

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

SOIL MOISTURE CONTENT ESTIMATION BY USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

Alejandro Donato Morales

Dirigido por:

Francisco Carreño Conde

Alcalá de Henares, a 8 de Julio de 2020

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis padres y mis hermanos el constante apoyo que me han dado en todo momento.

Dar las gracias a mi tutor Paco, por la confianza que ha depositado en mí, por su paciencia infinita y dedicación. Sin él, este Trabajo de Fin de Máster no hubiera sido posible.

A Esther y Laura por compartir este viaje que hemos hecho juntos. Sin vuestros consejos y todas las experiencias vividas este año, no hubiera sido lo mismo.

Índice General

I.- Resumen.....	1
II.- Abstract.....	2
1.- Introducción.....	3
2.- Objetivos.....	8
2.1.- Objetivos específicos.....	8
3.- Materiales y métodos.....	9
3.1.- Área de estudio.....	9
3.2.- Imágenes Satelitales.....	10
3.3.- Imágenes Radar: Sentinel-1.....	10
3.4.- Imágenes Ópticas: Sentinel-2.....	13
3.5.- Datos meteorológicos.....	16
3.6.- Mapas de Humedad.....	16
4.- Resultados y discusión.....	17
5.- Conclusiones.....	30
6.- Bibliografía.....	32
7.- Anexos.....	35

Índice Figuras

Figura 1: Representación gráfica de la penetración de las ondas en la vegetación y en el terreno con las bandas X-C-L. (Fuente: NASA).....	5
Figura 2: Representación del efecto de la rugosidad en la retrodispersión (Fuente: NASA).	5
Figura 3: Representación gráfica de la polarización V-V (Fuente: Modificado de NASA).	6
Figura 4: Localización de las distintas parcelas donde se ha realizado el estudio.....	10
Figura 5: Diagrama de flujo del procesamiento de imagen de Sentinel-1 realizado con SNAP.	12
Figura 6: A la izquierda se encuentra la imagen original de Sentinel-1 antes del procesamiento. A la derecha se muestra la imagen obtenida tras realizar todos los procesos del tratamiento de imagen obteniendo la imagen Sentinel-1 procesada.	12
Figura 7: Imagen radar Sentinel-1 resultante del tratamiento realizado con SNAP con fecha 04/01/2016.	13
Figura 8: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes ópticas Sentinel-2 y posterior cálculo del índice NDVI realizado con el software QGIS.	15
Figura 9: NDVI obtenido de la imagen Sentinel-2 tras su procesamiento con fecha 20-03-2017.	15
Figura 10: Puntos de extracción de datos de cada parcela para las imágenes radar y ópticas.	17
Figura 11: Relación entre la retrodispersión obtenida y la serie histórica de precipitación para los años 2016, 2017 y 2018.	18
Figura 12: Correlación existente entre los valores de humedad y retrodispersión (σ) en la gravera.	19
Figura 13: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el área de vegetación silvestre junto a sus valores de NDVI.....	20
Figura 14: Correlación existente entre los valores de humedad y retrodispersión (σ) en la zona de vegetación silvestre.	21

Figura 15: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el cultivo de pistachos junto a sus valores de NDVI.	22
Figura 16: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de pistachos.	23
Figura 17: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el cultivo de encinas junto a sus valores de NDVI.	24
Figura 18: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de encinas.	25
Figura 19: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el cultivo de maíz junto a sus valores de NDVI.	26
Figura 20: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de maíz.	27
Figura 21: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de maíz cuando este se encuentra cultivado y la densidad de vegetación es máxima.	28
Figura 22: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de maíz cuando este no se encuentra cultivado y la densidad de vegetación es mínima.	28

Índice Tablas

Tabla I:Características de las bandas de Sentinel-2 (Fuente: ESA).....	14
Tabla II: Imágenes radar de Sentinel-1 con valores de retrodispersión en cada parcela.....	35
Tabla III: Imágenes ópticas de Sentinel-2 con valores del índice NDVI de cada una de las parcelas.....	39
Tabla IV: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2016.....	41
Tabla V: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2017.....	42
Tabla VI: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2018.....	43
Tabla VII: Registros de humedad para las distintas parcelas proporcionados por el programa Copernicus	44

I.- Resumen

El estudio de la humedad del suelo es uno de los grandes retos para la hidrología debido a su importancia en el ciclo hidrológico y a su alta variabilidad en el espacio y en el tiempo. Repercute principalmente en procesos climáticos debido a la evaporación y a los cultivos por la evapotranspiración de las plantas. Esto último afecta en el diseño y necesidades de riego para los cultivos. Por ello, es objetivo de este estudio realizar estimaciones de humedad del suelo en diferentes parcelas de cultivo situadas en la cuenca del Jarama a partir técnicas de teledetección con imágenes radar de Sentinel-1 e imágenes ópticas de Sentinel-2, así como establecer las relaciones existentes entre la señal de retrodispersión radar con factores climatológicos como la precipitación.

