-2
9	-1.9	-1.4	-1.1	-1.2	-2.4	-5.4	-2.4	-4.3	-5.8	-4.7	1.1	-2
10	-1.9	-1.4	81.3	-1.2	-2.4	34.2	-0.4	-4.3	-0.9	-4.2	-2.9	-1.9
11	-1.9	-1.4	-1.1	-1.2	-2.5	10.4	-2.3	-2.3	2	5.6	-2.8	-1.9
12	-1.9	-1.4	-1	-1.2	-2.5	4.4	-0.3	-4.2	-6	2.5	1.2	-1.9
13	-1.9	-1.3	-1	-1.2	-2.6	0.5	4.7	3.8	-0.3	4.1	5.3	-1.8
14	-1.9	-1.3	-1	-1.2	-2.6	-6.3	-5.2	-4.2	-6.2	0.6	0.3	-1.8
15	-1.9	-1.3	1	-1.2	-2.7	-4.9	-5.1	-1.6	10.2	-3.8	-2.6	-1.8
16	-1.9	-1.3	-1	-1.2	-2.7	78.4	-5.1	-4.1	11.7	29.4	-2.5	-1.8
17	-1.9	-1.3	-1	-1.3	11.3	26.3	-5	-4.2	-6.3	-4.2	-2.5	-1.8
18	-1.8	-1.3	-1	-1.3	-3	125.8	-5	3.8	6.3	-4.1	-2.5	-1.8
19	-1.8	-1.3	-1	-1.4	-3.1	12.9	-5	-4.3	5.4	3.9	22.5	-1.8
20	-1.8	-1.2	-1	-1.4	-3.2	38.7	-3.5	-4.4	-6.1	-4	-2.4	-1.8
21	-1.8	-1.2	-1	-1.5	-3.3	-2.8	-2.9	6	-6	-4	-2.4	-1.8
22	-1.8	-1.2	-1.1	-1.5	-3.5	0.6	-2.4	10.5	-5.9	-3.9	-2.4	-1.8
23	-1.7	-1.2	-1.1	-1.6	-3.6	-6.2	-4.9	0.4	54.6	-3.9	-2.4	-1.8
24	-1.7	-1.2	-1.1	-1.6	-3.7	-6.2	-4.8	1.7	-5.8	-3.8	-2.3	-1.8
25	-1.7	-1.2	-1.1	-1.7	78.3	6.4	0.7	-2.7	-2.7	-3.8	0.7	-1.8
26	-1.7	-1.2	-1.1	-1.7	-4	11.9	15.2	-4.8	-5.6	8.3	-0.3	-1.8
27	-1.7	-1.2	-1.1	-1.8	-4.1	36	-3.7	-4.9	-0.6	-3.6	-2.3	-1.8
28	-1.7	-1.2	-1.1	-1.8	-4.2	6	-3.7	-5	-5.5	-3.6	-2.2	-1.8
29	NO_D		-1.1	-1.9	-4.3	2.6	-3.2	-5	2.6	-3.5	-2.2	-1.8
30	-1.6		-1.1	-1.9	-4.5	-3.9	-3.1	-5.1	-5.4	-3.5	-2.2	-1.8
31	-1.6		-1.1		-4.6		2.4	0.3		-0.4		-1.8

Anomalía de precipitación “Nicolás Bravo” (2010-2011)

El comportamiento de las anomalías en precipitación para el 2010 se muestra en color azul rey y denotan que prácticamente todo el año se mantuvo con una anomalía negativa, exceptuando los meses de abril y septiembre con un superávit de 1.6 y 26 mm respectivamente. Comparando el 2010 con el 2011 se observó que el 2010 fue considerablemente más seco que el 2011 con 112 días anómalos (Figura 14).

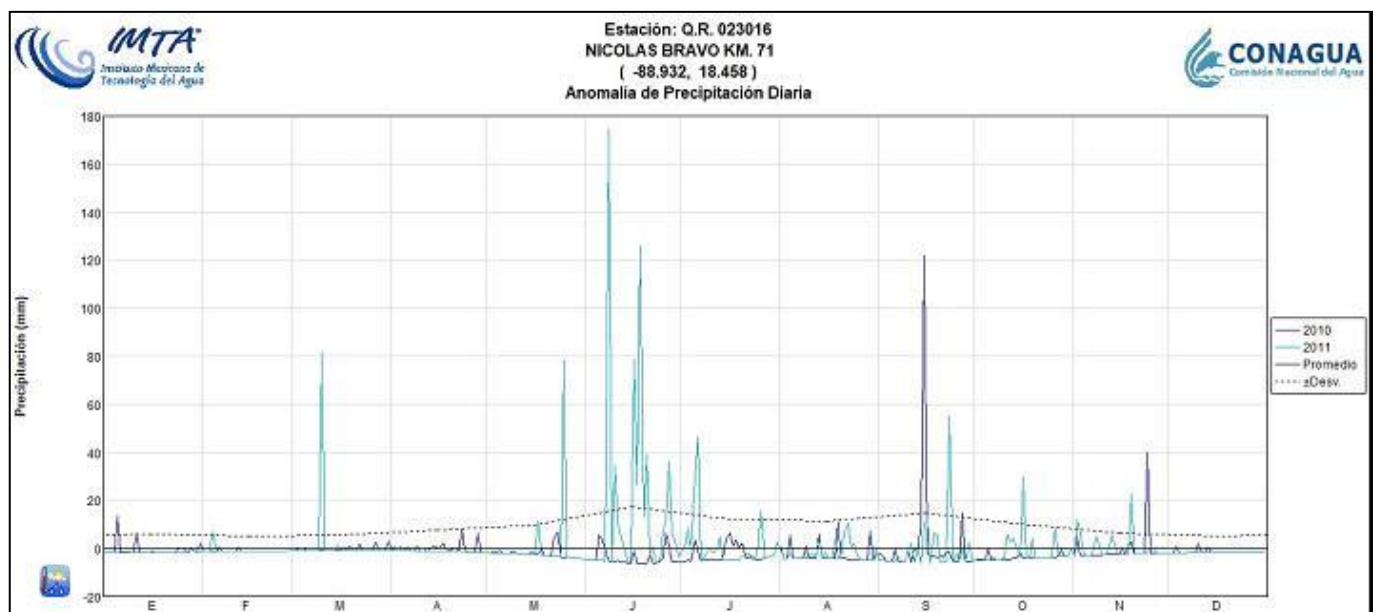


Figura 14. Anomalía de precipitación diaria en Nicolás Bravo, 2010-2011

3.2 ÍNDICE DIARIO DE SEQUÍA (KBD)

El índice diario de sequía se obtuvo con ayuda de dos estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio “Zoh-Laguna” y “Xpujil” (2010-2013). A continuación, se muestran los climogramas (Figuras 15 y 16) de las estaciones en cuestión y la gráfica (Figuras 17 y 18) sobre el comportamiento del índice diario de sequía en el 2010-2011 y 2012-2013. En el climograma (Figura. 15) nuevamente se denota que el año más caluroso fue en el 2011, seguido por 2010, 2013 y por último el 2012. Se observa que la tendencia de la temperatura es opuesta a la de la precipitación, es decir si la precipitación aumenta la temperatura tiende a disminuir, tal fue el caso del año 2011 en el que se presentaron mayores anomalías térmicas positivas y anomalías de precipitación negativas. Este resultado también se reforzó con los resultados obtenidos por la CONAGUA, 2017a en los reportes anuales del clima en México, en donde se menciona que el 2011 se caracterizó por tener una anomalía térmica positiva de 1°C por arriba de la normal. Con respecto a la precipitación, en la gráfica 15 también se observa que el 2011 fue el año más seco, este resultado se comparó con el reporte de clima de la CONAGUA del 2013 en donde se menciona que este año fue el decimotercero con menos lluvia desde 1941. Por último es importante mencionar que en general el periodo seco se presentó de octubre a marzo.

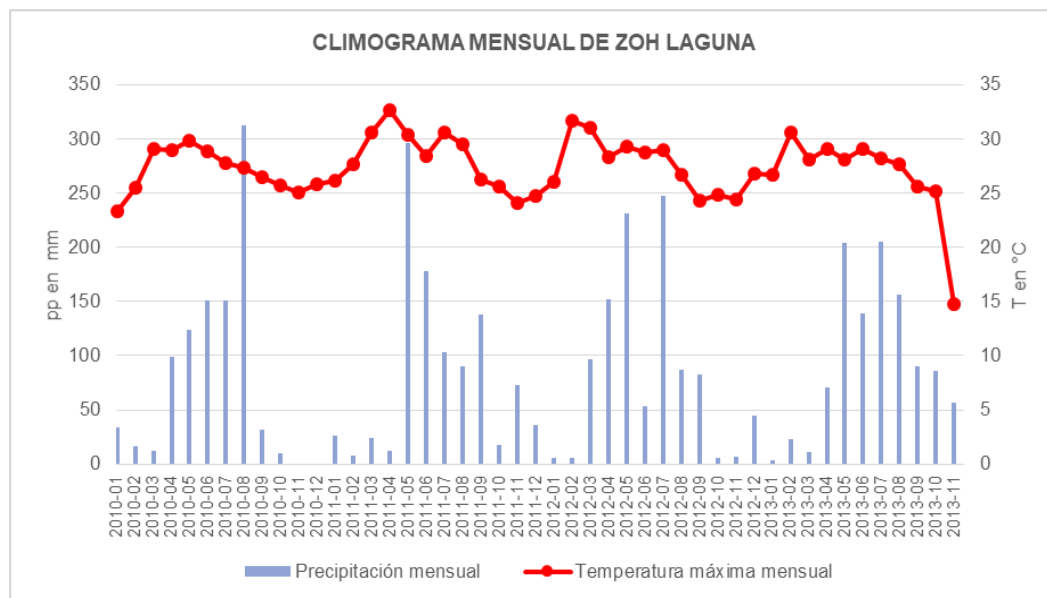


Figura 15. Climograma mensual de Zoh – Laguna, 2010-2013

El comportamiento de los datos en el siguiente climograma (Figura 16) refiere que el 2013 fue el año más cálido y según la CONAGUA, 2017b este año fue el segundo más cálido desde 1971 con 1.2°C por arriba de la normal. En cuanto a la precipitación el 2011 nuevamente se presentó como el año más seco, y el 2013 como el más lluvioso, incluso la CONAGUA, 2017b, menciona que este último se ha registrado como el cuarto más lluvioso desde 1941. Esto pudo ser por el paso de la Tormenta tropical Barry en el mes de junio.

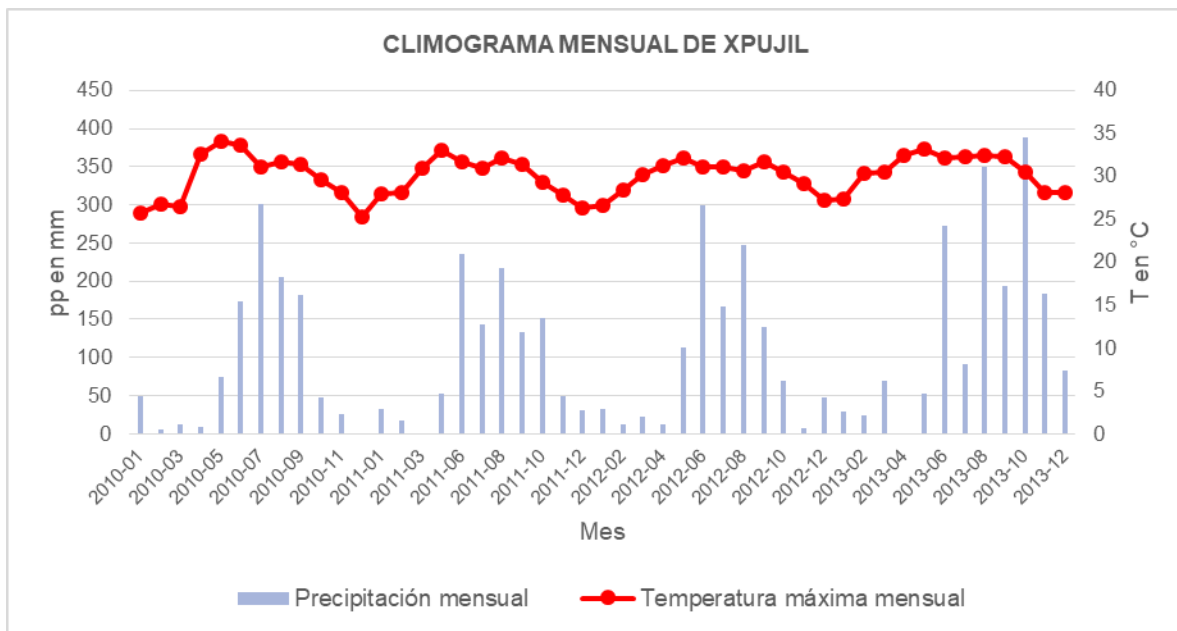


Figura 16. Climograma mensual de Xpujil, 2010-2013

En la figura 17 se muestra el índice de sequía utilizando las dos estaciones meteorológicas (Zoh-Laguna y Xpujil) para el 2010 y 2011. En el 2010 se observó que los días con un nivel alto de sequía se presentaron en los meses de abril (1509 a 1785), mayo (1703 a 1879), junio (1503 a 1649) y diciembre (1503 a 1600), estos resultados se compararon con los obtenidos del software ERIC III y se observó que para esos meses se registraron anomalías de temperatura máxima en un rango de 0.2 a 3.8 °C, así como una disminución en la precipitación que va desde los -1.5 hasta -4.7 mm. Por otro lado, para el 2011 los meses que presentaron un índice de sequía más alto fueron: enero (1610 a 1702), febrero (1585-1734), marzo (1743 a 1898), abril (1514 a 1738) y mayo (1510 a 1568),

estos resultados se compararon con los obtenidos del software ERIC III y muestran una concordancia entre las anomalías térmicas, de precipitación y el índice de sequía.

Al comparar el 2010 con el 2011 se observa claramente que el periodo de déficit hídrico para 2011 es considerablemente mayor con respecto al año anterior, estos resultados coinciden con lo arrojado en el software ERIC III y lo mencionado por la CONAGUA, 2017a. Las anomalías térmicas también mostraron que el 2011 fue considerablemente más caluroso, y con mayor déficit de precipitación.

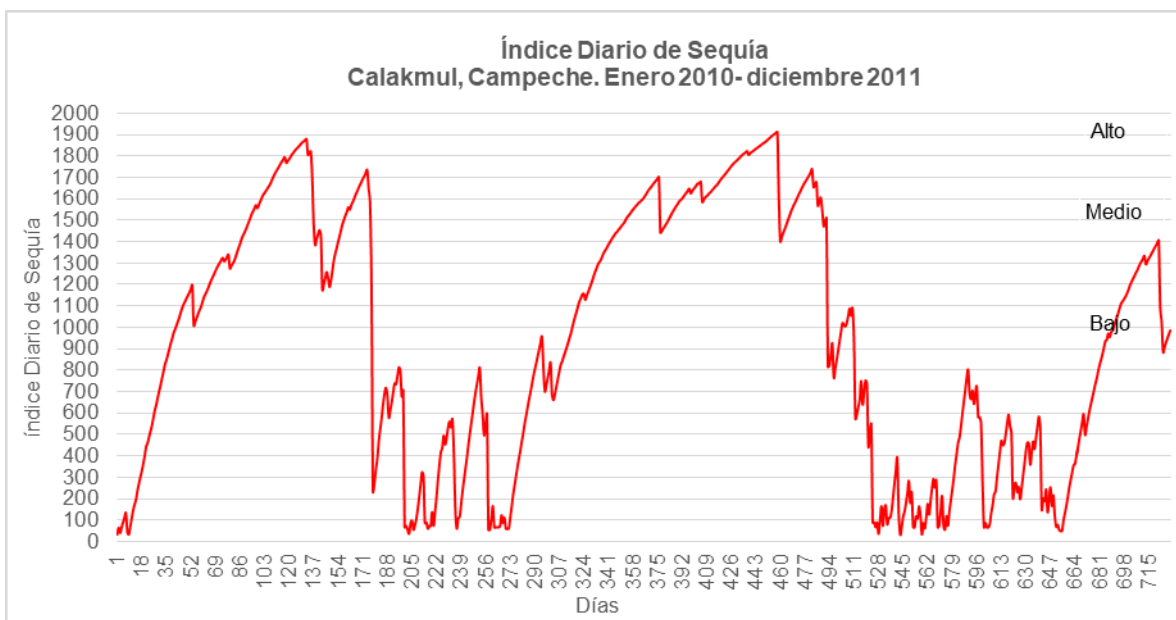


Figura 17. Índice Diario de Sequía de Keetch Byram, 2010-2011

KBDI para el 2012-2013

En el gráfico 18, se visualiza el comportamiento del índice de sequía para Zoh –Laguna y Xpujil (2012-2013). Los resultados en esta comparación ponen a la vista que el primer trimestre del 2013 fue predominantemente más seco con respecto del 2012, estos resultados concuerdan con el análisis local que realiza la CONAGUA, 2017b en donde presentan al primer trimestre del 2013 como el decimosexto más seco.

Para el 2012, los días más secos se presentaron en los meses de febrero (1507-1603), marzo (1673 a 1766), abril (1653 a 1775), mayo (1533 a 1607), noviembre (1509 a 1542) y diciembre (1553 a 1641), mientras que para el 2013 los meses más secos se presentaron en periodo de enero a junio con un rango de 1502 a 1730. La diferencia que hubo entre el 2012 y 2013, fue que en noviembre y diciembre del 2013 el índice de sequía se mostró más bajo con respecto al año anterior, esto puede ser por el paso de la Tormenta tropical Barry que tocó tierra en Belice en el mes de junio. Estos resultados concuerdan con los climogramas antes mencionados. En el gráfico también se puede observar gran variabilidad en el índice con picos en intervalos de valores muy bajos y de forma subsecuente picos en intervalos muy altos de sequía. Esto se debe posiblemente a que en esta región las lluvias son torrenciales y a veces solo se presentan por un día, saturan el sustrato en ese instante, pero se percolan demasiado rápido en suelos muy permeables.

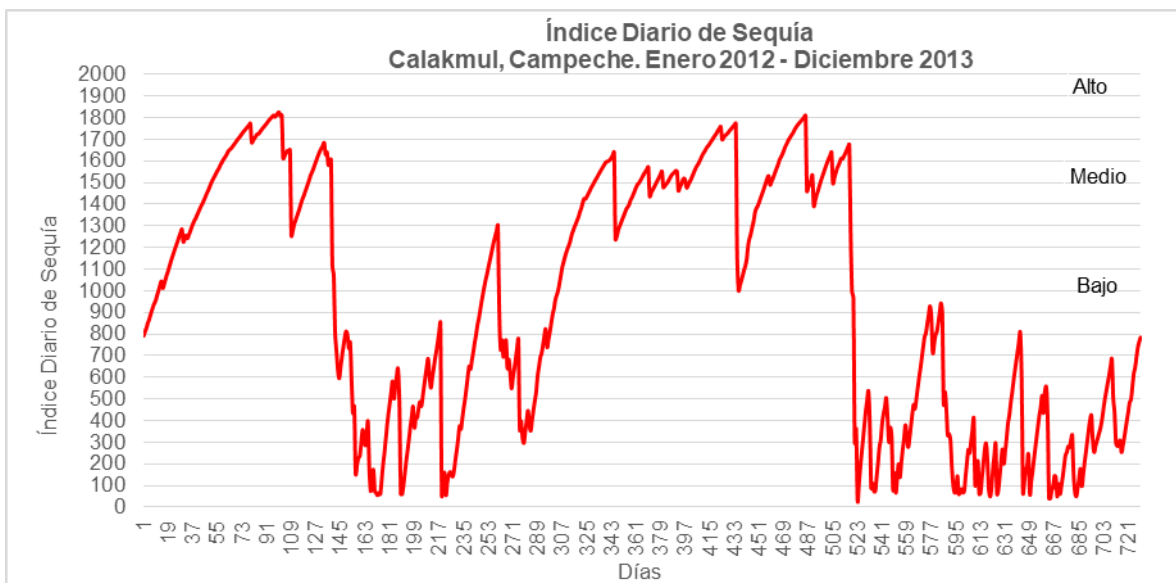


Figura 18. Índice Diario de Sequía de Keetch Byram, 2012-2013

En el caso de “Nicolás Bravo” se contrasta el comportamiento de la temperatura máxima con el comportamiento de la precipitación acumulada mensualmente (Figura 19). En general cuando la temperatura se incrementa la precipitación disminuye, las temperaturas máximas que se registraron se encuentran en un rango de los 31.9 a los 36.8 °C y la precipitación entre los 13 y 389 mm.

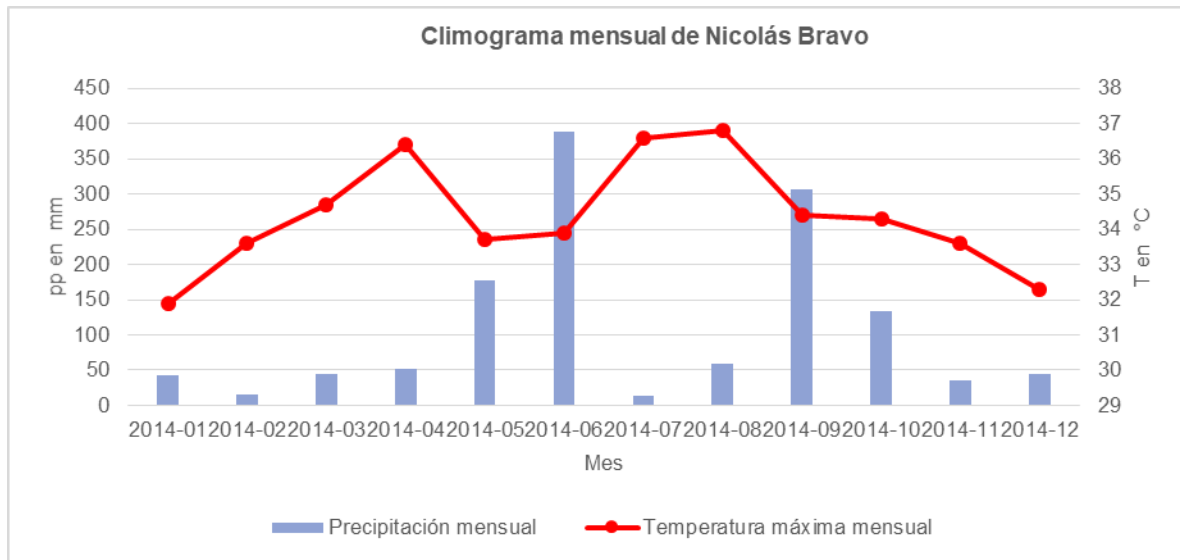


Figura 19. Climograma mensual de Nicolás Bravo, 2014

Para la estación de Calakmul II se observa que los días en donde se presentan las temperaturas más cálidas fueron en los meses de marzo, abril y de julio a octubre y los días de menor precipitación se presentaron de enero a marzo y en julio (Figura 20).

