



**ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO
MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE IMÁGENES RADAR (SENTINEL-
1) Y OPTICAS (SENTINEL-2) EN LA CUENCA DEL CANAL DE
PANAMÁ**

**SOIL MOISTURE RETRIEVAL ESTIMATION THROUGH THE
COMBINATION OF RADAR (SENTINEL-1) AND OPTICAL IMAGES
(SENTINEL-2) IN THE BASIN OF THE PANAMA CANAL**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D./D^a MARISSA LORANE SAMUDIO SÁNCHEZ

Dirigido por:

Dr./D^a FRANCISCO CARREÑO CONDE

Alcalá de Henares, a 3 de junio de 2019

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermanito por su apoyo incondicional en esta aventura de estudiar una maestría lejos de casa, por estar siempre pendiente de mí en cada momento.

A la República de Panamá, en trabajo coordinado de la Secretaria Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) y el Instituto para la Formación de Recursos Humanos (IFARHU) que me otorgaron la beca para poder realizar este máster y ser una especialista para el país en temas de Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos.

A Francisco Carreño Conde, mi tutor y asesor en la realización de este trabajo de fin de máster por su amabilidad y su ayuda constante.

A mis compañeros del máster, en especial a Julieta Dapa, Carolina Unapanta y Ruddy Robles por hacer esta experiencia única en mi vida, y que jamás olvidaré.

A los profesores del Máster que nos han querido brindar todo su conocimiento y experiencias laborales en 4 horas de clase de la mejor manera posible.

ÍNDICE

RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. JUSTIFICACION.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1. Objetivo General.....	13
3.2. Objetivos Específicos	13
4. METODOLOGÍA	13
4.1. Zona de Estudio	13
4.2. Datos de Precipitación	15
4.3. Datos satelitales	15
4.3.1. Imágenes de Radar: Sentinel-1	15
4.3.2. Imágenes Ópticas: Sentinel-2	20
4.3.3. Imágenes SMOS	22
4.4. Descripción del método de detección de cambio para estimar la humedad en el suelo	23
5. RESULTADOS	27
6. DISCUSIÓN.....	30
6.1. Relación de la precipitación y los valores obtenidos de la humedad del suelo	30
6.2. Descripción de la variación de la humedad en los mapas.....	31
7. CONCLUSIONES	32
8. BIBLIOGRAFÍA.....	33
8.1. Recursos de Internet.....	34
9. ANEXOS.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo variación de retrodispersión por factores como la rugosidad, relieve y humedad del suelo	10
Figura 2. Mapa de la cuenca del Canal de Panamá.	14
Figura 3. Ejemplo de Calibración radiométrica. (a) Antes de la calibración (b) Después de la calibración	17

Figura 4. Eliminación del moteado con un filtro Gamma Map 3 x 3.....	18
Figura 5. Corrección Geométrica del 2/3/2018	18
Figura 6. Imagen radar procesada del 2/3/2018.	19
Figura 7. Retrodispersión en la imagen del 2/3/2018.....	19
Figura 8. NDVI obtenidos de la imagen S2 de 2/3/2018.....	21
Figura 9. Imagen S2 con valores NDVI excluidos del 2/3/2018.....	22
Figura 10. Imagen SMOS de la zona de estudio del 2/3/2018	23
Figura 11. Retrodispersión de la señal del radar en suelo con vegetación.	24
Figura 12. Relación de NDVI y Diferencia de Retrodispersión.....	26
Figura 13. Relación de humedad Volumétrica (SMOS) y señal retrodispersada (S1).	27
Figura 14. Mapas de Humedad de noviembre 2017 - julio 2018	28
Figura 15. Mapas de Humedad de agosto 2018 - febrero 2019.....	29
Figura 16. Relación de la Precipitación de la zona y la Humedad del suelo estimada.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fechas de imágenes de Sentinel-1	16
Tabla 2. Fechas de imágenes de Sentinel-2.....	21
Tabla 3. Registros de Precipitaciones de la estación de Albrook Fields	35

TABLA DE ABREVIATURAS

ACP	Autoridad del Canal de Panamá
ESA	Agencia Espacial Europea
ETESA	Empresa de Transmisión Eléctrica S.A
HS	Humedad del Suelo
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
S1	Sentinel-1
S2	Sentinel-2
SAR	Radar de Apertura Sintética
SNAP	Sentinel Application Platform de la ESA

RESUMEN

La humedad del suelo es una variable del ciclo hidrológico que es un factor determinante en el clima, los procesos de escorrentía, evotranspiración, infiltración y atmosféricos que es de suma importancia su estimación de manera precisa, pero por su variabilidad tanto espacial como temporal es muy difícil su determinación. Debido a la gran variabilidad se han buscado métodos para determinar la humedad en el suelo utilizando técnicas de teledetección con satelitales tanto ópticos como de radar.

El siguiente estudio tiene como objetivo determinar la humedad del suelo utilizando una combinación de imágenes de radar y ópticas de los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2 en el área tropical de la cuenca del canal de Panamá. Se utilizó un método de detección de cambios para determinar la humedad del suelo (HS) basándose en una metodología aplicada anteriormente en Urgell, Cataluña. Las imágenes estudiadas fueron obtenidas en el periodo de octubre de 2017 a febrero de 2019, y el método se basa en determinar la humedad del suelo por el cambio en la señal retrodispersada, este cambio es calculado mediante la diferencia de la señal retrodispersada más seca para un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) dado y las señales retrodispersadas húmedas para ese NDVI en una fecha específica. Con estos métodos de detección de cambios se asume que el cambio de humedad en el suelo se relaciona directamente con el cambio en la señal retrodispersada puesto que por el corto período tiempo parámetros como la rugosidad del terreno o la vegetación no influyen de manera significativa.

Con las ecuaciones del método se obtuvieron mapas de humedad del suelo que nos brindan información sobre humedad en cada píxel de la imagen y de forma espacial, esta humedad obtenida se relacionó con eventos de precipitación de una estación meteorológica cercana y se observaron que hay relación entre los eventos de lluvia y la humedad estimada. Solamente se relacionó la humedad con la precipitación puesto que no se tienen datos in-situ de HS en la zona de estudio.

Se puede concluir que este método puede aplicarse sin datos de campo puesto que se utilizó datos de humedad de imágenes SMOS para desarrollar el método, pero se recomienda validar el método con datos de campo para conocer su confiabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la hidrología, el estudio de la humedad del suelo (HS) y su dinámica ha sido identificado por numerosos investigadores como uno de los principales retos debido a su importancia en procesos clave del ciclo hidrológico y a su variabilidad en espacio y tiempo (Álvarez-Mozos et al., 2005). La variabilidad de la humedad del suelo está gobernada por un conjunto amplio de factores en los que se distinguen, de forma general, entre una escala de detalle o local. El dominio espacial varía en un rango de centenas de metros y el temporal es de varios días; mientras que, en una escala regional, el dominio espacial es del orden de 400-800 km, y el temporal siempre superior a un mes. En el primer caso, una serie de factores locales como la topografía (pendiente, orientación, curvatura de la ladera, área de contribución específica, elevación relativa), propiedades del suelo (textura, materia orgánica, estructura y macroporosidad) y cobertura vegetal, explicarán las diferencias de humedades en el suelo; mientras que en el segundo caso el factor climático será clave (Ceballos Barbancho et al., 2005).

La humedad del suelo puede ser determinada por métodos in-situ que se clasifican como directos e indirectos. El método directo se refiere al método gravimétrico en el cual se recolecta una muestra del suelo, y se determina el contenido de agua de la muestra. Este método es el estándar contra el cual se calibran los métodos indirectos como tensiómetros y sensores (Enciso et al., 2007). Las mediciones in-situ son complejas porque para poder caracterizar correctamente la humedad del suelo de un sitio de medición, resulta de gran importancia conocer las propiedades edáficas del suelo en cuanto a textura, estructura, porosidad, color o temperatura (Solorza, 2013). En la actualidad, las observaciones directas de la humedad del suelo están restringidas a mediciones discretas de lugares específicos donde estas observaciones no representan la distribución espacial, debido a que las características de la humedad y su clasificación en contenido húmedo varían de un punto a otro. Por otra parte, el desarrollo en tecnología satelital particularmente en la percepción remota ha permitido también el desarrollo de metodologías para la estimación de la humedad del suelo (IMTA, 2015).

Distintas investigaciones han demostrado que la humedad del suelo puede ser estimada desde una variedad de técnicas de percepción remota. Sin embargo, solo los sensores remotos de microondas tienen la capacidad de medir cuantitativamente la humedad del suelo bajo una variedad de condiciones topográficas y de vegetación (Behari, 2005). Los sensores remotos con

microondas han demostrado tener la capacidad de mapear y monitorear cambios relativos de humedad del suelo en grandes áreas, como así también la oportunidad de medir, a través de modelos inversos, valores absolutos de humedad del suelo (Barrett et al., 2009).

La detección remota por microondas abarca formas activas y pasivas, según el sensor y su modo de operación. Los sensores pasivos (radiómetros) detectan la radiación de microondas emitida naturalmente dentro de su campo de visión. Mientras sensores activos proporcionan su propia fuente de iluminación y miden la diferencia de potencia entre la radiación electromagnética transmitida y recibida. Los sensores activos pueden ser imágenes (radar) o sensores sin imágenes como altímetros y dispersómetros (Barrett et al., 2009). En los últimos años se han realizado numerosos estudios con el fin de intentar estimar la humedad a partir de imágenes con sensores pasivos, no obstante, los resultados más prometedores se han obtenido empleando imágenes captadas por sensores radar (Álvarez-Mozos et al., 2005).

Las técnicas de radar de apertura sintética (SAR) son particularmente útiles porque permiten monitorear los parámetros del suelo en cualquier condición climática (Kousik y Prabir Kumar, 2015). Según Álvarez-Mozos (2005), la estimación de la humedad del suelo a partir de sensores radar no es sencilla, puesto que, adicional de la constante dieléctrica (ϵ) influyen en el coeficiente de retrodispersión (σ) observado por los sensores radar activos factores como la rugosidad superficial, la textura del suelo, el relieve y la presencia de vegetación que intervienen y dificultan la estimación de humedad del suelo. En condiciones de ausencia de vegetación, la rugosidad es la característica de la superficie que junto con HS ejercen mayor influencia sobre la retrodispersión (Figura 1).