Al comparar los valores de retrodispersión en una zona sin vegetación con los obtenidos en las distintas parcelas de cultivos, los resultados muestran que la vegetación interfiere en la señal radar disminuyendo su valor. Los valores de retrodispersión del cultivo de pistachos y la vegetación silvestre han obtenido buenas correlaciones con la humedad, siendo $R^2=0.61$ y $R^2=0.60$ respectivamente. Sin embargo, los cultivos de maíz y encinas con una densidad de vegetación mayor a los anteriores muestran menor correlación con los valores de humedad, siendo estos $R^2=0.44$ y $R^2=0.37$ respectivamente. Además, en el estudio realizado en la gravera, se ha comprobado que la permanencia de la humedad en el suelo depende directamente de factores climatológicos como la precipitación y temperatura.

Por tanto, se concluye que la vegetación presenta una interferencia en la señal radar dificultando la estimación de humedad del suelo según del tipo de vegetación del que se trate y que su permanencia en el mismo depende directamente del volumen de precipitación y de la temperatura. También se comprueba la validez de las técnicas de teledetección como una herramienta útil de investigación y seguimiento.

II.- Abstract

The study of soil moisture is one of the great challenges for hydrology due to its significance in the hydrological cycle and the high variability in space and time. It mainly affects climatic processes due to evaporation and crops due to plant evapotranspiration. The latter affects the design and irrigation needs for crops. Therefore, the main objective of this study is estimates soil moisture in different cultivation plots located in the Jarama watershed by using remote sensing techniques with Sentinel-1 radar images and Sentinel-2 optical images, as well as establishing the relationships existing between the radar backscatter signal with weather factors such as precipitation.

When comparing the backscatter values in an area without vegetation with those obtained in the different crop plots, the results show that the vegetation interferes with the radar signal, decreasing its value. The backscatter values of pistachio cultivation and wild vegetation have obtained good correlations with humidity, being $R^2 = 0.61$ and $R^2 = 0.60$ respectively. However, corn and holm oak crops with a higher vegetation density than the previous ones, show less correlation with humidity values, with $R^2=0.44$ and $R^2=0.37$ respectively. In addition, in the study carried out in the gravel pit, it has been found that the permanence of moisture in the soil depends directly on climatological factors such as precipitation and temperature.

Therefore, it is concluded that the vegetation presents an interference in the radar signal, making it difficult to estimate the humidity of the soil according to the type of vegetation in question and that its permanence in it depends directly on the volume of precipitation and the temperature. The validity of remote sensing techniques is also checked as a useful research and monitoring tool.

1.- Introducción

El estudio de la humedad del suelo (HS) y su dinámica ha sido fijado como uno de los principales retos de la hidrología debido a su importancia en el ciclo hidrológico y a su alta variabilidad en el espacio y tiempo (Rodríguez – Iturbe, 2000).

La influencia de la HS en el ciclo hidrológico puede verse desde diferentes magnitudes. A grandes escalas interviene en procesos meteorológicos y climáticos ya que influye en la tasa de evaporación y transpiración (Chanzy, 2003). A escalas medias determina la generación de escorrentía (Jackson, 1980) y la evapotranspiración (Wetzel y Chany, 1987). Tiene gran importancia en los cultivos, tanto en su desarrollo como en las necesidades de riego (Geogakakos y Baumer, 1996). También en la realización de mapas y la creación de modelos de cultivo (Inés, 2013). A escalas pequeñas influye en procesos biogeoquímicos como el movimiento de solutos en el suelo, por lo que tiene influencia en la calidad de las aguas (Huisman *et al.*, 2002).

La caracterización de la HS es compleja ya que responde a diferentes variables como la precipitación, la vegetación o la topografía, particularmente la pendiente, el tipo y texturas del suelo. Estas variables hacen que sea un cálculo complicado y que tenga una alta variabilidad tanto espacial como temporal (Famiglietti *et al.*, 1998).