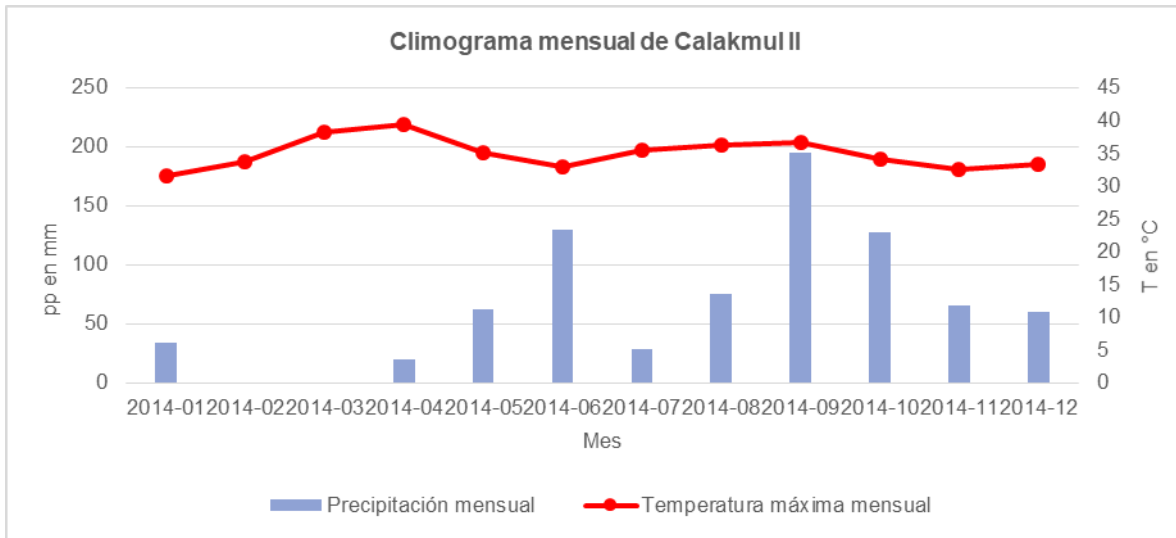


Figura 20. Climograma mensual de Calakmul II, 2014

La evolución del índice de sequía (Figura 21) muestra que los días con niveles altos de sequía se presentaron en febrero, marzo, abril, mayo, julio y agosto en un rango de 1500 a 1858, estos periodos concuerdan con la disminución de la precipitación en las dos estaciones meteorológicas antes mencionadas y con la CONAGUA, 2017c que muestra que Campeche estuvo anormalmente seco en el mes de Abril.

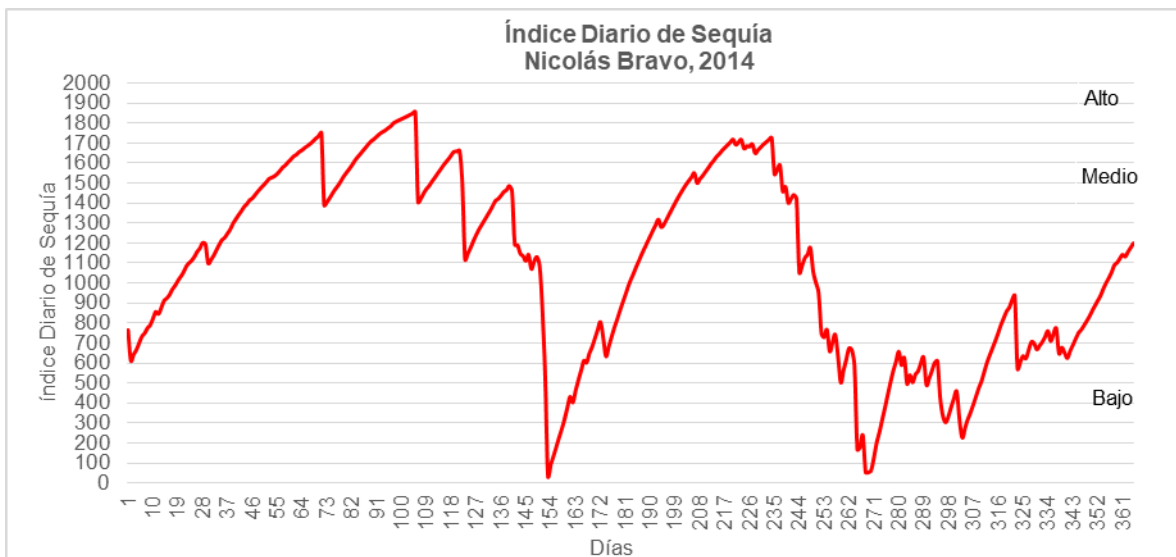


Figura 21. Índice Diario de Sequía Keetch Byram, 2014

3.3 Coeficiente de retrodispersión VS índice diario de sequía de Keetch-Byram

Procesamiento de imágenes de radar

El speckle y clutter se redujeron con el tipo de filtro Refined Lee a una ventana de 5*5 mediante el software SNAP; es importante resaltar que este proceso de reducción del ruido multiplicativo es específico para cada área de estudio, es decir que no existe por el momento un filtro que sea universal, sin embargo se ha encontrado que para las imágenes de Radarsat-2 los filtros de Lee han presentado resultados satisfactorios, de tal forma que no eliminan rasgos importantes o muy finos de las imágenes originales, pero si atenúan el speckle y clutter (Liangliang *et al.*, 2016; López, 2005).

Los criterios que se tomaron en cuenta para evaluar los procesos de filtrado se dividen en dos: cualitativos y cuantitativos, en el primero se realizaron pruebas de definición de bordes, brillo, contraste y diferencia; en el segundo se tomó en cuenta el comportamiento de los histogramas de las imágenes filtradas contra las originales, este comportamiento hace referencia a la calidad tonal o radiométrica de la imagen en él se ve representado la frecuencia relativa de la ocurrencia de los niveles de gris y son modelados por una función de distribución de probabilidad en los gráficos resultantes (gausiano, exponencial o bien de ji- cuadrada), también se evaluó la media, la desviación estándar del speckle, el porcentaje de disminución de la desviación estándar del speckle, los niveles de cuantización, el factor de homogeneidad y el número equivalente de looks de la imagen original contra las imágenes filtradas.

Para realizar todas las pruebas y agilizar los tiempos computacionales se tomó una muestra representativa de cada imagen en polarización HH, HV, VH y VV estas sub imágenes se encuentran al noroeste de la zona de estudio y contiene rasgos que son importantes de preservar para esta investigación (Figura 22)



Imagen sin filtrar con polarización HH

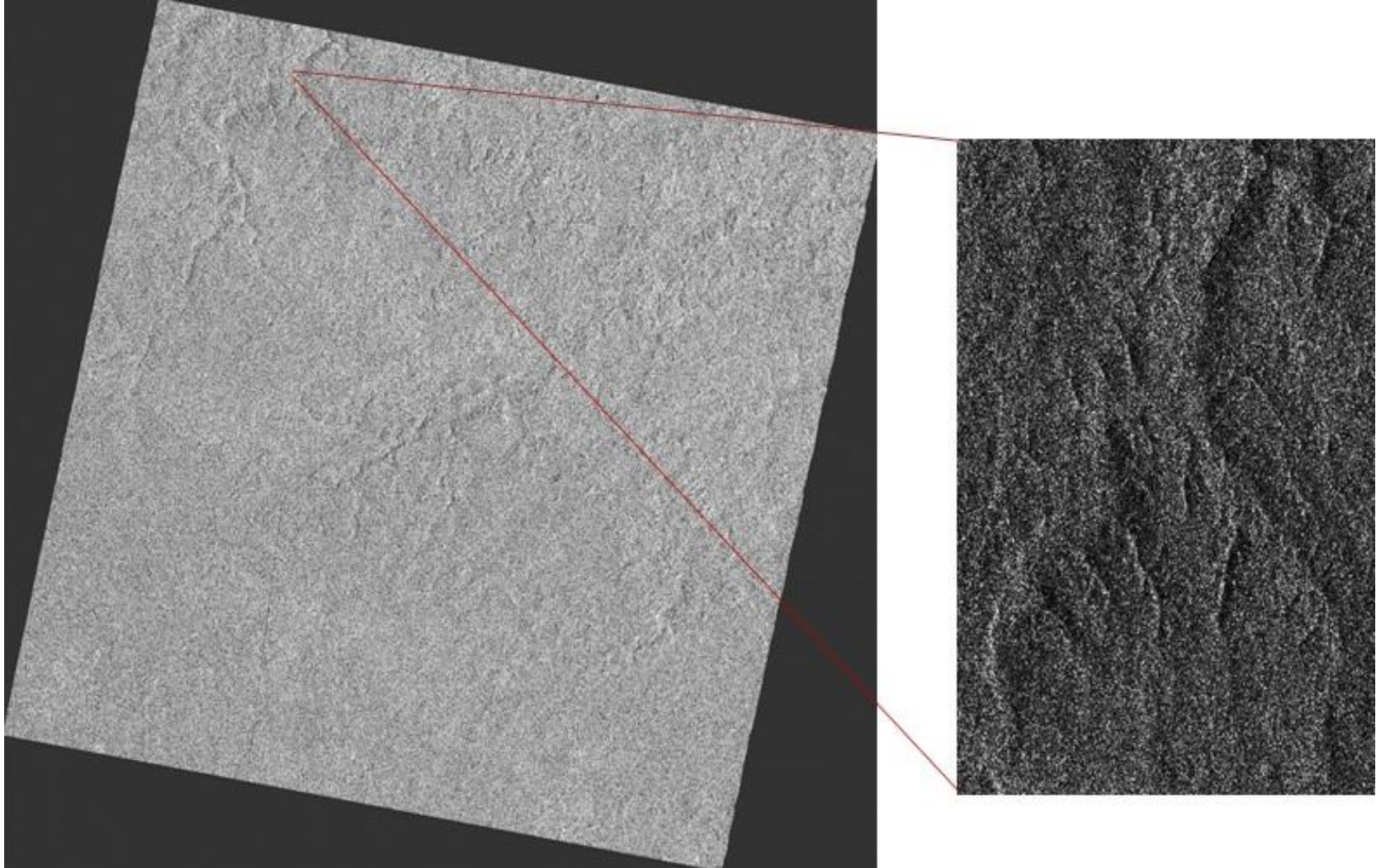


Figura 22. Zona norte de Calakmul con polarización HH

Evaluación visual por los métodos físicos y digitales. Definición de bordes.

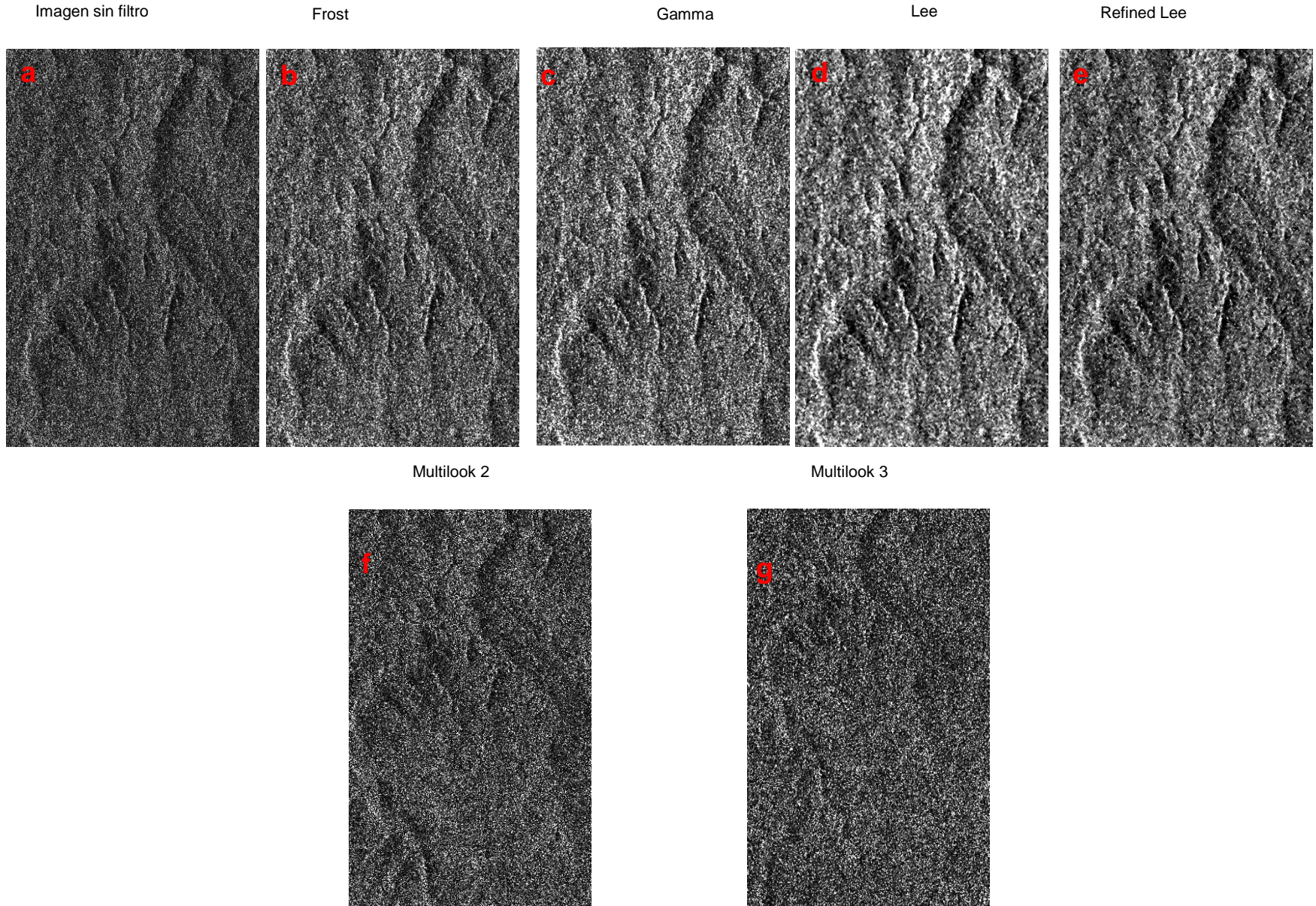


Figura 23. Evaluación visual con definición de bordes, corte noroeste de la zona de estudio

Brillo

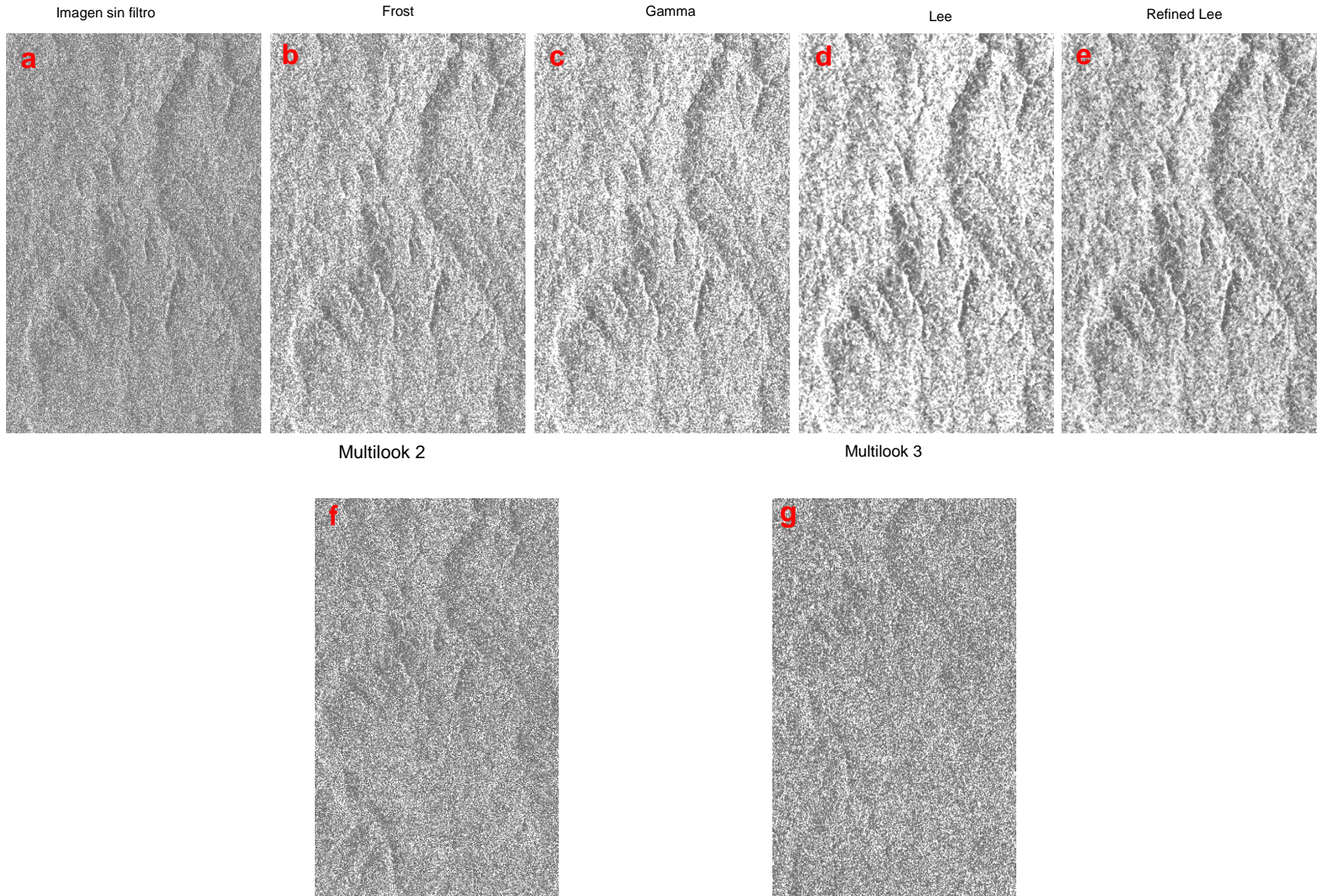


Figura 24. Evaluación visual (Brillo) zona norte de la zona de estudio

Contraste

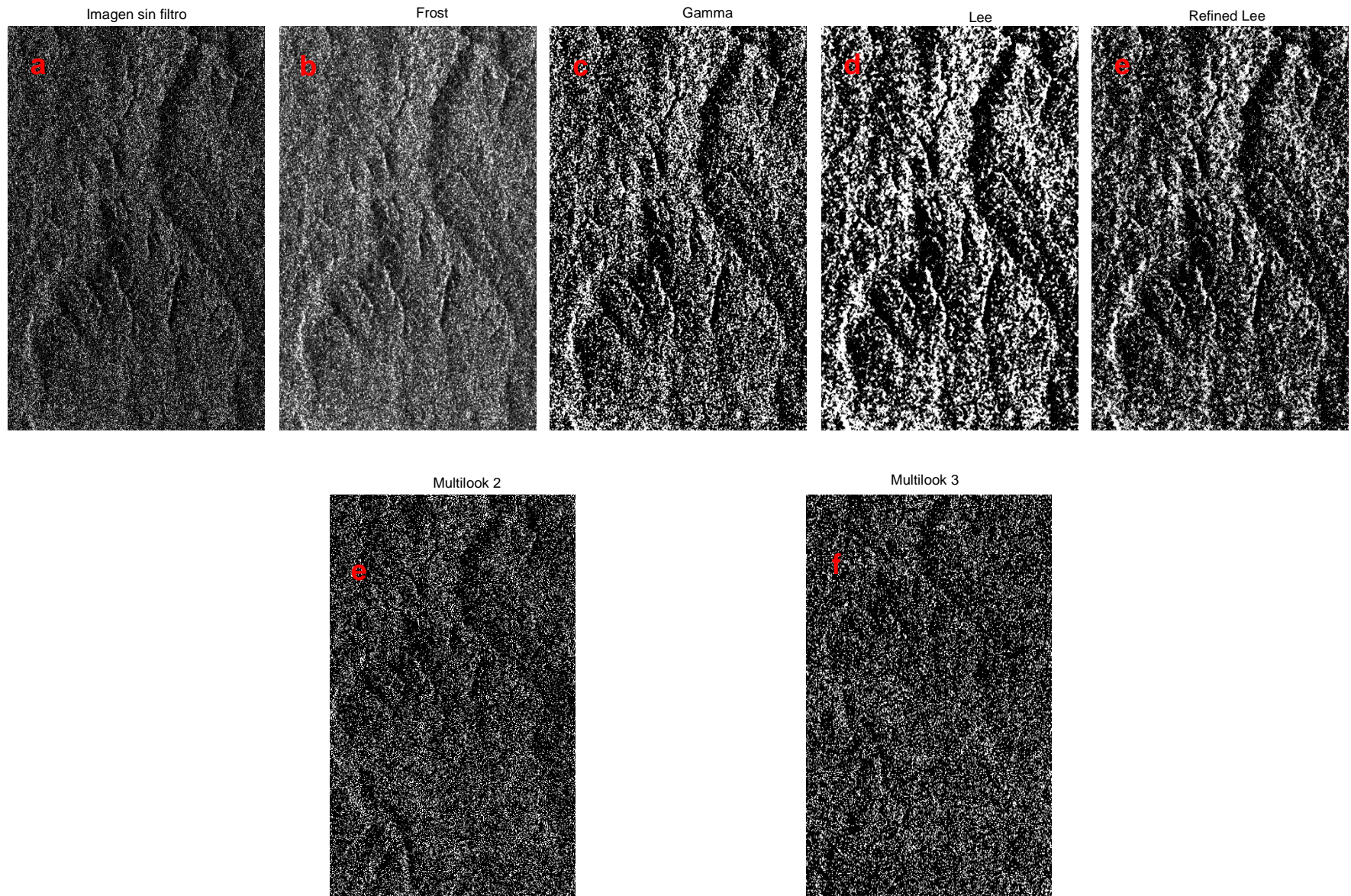


Figura 25. Evaluación visual (contraste) zona norte de la zona de estudio

Diferencia

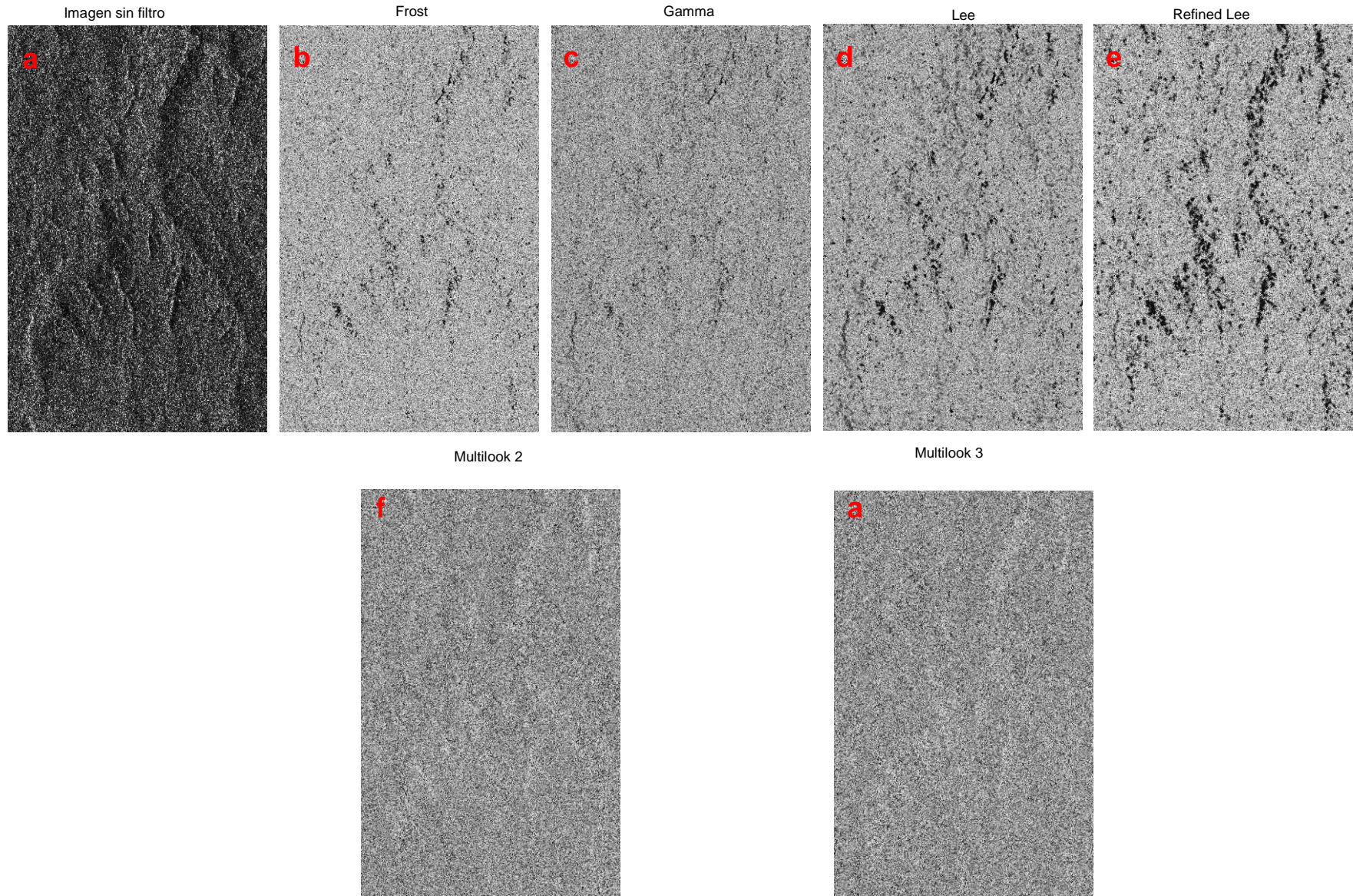


Figura 26. Evaluación visual (diferencia) zona norte de la zona de estudio

Descripción de la evaluación visual

La evaluación visual de las imágenes filtradas se realizó con base en la metodología de Lira, 2017 fue muy importante, pues con base en ella se determinó el tipo de filtro a aplicar según el nivel de detalle que se requería en la investigación, a pesar de que este tipo de evaluaciones son cualitativas al final ayudan a discernir entre cada uno. Derivado del proceso anterior se obtuvo que el filtro más adecuado en cuanto a evaluación cualitativa fue el Refined Lee, pues conserva los detalles más finos suavizando las zonas homogéneas y eliminando la parte del efecto de sombra por la forma en que llega la energía e interactúa con los elementos dispersores (Figuras 23-26).