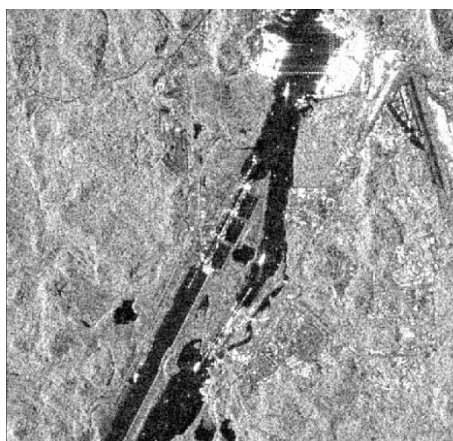


Figura 1. Ejemplo variación de retrodispersión por factores como la rugosidad, relieve y humedad del suelo

Existen diferentes metodologías para la estimación de HS a partir de imágenes radar que Verhoest (2008) los ha clasificado en: 1) Modelos empíricos; 2) Modelos semi-empíricos, y 3) Modelos basados en la física o teóricos.

Los modelos empíricos tratan de relacionar el coeficiente de retrodispersión observado en las imágenes con la humedad del suelo mediante regresiones lineales empíricas que son válidos para condiciones invariables de rugosidad superficial y también de parámetros de adquisición de las imágenes. Este tipo de modelos tiene una aplicación limitada en el campo de la estimación de la HS debido principalmente a que requieren de conjuntos de datos específicos, que en la mayoría de los casos son solo válidos para el área bajo estudio (Barrett et al., 2009).

Otro tipo de modelos directos se basan en las relaciones semi-empíricas, que representan un compromiso entre la complejidad de los modelos teóricos y la simplicidad de los modelos empíricos, y pueden ser aplicados cuando hay poca o nula información de la rugosidad de la superficie (Dubois et al., 1995).

El desarrollo de modelos teóricos o físicos directos mediante la simulación de los coeficientes de retrodispersión en términos de atributos del suelo como la constante dieléctrica y la rugosidad de la superficie, para un área con características conocidas, es uno de los enfoques más comunes utilizados para desarrollar modelos para la recuperación de la humedad del suelo (Sikdar y Cumming, 2004).

Otra metodología es la aplicación de técnicas de detección de cambios para analizar las variaciones de HS, asumiendo que la rugosidad superficial, textura del suelo o la cobertura vegetal cambian mucho más lentamente que la humedad del suelo (Álvarez-Mozos et al., 2005). La ventaja de estas técnicas es que, en los casos en que la rugosidad de la superficie y la vegetación permanecen invariables en el tiempo, la diferencia en la retrodispersión entre dos fechas puede relacionarse únicamente con un cambio en las propiedades dieléctricas de la superficie, es decir, el contenido de humedad de la superficie del suelo (Barrett et al., 2009).

En el presente trabajo se plantea la utilización de una metodología desarrollada por Gao et al. (2017) basada en detección de cambios para determinar la humedad del suelo en la cuenca del canal de Panamá. La humedad del suelo es determinada por medio de imágenes de radar Sentinel-1 (S1) y ópticas Sentinel-2 (S2). El método consiste en determinar la humedad del suelo mediante una relación entre la diferencia de retrodispersión más seca y la retrodispersión

para una fecha dada durante período de tiempo y el NDVI dados para ese periodo.

2. JUSTIFICACION

El presente documento es el trabajo de fin de máster en estudios sobre Hidrología y Gestión de los recursos hídricos en el cual se busca aprender a utilizar los recursos de una manera sostenible que pueda ser provechoso para quienes demandan el uso del agua, pero sin una explotación excesiva o la contaminación de las fuentes de agua. Un tema importante dentro del ciclo hidrológico y que debe tomarse en cuenta para la gestión del recuso es la humedad del suelo.

La humedad del suelo es un componente crítico, puesto que controla la división entre la infiltración y la escorrentía. La infiltración determina la cantidad de agua disponible para el crecimiento de la vegetación y el escurrimiento tiene un fuerte impacto en la tasa de erosión de la superficie y en los procesos fluviales (Kousik y Prabir Kumar, 2015). Adicional a gran escala interviene en procesos meteorológicos y climáticos puesto que influye en la tasa de evaporación y transpiración que dará lugar a las nubes y además ejerce un efecto suavizador del clima similar al de los mares, pero de menor intensidad (Álvarez-Mozos et al., 2005).

Debido a la importancia de este factor se ha utilizado técnicas de teledetección con sensores tanto pasivos como activos para estimar la humedad del suelo que ayudan a determinar un valor aproximado de este elemento que presenta gran variabilidad. En este estudio se realiza un método utilizando imágenes satelitales para estimar la humedad del suelo sobre la cuenca del canal de Panamá, según el Informe de la Autoridad del Canal (ACP) sobre el Estado Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (2007), la cuenca es aprovechada para fines diversos, entre ellos el abastecimiento de agua potable, navegación, generación de energía, actividades agropecuarias, producción industrial, pesca y recreación, e investigación científica. Del volumen anual promedio de agua captada en la Cuenca del Canal que aproximadamente es 4,390 Millones de m^3 (Mm^3) se utiliza para navegación en 37 esclusajes diarios unos $7 Mm^3/día$ equivalente a unos $2,580 Mm^3/año$ que representa el 58% del promedio anual de producción de agua. La producción de agua potable se da a través de 7 plantas potabilizadoras: 4 en la provincia de Panamá y otras 4 en la provincia de Colón que utilizan un 7% del total de la producción de la Cuenca. En generación de energía eléctrica se utiliza un promedio de $115 Mm^3/año$. Debido a la gran importancia de esta cuenca para el país se decidió determinar la humedad del suelo en

ella y tener herramientas que ayuden a la gestión del recurso de manera sostenible y para posteriormente aplicar el método en otras cuencas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

El objetivo general de este documento es la aplicación de una metodología de detección de cambios desarrollada por Gao et al. (2017), para estimar la humedad del suelo mediante la combinación de imágenes satelitales de radar y ópticas en la cuenca del canal de Panamá. Se busca determinar una relación entre el cambio de retrodispersión de las imágenes de radar de Sentinel-1, el NDVI obtenido de las imágenes ópticas de Sentinel-2, con la humedad del suelo durante un periodo de tiempo con duración de 1 año y 4 meses.

3.2. Objetivos Específicos

- Revisión bibliográfica sobre imágenes de radar y su utilización en la estimación de la humedad del suelo, componentes de las imágenes satelitales y metodologías utilizadas para determinar la HS.
- Procesamiento de las imágenes de radar Sentinel-1 y las imágenes ópticas Sentinel-2 mediante la aplicación *Sentinel Application Platform* (SNAP) de la Agencia Espacial Europea (ESA).
- Obtener relación entre NDVI, cambios de retrodispersión del radar y humedad del suelo.
- Realizar mapas de humedad de la zona de estudio.

4. METODOLOGÍA

4.1. Zona de Estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la República de Panamá que tiene una extensión territorial de 75,524 km² y está dividida en 52 cuencas hidrográficas (Osorio, 2014). Nuestra zona de interés pertenece a la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá que tiene una extensión de 3,313 Km² y abarca 41 corregimientos ubicados en 7 distritos de las provincias de Panamá, Panamá Oeste y Colón. La Cuenca está conformada por una intrincada red de subcuencas de ríos y quebradas que drenan hacia los lagos Gatún, Alhajuela y Miraflores (Figura 2).

El clima se caracteriza por una estación seca (entre los meses de diciembre a abril) y una estación Lluviosa (de mayo a noviembre). Los inicios de cada estación dependen del comportamiento del clima en la zona, en un año seco la precipitación media anual en la cuenca alta del Canal puede alcanzar valores de 2232 mm, y en un año húmedo valores sobre los 4701 milímetros (Osorio, 2014). Según el Informe de la Universidad de Panamá (2005) la vegetación correspondiente a las Esclusas del Pacífico (Miraflores y Pedro Miguel) se clasifica en zonas de bosque secundario maduro y secundario intermedio de tipo semideciduo tropical de tierras bajas y sistemas productivos con vegetación leñosa natural o espontánea significativa que incluyen matorrales y herbazales.

4.2. Datos de Precipitación

Se utilizaron datos diarios de precipitación durante el periodo de noviembre 2017 a febrero de 2019 de la estación meteorológica de Albrook Fields ubicada a una distancia aproximada de 4 km de la esclusa de Miraflores. La estación es operada por la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A (ETESA) que es administrada por el estado. De la estación obtuvimos datos de precipitación para relacionar los valores obtenidos de humedad en el suelo con los eventos de lluvia en la zona.

4.3. Datos satelitales

Para este trabajo se seleccionaron y descargaron las imágenes de radar del Satélite Sentinel-1 e imágenes ópticas del satélite Sentinel-2 desde el servidor de imágenes de la ESA (Copernicus Hub). La corrección y procesamiento de las imágenes radar y ópticas, se realizaron con la herramienta informática SNAP desarrollada por la ESA.

SNAP es una arquitectura común para todas las cajas de herramientas de Sentinel que se está desarrollando conjuntamente por Brockmann Consult, Array Systems Computing y CS. La arquitectura SNAP es ideal para el procesamiento y análisis de la Observación de la Tierra debido a sus innovaciones tecnológicas (ESA, 2018).

4.3.1. Imágenes de Radar: Sentinel-1

La misión Sentinel-1 es una misión de imágenes de radar diurno y nocturno para los servicios terrestres y oceánicos, en órbita polar, para todo clima, diurno y nocturno. Sentinel-1A se lanzó

el 3 de abril de 2014 y Sentinel-1B el 25 de abril de 2016. Ambos se pusieron en órbita en un cohete Soyuz desde el puerto espacial europeo en la Guayana Francesa (ESA, www.step.esa.int).

La misión Sentinel-1 incluye imágenes de banda C que funcionan en cuatro modos de imagen exclusivos con diferente resolución (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km). Para cada observación, se dispone de mediciones precisas de la posición y actitud de la nave espacial. El radar de apertura sintética (SAR) tiene la ventaja de que opera en longitudes de onda que no están impedidas por la cobertura de nubes o por falta de iluminación, y puede adquirir datos en un sitio durante el día o la noche en cualquier condición climática (ESA, www.step.esa.int).