Está probado que las imágenes radar son muy útiles para la estimación de HS ya que los sensores de microondas activos como los radares de apertura sintética (SAR), tienen la capacidad de obtener imágenes de alta resolución bajo cualquier condición atmosférica (Ouchi, 2013). Estos sensores miden retrodispersión, es decir, reflexión de ondas, partículas o señales en dirección al lugar del que provienen. Sin embargo, la retrodispersión radar es muy sensible a las características de la superficie terrestre, como la constante dieléctrica (Gorrab *et al.*, 2015), rugosidad del terreno (Zribi y Dechambre, 2003), propiedades físicas y geométricas de la vegetación. También a las características del sensor, en particular la frecuencia, longitud de onda, ángulo de incidencia y a la polarización (Patel *et al.*, 2006).

1.1.- Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es uno de los factores que más afectan al valor de retrodispersión. Las propiedades dieléctricas de los materiales influyen en la capacidad para absorber energía de microondas. Son indicadores de reflectividad y conductividad. La magnitud de retrodispersión medida es directamente proporcional a la constante dieléctrica de la superficie u objeto de estudio donde inciden dichas ondas. En las imágenes radar cuanta mayor sea la energía retrodispersada, es decir, cuanta mayor sea la energía que vuelve al sensor, la imagen se verá más blanca en ese punto puesto que tiene una mayor energía. Por el contrario, a medida que la energía retrodispersada sea menor, en la imagen se verá desde tonos más grisáceos hasta tonos negros. El valor de retrodispersión suele ser expresada por el coeficiente sigma σ , el cual demuestra el efecto combinado de las condiciones de la superficie (rugosidad, vegetación y HS) y la configuración de radar (longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia).

Es importante tener presente que la constante dieléctrica está directamente relacionada con el contenido en agua, de modo que suelos con alto contenido en agua mostrará un valor de retrodispersión mayor que en superficies secas.

1.2.- Longitud de onda

La longitud de onda define la interacción entre la señal y el objeto de estudio, en este caso, la superficie terrestre. La relación existente entre ambas es directamente proporcional, a mayor longitud de onda, mayor será la penetración en el terreno. Es interesante conocer este factor ya que dependiendo de cuál sea el objetivo del estudio, ya sea hallar datos en superficie para conocer la escorrentía o, si se quiere conocer la humedad a mayor profundidad, se deberá escoger un sensor con la longitud de onda adecuada para el estudio que se desea realizar. En la figura 1 se muestran las longitudes de onda más utilizadas por los sensores SAR. La banda-X (longitud de onda más corta, 3 cm) refleja la superficie de la vegetación. La banda-L (longitud de onda más larga, 24 cm) penetra a través de las copas de los

árboles y penetra en la superficie del terreno. La banda-C (longitud de onda intermedia, 6 cm) refleja ambas, las copas de los árboles y la superficie del terreno (Barrett *et al.*, 2009).

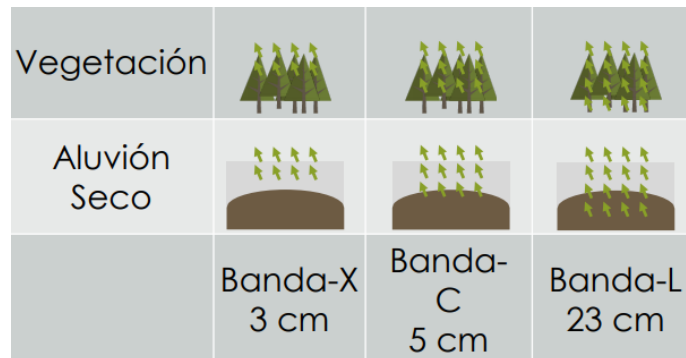


Figura 1: Representación gráfica de la penetración de las ondas en la vegetación y en el terreno con las bandas X-C-L. (Fuente: NASA).

1.3.- Rugosidad

La rugosidad de la superficie es un factor importante que afecta al valor de la retrodispersión tanto o más que la longitud de onda (Lu and Meyer, 2002). La rugosidad es la descripción de la irregularidad de la topografía de la superficie de la Tierra (Li *et al.*, 2015). En la figura 2 se puede ver cómo afecta la rugosidad en diferentes tipos de superficie a la retrodispersión de la señal.

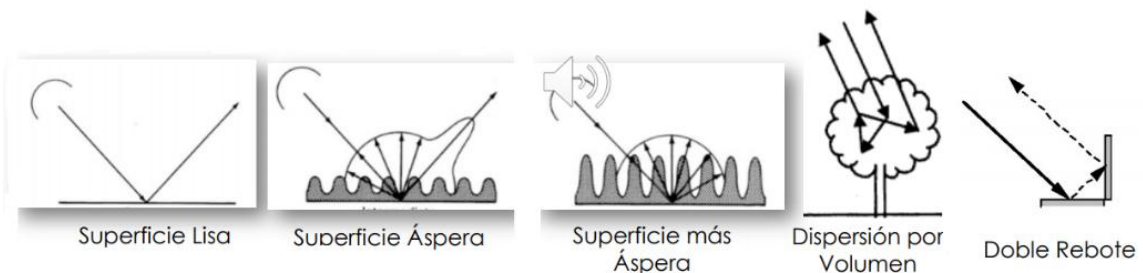


Figura 2: Representación del efecto de la rugosidad en la retrodispersión (Fuente: NASA).