Las 12 imágenes que se utilizaron en esta investigación fueron del tipo de amplitud. Para saber que las imágenes son de amplitud se obtuvieron los histogramas de cada una (Figura 27), en donde se puede observar que el modo de detección hace referencia al modo lineal, pues en el modo cuadrático la distribución tiende más bien a ser de tipo Gaussiana lo que da como resultado una imagen de intensidad. El valor aproximado de la media para el histograma de la imagen filtrada fue de 80 000 000 y la desviación estándar de 90 000 000, lo que sugiere una distribución amplia y por lo tanto la presencia relativamente significativa del speckle.

El histograma presenta una distribución de Rayleigh



Figura 27. Histograma con polarización HH

En la figura 28 se puede observar el comportamiento del histograma de las imágenes filtradas comparado con el histograma de la imagen original. La imagen procesada con el filtro Refined Lee es la que tiende más a una distribución normal, razón por la cual se eligió como el mejor filtro para la restauración de las imágenes.

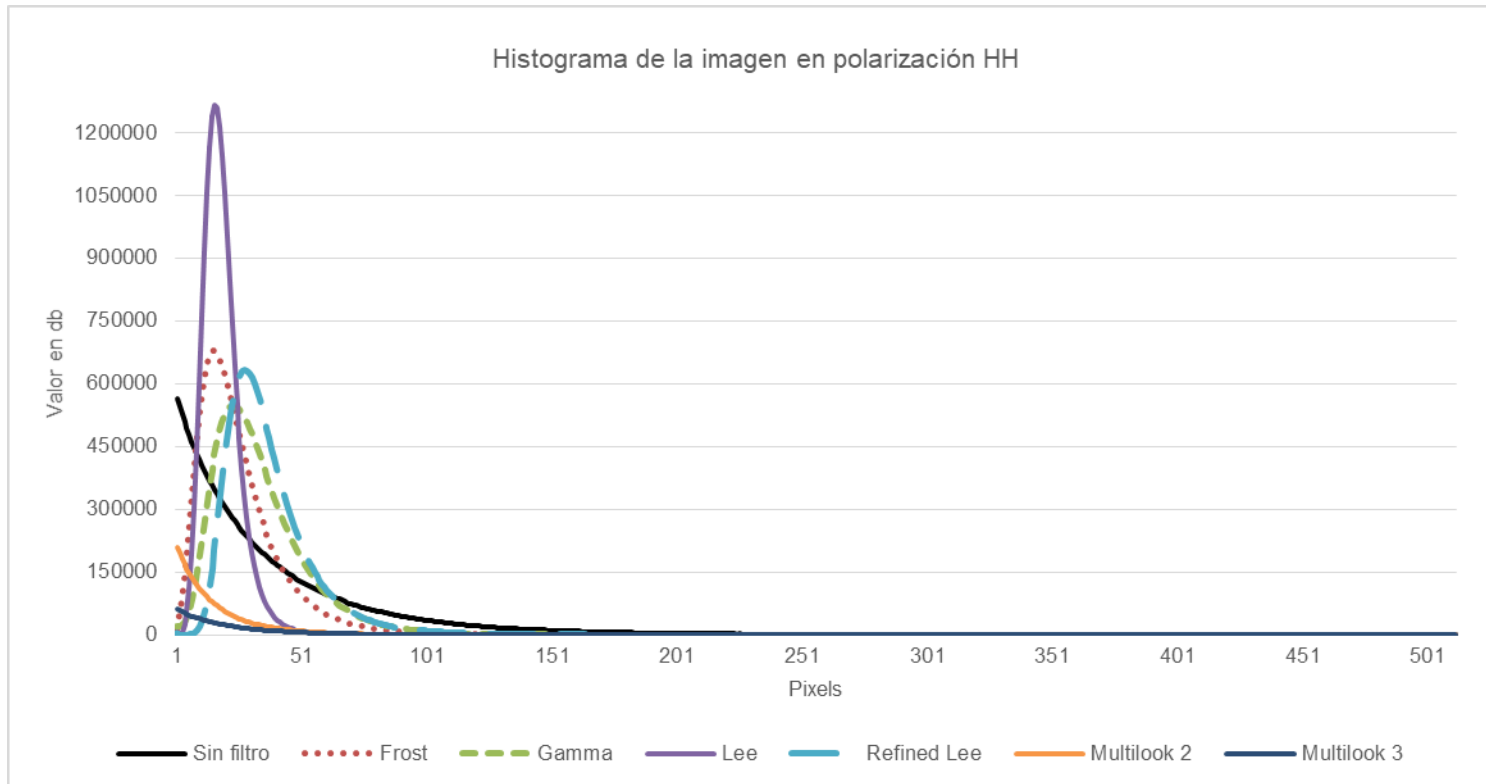


Figura 28. Histograma de imagen original e imágenes filtradas en polarización HH

Perfiles

Para esta evaluación se eligió el perfil número 10 (un lugar en donde convergiera una zona plana con vegetación con un camino), ya que se podía tener la variabilidad en la respuesta radiométrica (Lira, 2010). Todos los perfiles que se muestran a continuación se obtuvieron de los distintos tipos de filtrado contra la imagen original (Figura 29).

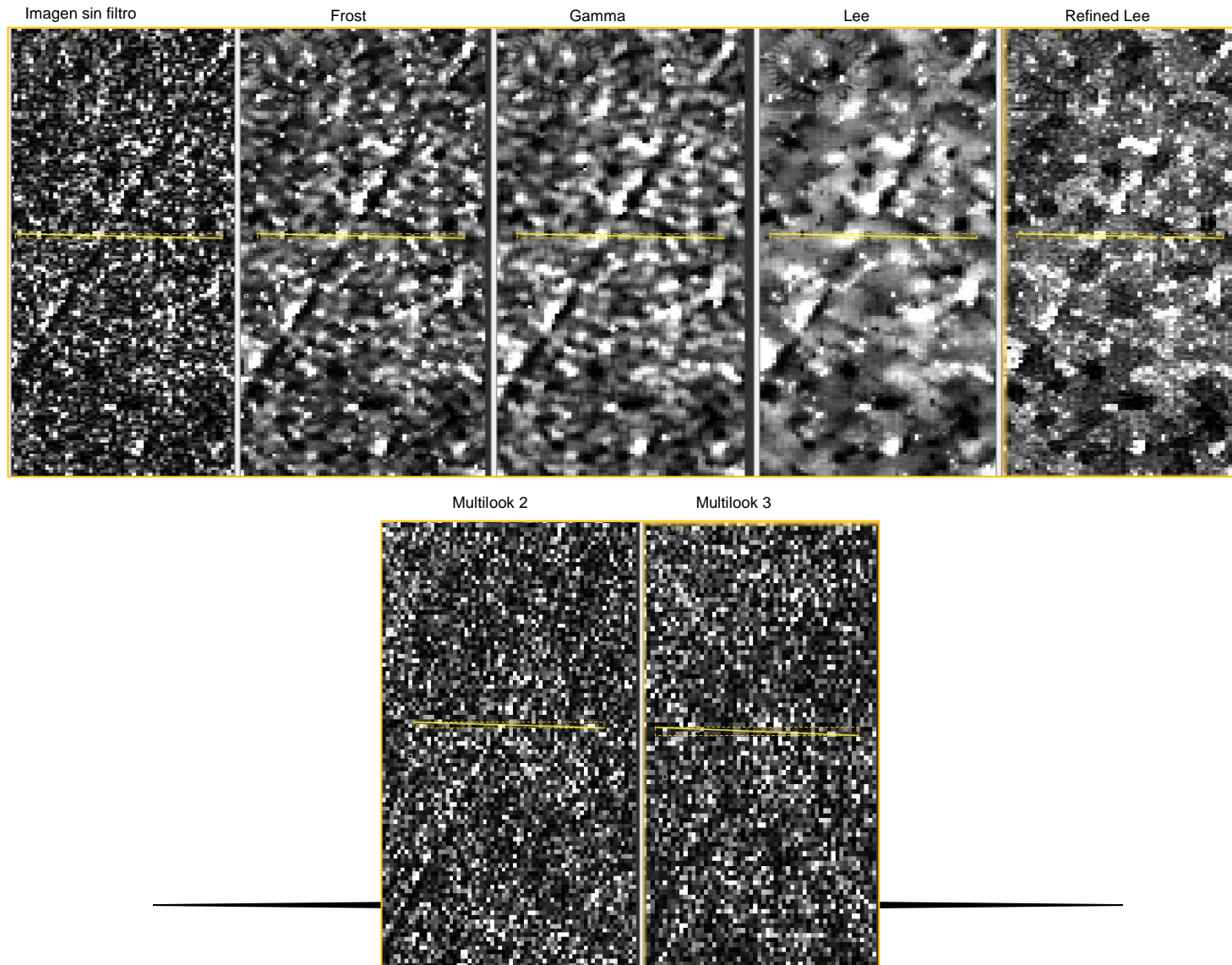
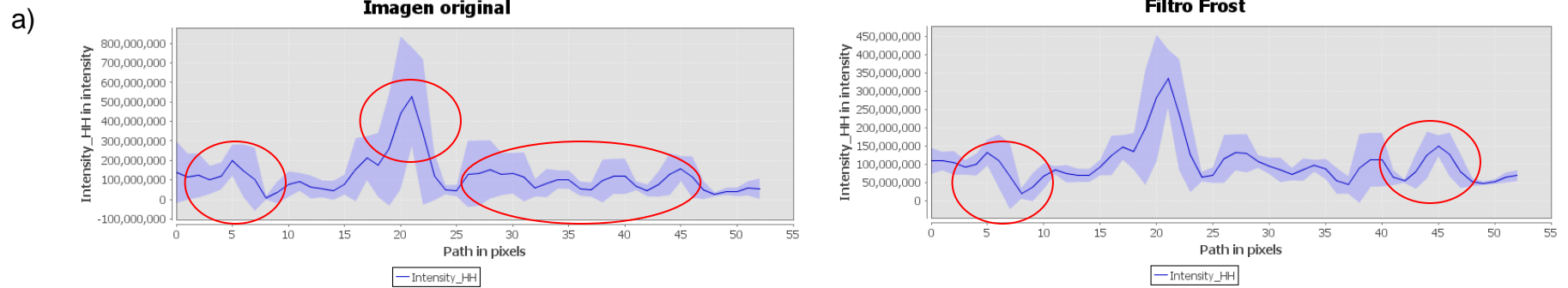


Figura 29. Perfiles de imagen original VS imágenes filtradas

Perfiles de filtros digitales

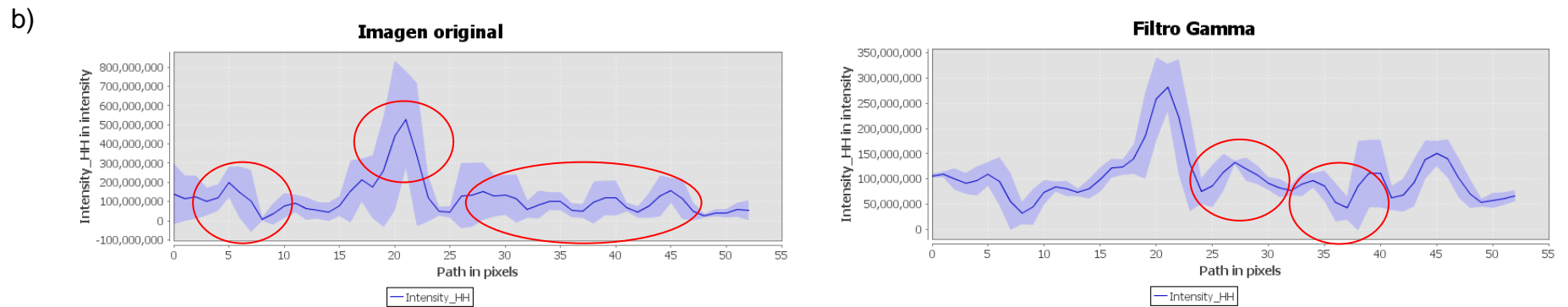
Filtro de Frost

En la gráfica (Figura a) de la imagen filtrada se puede apreciar que el perfil no cambio mucho, sin embargo también se observa en el área marcada con círculos rojos que aún se presenta un ruido remanente.



Filtro Gamma

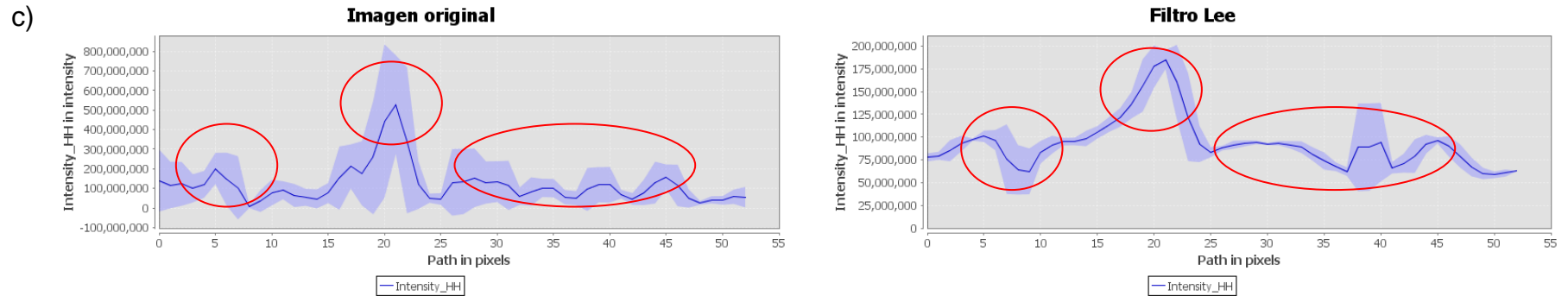
Con el filtro Gamma (Figura b), se refleja un cambio abrupto en las crestas y valles denotando así que un grupo de pixeles se ven muy influenciados por el efecto del speckle.



Perfiles de filtros digitales

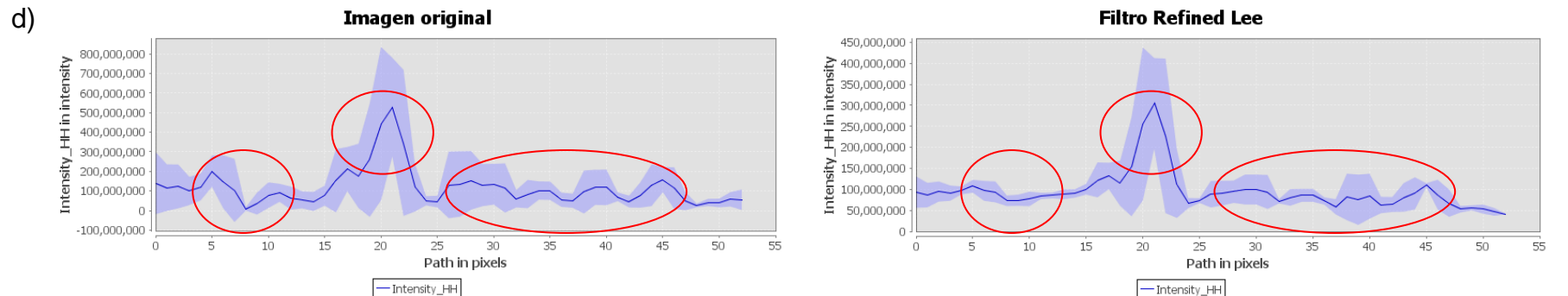
Filtro Lee

En cuanto a la imagen procesada con el filtro Lee, se puede observar que las crestas y los valles se suavizan de forma considerable, de tal suerte que la forma del gráfico original se modifica por completo, por lo que este filtro queda descartado en el cuadro como una opción para tratamiento de las imágenes (Figura c).



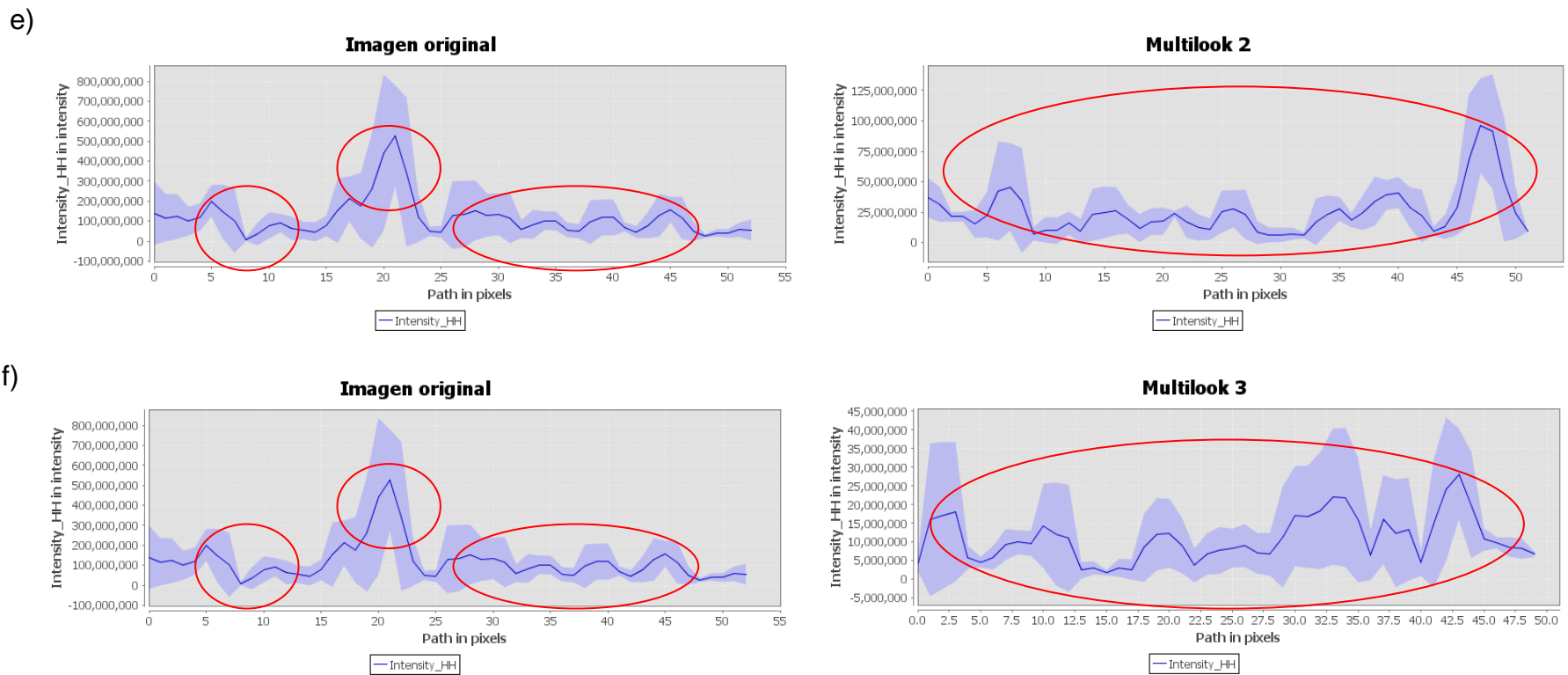
Filtro Refined Lee

La imagen (Figura d) filtrada aún conserva algunos picos; sin embargo, al compararlo con otros sistemas de filtrado se observó que este fue el mejor, pues suavizo las crestas y los valles sin modificar considerablemente el comportamiento de todo el perfil.



Perfiles de filtros físicos (Multilook)

A continuación (Figuras e y f) se muestran las imágenes tratadas con una técnica Multilook con un filtro físico que consiste en promediar el valor de intensidad de una ventana de píxeles. Se emplea esta técnica este tipo de filtros son adecuados cuando se quiere hacer un promedio de varias imágenes de la misma escena para reducir el speckle antes de la elaboración de un interferograma (Hernández J., 2012). Se mejoró la interpretación del área de estudio; sin embargo, para la zona de Calakmul se observa que el filtro modifica completamente el perfil de la imagen filtrada con respecto a la original y de acuerdo con Goldstein *et al.*, (1988) disminuye la resolución espacial



Evaluación final

Con base en los resultados anteriores se elaboró una tabla a manera de resumen (Cuadro 20), en donde se concluyó que el mejor filtro para para el tratamiento de las imágenes de RADARSAT-2 fue el de Refined Lee, ya que la imagen presenta una buena calidad en el contraste visual, los niveles de cuantización, así como la atenuación de los bordes grandes y medianos sin eliminar los detalles que importan para esta investigación. En cuanto al histograma, se pudo observar que si bien no se mantuvo la media original esta no se encuentra tan alejado de la misma, la desviación estándar disminuyó en un 66% con respecto a la original y este también fue un indicativo de que el speckle se redujo. Los filtros no son generales, es decir no se puede utilizar el mismo para diferentes zonas de estudio, sin embargo Rodríguez, (2014) también lo aplicó para el tratamiento de las imágenes RADARSAT-2 en una investigación sobre sobre la variación temporal del contenido de humedad en la zona sur de Calakmul y los resultados fueron positivos, por su parte Monsiváis-Huertero, (2014) mencionan que este tipo de filtros es adecuado en zonas boscosas en un estudio realizado sobre la humedad del suelo en la zona sur de Calakmul.

Cuadro 20. Evaluación general de los filtros

IMAGEN	HISTOGRAMA		PORCENTAJE DE DISMINUCIÓN DE LA DV ST	NIVELES DE CUANTIZACIÓN	FACTOR DE HOMOGENEIDAD	NÚMERO EQUIVALENTE DE LOOKS
	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR				
Original	80418336.4	90691261.6		224	0.891672598	1.121487867
Frost	78629142.37	56976348.2	37.17548179	211	0.426800187	2.343016779
Gamma	78200102.38	46041242.9	49.23298889	199	0.315342674	3.171153419
Lee	77223303.73	35059294.3	61.34214733	175	0.178005468	5.617804948
Refined Lee	76096639.94	39792479.1	56.12313872	190	0.258215104	3.872740144
Multilook 2	27727761.95	30416779.2	66.46117973	185	0.898073186	1.239871109
Multilook 3	13107459.62	13903364.9	84.66956499	203	0.872953337	1.312254109

Correlación entre la retrodispersión y el KBDI

De los 18 sitios que se muestrearon solo 5 presentaron una correlación positiva entre el índice diario de sequía de Keetch Byram y el coeficiente de retrodispersión de las imágenes de radar en los años de 2010, 2013 y 2014 (Cuadro 21).