Para realizar la estimación de la HS se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-1 descargadas desde el portal de la Agencia Espacial Europea, con una resolución espacial de 10 m, resolución temporal de 12 días, en polarización VV y VH. Se utilizó la polarización VV puesto que estudios recomiendan polarización HH y VV para determinar estimaciones más precisas de HS (Vijay, 2017). Las imágenes tiene un ángulo de incidencia aproximadamente de $38,4^\circ$ que según Holah et al. (2005) la estimación de la humedad del suelo es óptima en ángulos de incidencia bajos y medios ($20^\circ - 37^\circ$). Las imágenes de Sentinel-1 utilizadas comprenden el periodo entre octubre 2017 hasta febrero 2019, es decir un período de un año y cuatro meses. A continuación, se muestran en la tabla 1, las fechas de las imágenes utilizadas.

Tabla 1. Fechas de imágenes de Sentinel-1

25/02/2019	01/02/2019	08/01/2019	15/12/2018	03/12/2018	21/11/2018	09/11/2018
04/10/2018	10/09/2018	17/08/2018	12/07/2018	25/05/2018	19/04/2018	26/03/2018
02/03/2018	18/02/2018	06/02/2018	25/01/2018	01/01/2018	08/12/2017	14/11/2017
21/10/2017						

Las imágenes de radar están sujetas a distorsiones geométricas, radiométricas y un fenómeno conocido como moteado o *speckle* producido por las ondas electromagnéticas del radar. Cada imagen fue previamente procesada utilizando la Caja de Herramientas de Sentinel-1 SNAP para eliminar estas distorsiones.

Distorsión Radiométrica: Se debe a la influencia de la topografía y al corregirse se eliminan valores muy elevados de topografía compleja en la imagen (Figura 3).

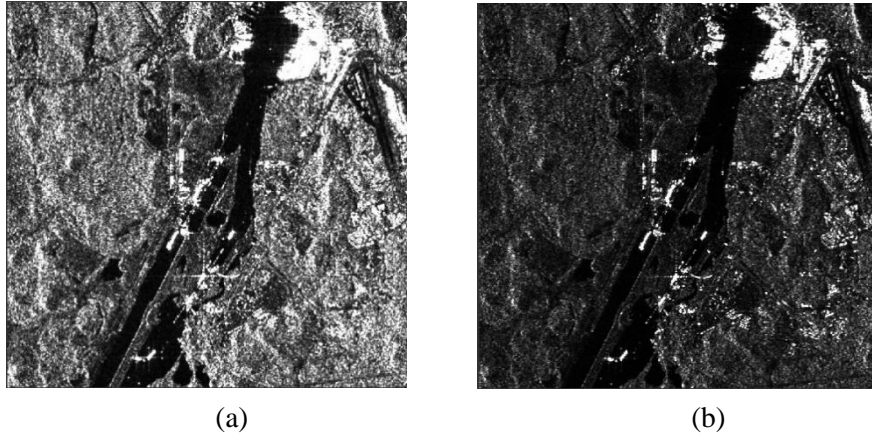


Figura 3. Ejemplo de Calibración radiométrica. (a) Antes de la calibración (b) Después de la calibración

Moteado: El moteado es un ‘ruido’ granular que existe inherentemente y degrada la calidad de las imágenes de SAR. Este efecto conocido también como ruido “sal y pimienta”, que se visualiza en las imágenes como una granulado claro y oscuro, representa un gran obstáculo para la clasificación, análisis e interpretación de las imágenes. Como el *speckle* es un ruido multiplicativo, y no aditivo, es muy difícil de extraer (Solorza, 2013). Básicamente, las técnicas de reducción de moteado SAR se dividen en dos categorías: Técnicas multi-vista o *multilooking* y la utilización de filtros. *Multilooking* consiste en dividir el ancho de banda del espectro de azimut de la imagen del radar en segmentos o miradas formando imágenes independientes a partir de estos espectros y realizando promedios. Esto reduce el espectro de azimut. Ancho de banda y, por lo tanto, moteado ruido, pero a costa de aumentar la carga computacional y degradar la imagen. Sin embargo, muchos sistemas SAR integran pocas miradas durante la formación de la imagen en orden. Para mejorar de forma mínima la calidad de la imagen. Es necesario que el pixel residual deba procesarse utilizando filtros de formación posteriores a la imagen. Entre los filtros más utilizados se encuentran los filtros Mediano, Lee, Kuan, Frost y Gamma (Gagnon y Jouan, 1997). Filtros como Lee, Frost o Gamma-MAP su principio de funcionamiento se basa en las propiedades geométricas de la imagen (tamaño y forma de los objetos), no en las estadísticas de valores de píxel y producen muy buenos resultados para la eliminación del moteado (Kupidura, 2016). Para eliminar el *speckle* se realizó un multilooking y luego se le aplicó a la imagen un filtro Gamma-Map 3 x 3. En la figura 4, se observa la reducción del moteado con la aplicación de filtros.

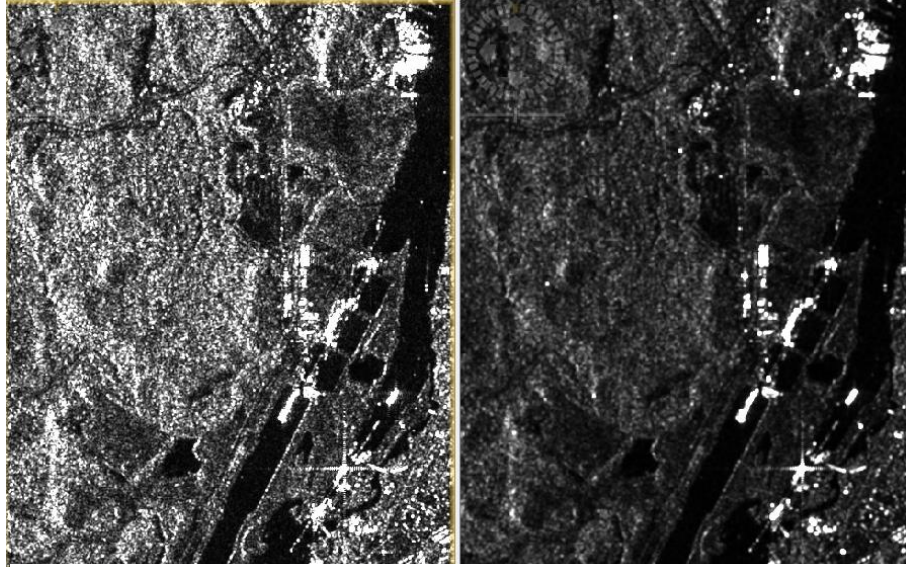


Figura 4. Eliminación del moteado con un filtro Gamma Map 3 x 3

Distorsión Geométrica: Es producida en áreas especialmente de montañas o relieve pronunciado, en las imágenes de radar se dan los efectos de acortamiento, inversión o sombra que hacen que las pendientes se observen más pequeñas o más grandes de lo que realmente son. El efecto sombra se observa cuando el relieve es muy pronunciado, donde algunas laderas quedan ubicadas en dirección opuesta al rango de iluminación del radar, se produce el fenómeno de sombra, no registrándose ecos reflejados provenientes de esta zona en sombra (Solorza, 2013). Se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) a 30 metros incluido en SNAP para realizar la corrección. En la figura 5 se observa la corrección de la distorsión geométrica.

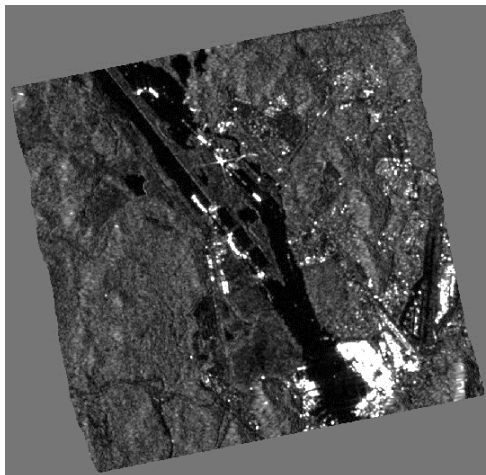


Figura 5. Corrección Geométrica del 2/3/2018

En la figura 6 se observa el resultado del procesamiento de las imágenes de radar en SNAP.

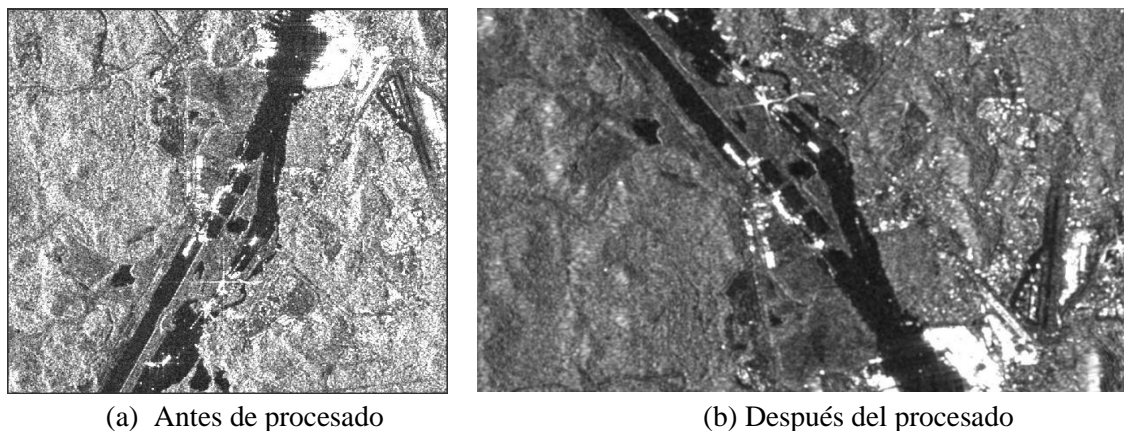


Figura 6. Imagen radar procesada del 2/3/2018.

En la figura 7 se observa la conversión de los valores de la banda VV en valores de retrodispersión (σ) de la imagen radar. El coeficiente de retrodispersión (σ) demuestra el efecto combinado de las condiciones de la superficie (rugosidad y vegetación) y las configuraciones del radar (frecuencia, polarización, ángulo de incidencia) (Vijay, 2017).

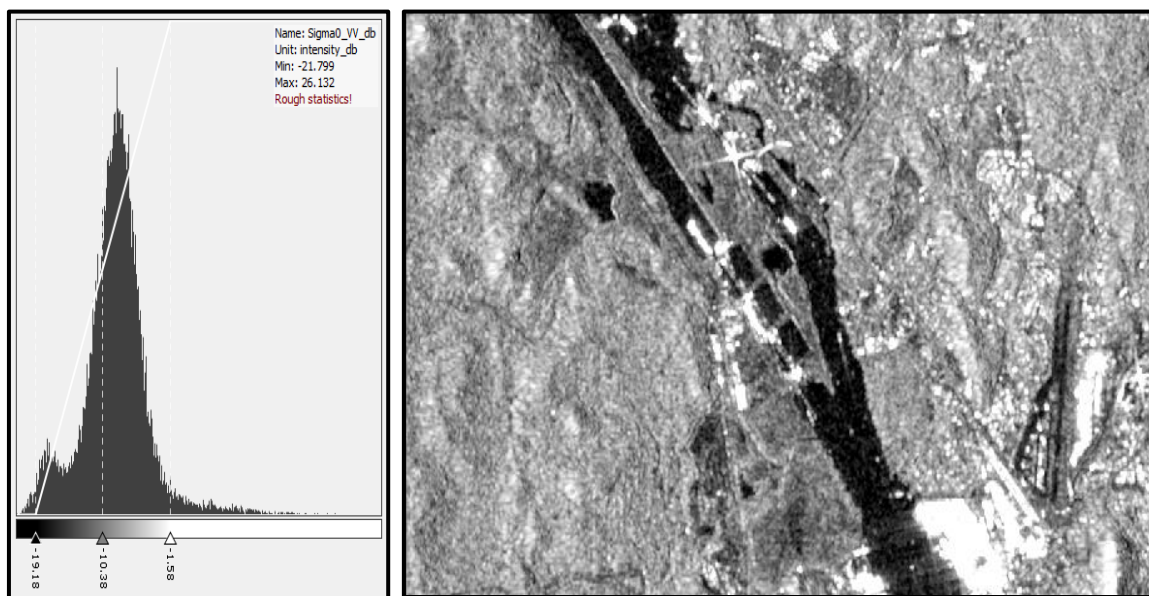


Figura 7. Retrodispersión en la imagen del 2/3/2018.

4.3.2. Imágenes Ópticas: Sentinel-2

Sentinel-2 es una misión de imágenes de alta resolución multiespectral y de órbita polar para el monitoreo de la tierra para proporcionar, por ejemplo, imágenes de vegetación, cobertura de suelo y agua, vías navegables interiores y zonas costeras. Sentinel-2 también puede entregar información para servicios de emergencia. Sentinel-2A se lanzó el 23 de junio de 2015 y Sentinel-2B se lanzó el 7 de marzo de 2017 (ESA, www.step.esa.int).

Sentinel-2 cuenta con 13 bandas espectrales desde lo visible (VNIR) y el infrarrojo cercano (NIR) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR):

- Bandas de 4 x 10 metros: las tres bandas RGB clásicas ((Azul (~ 497nm), Verde (560nm) y Roja (~ 665nm)) y una banda de infrarrojo cercano (835nm);
- 6 bandas de 20 metros: 4 bandas estrechas en el dominio espectral del borde rojo de la vegetación VNIR (~ 704nm, ~ 740nm, ~ 783nm y ~ 865nm) y 2 bandas SWIR más anchas (1610nm y 2190nm) para aplicaciones tales como detección de nieve / hielo / nubes, o evaluación del estrés hídrico de la vegetación;
- Bandas de 3 x 60 metros enfocadas principalmente a la detección de nubes y la corrección atmosférica (~ 443nm para aerosoles y 945nm para vapor de agua) y detección de cirros (~ 1374nm). (ESA, www.step.esa.int).

Índices de Vegetación

Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda. Es particularmente sensible a la cubierta vegetal, que corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y tiene una posible relación con la cantidad de vegetación presente en un píxel dado.

Estos índices, son utilizados para discriminar entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas. Los valores bajos de los índices de vegetación usualmente indican vegetación poco vigorosa, mientras que los valores altos, indican vegetación densa (Muñoz Aguayo, 2013). Existen diversos índices de vegetación, pero el más conocido el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI).

El NDVI se determina utilizando la banda roja y la banda de infrarrojo cercano (NIR).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Rojo}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

Se utilizaron imágenes multiespectrales de alta resolución descargadas desde el portal de la ESA para un periodo de octubre 2017 a febrero 2019 especificadas en la tabla 2. Estas imágenes fueron procesadas con SNAP para obtener una resolución de imagen a 10 m y luego determinar el NDVI de cada imagen.

Tabla 2. Fechas de imágenes de Sentinel-2

24/02/2019	27/01/2019	05/01/2019	31/12/2018	10/12/2018	24/11/2018	08/11/2018
07/10/2018	05/09/2018	20/08/2018	04/07/2018	20/05/2018	15/04/2018	21/03/2018
01/03/2018	25/02/2018	09/02/2018	25/01/2018	08/01/2018	23/12/2017	06/11/2017
20/10/2017						

En la figura 8 se observan los NDVI obtenidos de la imagen de Sentinel-2

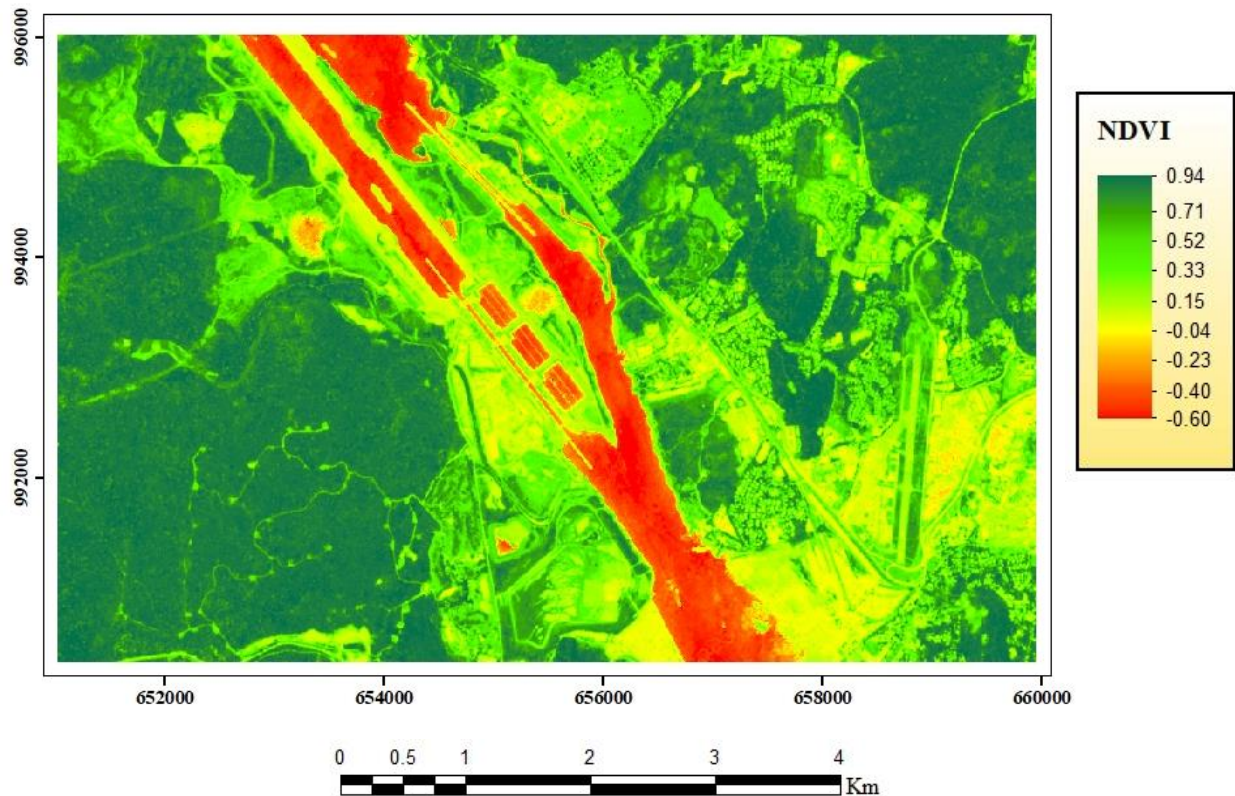


Figura 8. NDVI obtenidos de la imagen S2 de 2/3/2018

Debido al clima y la precipitación de la zona de estudio las imágenes ópticas presentan una gran cantidad de nubosidad y sombra de nubes sobre el terreno, esto afecta y distorsiona el valor de NDVI, por lo que se procedió a realizar máscaras de nubes en la imagen antes de determinar el Índice de vegetación. Para desarrollar adecuadamente la metodología y determinar la humedad del suelo se excluyen los valores con un $NDVI > 0,8$ porque representan vegetación de alta densidad y con valores $NDVI < 0,1$ que corresponden a superficies de agua. En la figura 9 se muestra la imagen S2 excluyendo los valores de $0,0 < NDVI < 0,8$.