Cuadro 21. Coeficiente de correlación de Pearson

NOMBRE DEL SITIO	USO DE SUELO y VEGETACIÓN	POLARIZACIÓN	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON
NUEVA VIDA 2	SELVA BAJA (BAJOS)	VV	0.771058446
NUEVA VIDA	AGRICULTURA	HV	0.729998706
NUEVA VIDA 6	POTRERO	VH	0.711331153
NUEVA VIDA 6	POTRERO	HV	0.693629955
NUEVA VIDA	AGRICULTURA	VH	0.640823937
NUEVA VIDA	AGRICULTURA	VV	0.633477403
NUEVA VIDA	AGRICULTURA	HH	0.633114834
NUEVA VIDA 4	POTRERO	VH	0.60250608

ANÁLISIS POR SITIO

Nueva Vida 2

Se encuentra al noroeste de la zona de estudio, el tipo de vegetación que se presenta es selva baja y también denominados bajos inundables, el tipo de suelo es vertisol pelico. La población hace referencia que las inundaciones en este sitio duran por lo menos tres meses, pero que últimamente este sitio ha permanecido inundado solo por quince días en cada año a partir del 2011 al 2016 (Figura 30).

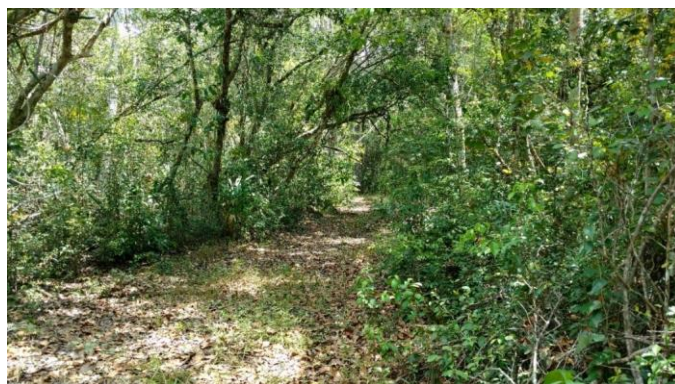


Figura 30 Selva baja al noroeste de la zona de estudio. Nueva Vida 2

En la figura 31 se muestra el comportamiento del coeficiente de retrodispersión en polarización VV contra el KBDI. Este comportamiento se comparó con los datos del índice de Palmer obtenido del SMN del 2010 al 2014, en donde se menciona que para el estado de Campeche la sequía fue de tipo D0, es decir anormalmente seco, si bien es cierto que los procedimientos para obtener los dos índices (KBDI y el de Palmer) son diferentes estos resultados son oficiales y es con los que se cuenta como referente bibliográfico sólido.

Por otro lado, en el cuadro 22, se muestran los valores en específico del índice KBD y los del coeficiente de retrodispersión; el índice representa un amplio rango de valores hasta cierto grado de severidad en la sequía (de 98 hasta 1848). Los niveles más altos de sequía se presentan con los meses normalmente secos que menciona el SMN en sus normales climatológicas para las estaciones de Zoh-Laguna, Xpujil y Nicolás Bravo, adicionalmente se muestra que el nivel más severo de sequía se presenta en el mes de abril, este dato no concuerda con las normales climatológicas en cuanto a precipitación, pero sí en uno de los meses más cálidos para las estaciones antes mencionadas.

Cuadro 22. Sigma cero vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-8.6507	138
28/10/2013	-8.8054	98
15/12/2013	-9.3195	288
25/02/2014	-9.726	1562
21/03/2014	-10.7303	1551
14/04/2014	-10.4449	1848
08/05/2014	-10.7735	1267
01/06/2014	-9.4805	539
25/06/2014	-9.4109	728
19/07/2014	-11.1645	1425
12/08/2014	-9.6656	1673
05/09/2014	-11.2692	1176

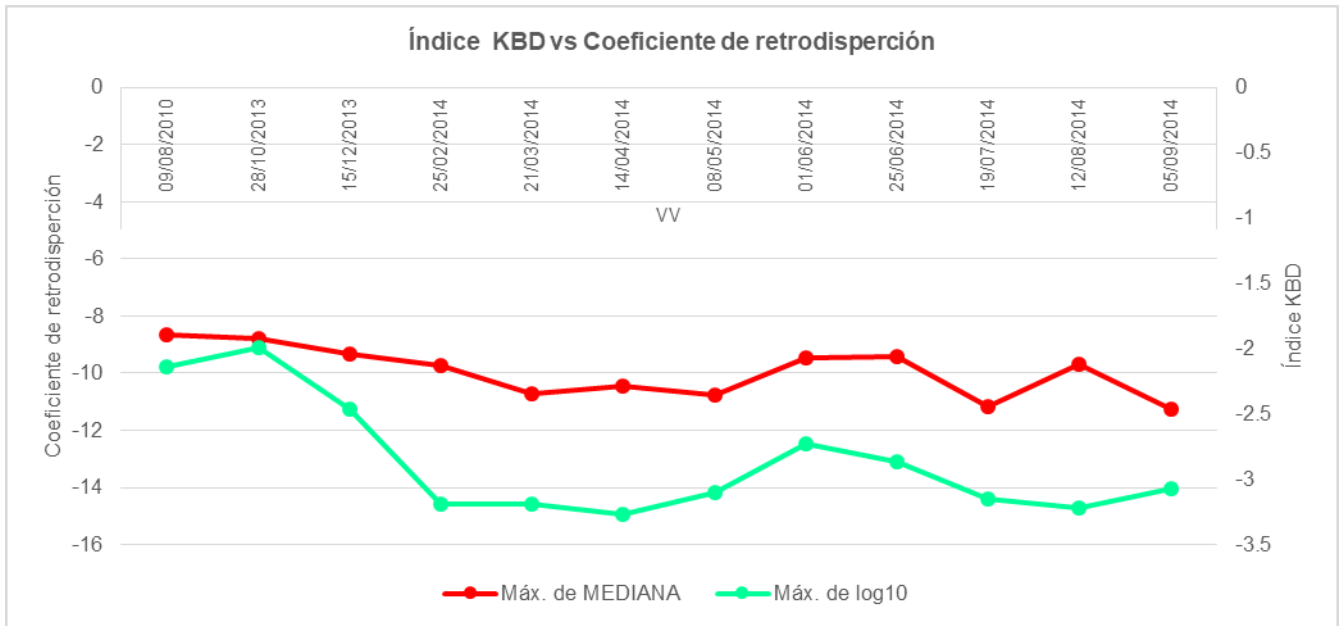


Figura 31. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión

La figura 32 muestra la evolución del coeficiente de retrodispersión por fecha de imagen correspondiente a la polarización VV que se enfoca en mostrar contribuciones de volumen o vegetación, es por ello que se infiere que la flora, en especial los árboles que se encuentran en la categoría de bajos en el periodo del 2010, 2013 y 2014 se encontraba en un estrés hídrico, especialmente en los meses de febrero, marzo, abril, agosto y septiembre, donde se observa una ligera pérdida de intensidad de brillantez en la escalas de grises así como el incremento de decibeles en los mismos, ya que según Lira, (2010) las áreas que presentan pixeles más oscuros se encuentran bajo un estrés hídrico, aunque también es necesario tomar en cuenta la disposición geométrica de los dispersores, ya que aunque el CIV sea el mismo de un mes a otro la planta crece, incrementando así los elementos dispersores que conforman a la zona de estudio. El coeficiente de correlación que se obtuvo en esta zona fue de 0.77 en polarización VV y de acuerdo con Manninen, *et al.*, (2005) en este tipo de polarización se obtienen correlaciones altas en bosques. Por su parte Monsiváis-Huerta y Magagi, (2014) menciona que en las polarizaciones lineales se detecta mejor los cambios en la humedad de las hojas, esto se menciona con base en un reporte de un estudio de humedad del suelo y vegetación en la zona sur de la Reserva de la Biosfera de Calakmul

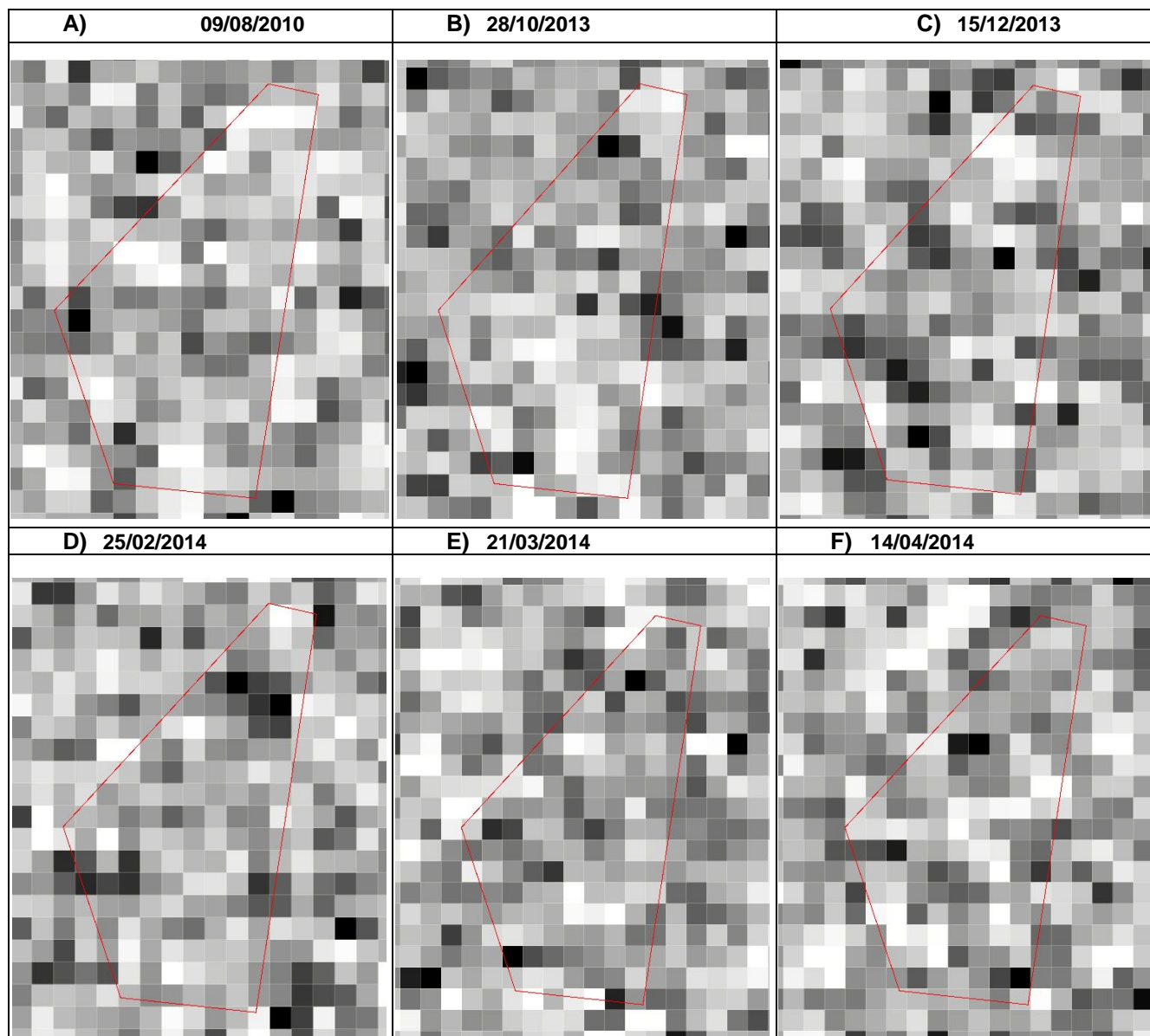


Figura 32. Evolución visual del coeficiente de retrodispersión en polarización VV para los años 2010, 2013 y 2014

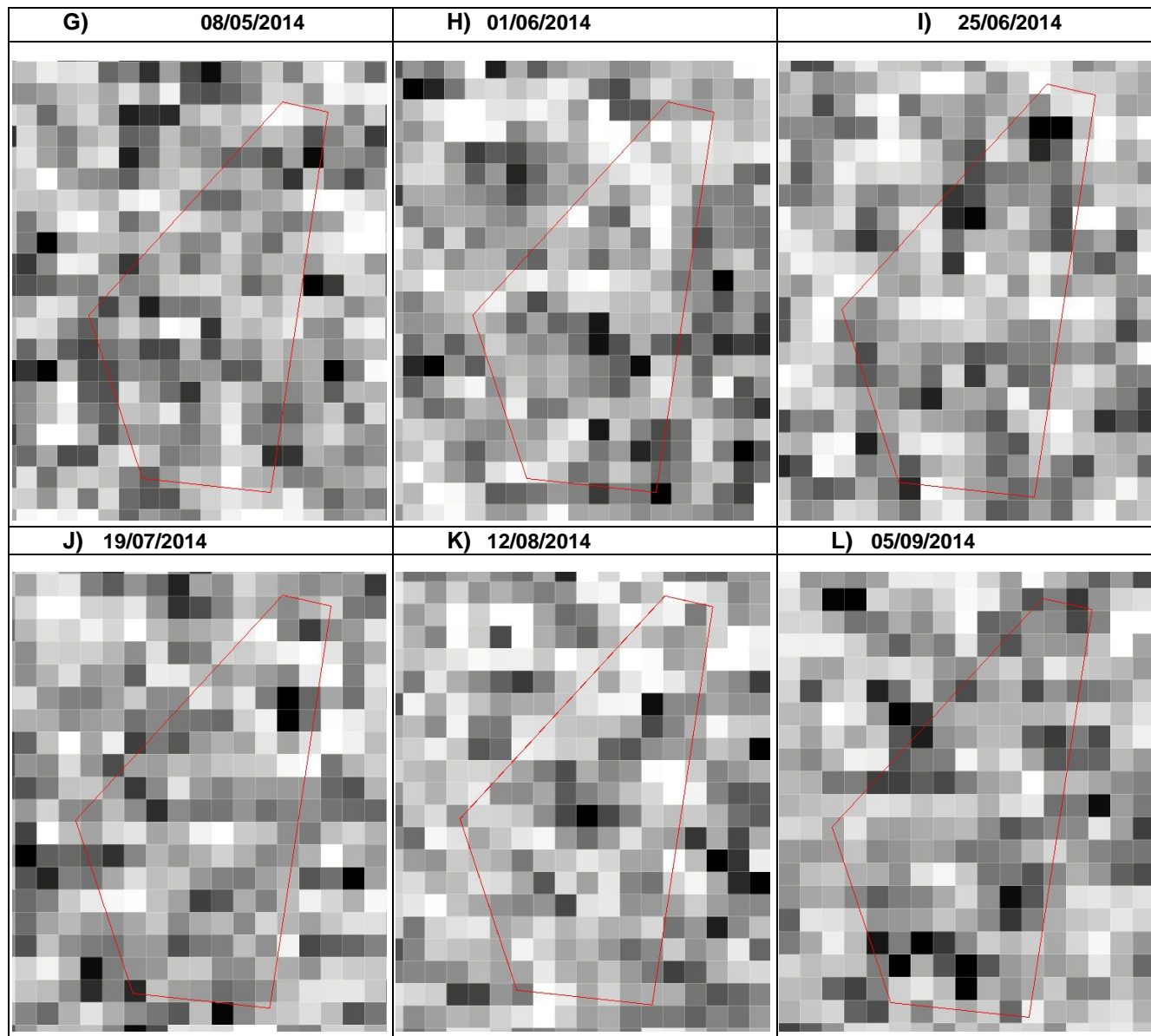


Figura 33. Evolución visual del coeficiente de retrodispersión en polarización VV para 2014

Nueva Vida 1

Se encuentra ubicado al noroeste de la zona de estudio, presenta un uso de suelo agrícola, en él se siembra calabaza, plátano, yuca, y maíz; presenta un tipo de suelo de rendzinas, este lugar se encuentra rodeado de acahuales, selva baja y mediana (Figura 34).



a)



b)

Figura 34. Sitio Nueva vida 1. a) cara este del polígono. b) cara sur del polígono

A continuación, se presenta una serie de gráficos sobre el comportamiento del coeficiente de correlación en las diferentes polarizaciones (VV, HH, HV y VH) contra el KBDI para los años 2010, 2013 y 2014. El coeficiente de correlación más significativo que se obtuvo en este sitio fue de 0.72 correspondiente a la polarización HV (Figura 35), seguido por 0.64 en polarización VH (Figura 39), y por último las polarizaciones VV y HH (Figuras 41 y 42) con una correlación de 0.63.

La correlación más alta se obtuvo en las polarizaciones cruzadas, quizá porque la copolarización está relacionada con el doble rebote y así se puede obtener mayor información en volumen del cultivo sin llegar a la saturación como en el estudio que realizaron Gao, *et al.*, 2013, en donde obtuvieron mayor correlación en esta polarización al momento de estudiar la biomasa del maíz. Como se mencionó anteriormente hubo correlación positiva en todas las polarizaciones y también mucha variación entre los coeficientes de retrodispersión esto debido al ciclo vegetativo muy contrastante del maíz, es decir hay que tomar en cuenta la dispersión en cuanto a las características estructurales de la planta.

En cuanto a las imágenes (Figura 40) se puede observar el coeficiente de retrodispersión de manera visual, es decir que en los meses más secos y de mayor relación el color del pixel se torna de un gris más intenso (oscuro) como por ejemplo en marzo en donde la sequía es evidente ya que los decibeles se incrementan, así como el nivel de intensidad del KBDI, por el contrario cuando la sequía disminuye también lo hace la intensidad de los niveles digitales del sitio en cuestión, es decir la zona es más brillante.

POLARIZACIÓN HV

Cuadro 23. Coeficiente de correlación vs KBDI HV

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-15.9739	138
28/10/2013	-16.6719	98
15/12/2013	-16.3817	288
25/02/2014	-18.4197	1562
21/03/2014	-19.4534	1551
14/04/2014	-20.7419	1848
08/05/2014	-20.5734	1267
01/06/2014	-16.3949	539
25/06/2014	-19.5071	728
19/07/2014	-19.5123	1425
12/08/2014	-17.854	1673
05/09/2014	-17.2955	1176