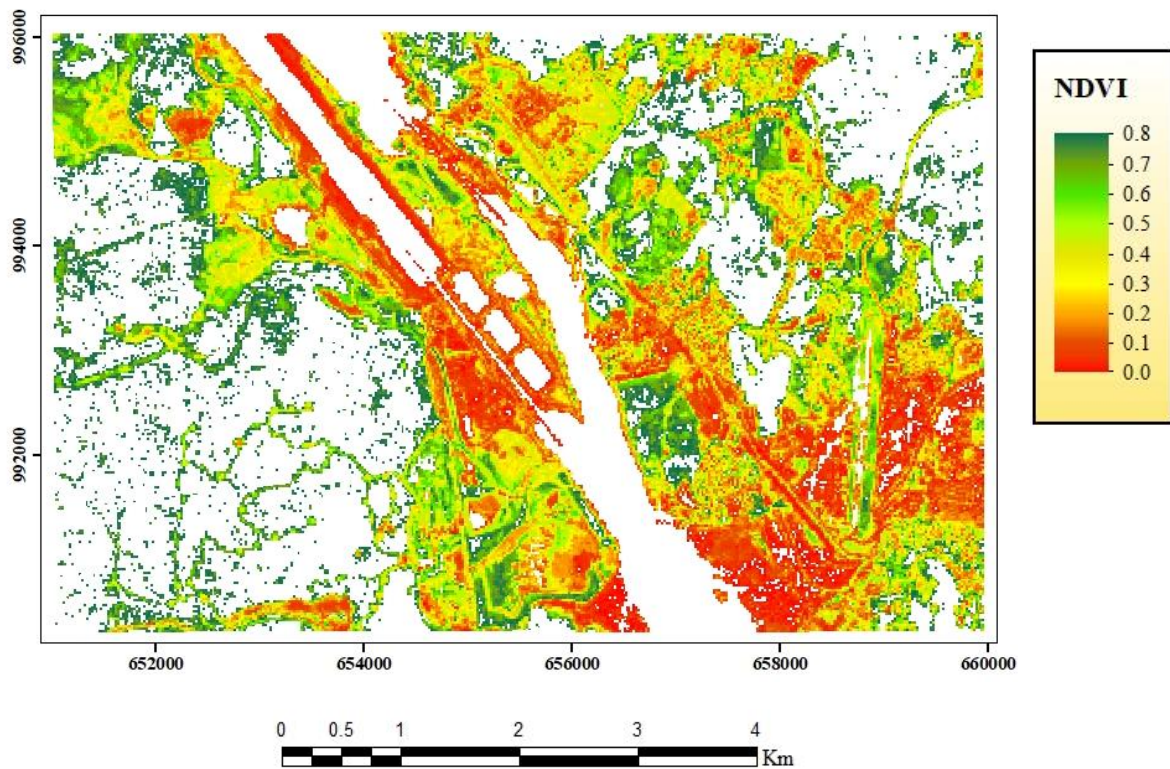


Figura 9. Imagen S2 con valores NDVI excluidos del 2/3/2018

4.3.3. Imágenes SMOS

La misión del explorador de la Tierra de la ESA Moisture Ocean Salinity (SMOS) es un radiómetro de imágenes de microondas que utiliza el radiómetro de síntesis de apertura (MIRAS) que capta las débiles emisiones de microondas de la superficie de la Tierra para trazar un mapa de los niveles de humedad del suelo, salinidad de la superficie del mar, espesor del

hielo marino y otras variables geofísicas, como la velocidad del viento sobre el océano y el estado del suelo congelado / descongelado ESA (www.step.esa.int).

Hay diferentes productos de datos SMOS pero los utilizados fueron los productos de Nivel 2 que contiene información de la humedad del suelo basada en hilera, la profundidad óptica de la vegetación y otros datos auxiliares derivados del procesamiento. Se utilizaron estas imágenes para determinar la humedad del sitio por no contar con datos in-situ como se muestra en la figura 10.

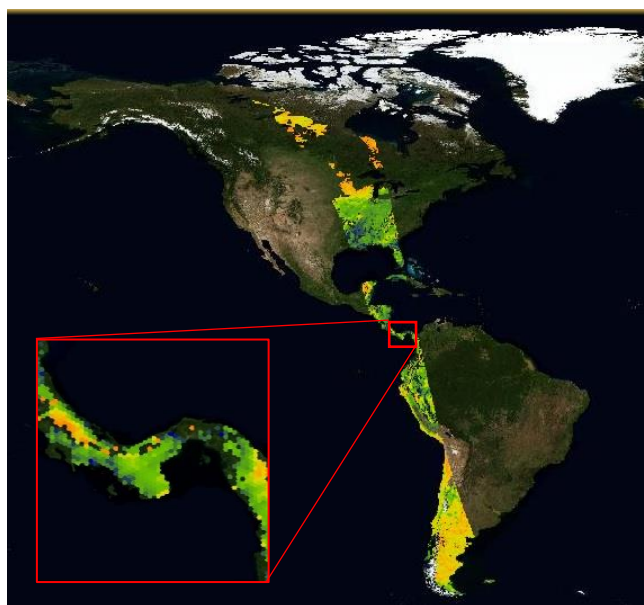


Figura 10. Imagen SMOS de la zona de estudio del 2/3/2018

4.4. Descripción del método de detección de cambio para estimar la humedad en el suelo

El método utilizado para medir la humedad en el suelo se basa en técnicas de detección de cambios en la señal de radar. Este método fue utilizado en Urgell Cataluña, España (Gao et al., 2017). El método modela las señales de radar retrodispersadas como la suma de las señales dispersadas por el suelo desnudo, la atenuación de la vegetación y la cubierta vegetal. Se puede describir de la siguiente manera:

$$\sigma_{cobertura}^0 = \sigma_{veg}^0 + \gamma^2(\theta)\sigma_{suelo}^0 \quad (1)$$

donde $\gamma^2(\theta) = \exp[-2\tau / \cos(\theta)]$ es la transmisividad de dosel de la vegetación de dos vías, descrito por la atenuación experimentada la señal cuando viaja dos veces por el dosel (Gupta et

al., 2013). El (σ_{veg}^0) representa la contribución resultante de múltiples interacciones de dispersión entre la cobertura de la vegetación y la superficie del suelo (figura 11), τ es el parámetro de espesor óptico que depende del tipo de estructura geométrica y del contenido de agua de la vegetación del dosel (Zribi et al., 2008).

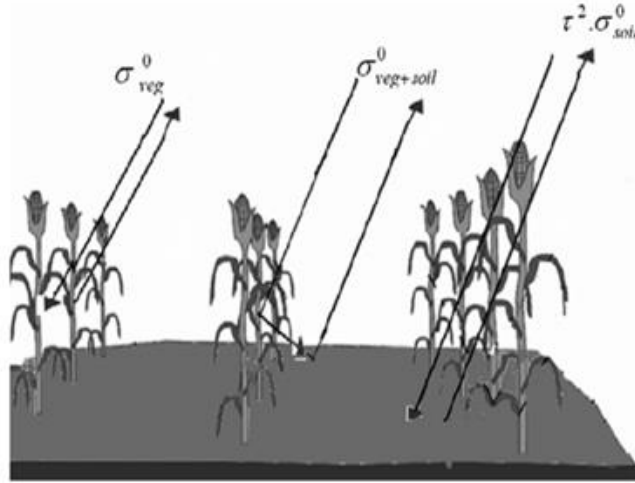


Figura 11. Retrodispersión de la señal del radar en suelo con vegetación (Gupta et al., 2013).

El método plantea que las variaciones temporales de la humedad del suelo pueden relacionarse con el cambio de la señal retrodispersada del radar. Considerando la señal de radar para una imagen con valores de NDVI muy similares en fechas distintas se reduce el efecto de la rugosidad considerablemente al calcular la diferencia de retrodispersión de las imágenes de fechas distintas (Gao et al., 2017).

Utilizando un valor de NDVI (obtenido de Sentinel-2) se puede determinar el valor mínimo de retrodispersión σ^0 , que corresponde a la señal más seca. La diferencia entre la señal más seca en un píxel y la señal de radar en una fecha d dentro del tiempo estudiado para un píxel (i,j) se expresa:

$$\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI} = \sigma_{(i,j),NDVI}^0(d) - \sigma_{seco,(i,j),NDVI}^0 = H_{(i,j)}(NDVI, Mv) \quad (2)$$

Dónde $\sigma_{(i,j),NDVI}^0(d)$ es la señal retrodispersada del píxel (i, j) en una de las fechas estudiada (d), con su NDVI correspondiente. $\sigma_{seco,(i,j),NDVI}^0$ es la señal retrodispersada con el valor más bajo que corresponde a las condiciones más secas. Este valor es determinado mediante la búsqueda en cada píxel de cada imagen durante el periodo estudiado el valor más bajo de retrodispersión

correspondiente a un valor de NDVI. Por ejemplo, para el valor de NDVI igual a 0,5 se busca en toda la serie de imágenes su valor más bajo de retrodispersión y así sucesivamente para 0,6, 0,7, 0,8. Siendo $\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI}$ la diferencia entre el valor más seco de retrodispersión para su respectivo NDVI y la otras retrodispersiones de la imagen correspondiente al mismo valor de NDVI. $H(i, j)$ (NDVI, Mv) es una función del índice de vegetación NDVI y la humedad del suelo Mv en la celda (i, j).

En nuestro estudio se consideraron grupos de NDVI en intervalos de 0,1 para determinar el cálculo de $\sigma_{seco,(i,j),NDVI}^0$ se utilizaron intervalos de (0,1-0,2, 0,2-0,3....) en cada imagen para valores de NDVI que comprenden de 0,1 a 0,8. Es decir, que la $\sigma_{seco,(i,j),NDVI}^0$ se buscó por intervalos de 0,1 y no por valores únicos de NDVI.

Diversos estudios han demostrado que existe una relación lineal entre las diferencias de la señal del radar y los cambios en la humedad del suelo, en el caso de suelos desnudos y superficies cubiertas de vegetación (Patel y Srivastava, 2015). Para un NDVI dado, la diferencia de la señal del radar, $\Delta\sigma^{NDVI}$ así se puede escribir como:

$$\Delta\sigma^{NDVI} = \alpha (NDVI) \Delta Mv \quad (3)$$

donde ΔMv es el cambio en la humedad del suelo entre la fecha d y la fecha en que el suelo estaba más seco. El parámetro α depende del NDVI. Cuando aumenta el NDVI, se puede esperar que la sensibilidad a la humedad de la señal disminuya (Zribi et al., 2008). Esto significa que $\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI}$, disminuye en función de NDVI.

La variación máxima de humedad del suelo ΔMv_{max} puede determinarse por la diferencia entre el valor más seco (Mv_{min}) y las condiciones más húmedas (Mv_{max}):

$$\Delta Mv_{max} = Mv_{max} - Mv_{min} \quad (4)$$

Con la variación máxima de humedad ΔMv_{max} se determina que la diferencia máxima en la señal retrodispersada es una función de NDVI:

$$\Delta\sigma_{max}^{NDVI} = \alpha (NDVI) \Delta Mv_{max} = f(NDVI) \quad (5)$$

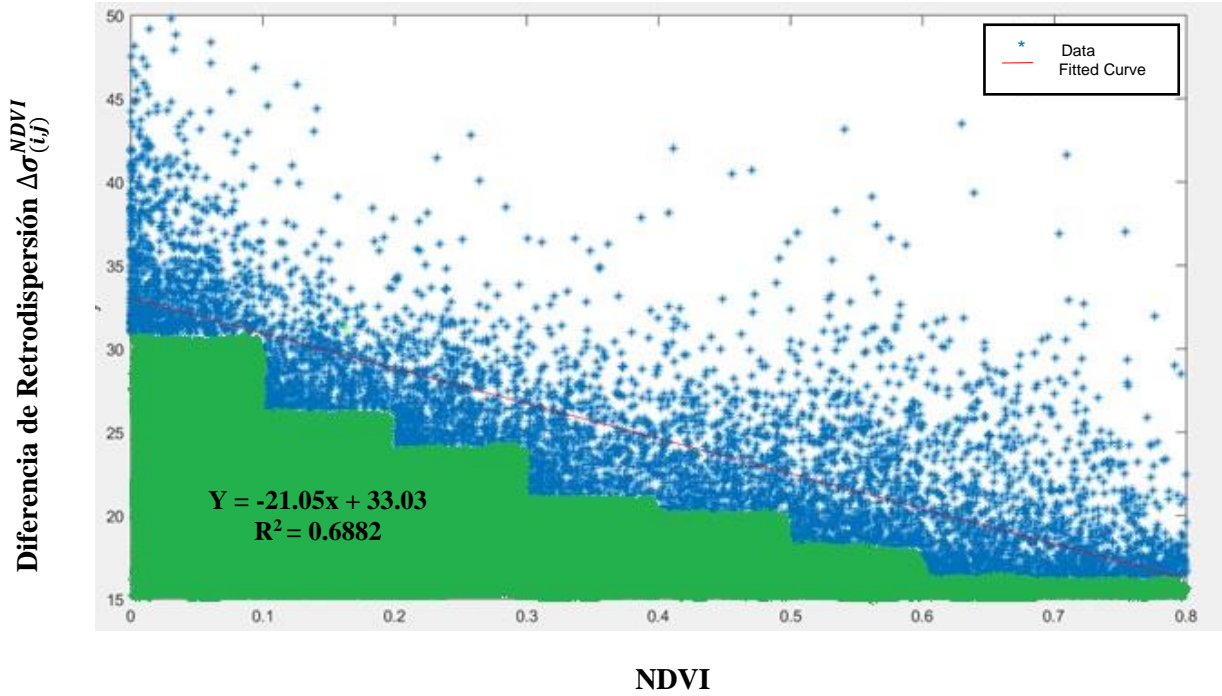


Figura 12. Relación de NDVI y Diferencia de Retrodispersión

Con la figura 12 podemos determinar la función de NDVI que se relaciona la máxima diferencia de la señal retrodispersada $\Delta\sigma_{max}^{NDVI}$. En la figura se observan valores en azul que son 1% superior de los valores de la diferencia de retrodispersión de la serie de datos por cada intervalo de NDVI. Esto es realizado para minimizar la influencia del *speckle* al estimar $f(NDVI)$ y también se eliminan los valores de la señal de radar inferiores a -15 dB ya que corresponden a valores de agua. De la figura 12 podemos obtener la ecuación de señal retrodispersada máxima $\Delta\sigma_{max}^{NDVI}$ que es igual a la $f(NDVI)$ obtenida de la relación entre $\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI}$ y los NDVI.

$$\Delta\sigma_{max}^{NDVI} = f(NDVI) = \alpha NDVI + \Delta\sigma_{max}^{desnudo} \quad (6)$$

Cuando $NDVI = 0$, $\Delta\sigma_{max}^{NDVI} = \Delta\sigma_{max}^{desnudo}$ este es valor máximo de retrodispersión de la diferencia entre el $\Delta\sigma^{NDVI}$ y las condiciones más secas del suelo. Finalmente se halla una ecuación para determinar la humedad del suelo para cada píxel en la imagen:

$$M_v = \frac{\Delta\sigma^{NDVI}}{f(NDVI)} (Mv_{m\acute{a}x} - Mv_{m\acute{i}n}) + Mv_{m\acute{i}n} \quad (7)$$

La ecuación está en función de las diferencias de retrodispersión en la serie de datos con la señal

más seca por intervalos de NDVI, la función de NDVI y la humedad máxima y mínima del sitio. Se utilizaron productos de humedad de nivel-2 de SMOS para el periodo estudiado para estimar $Mv_{máx}$ y $Mv_{mín}$, ya que no se midieron datos in-situ en la zona. En la figura 13 a continuación se presenta la relación aproximadamente lineal entre los valores de humedad volumétrica del suelo obtenida por las imágenes SMOS y la señal de radar retrodispersada de las imágenes de Sentinel-1. Los valores de humedad obtenidos son los siguientes: $Mv_{máx} \approx 1,00 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ y la $Mv_{mín} \approx 0,3 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ valores similares a los obtenidos en Sugasti y Pinzón (2018).

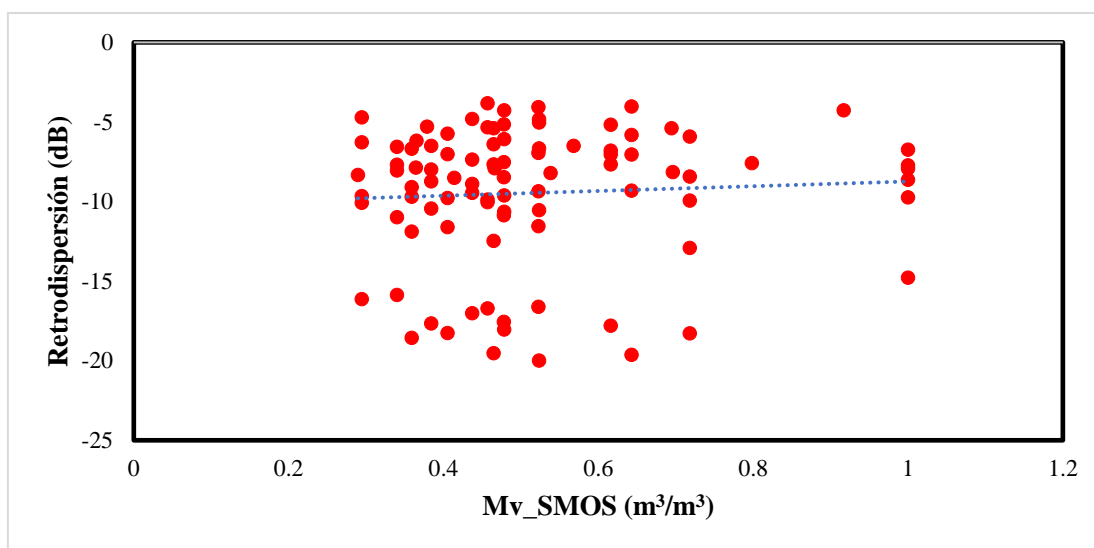


Figura 13. Relación de humedad Volumétrica (SMOS) y señal retrodispersada (S1).

5. RESULTADOS

A Continuación, en las figuras 14 y 15 se muestran los mapas de humedad realizados utilizando la ecuación (7) de la metodología. En cada mapa se han enmascarado los valores de $NDVI < 0,1$ y los valores de $NDVI > 0,8$ asociados a cuerpos de agua y vegetación densa. Se realizó una serie de mapas desde el mes de noviembre de 2017 hasta febrero de 2019 para mostrar la variación de la humedad en la zona.

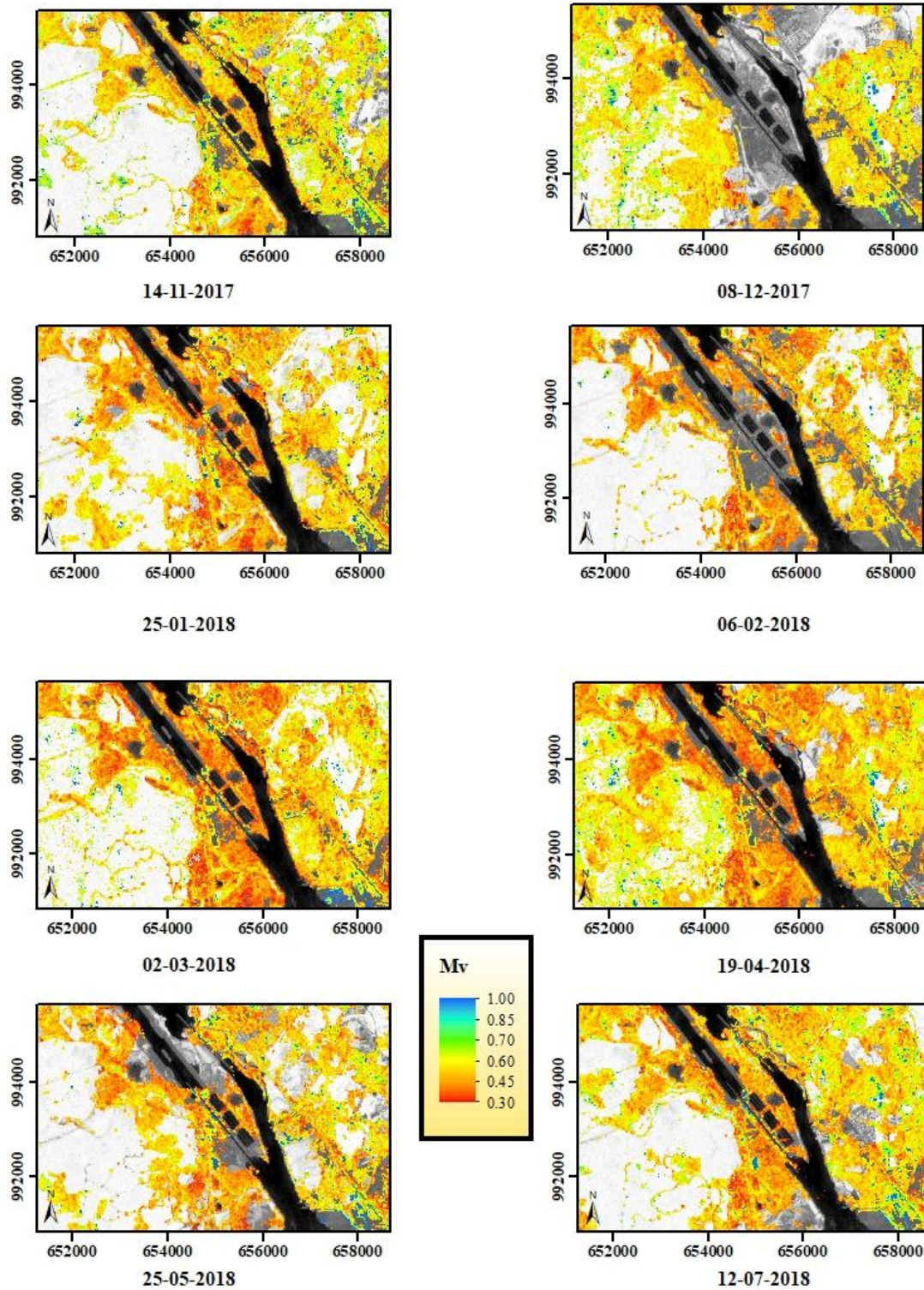
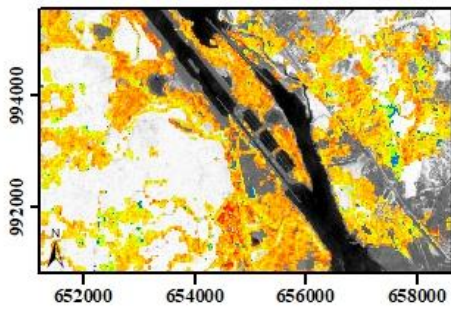
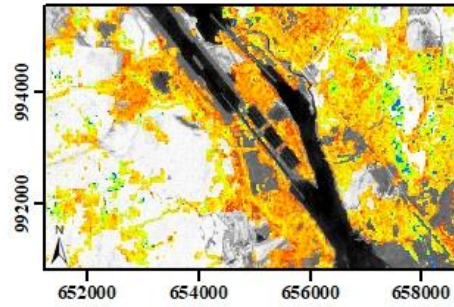