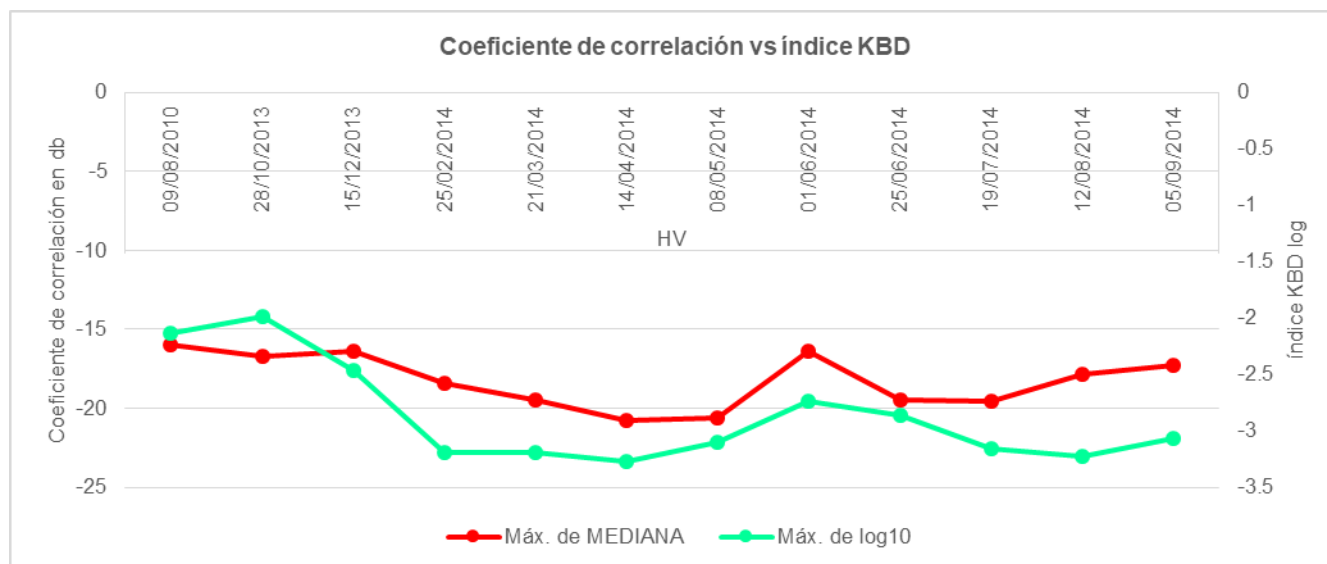


Figura 35 Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización HV

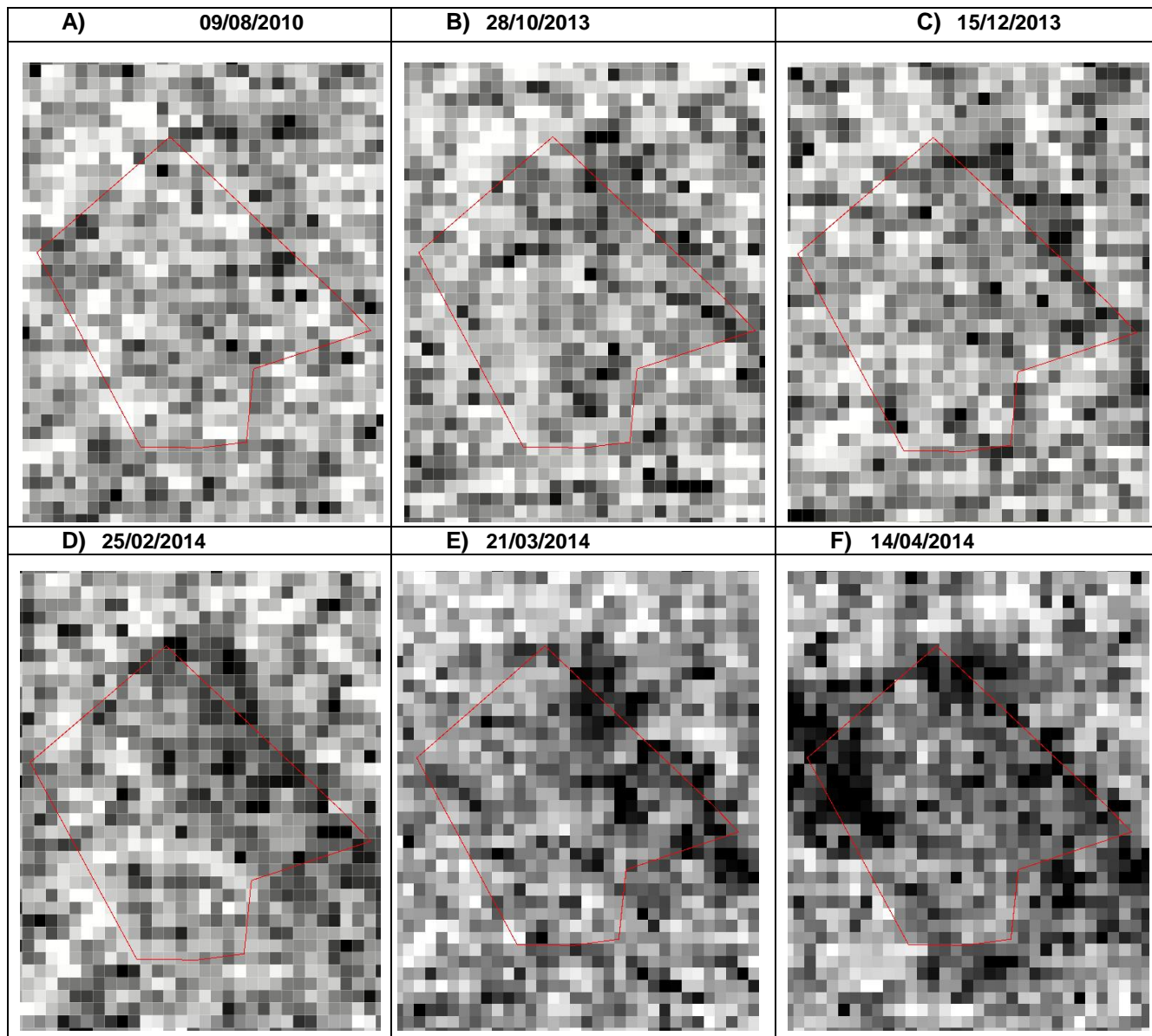


Figura 36 Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización HV

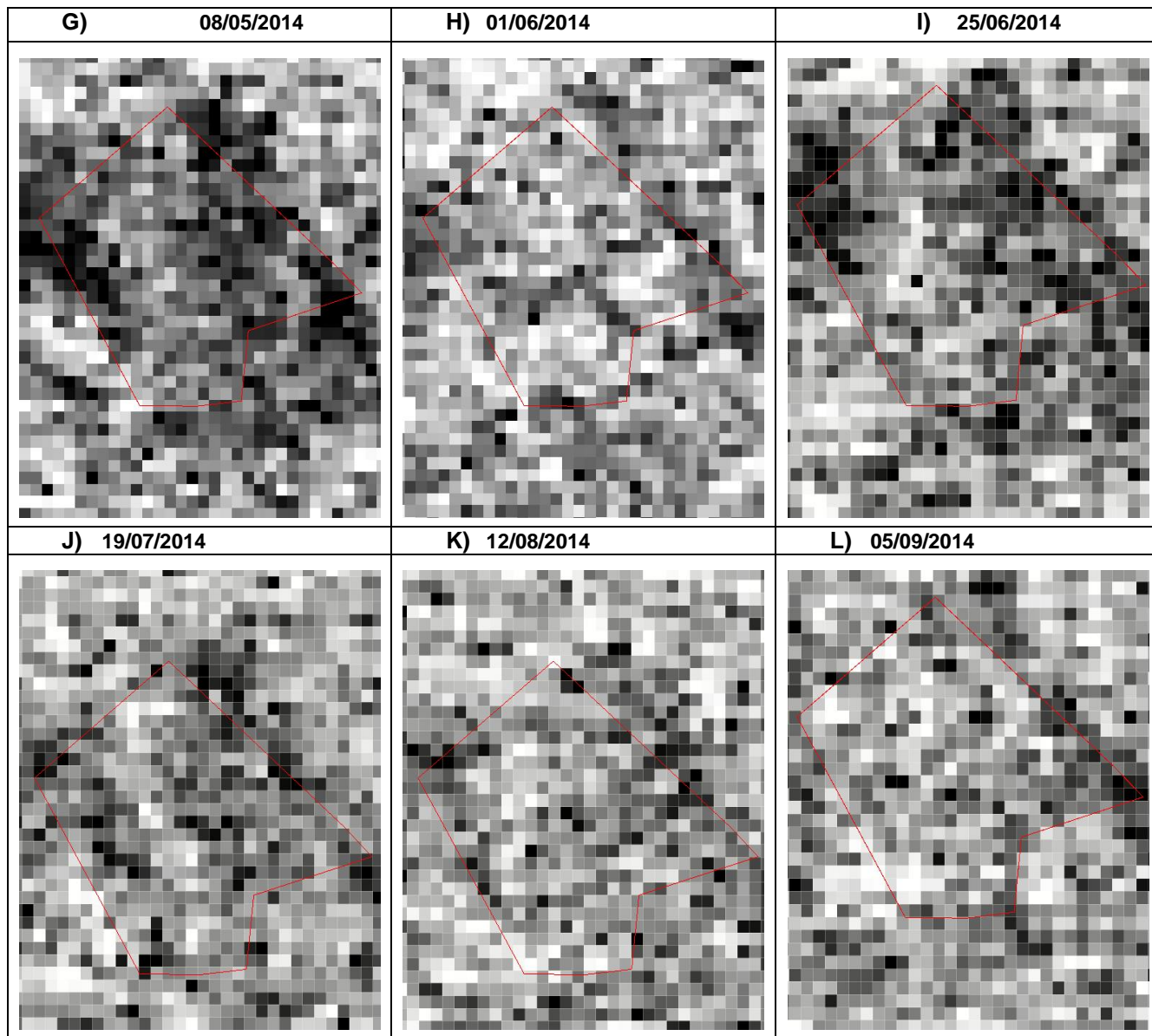


Figura 37 Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización HV

POLARIZACIÓN VH

Cuadro 24. Coeficiente de retrodispersión en VH vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-15.8494	138
28/10/2013	-16.909	98
15/12/2013	-16.5655	288
25/02/2014	-17.8364	1562
21/03/2014	-19.0101	1551
14/04/2014	-20.9114	1848
08/05/2014	-20.3465	1267
01/06/2014	-15.8319	539
25/06/2014	-19.4994	728
19/07/2014	-19.4085	1425
12/08/2014	-17.4737	1673
05/09/2014	-17.0516	1176

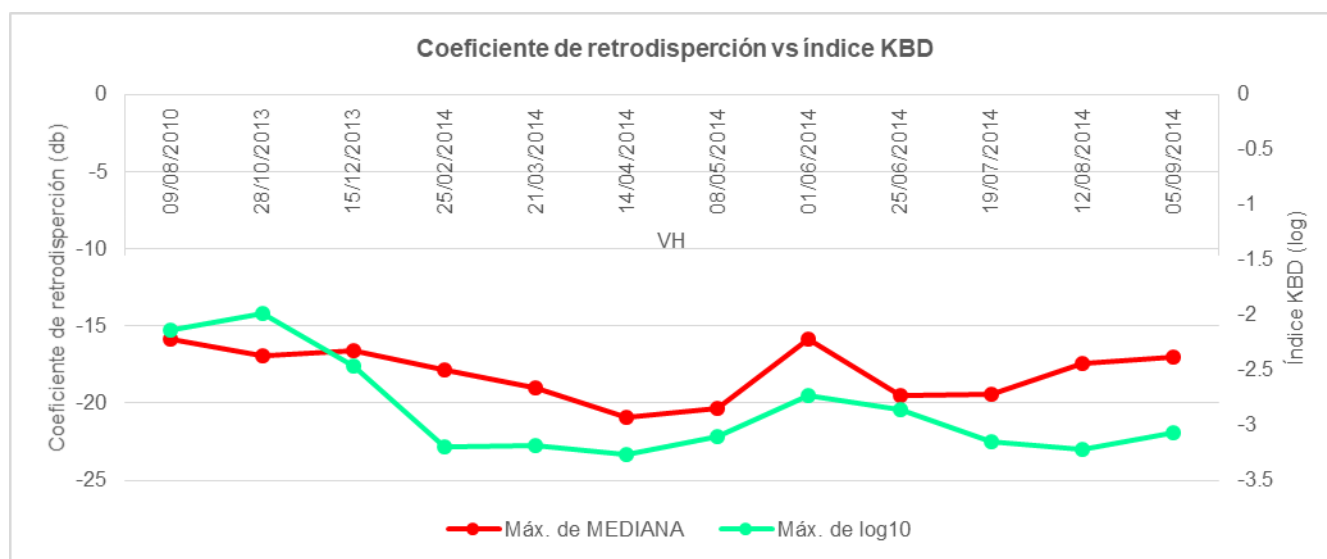


Figura 38. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VH

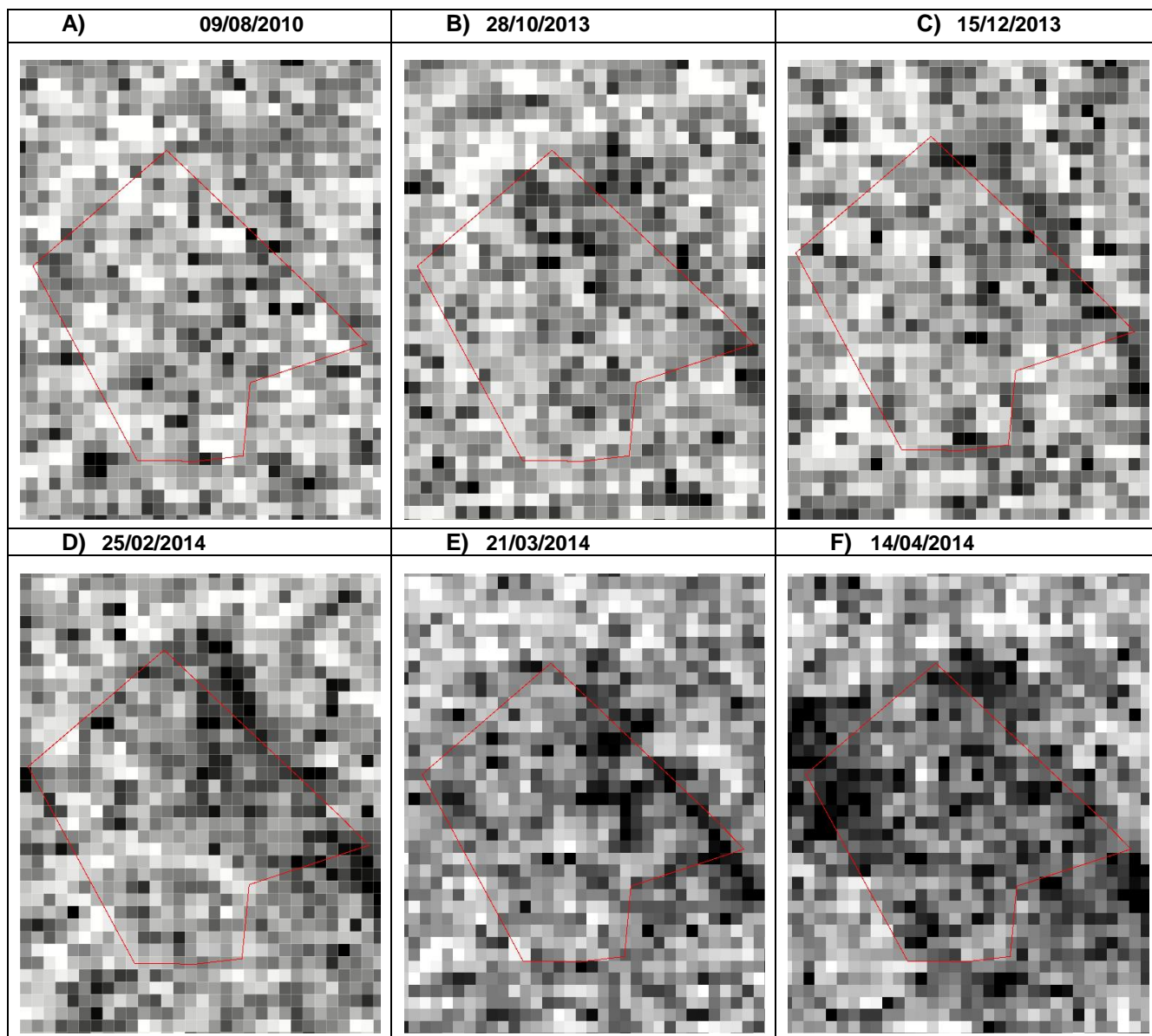


Figura 39. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VH

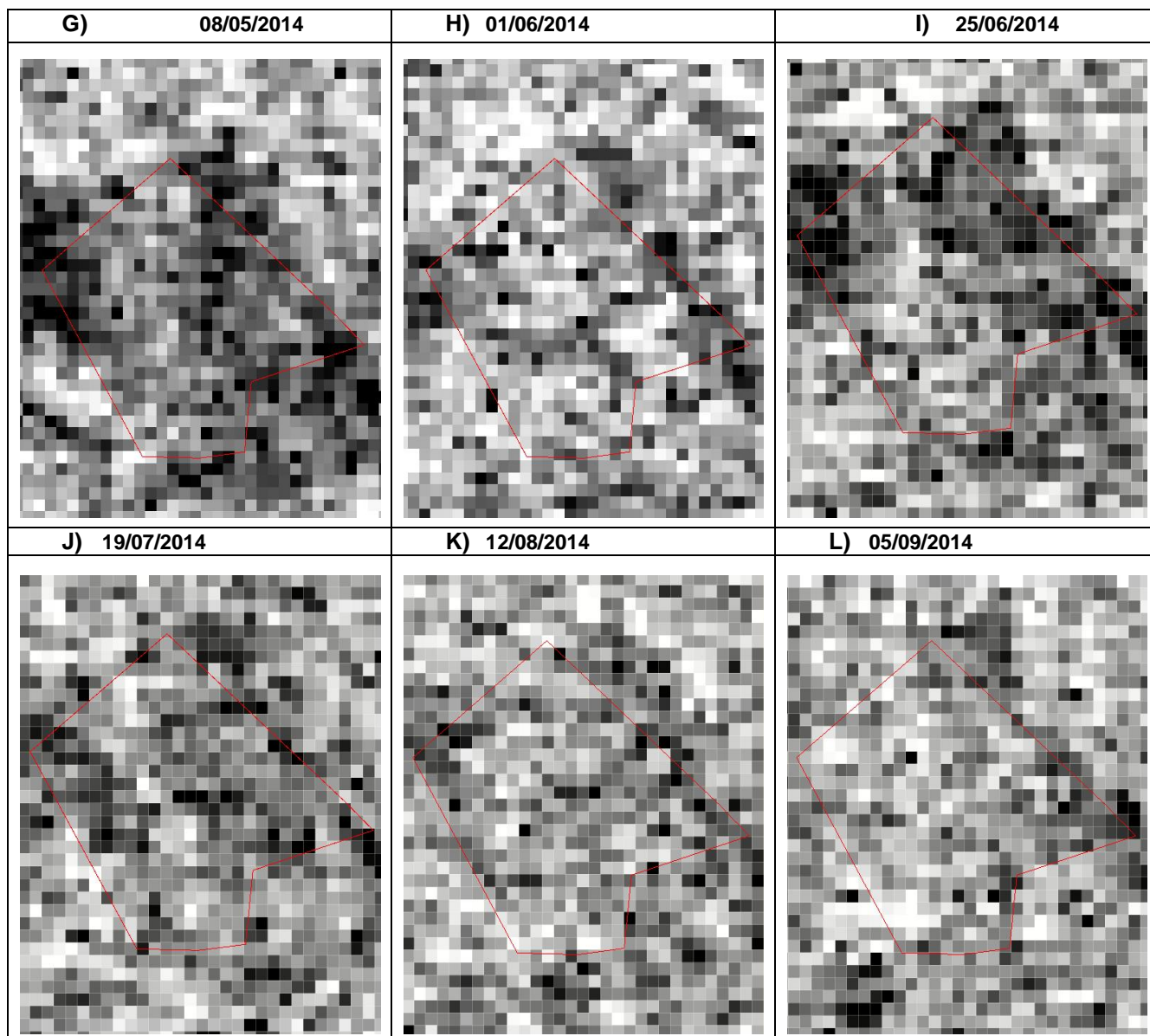


Figura 40. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización VH

POLARIZACIÓN HH

Cuadro 25. Coeficiente de retrodispersión en HH vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-9.8186	138
28/10/2013	-9.5154	98
15/12/2013	-9.4527	288
25/02/2014	-11.8198	1562
21/03/2014	-12.821	1551
14/04/2014	-12.8672	1848
08/05/2014	-13.659	1267
01/06/2014	-8.8638	539
25/06/2014	-13.1895	728
19/07/2014	-11.9581	1425
12/08/2014	-10.2431	1673
05/09/2014	-10.4212	1176

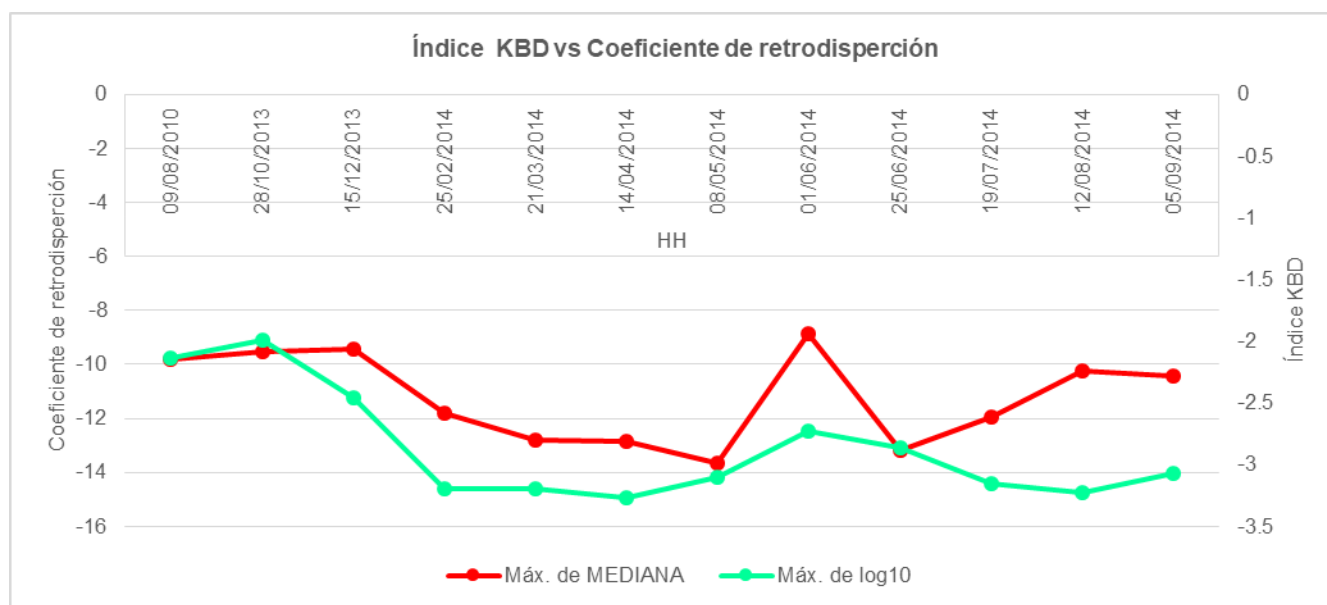


Figura 41. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización HH

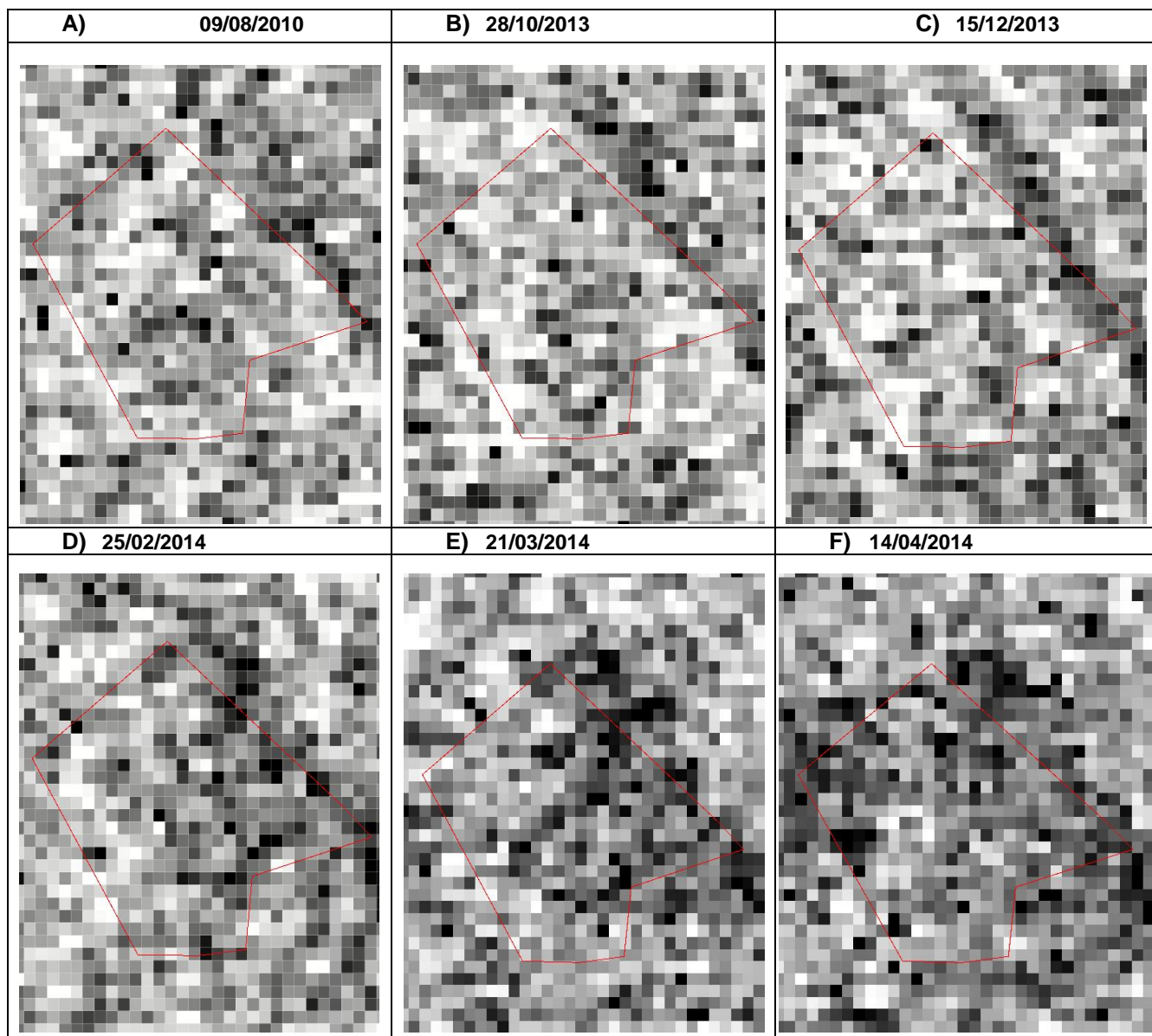


Figura 42. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización HH

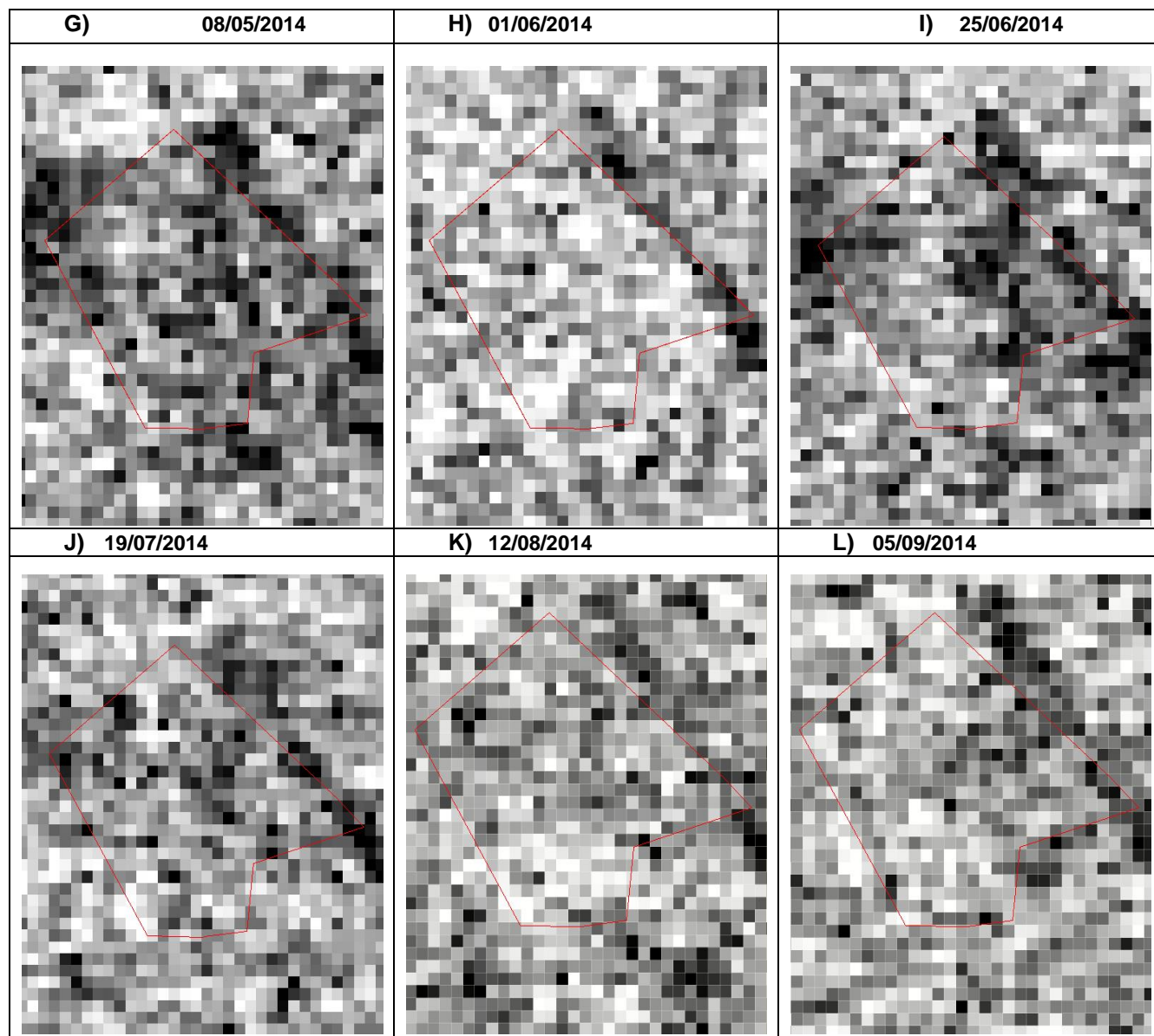


Figura 43. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización HH

POLARIZACIÓN VV

Cuadro 26. Coeficiente de retrodispersión vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-8.8313	138
28/10/2013	-10.5165	98
15/12/2013	-9.8905	288
25/02/2014	-12.4851	1562
21/03/2014	-13.4155	1551
14/04/2014	-14.4867	1848
08/05/2014	-14.302	1267
01/06/2014	-9.3492	539
25/06/2014	-13.286	728
19/07/2014	-11.2406	1425
12/08/2014	-10.3775	1673
05/09/2014	-11.0798	1176