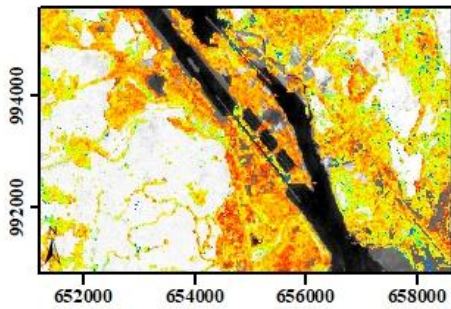
Figura 14. Mapas de Humedad de noviembre 2017 - julio 2018



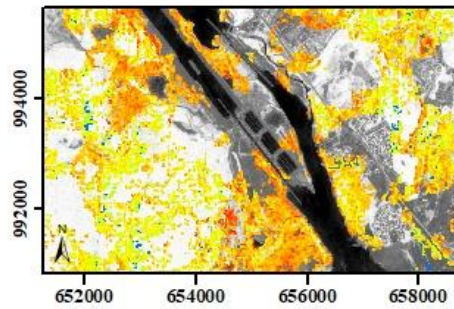
17-08-2018



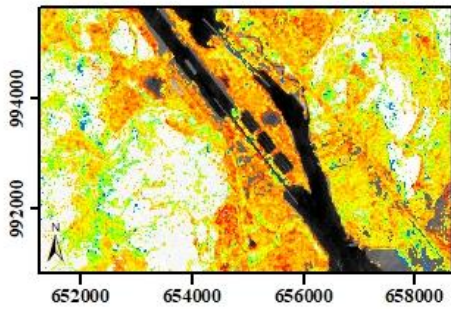
10-09-2018



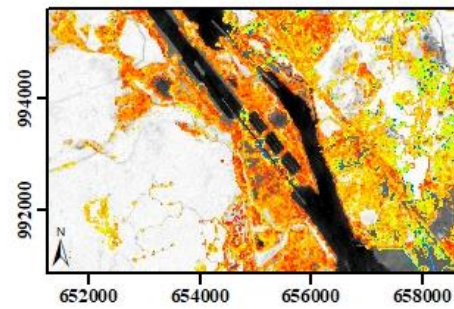
04-10-2018



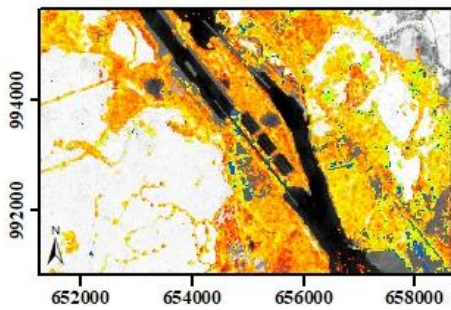
21-11-2018



15-12-2018



08-01-2019



01-02-2019

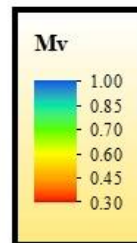


Figura 15. Mapas de Humedad de agosto 2018 - febrero 2019

En la figura 16 se presenta la relación de la precipitación con los datos estimados de humedad.

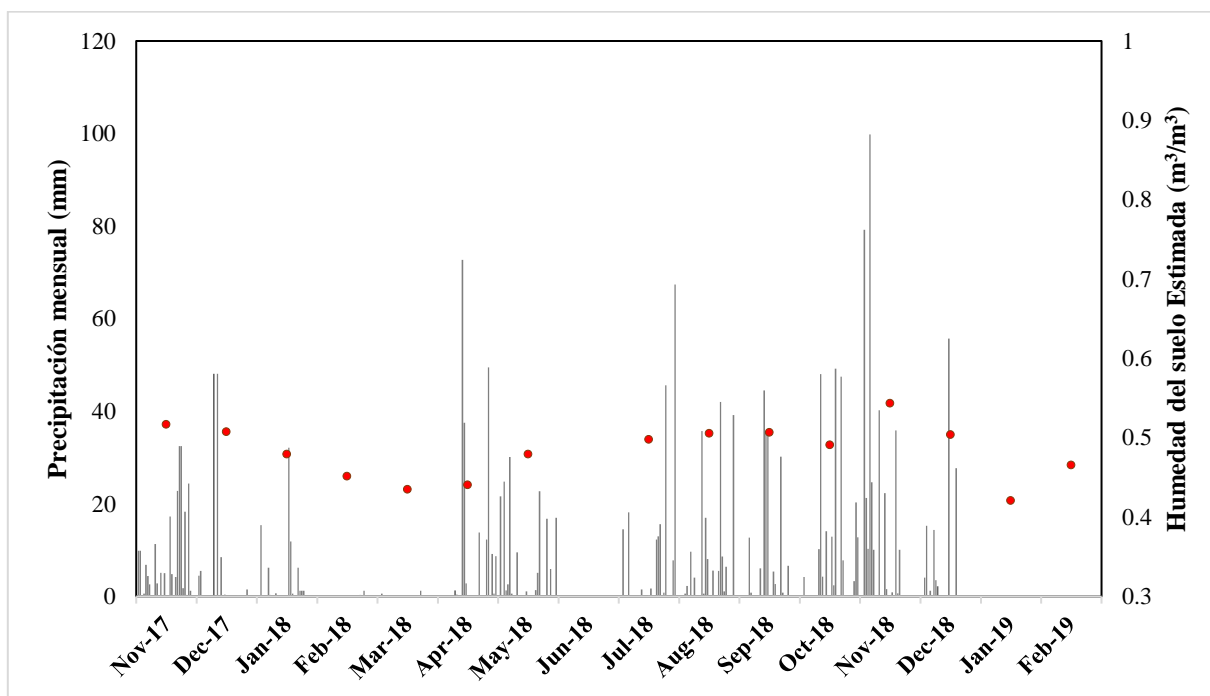


Figura 16. Relación de la Precipitación de la zona y la Humedad del suelo estimada

6. DISCUSIÓN

En este estudio no se cuentan con datos de campo para validar los resultados obtenidos por las ecuación utilizadas en la metodología, así que se pensó en relacionar los eventos de precipitación con los valores de humedad del suelo, y realizar una descripción de la variación en los mapas de humedad.

6.1. Relación de la precipitación y los valores obtenidos de la humedad del suelo

En la figura 16 se observa una relación entre los eventos de precipitación y la humedad del suelo. Después de un evento de lluvia significativo se muestra un aumento en la humedad, y en los meses donde la precipitación es baja o no hubo eventos significativos también se presenta una disminución en la humedad del suelo. Esto nos hace pensar que se relacionan de manera coherente los eventos de precipitación y los valores estimados de humedad del suelo. Para los meses de enero y febrero de 2019 no hay datos en la estación.

6.2. Descripción de la variación de la humedad en los mapas

Se observa que la variación de la humedad en la serie de mapas no es tan cualitativamente distintiva durante los meses debido a que la zona de estudio presenta un clima tropical lluvioso con humedad elevada a lo largo del año. Comparando con los eventos de lluvia aquellos meses de temporada seca (enero-abril) donde la precipitación es menor los mapas de esas fechas presentan zonas con contenido de humedad más bajo que los otros meses. En este grupo están los mapas 25/01/2018, 06/02/2018, 02/03/2018, 19/04/2018, 08/01/2019 y 01/02/2019. También se puede observar que las zonas cercanas a la esclusa de Miraflores son los lugares que presentan mayor variabilidad en la humedad causado por ser el área donde se llevan las actividades del canal y la vegetación es menor.

Utilizando la media de los valores de cada imagen se puede comprobar que los meses de enero a abril presentan menor humedad en el suelo con valores aproximados de $0,46 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mientras que para los meses de temporada lluviosa la media se aproxima a valores de $0,52 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Debido a la vegetación y a la excesiva nubosidad alrededor de la zona de estudio se debieron utilizar máscaras para evitar la distorsión de la información de las imágenes dando como resultado zonas donde no se pudo determinar la humedad del suelo. Una alta densidad de vegetación puede atenuar significativamente la señal de radar, lo que conduce a errores en la estimación de la humedad del suelo y que se presenten una mayor incertidumbre (Qi Gao et al., 2017).

Se puede decir que la metodología utilizada ha relacionado de manera efectiva los eventos de precipitación con la humedad del suelo, y adicional ha presentado de manera coherente la humedad en forma espacial en los mapas. Pero esto es un no deja de ser un estudio cualitativo, que para poder estimar de forma cuantitativa la HS se debe validar los resultados obtenidos con datos de campo de la zona de estudio. Los autores de los modelos para estimar la HS con imágenes satelitales buscan la validación del mismo por medio de mediciones en campo, ya sea por medio del método gravimétrico o por el TDR o cualquier otro, se requiere comprobar que la metodología empleada funciona para la estimación de la humedad de manera confiable.

7. CONCLUSIONES

- Las técnicas de teledetección brindan una alternativa para la determinación de la humedad en el suelo en grandes extensiones de superficie aproximándose más a estimar de manera precisa la variabilidad espacial de la humedad que los métodos in-situ que miden de manera puntual.
- La metodología utilizada en este trabajo de detección de cambios es una forma sencilla de relacionar la humedad del suelo con los cambios de la retrodispersión del radar asumiendo que los factores como la rugosidad del terreno o la vegetación varían o cambian más despacio que la humedad del suelo.
- De los resultados obtenidos se obtiene una relación lineal entre el NDVI calculado a partir de imágenes ópticas y la retrodispersión de la señal de radar para estimar la humedad del suelo. Relación en la cual, si aumenta el índice de vegetación se dificulta estimar la relación de la retrodispersión y la humedad del suelo. Una vegetación muy densa puede ocasionar errores en la estimación.
- Con los datos diarios de precipitación y los datos estimados de HS se observó una relación que presenta un aumento de la humedad en el suelo cuando los eventos de lluvia son notables, y una disminución de la humedad cuando existe déficit de lluvia.
- En los mapas de variación de humedad no se observaron diferencias muy significativas entre los meses, con excepción de los meses de temporada seca (enero-abril) que presentaron zonas cercanas a la esclusa con menor cantidad de humedad que los meses de temporada de lluvia (mayo-diciembre).
- El método ofrece la posibilidad de no utilizar datos in-situ como se realizó en este trabajo, puesto que con las imágenes SMOS se pueden obtener datos de humedad en la zona que se requiera. Pero se recomienda validar el método con datos en campo para determinar su confiabilidad en la estimación de la humedad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Espacial Europea (ESA) (2012). Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services (ESA SP-1322/1, marzo 2012)
- Autoridad del Canal de Panamá (2018). Anuario Hidrológico 2017. ACP, Panamá.
- Autoridad del Canal de Panamá (2007). Informe del Estado Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. ACP, Panamá.
- Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., & González-Audícana, M. (2005). Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. *Revista de Teledetección*, 23: 27-42.
- Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., González-Audícana, M., & López, J. (2005). Estimación de la humedad superficial del suelo mediante teledetección radar en presencia de una cubierta de cereal. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, Vol VII. 1-16.
- Barrett, B., Dwyer, E., & Whelan, P. (2009). Soil Moisture Retrieval from Active Spaceborne Microwave Observations: An Evaluation of Current Techniques. *Remote Sensing*, 1(3), 210-242.
- Behari, J. (2005) *Microwave Dielectric Behavior of Wet Soils*. Anamaya Publishers.
- Belda, F., Melia, J. Segarra, D. (1999). Relación entre El NDVI, Precipitación Y Humedad Del Suelo. Aplicación a Zonas Forestales de la Provincia De Alicante. *TELEDETECCIÓN. Avances y Aplicaciones*. pp 80-83
- Ceballos Barbancho, A., Martínez Fernández, J., Hernández Santana, V., Morán Tejeda, C., & Casado Ledesma, S. (2005). Variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo en el sector semiárido de la cuenca del Duero (España). *C + G*, 63-77
- Dubois, P. C., van Zyl, J. and Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915-926.
- Enciso, J. M., Porter, D., & Périès, X. (2007). Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. *Texas A&M AgriLife Extension Services*, 1-14.
- Engman, E.T. (1991). Applications of Microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 35: 213-226
- Gagnon, L., & Jouan, A. (1997). Speckle Filtering of SAR Images - A Comparative Study Between Complex-Wavelet-Based and Standard Filters. *Departement de R&D*, 1- 12.
- Gao, Qi., Zribi, Mehrez., Escorihuela, Maria J., Baghdadi, N. (2017). Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors*. V.17(9)
- Gupta, V., Sharma, N., & Jangid, R. (2013). Emission and scattering behaviour of bare and vegetative soil surfaces of different moist states by microwave remote sensing. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol 42, pp 42-51.
- Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A. and King, C. (2005). Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 96, (1), 78-86.
- IMTA (2015). Estimación de Humedad de Suelo con Base en Imágenes de Satélite. IMTA, México.
- Kousik, D., & Prabir Kumar, P. (2015). Soil moisture retrieval model by using RISAT-1, C-band data in tropical dry and sub-humid zone of Bankura district of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space*, 18, 297-310.
- Kupidura, P. (2016). Comparison of filters dedicated to speckle suppression in SAR images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B7 (1-16).
- Minchella, A., & Wicks, D. (2017). Sentinel 1 Analysis ready Data (ARD). *CATAPULT: Satellite Application*, 1-3.
- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de Vegetación*. Chile: Centro de Información de Recursos Naturales.

- Patel, P., & Srivastava, H. (2015). An approach to validate soil moisture derived from passive microwave sensors using SAR as an interface. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 9, 2353–2374.
- Osorio, Ugarte., Haydee, Isabel (2014). Síntesis del Sistema Hidrológico del Río Chagres, República de Panamá. Tesis Doctoral. Universidad de Concepción, Chile.
- Sikdar, M; Cumming, I. (2004). Un modelo empírico modificado para la estimación de la humedad del suelo en áreas desovadas utilizando datos de SAR. En *Actas del IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '04)*, Anchorage, AK, EE. UU., 2004; pp. 803–806.
- Solorza, R. (2013). Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes SARAT. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba.
- Sugasti, L., & Pinzón, R. (2018). Medición continua de flujo de CO₂ en suelo en una parcela de bosque tropical en Isla Barro Colorado, Canal de Panamá. Universidad Tecnológica de Panamá, 1-7.
- Universidad de Panamá (2005). Informe Final: Recopilación y presentación del inventario biótico de vegetación, flora y fauna en las áreas dentro y aledañas al proyecto conceptual de la ampliación del canal de Panamá. Universidad de Panamá, Panamá.
- Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Wagner, W., Alvarez-Mozos, J., Moran, M. S. and Mattia, F. (2008). On the Soil Roughness Parameterization Problem in Soil Moisture Retrieval of Bare Surfaces from Synthetic Aperture Radar. *Sensors*, 8, 4213-4248. DOI: 10.3390/s8074213.
- Vijay, S. (2017). Space-borne Active Microwave Remote Sensing of Soil Moisture: A Review. *Remote Sensing of Land*, 1(1), 53-86, 2017.
- Zribi, M., & Dechambre, B. (2008). Un método para la estimación de la humedad del Suelo en África occidental basado en el dispersómetro ERS. *IEEE Trans. Geosci Remote Sensors*, 46: 438-448.

8.1. Recursos de Internet

- NASA. www.arset.gsfc.nasa.gov. Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR). <https://arset.gsfc.nasa.gov/disasters/webinars/intro-SAR>. Accedido el 7 de mayo del 2019.
- ESA. www.step.esa.int. Productos de Datos SMOS. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5621168/#B80-sensors-17-01966>. Accedido el 20/05/2019.
- ESA. www.step.esa.int. Caja de Herramientas SNAP. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>. Accedido el 8/05/2019.
- ESA. www.step.esa.int. Descripción de SENTINEL-1. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>. Accedido el 8/05/2019.
- ESA. www.step.esa.int. COPERNICUS Observing the Earth. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4. Accedido el 8/05/2019.
- ESA. www.step.esa.int. Sen2Cor. <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>. Accedido el 8/05/2019.

9. ANEXOS

Tabla 3. Registros de Precipitaciones de la estación de Albrook Fields

<i>Día</i>	<i>Nov-17</i>	<i>Dic-17</i>	<i>Ene-18</i>	<i>Feb-18</i>	<i>Mar-18</i>	<i>Abr-18</i>	<i>May-18</i>	<i>Jul-18</i>	<i>Ago-18</i>	<i>Sep-18</i>	<i>Oct-18</i>	<i>Nov-18</i>	<i>Dic-18</i>	<i>Ene-19</i>	<i>Feb-19</i>
1	9.9	4.5		0	0	0	21.6		0.2	0	0		0		0
2	9.9	5.5	15.4	0	0.6	0	0	14.5	0		4.2	79.2	4.1	0	0
3		0			0	0	24.8	0	0.6			21.3	15.3	0	
4	0.6			0	0	0	1.3		2.3	0	0	10.3	0	0	
5	6.8	0		0	0	0	2.6	18.2	0	12.7	0	99.8	1.2	0	0
6	4.4		6.2	0	0	0	30.1		9.7	0.8		24.7	0		0
7	2.6	0	0.3	0	0	0	0.6	0		0	0	10.1	14.4	0	0
8			0		0	0	0	0	4.1		0	0	3.5	0	0
9	0	48.1			0	1.3	0		0				2.2	0	0
10	11.3		0.7	0		0.4	9.5	0	0	0	10.2	40.2	0	0	0
11	2.8	48.1		0	0	0		0.2		6.1	48		0	0	0
12	0	0		0	0	0		1.5	35.7	0	4.3	0	0		0
13	5.1	8.5	0	0	0	0	72.7	0	0.2	0.6	44.5	0	22.3	0	0
14		0			0	0	37.5		0	17	35.7	14.1	1.6	0	0
15	5	0.4		0	0	0	2.8	1.1		8.1	35.7		55.7	0	0
16				0				0	0.3			0	0	0	0
17			32.1	0	0			1.7	0	0	12.9	0.9	0	0	0
18	17.3		11.9	0	0			0	5.6	5.4	2.4		0		0
19	4.8	0	0.6	0	0		0	0.1		2.7	49.2	35.9	27.7		0
20	0	0	0.2	0	0	0	1.4	12.3	0	0	0.2	0.7	0	0	0
21	4.2	0		0	0	0	5.1	13	5.54		0	10.1	0	0.1	0
22	22.8	0.2	6.2	0	0	0	13.8	22.7	15.6	42	30.2	47.5	0.2	0	0
23	32.5		1.2	0.3	1.2			0		8.6	0.8	7.8		0	0
24	32.5	0	1.2	0	0			0.8	1.1	0	0	0	0	0	0

25	1.8	0	1.2	1.2	0		0	45.6	6.4	0	0	0		0	0
26	18.3	0	0	0.2		12.3	16.8		0.2	6.6	0	0			
27	0.3	1.5		0		49.5					0	0	0	0	0
28	24.4			0		0	5.9			0		0	0	0	0
29	1.2					9.2	0	7.8	39.2	0	3.3	0	0	0	
30			0			0.6		67.4		0	20.3	0	0	0	
31			0			8.7	17		0		12.8				
<i>Promedio</i>	29.7	30.4	4.5	0.1	28.3	8.7	7	9.5	7.8	7.9	9.1	14.9	4.4	0	0
<i>Extremo</i>	31.4	32.4	32.1	1.2	29.2	72.7	30.1	67.4	42	44.5	49.2	99.8	55.7	0.1	0
<i>Total Mensual</i>	218.5	116.8	77.2	1.7	1.8	200.1	160.5	199.2	186.9	181.2	237.2	357.3	124.1	0.1	0