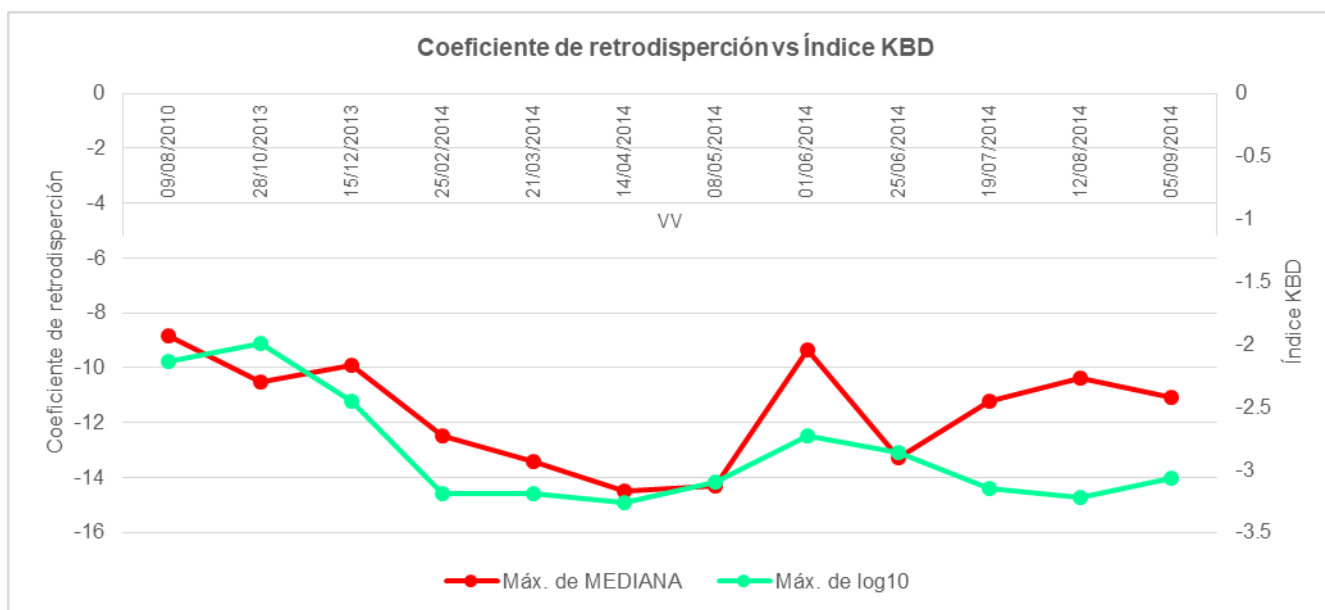


Figura 44. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VV

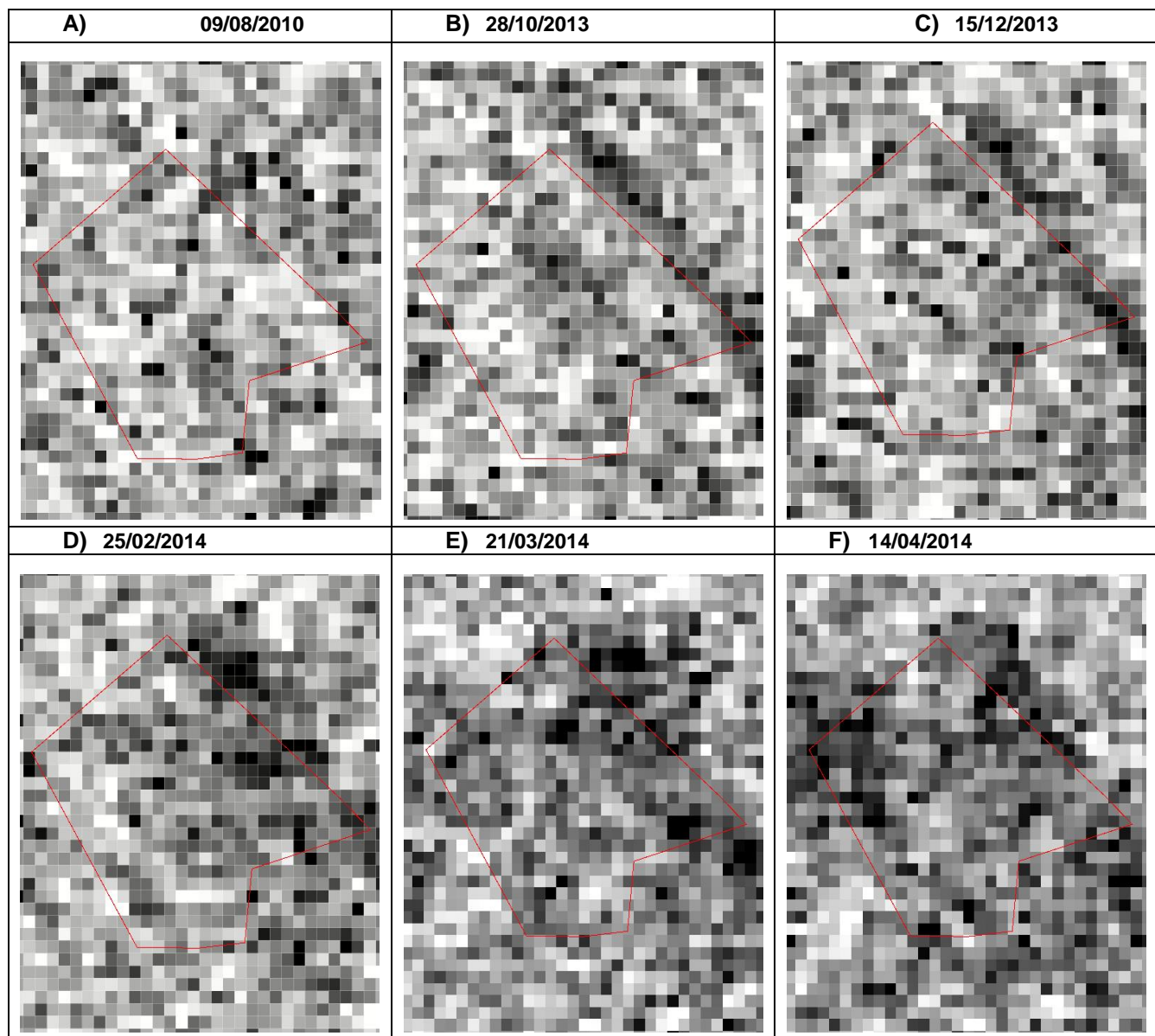


Figura 45. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VV

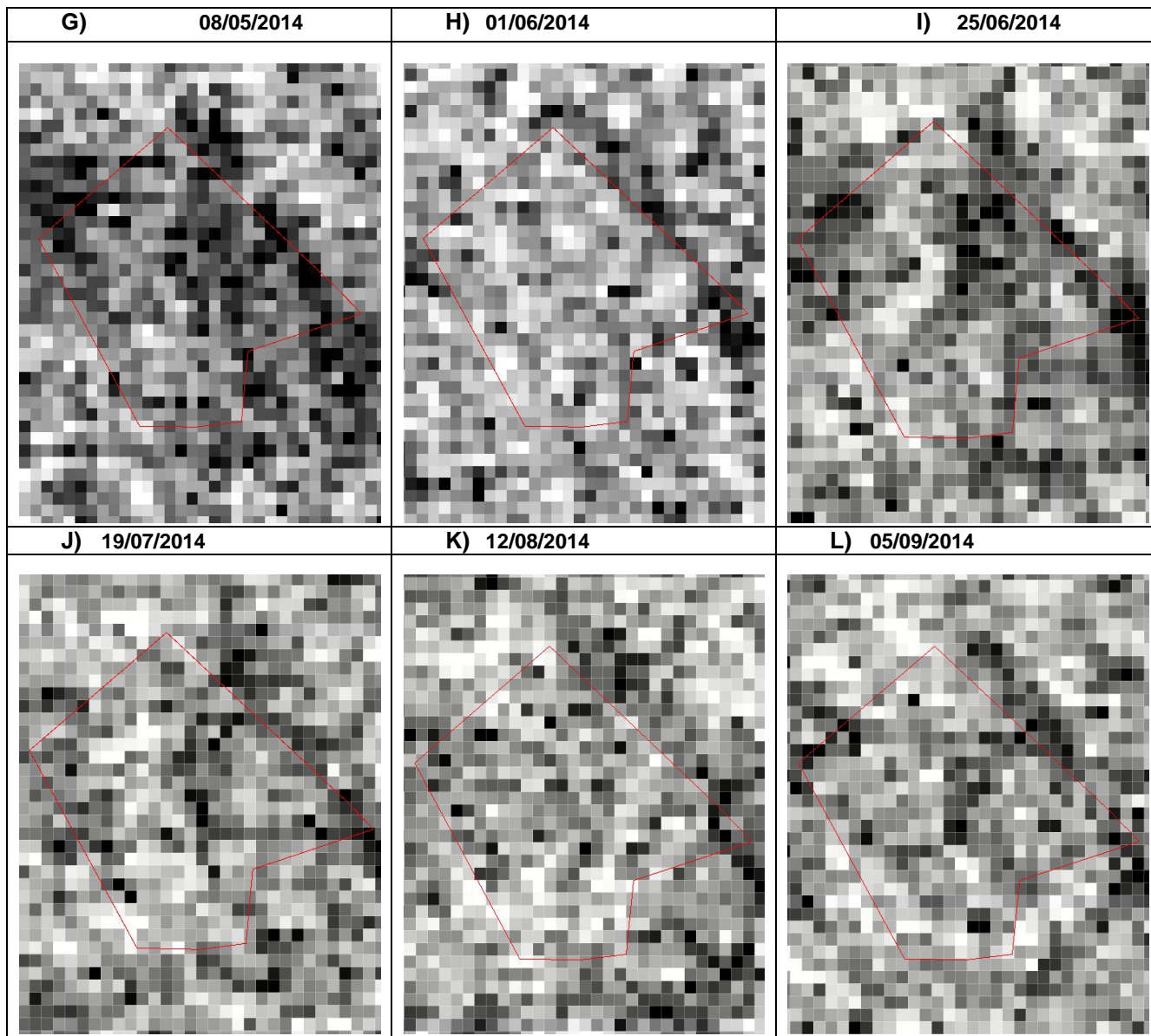


Figura 46. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el año 2014 en polarización VV

Nueva vida 6

Se encuentra ubicado al noroeste de la zona de estudio, presenta un uso de suelo propio de potrero, rodeado geomorfológicamente por un lomerío bajo y vegetación de selva baja y mediana, el tipo de suelo es Rendzina fina.



a)



b)

Figura 47. Potrero Nueva vida 6. a) Zona Sureste, b) Zona noreste

A continuación, se presenta un gráfico con la evolución del coeficiente de retrodispersión en polarización VH (Figura 48) y HV (Figura 51) contra el KBDI para los años 2010, 2013 y 2014. En este sitio el coeficiente de correlación fue de 0.71, este sitio tiene como característica que se encuentra constituido en su mayoría por pastos inducidos y vegetación secundaria de selva baja de menos de un metro.

En el cuadro 28 se puede observar la media de los niveles digitales obtenidos de las imágenes de radar, estas cifras muestran que la correlación entre el KBDI y el coeficiente de retrodispersión es positivo, ya que cuando el índice de sequía aumenta el coeficiente de retrodispersión lo hace de la misma forma, mostrando así que el tipo de vegetación de pastos se encontraba bajo un estrés hídrico. Estos resultados concuerdan con los resultados presentados en el estudio sobre la capacidad potencial en la evaluación biofísica de los sensores en banda C, en los campos de cultivo de arroz en Asia, en donde mencionan que la correlación más alta se obtuvo en la polarización de tipo cruzada (VH). En este estudio se demostró que las plantas que presentaban menor biomasa se encontraban en niveles digitales de -28.5 (Inoue, *et al.*, 2014)

Polarización VH

Cuadro 27. Coeficiente de retrodispersión vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-9.5572	138
28/10/2013	-16.3488	98
15/12/2013	-16.2716	288
25/02/2014	-17.2494	1562
21/03/2014	-19.1864	1551
14/04/2014	-19.791	1848
08/05/2014	-20.0117	1267
01/06/2014	-16.6652	539
25/06/2014	-18.7443	728
19/07/2014	-19.0026	1425
12/08/2014	-18.2143	1673
05/09/2014	-17.5367	1176

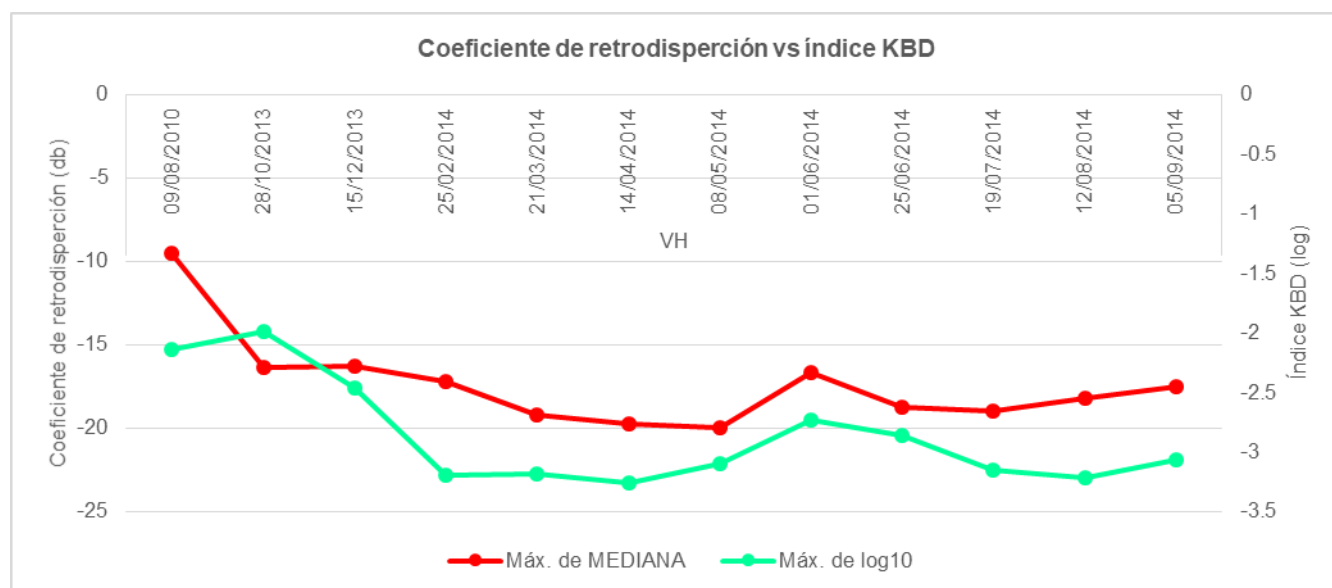


Figura 48. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VH

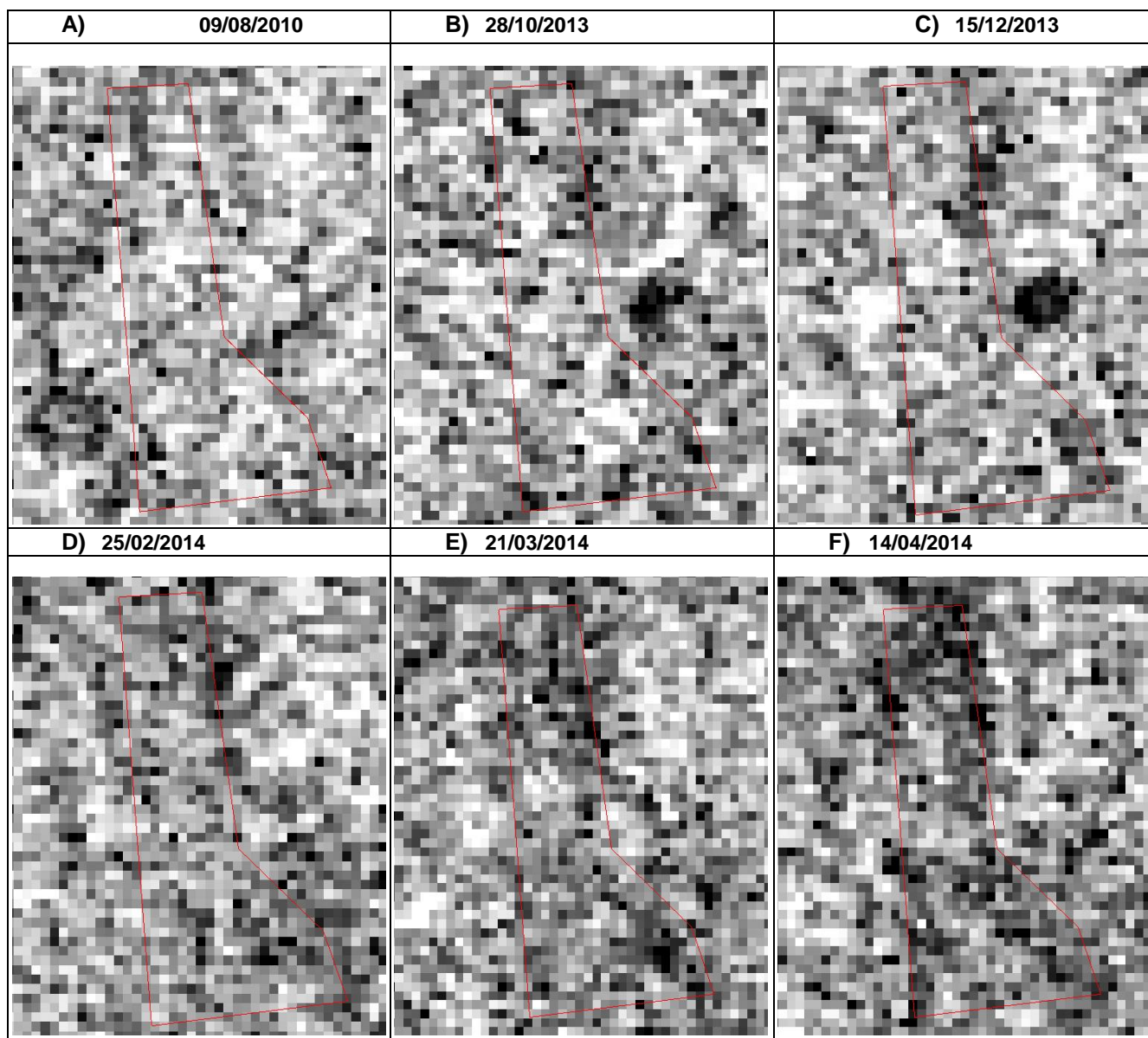


Figura 49. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VH

}

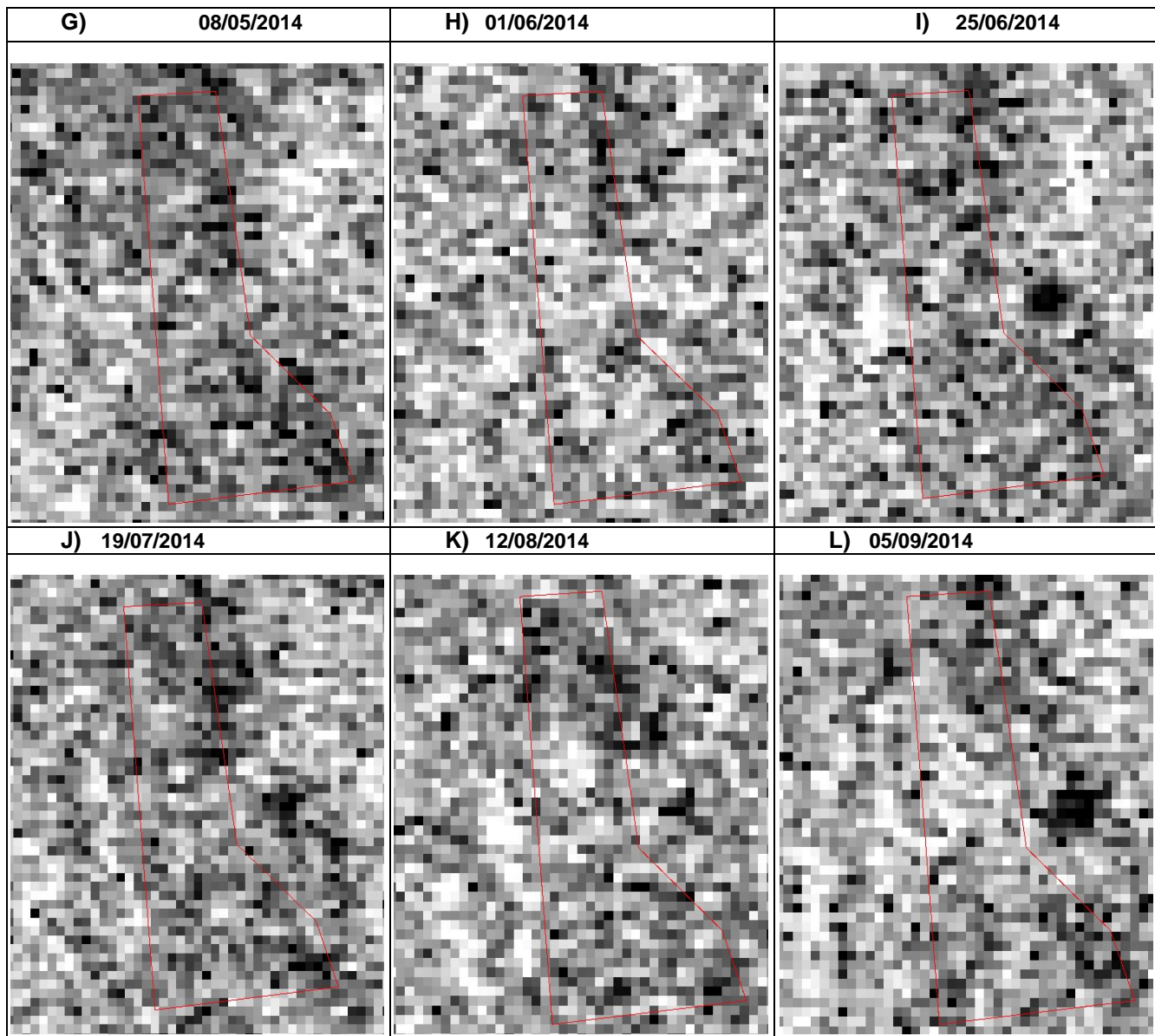


Figura 50. Evolución del coeficiente de retrodispersión en el periodo 2010-2014 en polarización VH

Polarización HV

Cuadro 28. Coeficiente de retrodispersión en HV vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-9.1157	138
28/10/2013	-16.332	98
15/12/2013	-16.425	288
25/02/2014	-16.278	1562
21/03/2014	-19.39	1551
14/04/2014	-19.7734	1848
08/05/2014	-20.1445	1267
01/06/2014	-16.9563	539
25/06/2014	-19.5418	728
19/07/2014	-19.049	1425
12/08/2014	-17.9898	1673
05/09/2014	-17.7814	1176

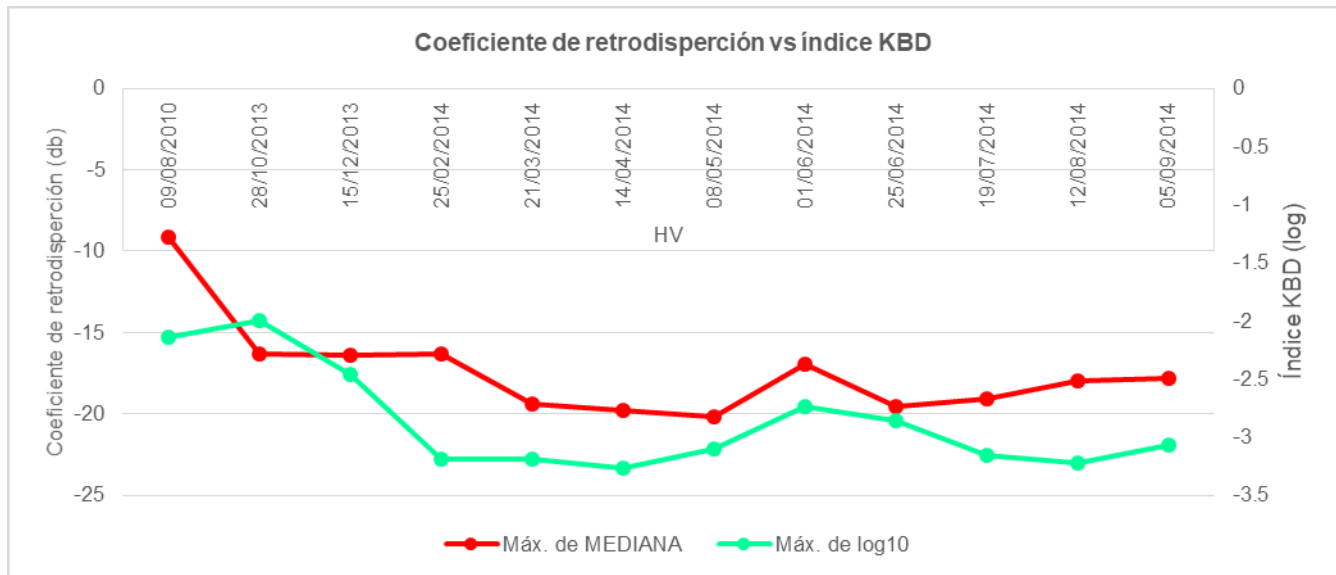


Figura 51. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización HV

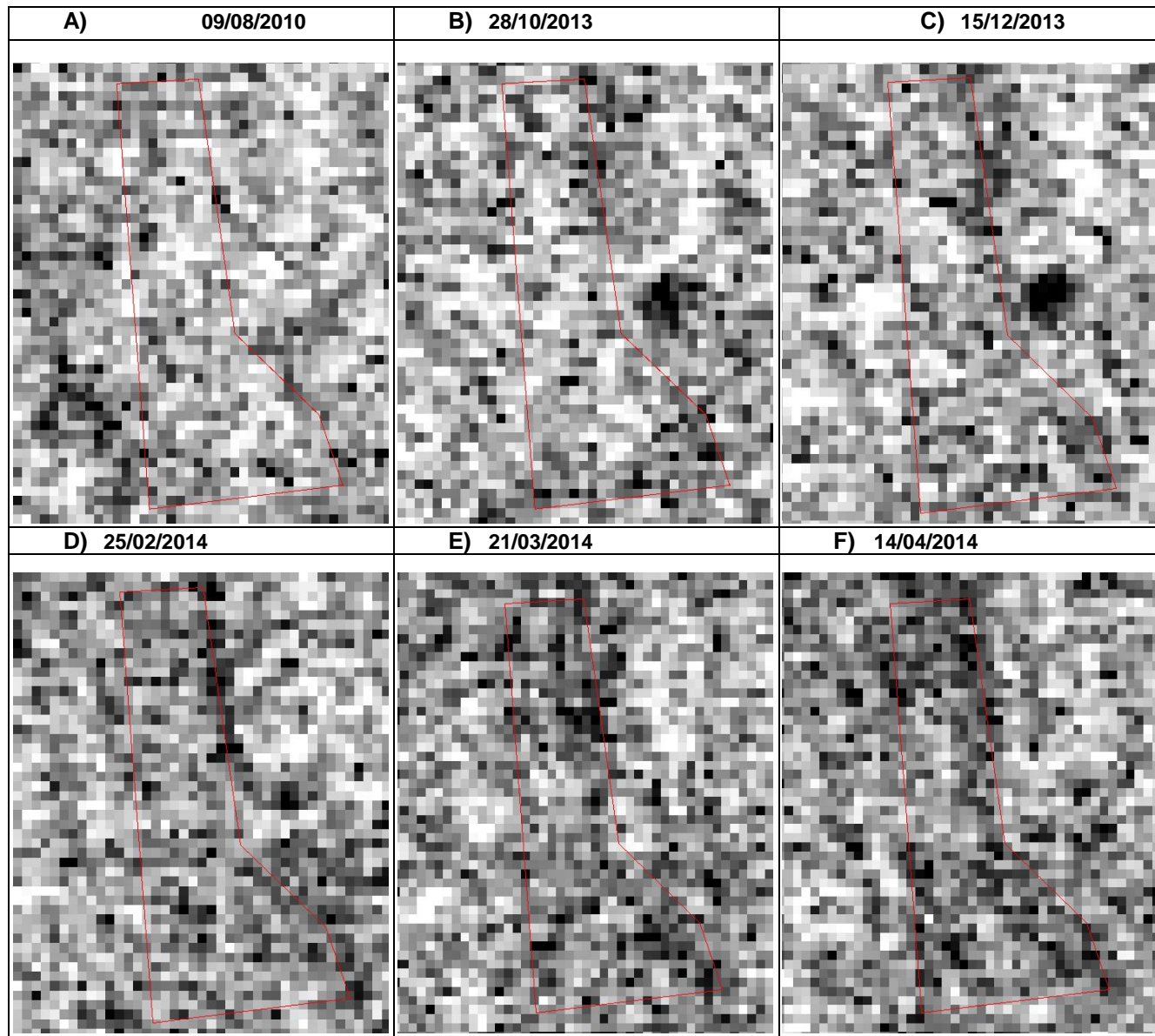


Figura 52. Coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización HV

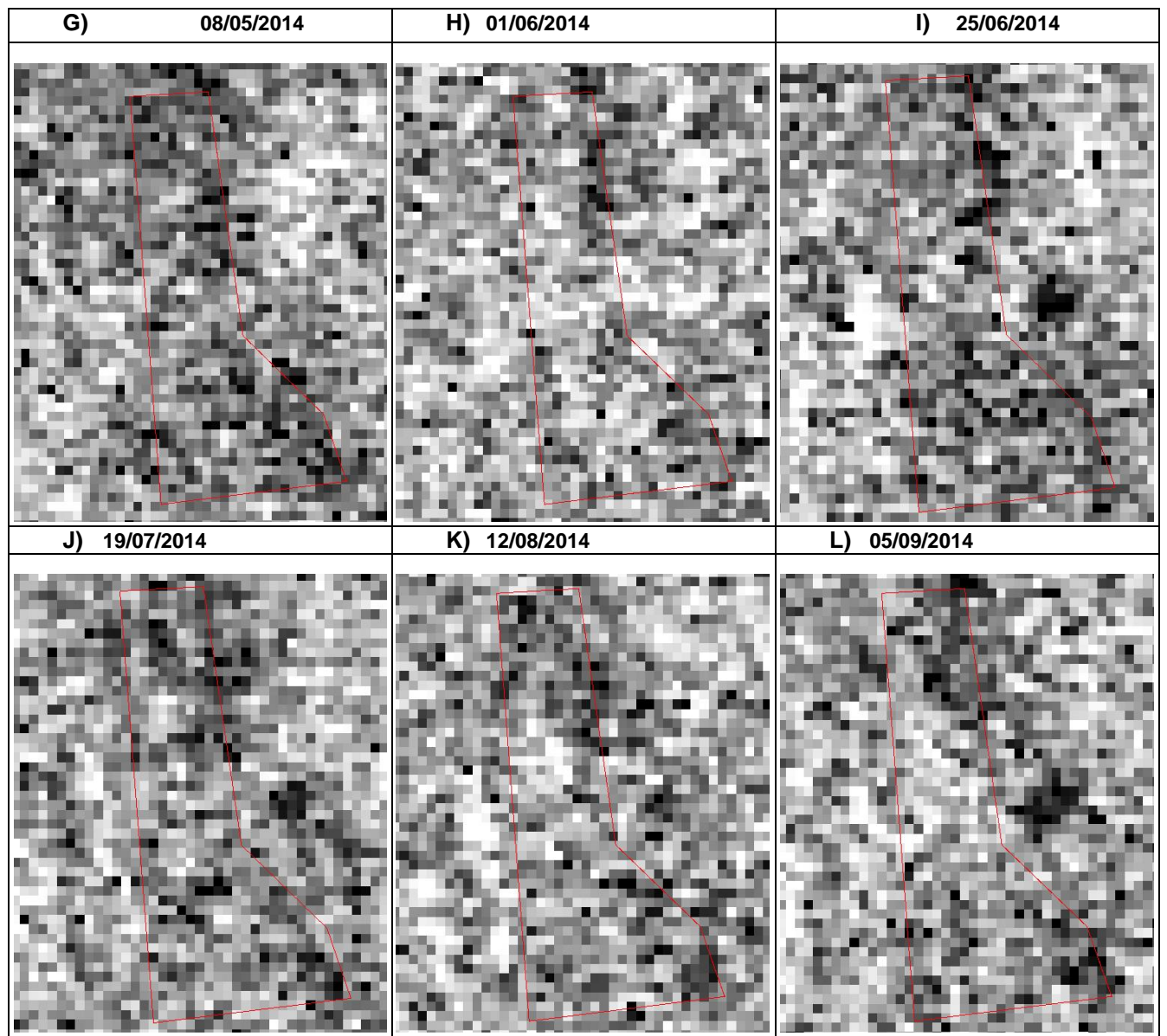


Figura 53. Coeficiente de retrodispersión para el año 2014 en polarización HV

Nueva vida 4

Potrero ubicado al noroeste de la zona de estudio conformado por pastizales inducidos, algunos árboles secos, rodeados por selva baja y mediana con suelos de tipo Vertisol pelico (Figura 54).



a)



b)

Figura 54. Potrero Nueva Vida 4, a) zona este del potrero y b) zona oeste del potrero

El índice de correlación que se obtuvo en este sitio fue de 0.60. En el cuadro 29, se puede observar las correlaciones más fuertes de febrero a mayo del 2014, en donde se muestra que cuando el índice tiende a disminuir en términos de base logarítmica, el coeficiente de retrodispersión también lo hace, es normal que en los meses de octubre a mayo se presente una disminución importante de la precipitación. Sin embargo, en esta ocasión la disminución fue anormal a tal grado de llevarla a registrar niveles altos de sequía. Estos resultados se compararon con el análisis mensual que realizó la CONAGUA, (2017c) para el 2014 en donde se menciona que febrero se destacó como el mes más seco con -67%, abril el vigesimoquinto con -20.6% y marzo se ubicó con anomalías por debajo de la normal con -2.4%.

Cuadro 29. Coeficiente de retrodispersión vs KBDI

FECHA	SIGMA CERO	ÍNDICE KBD
09/08/2010	-11.519	138
28/10/2013	-16.9865	98
15/12/2013	-16.3658	288
25/02/2014	-16.5048	1562
21/03/2014	-18.4832	1551
14/04/2014	-17.1006	1848
08/05/2014	-17.2059	1267
01/06/2014	-17.2505	539
25/06/2014	-17.8792	728
19/07/2014	-18.4671	1425
12/08/2014	-17.1816	1673
05/09/2014	-18.0591	1176

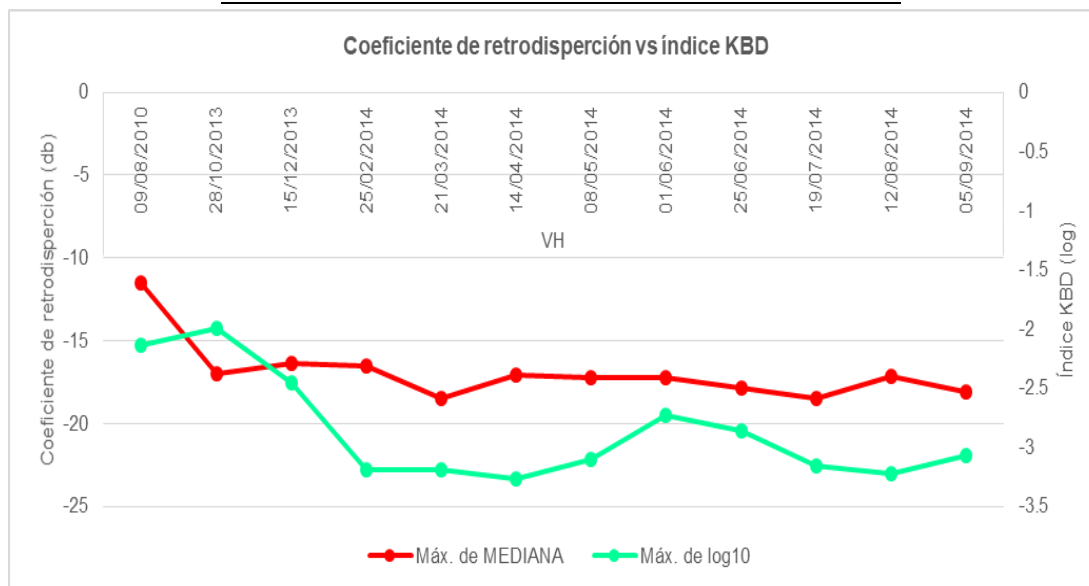


Figura 55. Índice KBD vs Coeficiente de retrodispersión en polarización VH

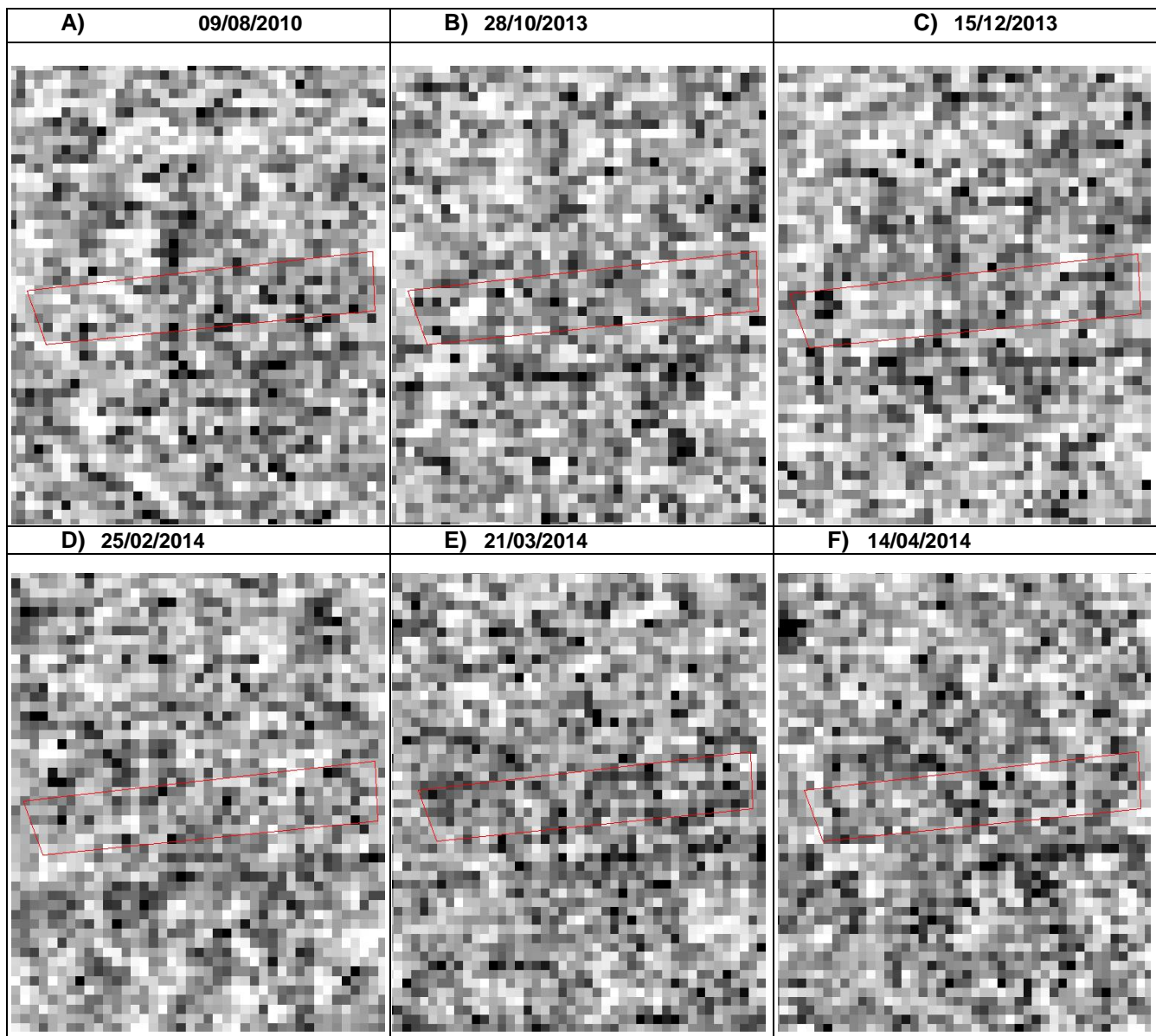


Figura 56. Evolución del coeficiente de retrodispersión para los años 2010, 2013 y 2014 en polarización VH

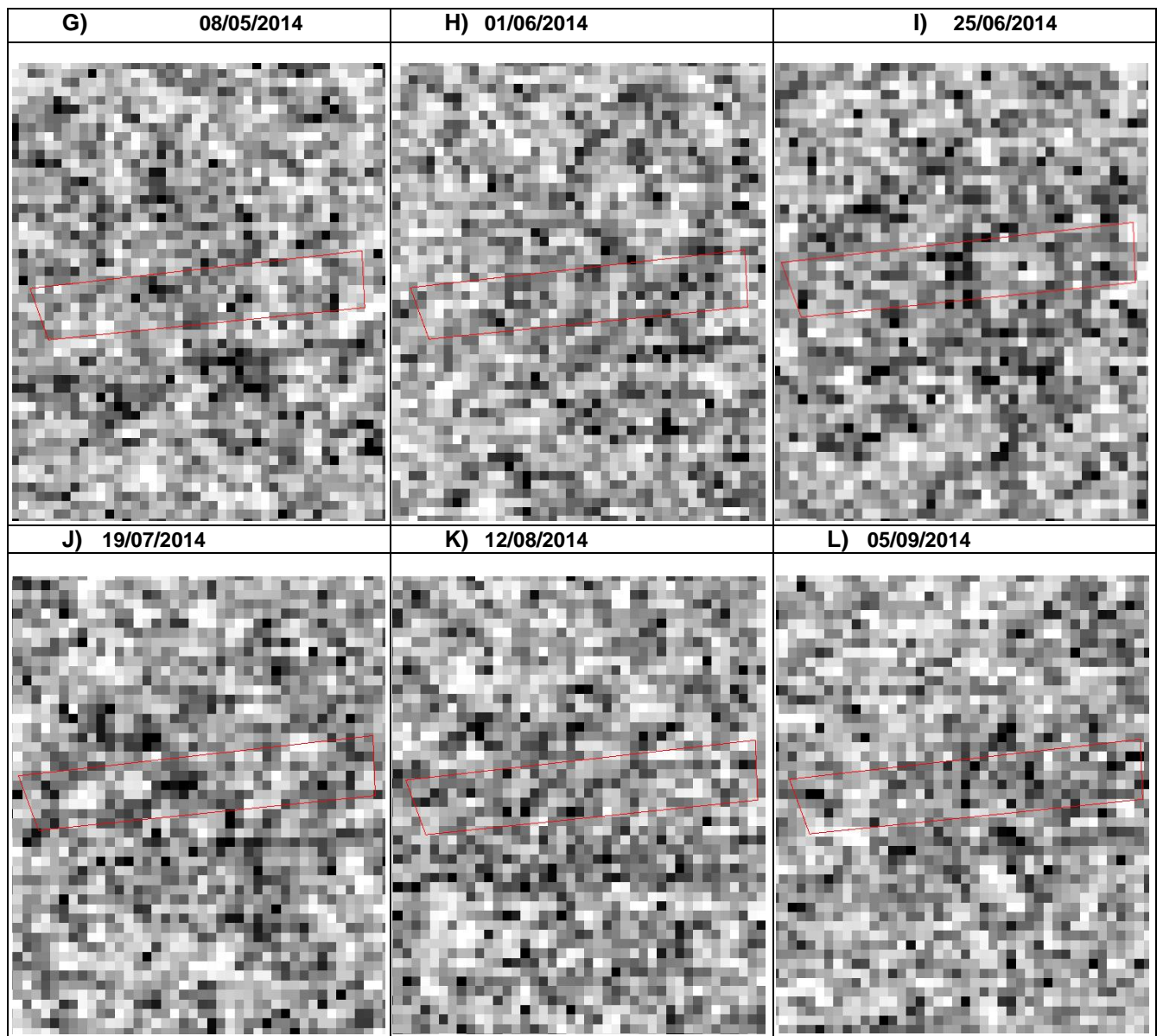


Figura 57. Evolución del coeficiente de retrodispersión para el año 2014 en polarización VH

Análisis general

En general solamente se logró identificar déficit hídrico en una localidad de la zona de estudio (Nueva Vida) durante el 2010, 2013 y 2014. Se observó que los sitios en donde se obtuvo correlación presentaban las siguientes características: dosel arbóreo despejado y en algunos sitios casi nulo, suelos de tipo Rendzinas, formados en rocas madre de tipo cársticas con características someras, más ácidas, con abundantes afloramientos de calcio, estas características reducen la disponibilidad de agua en suelo y acentúan la sensibilidad de las plantas al estrés hídrico y a las sequías estacionales (Martínez y Galindo, 2002), anomalías diarias de temperatura máxima para el nivel de sequía alto, que van desde los 0.1 hasta los 5°C y un déficit de precipitación que va desde los -6.1 a -0.8 mm para los meses de febrero, marzo, abril y agosto del 2014 estos resultados concuerdan con la CONAGUA, 2017c que menciona que para los meses de febrero, marzo y abril las lluvias mensuales estuvieron por debajo de la normal; anomalías diarias de temperatura para los niveles de sequía medio que van desde los 0.1 hasta los 5.7 °C y déficit de precipitación de -5.8 a -0.7 mm en los meses de mayo, julio y septiembre del 2014 esto fue comparado con los resultados de anomalías de precipitación reportadas por la CONAGUA, (2017c), en donde se menciona que julio fue el onceavo mes más seco reportando un déficit de pp de -20.6%. Por último las anomalías diarias de temperatura para los niveles de sequía bajos se encuentran en un rango de 0.1 a 4.8 °C y un déficit de precipitación de -4.8 a -0.8 mm para los meses de octubre y diciembre del 2013. Los resultados anteriores se compararon con los que obtuvieron Márdero, *et al.*, (2012) en un estudio que realizaron para identificar sequías al sur de la península de Yucatán con un índice basado en quintiles. En donde muestran un aumento en los años de sequía desde leve hasta extrema a partir de 1985 al 2007. Estos datos bibliográficos dan una referencia a que la zona de estudio en el presente trabajo se ha visto influenciada por la presencia de estrés hídrico en la vegetación. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Márdero *et al.*, (2012) en donde mencionan que las sequías locales en la Península de Yucatán se presentan en dos periodos, el primero que es la sequía pre-estival que va de enero a abril y la sequía intra estival o canícula que se presenta en los meses de julio y agosto. Esta última etapa se presenta por la inestabilidad en los vientos alisios. En verano se presenta un sobrecalentamiento del mar en la porción del del Pacífico oriental por debajo de la Zona Intertropical de Convergencia, lo cual debilita el gradiente barométrico y por ende

disminuye la intensidad de los vientos alisios, lo que trae como consecuencia una disminución en frecuencia y cantidad de lluvia en la zona de Calakmul.

Análisis por sitio

El sitio en dónde se obtuvo una correlación más alta fue en Nueva vida², en una zona de selva baja en la polarización VV con una correlación de 7.7, esto quizá porque en esta polarización se ha demostrado que responde mejor a la contribución de volumen, en este caso de volumen de copa arborea. Mientras tanto, Kasischke, *et al.*, (1995) mencionan que la mejor polarización para observar biomasa en bosques es HH y VH, esto quisa es porque ese estudio se realizo en bosques de pino, donde las copas tienen un arreglo geometrico muy diferente al de los bosques tropicales.

Por otra parte se observó que para las zonas en donde se encuentra presente los cultivos las correlaciones fueron más altas en las polarizaciones cruzadas (HV y VH), esto se puede explicar debido a que responden mejor a la interacción de doble rebote con los elementos dispersores, estos resultados concuerdan con los obtenidos en diversos estudios, como el realizado por Zhang, *et al.*, (2017) en el que mencionan que tuvieron mejores resultados en la polarización HV al momento de analizar el rendimiento y la eficiencia de un campo de cultivo de arroz.

En cuanto a los potreros las correlaciones más altas se obtuvieron en las polarizaciones cruzadas, esto puede ser a que la vegetación que se encontraba no solo respondía a ser pastos inducidos, si no que también había vegetación de sotobosque secundario. Por su parte Zempoaltecatl-Ramirez, *et al.*, (2014), mencionan que la contribución del suelo es baja porque la señal del radar no penetra debido a las capas de vegetación.

Sin embargo Monsiváis-Huertero, *et al.*, (2009), mencionan que la mejor polarización para analizar los pastizales es la de HH, ellos estudiaron la aplicabilidad de un procedimiento para la recuperación de la vegetación utilizando un modelo de dispersión coherente que considera las propiedades bótanicas de los pastizales africanos

Sitios donde no se presentó correlación positiva

Según las anomalías diarias de temperatura y precipitación, el año 2010 fue particularmente frío y húmedo quizá por el paso de la tormenta tropical Mathew, el cual dejó remanentes de humedad tanto en el suelo como en la vegetación, este tipo de geomorfología obedece a una llanura de tipo inundable y muchas veces estas actúan como amortiguadores de inundaciones y sequías extremas (Zhao, *et al.*, 2014). Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Rodríguez, (2014), donde demostró que para el 2010 la humedad del suelo se incrementó y este resultado también fue atribuido a la tormenta tropical Mathew.

Por otro lado estos resultados también se corroboran con lo mencionado por García, *et al.*, (2002) en donde sostiene que la humedad que reciben las selvas de Calakmul varía según la incidencia de las tormentas tropicales en el mar Caribe que siguen normalmente un desplazamiento al oeste.

En cuanto al 2013, se destacó por ser el decimotercero con menos lluvia a nivel nacional, es importante mencionar que estos datos se presentaron solo para el primer semestre del año ya que los últimos meses de este se registraron fuertes lluvias, mismas que se reflejaron en este estudio, ya que se demostró con el KBDI que a nivel local y para los últimos meses que la sequía se presentó en rangos menores de 1000, es decir en un nivel bajo. En este estudio solo se analizaron las imágenes de octubre y diciembre del presente año, ya que eran las únicas que coincidían con las características mencionadas en la metodología.

Con respecto a la parte de percepción remota, se tiene un supuesto de que la señal de radar se saturó en zonas donde el dosel arbóreo estaba más cerrado y denso y por ello no se pudo analizar bien este fenómeno, esto puso sobre la mesa que se requieren de otro tipo de tratamientos para las imágenes en el análisis de este fenómeno, o bien otro tipo de imágenes con mayor resolución y una mejor calidad en los datos meteorológicos. Como en el estudio realizado por Tanase, *et al.*, (2015) en donde se obtuvieron resultados favorables al monitorear un bosque templado pre y post incendio con imágenes SAR en banda L. Otro factor que pudo haber influido en que no hubiese correlación en ciertos sitios fue el paso de

la Tormenta tropical Barry del 2013 y la tormenta tropical Hanna que afecto Quintana Roo y parte de Campeche dejando a su paso humedad en el suelo y en la vegetación.

Los sitios de selva baja que no presentaron correlaciones en su mayoría fue porque el KBDI presentaba sequía mientras que los coeficientes de retrodispersión mostraban rangos de entre -9 a -12 db, con pixeles muy brillantes, indicando que la vegetación no estaba estresada hídricamente, este resultado se comparó con el estudio realizado por Monsivais-Huetero *et al.*, (2014) en donde mencionan que la humedad en las hojas de la vegetación arbórea para la zona sur de Calakmul va de .45 a .62 en sitios donde la vegetación no esta tan impactada

Es importante resaltar que en los predios: “Nuevo Becal Otilio Bosque”, “Nuevo Becal Chorro”, “Nuevo Becal y “Puerto Veracruz” las variaciones en los decibeles de las 4 polarizaciones fue apenas de 2 db es decir, los decibeles en las polarizaciones cruzadas fueron oscilaban entre -17 a -15, mientras que para las lineales: HH fue de -12 a -9 db y VV - 10 a -8 db, estos resultados refuerzan lo antes mencionado con respecto a la saturación en la señal al momento de interaccionar con los elementos dispersores.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES

En esta contribución se logró identificar la presencia de la sequía meteorológica en dos localidades “Nuevo Becal” y “Nueva vida”, la primera su ubica al suroeste de la zona de estudio, mientras que la segunda se encuentra al noroeste de la misma. La correlación que se obtuvo fue mayor a 0.60 entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes de RADARSAT-2 y el índice diario de sequía de Keetch Byram modificado para vegetación tropical.

La técnica de identificación de sequía resulto ser adecuada solo para zonas donde la señal no tiende a la saturación, es decir para cultivos y potreros, ya que por las características de la vegetación arbórea del lugar es muy difícil captar las variaciones sin otro tipo de descomposición o bien otra banda con una resolución mayor a los 5.9 cm.

Las imágenes en banda C son adecuadas para analizar cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo, en especial en polarización HV, ya que en esta polarización se obtuvieron mejores resultados al momento de realizar un estudio además de tener una mejor correlación. El filtro Refined Lee de ventana 7x 7 fue el mejor para esta zona de estudio ya que disminuye el speckle y clutter sin eliminar rasgos importantes en las imágenes.

Se observó que la selva baja y la mediana en polarización lineal oscilan entre los -12 a -9 db para HH y para VV -10 a -8 db, mientras que para las cruzadas -17 a -15 db, este tipo de vegetación se encuentra en la zona limítrofe de un área en recuperación con remanentes de vegetación secundaria y acahuales .

Los meses en que se presentó un nivel alto a la vulnerabilidad de la vegetación ante el estrés hídrico fue en febrero, marzo, abril y agosto, mientras que los meses de mayo, julio y

septiembre fueron catalogados en un nivel medio y por último los meses de octubre y diciembre se catalogaron en un nivel bajo.

PROPUESTAS

Combinar los datos del índice de vegetación, las imágenes de RADAR y las del radiómetro de SMOS para observar si hay una correlación para la sequía, ya que este radiómetro de SMOS identifica los objetos con mayor calor como pixeles más brillosos y los más fríos como más oscuros

Con las imágenes previamente filtradas otro trabajo igual muy sencillo y para obtener más información acerca de un tipo de cubierta, ya sea de vegetación o bien del suelo es realizando la adición o la extracción entre las polarizaciones por ejemplo $VV+ HH$ = más información de vegetación o bien $VV- HH$ = disminuye la vegetación e incrementa el suelo (Monsiváis-Huertero *et al.*, 2014)

Se propone trabajar con imágenes de banda L o P, para eliminar la saturación que se obtuvo en banda C como en los trabajos realizados en bosques tropicales de la Amazonias, en donde se pudo obtener un análisis sobre el ciclo del carbono (Treuhft, *et al.*, 2004)

Para clasificar los tipos de vegetación en un área de tipo heterogénea se propone utilizar una descomposición de *Freman Durden* o bien una descomposición basada en la matriz de confusión T como lo hicieron Almeida, *et al*, (2016).

Bibliografía

- Aguirre, R. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. México: Instituto de Geografía; Universidad Nacional Autónoma de México.
- Allwood, J., Bosetti, N., Gómez-Echeverr, L., & Stechow, C. (2014). *Glosario. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel y J.C. Minx .
- Almeida, L., Freire, T., & Leão, E. (2016). Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon várzea wetlands. *Remote Sensing of Environment*, Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon várzea wetlands, In Remote 174:212-222.
- Barros, V. (2005). *El cambio climático global*. Buenos Aires, Argentina: Libros del Zorzal.
- Beriaux, E., Lucau-Danila, C., Auquiere, E., & Defourny, P. (2013). Multiyear independent validation of the water cloud model for retrieving maize leaf area index from SAR time series. *International Journal of Remote Sensing* , 34, 4156-4181.
- Campos, D. (2013). Caracterización de seúas meteorológicas mediante curvas de severidad- área de influencia- frecuencia, en el valle de San Luis Potosí, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6:3. 165-186 pp.
- Canadian Space Agency. (2017). *Satellites*. Obtenido de <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/default.asp>
- Chuvienco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel. S.A.
- Clemente, V. (2012). *Determinación y análisis de mecanismos de dispersión electromagnética en zonas agrícolas*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- CONAFOR, C. (2017). *Incendios forestales*. Obtenido de Guía práctica para comunicadores: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>
- CONAGUA. (2017a). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2011.pdf>
- CONAGUA. (2017b). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2013.pdf>

- CONAGUA. (2017c). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de Reporte del Clima en México: <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2014.pdf>
- Couturier, S. T. (2001). ERS SAR backscatter: a potential real time indicator of the proneness of modified rainforest to fire. *Remote Sensing of Environment*, 76:410-417.
- Dávila, N. (2011). *Modelo de segmentación de depositos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X)*. México: UNAM.
- Edgar, T. (1982). *Manual of Rubber Planting (Malaya)*. The incorporated Society of Planters. Malaysia.
- ESA, A. (2016). Calibration operator. SNAP [Software].
- Escalante-Ramírez, B., y Lira-Chavéz, J. (1996). *SPIE.Digital Library*. Obtenido de SPIE 2753, Visual Information Processing V: <http://dx.doi.org/10.1117/12.243585>
- Ferro-Famil, L., y Pottier, E. (2014). *Radar Polarimetry Basics and Selected Earth Remote Sensing Applications*. Obtenido de Elsevier: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-396500-4.00021-1>
- Florescano, E., y Swan, S. (1995). *Breve historia de la sequía en México*. Xalapa, Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Gao, S., Niu, Z., Huang, N., y Xuehui, H. (2013). Estimating the Leaf Area Index, height and biomass of maize using HJ-1 and. *International Journal of Applied Earth Observation and*, 24:1-8.
- García , E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen*. México: Instituto de Geografía UNAM.
- García, E. (1974). *Situaciones climáticas durante el auge y la caída de la cultura teotihuacana*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- García, F. (1998). *Análisis de frecuencias de sequías para el estado de Sinaloa*. División de estudios de posgrado. Facultad de Ingeniería: UNAM.
- García, G., y Pat, J. (2001). Apropiación del espacio y colonización de la selva en la Reserva de la Biosfera Calakmul Campeche. *Revista Mexicana del Caribe*, 10:2012-2013.
- García, G., Palacio, J., y Ortíz, M. (2002). Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico de la Reserva de la Biosfera Calakmul, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 7-23.
- García, J., Fuentes, O., y Matías, R. (2002). Sequías. *Serie Fascículos, CENAPRED, Secretaría de Gobernación, México*.
- García, V. (1993). Las sequías históricas de México. Desastres y sociedad. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 83-96.

- Geografía, I. I. (2008). *Conjunto de datos Vectoriales para la Humedad del suelo, escala 1:250 000*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>
- Geografía, I. I. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250 000*.
- Goldstein, R., Zebker, H., y Wener, C. (1988). Satellite radar interferometry. *Two dimensional phase unwrapping*. *Radio Science*, 23:4, 713-720.
- Hernández, J., Zempoaltecatl, E., Jiménez, J., Monsiváis, A., y Mosqueda, A. (2016). *Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León*. Obtenido de Ciencia UANL: <http://cienciauanl.uanl.mx/>
- Hernández, M., Carrasco, G., y Alfaro, G. (2007). *Mitos y realidades de la sequía en México*. México: Instituto de Geografía. UNAM.
- Hernández, M., Torres, L., y Valdéz, G. (2000). *Sequía meteorológica; México: una visión hacia el siglo XXI, El cambio Climático en México*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Hernández, S. (2012). *Análisis de series temporales de la subsidencia en cuencas en el centro de México obtenidas a partir de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR): Caso Morelia*. México: UNAM.
- Hurtado, G., y Cadena, M. (2002). Aplicación de índices de sequía en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 5:131-137.
- INEGI, I. (2007). *Modelo Digital de Elevación, escala 1: 100 000*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/metadatos/ntm.aspx?s=geo&c=2374>
- INEGI, I. (2017). *Recursos naturales*. Obtenido de Climatología: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística . (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250 000*. Obtenido de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/doc/guia_interusuarioslov.pdf
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía. (2008). *Conjunto de datos Vectoriales. Unidades Climáticas escala 1:1 000 000*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y G. (2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II*. Obtenido de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geograf. (2015). *Datos vectoriales de Uso de suelo y Vegetación a escala 1: 250 000*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/>

- Inoue, Y., Sakaiya, E., & Wang, C. (2014). Capability of C-band backscattering coefficients from high-resolution satellite SAR sensors to assess biophysical variables in paddy rice. *Remote Sensing of Environment*, 140: 257-266.
- IPCC. (2007). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. enhen, M. Marquis, K.B. Ave. New York, NY, USA.: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and United Kingdom . Obtenido de Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. enhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)].
- IPCC. (2013). *Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tign. NY, Estados Unidos de América: Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York.
- Jinsong , C., Hui, L., Chudong, H., y Chaoyang, F. (2009). The relationship between the leaf area index (LAI) of rice and the C-band SAR vertical/horizontal (VV/HH) polarization ratio. *International Journal of Remote Sensing*, 30:8. DOI: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160802609700?needAccess=true>.
- Kasischke, E., Christensen, N., y Bourgeau-Chavez, L. (1995). Correlating radar backscatter with components of biomass in loblolly pine forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33:3:643-659.
- Kornelsen, K., y Coulibaly, P. (2013). Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar. *ELSEVIER. Journal Hidrology*, 460-489.
- Lang, M., Townsend, A., y Kasischke, E. (2008). Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment*, 112:10:3898-3907.
- Lee, J. (1980). Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, PAMI-2. 2:165-168.
- Lee, J., y Pottier, E. (2009). *Polarimetric radar imaging from basics to applications*. New York: Taylor & Francis Group.
- Liangliang, T., Jing , L., Jinbao, J., Xi, C., y Quingkong, C. (2016). A modified vegetation backscattering model for leaf area index retrieval from SAR time series. *International Journal of Remote Sensing*, 37:24, 5884-5901, DOI: 10.1080/01431161.2016.1251627.
- Lillesand, T., Kiefer, R., y Chipman, J. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Estados Unidos de América : Wiley.

- Lindenlaub, J. (1976). *Remote Sensing: Fundamentals of Remote Sensing*. Purdue Research Foundation.
- Lira, J. (2010). *Tratamiento de imágenes multispectrales*. México: Instituto de Geofísica. UNAM.
- López, A. (2004). *Modelación morfológica de sitios arqueológicos del área maya empleando imágenes de radar de alta resolución*. México D.F: UNAM.
- Lugo, J. (1991). *Elementos de geomorfología aplicada*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Magaña, V., Pérez, J., y Conde, C. (1998). El fenómeno de El Niño y sus impactos. *Ciencias*, 51:14-18.
- Makoto, S., y Hiroshi, H. (2004). Diurnal Change of Amazon Rain Forest backscattering coefficients Observed by Ku-Band Spaceborne Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42:6, 1127-1134.
- Manninen, T., Stenberg, P., Rautiainen, M., Voipio, P., y Smolander, H. (2005). Leaf area index estimation of boreal forest using ENVISAT ASAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43:11:2627-2635.
- Marchionni, D., y Francois, C. (2014). Radar remote sensing as a source of structural and lithological information. RADARSAT-1 SAR spatial image analysis. *GEOACTA*, 39(1):62-89.
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., y Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 78:19-33 .
- Martínez, E., y Galindo, C. (2002). La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71:7-32.
- Masera, O., y Dirzo, R. (1992). Carbon Emissions and Sequestration in Forests: Case Studies from Seven Development Countries. *Berkeley: climate Change Division, EPA and Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory*.
- Mckee, T., Doesken, N., y Kleist, J. (1993). The relation of drought frequency and. *Proceeding of the Eight Conference on Applied Climatology*, 179-184.
- Monsiváis-Huertero, A., y Magagi, R. (2014). *Estimación de la biomasa y de la humedad de suelo de una zona forestal con alta variabilidad espacial a partir del modelado físico y de datos polarimétricos Radarsat-2*. México.
- Monsivais-Huertero, A., Chenerie, I., y Sarabandi, K. (2009). Estimation of Sahelian-Grassland Parameters Using a Coherent Scattering Model and a Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47:4:999-1011.

- Mosiváis-Huertero, A., Jiménez, J., Galeana-Pizaña, J., Torres-Gómez, A., Magagi, R., Goïta, K., Hernández, J. (2016). *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7729992&isnumber=7728980>
- Mosqueda, G. (2013). *Análisis del cambio de cobertura forestal 2001-2012 asociado a los caminos en la Reserva de la Biósfera Calakmul y zonas sujetas a conservación ecológica Balam Kú y Balam Kin*. México: UNAM.
- Mousavi, M., Amini, J., Maghsoudi, Y., y Arab, S. (2015). PolSAR Speckle Filtering Techniques and Their Effects on classification. *ASPRS. The Imaging & Geospatial Information Society*.
- NDMC. (Enero de 2017). *National Drought Mitigation Center*. Obtenido de What is drought: <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatisDrought.aspx>
- Ortega, D. (2013). Sequía causas y efectos de un fenómeno global. *Ciencia y Sociedad*, 16:61, 8-15.
- Pat, J., y Ku, V. (2000). *Tendencias de cambio en el uso del suelo por los factores socioeconómicos, naturales y técnicos en la región de Calakmul*. Memoria de avances de investigación.
- Patrick, E. (2003). Sequía: Vulnerabilidad y crisis en tierras áridas Kenia. *Centro para el Desarrollo de las Tierras Áridas, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*, 2.
- Podest, E., y Saatchi, S. (2002). Application of multiscale texture in classifying JERS-1 radar data over tropical vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 23:7, 1487-1506, DOI :10.1080/01431160110093000.
- Reyna, R., Farril, G., Sima, D., Andrade, M., Padilla, A., y Sosa, L. (2010). Las aguadas de Calakmul: reservorios de vida silvestre y de la riqueza natural de México. *Biodiversitas*, 93:1-6.
- Rodríguez, B. (2014). *Estimación de humedad de suelo en un bosque tropical mediante imágenes RADARSAT*. México: Facultad de Ingeniería , UNAM.
- Rojas, S. (2014). *MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS DEL AISAJE EN LA AMAZONIA CON BASE EN SENSORES REMOTOS*. Bogotá , Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Sensat, M. (2015). *Formación de imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR) de precisión mediante técnicas de retroproyección*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- SNAP, S. (2017). *Science toolbox exploitation platform*. Obtenido de Science toolbox exploitation platform. Developer Guide: <https://senbox.atlassian.net/wiki/display/SNAP/Developer+Guide>

- Steven, M., Gill, G., Cookmartin, G., Morrison, K., y Jaggard, K. (2000). Radar responses to wilting in sugar beet *Beta vulgaris*. En *Aspects of applied biology* (págs. 123-130).
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N., y Xie, S. (10 de enero de 2016). *Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación* x. Obtenido de IPCC: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_TS_FAQ_ES.pdf
- Tanase, M., Kennedy, R., y Aponte, C. (2015). Radar Burn Ratio for fire severity estimation at canopy level: An example. *Remote Sensing of Environment*, 170:14-31.
- Thomas, J., y Paris, D. (2008). *Handbook of Fundamental Spectroscopic correlation Charts*.
- Treuhaft, R., Law, B., y Asner, G. (2004). Forest attributes from radar interferometric structure and its fusion with optical remote sensing. *Bioscience*, 54:561-571.
- UNESCO. (enero de 10 de 2010). CAZALAC. Obtenido de http://www.cazalac.org/2015/fileadmin/templates/documentos/Guia_Metodologia_Atlas_de_Sequia.pdf
- UNIATMOS. (octubre de 2016). *Bases de datos y metadatos. Climatología continental*. Obtenido de <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>
- Valiente, O. (2001). Sequía : definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*, 26:59-80.
- Vargas, G. (2016). *La tropicalidad y el análisis geográfico*. Obtenido de Dialnet,Uniroja : <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4796465.pdf>
- Whilite, D., y Glantz, M. (1985). *Understanding the drought phenomenon: the role of definitions*. Water international.
- WMO, W., y GWP, G. (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs)*. Ginebra: Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2.
- Zempoaltecatl-Ramirez, E., Monsivais-Huertero, A., Davila, J., JimenezEscalona, J., & Ramos, J. (2014). Simplified model for estimating the backscatter signal at C-band from a tropical forest in Southern Mexico. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 114-116.
- Zhang, Y., Yang, B., Liu, X., y Wang, C. (2017). Estimation of rice grain yield from dual-polarization Radarsat-2 SAR data by integrating a rice canopy scattering model and a genetic algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformatio*, 57:75-85.
- Zhao, L., Yang, J., Li, P., & Zhang, L. (2014). Seasonal inundation monitoring and vegetation pattern mapping of the Erguna floodplain by means of a RADARSAT-2 fully polarimetric time series. *Remote Sensing of Environment*, 152: 426-440.