1.4.- Ángulo de incidencia

La contribución de la retrodispersión de la superficie terrestre en el total del valor de retrodispersión depende principalmente del ángulo de incidencia (Hégarat-Mascl *et al.*, 2002). Para ángulos pequeños las ondas penetran más y se obtienen datos de retrodispersión más altos. Sin embargo, la retrodispersión disminuye a medida que el ángulo de incidencia aumenta. Para el estudio de

HS están recomendados ángulos de incidencia por debajo de 30° (Filion *et al.*, 2015).

1.5.- Polarización

Es el plano de propagación del campo eléctrico de la señal e influye en la profundidad de penetración de dicha señal. Los sensores de microondas activos (Bandas X, L y C) proporcionan diferentes tipos de polarizaciones: Polarización similar como P_{HH} (polarización horizontal-horizontal), significa que la señal se emite en un plano horizontal y es recibida en un plano horizontal, y P_{VV} (polarización vertical-vertical). Y polarizaciones cruzadas como por ejemplo P_{VH} (polarización horizontal-vertical) y P_{HV} (polarización horizontal-vertical) (Wang, 2009). La polarización vertical es más sensible a la HS que la polarización horizontal (Narvekar *et al.*, 2015). Por ello, la polarización utilizada para el estudio de HS será la polarización P_{VV} representada en la figura 3.

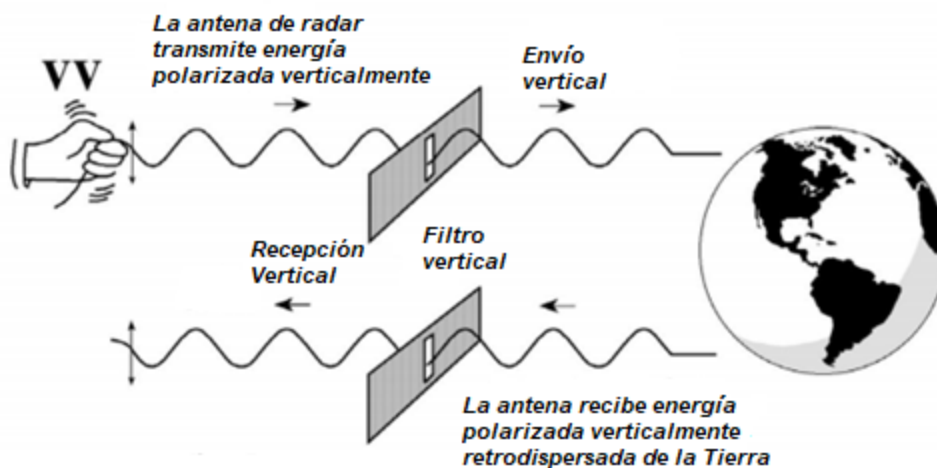


Figura 3: Representación gráfica de la polarización V-V (Fuente: Modificado de NASA).

1.6.- Humedad del suelo

La HS puede ser determinada por métodos directos in situ y también mediante técnicas de teledetección. Un ejemplo de la primera es el método gravimétrico en el cual se toma una muestra del suelo y se mide el contenido de agua de la muestra (Enciso *et al.*, 2007). Existen múltiples métodos aplicados a técnicas de teledetección, como modelos empíricos que muestran la relación entre la señal de retrodispersión radar y el contenido de HS asumiendo constante la rugosidad de la superficie (Verhoest *et al.*, 2008).

$$\theta^0(dB) = a + bV_{sm} + ce^{-ks} \quad (1)$$

Donde “a, b y c” son coeficientes calibrados, “k” es el número de onda, “ V_{sm} ” es el volumen de HS y “s” es la altura media de la superficie (Verhoest *et al.*, 2008). Existen modelos semi empíricos que son combinación de fundamentos teóricos con enfoques empíricos. Muestran relación entre HS (V_{ms}) y la señal de retrodispersión radar (dB), σ_{dB}^0 (Wang, 2009). En la siguiente ecuación “ α y β ” son constantes. Este método ha sido validado para cuencas de agricultura y el valor de la pendiente debe ser calibrado puesto que varía entre cuencas.

$$\sigma_{dB}^0 = \alpha V_{sm} + \beta \quad (2)$$

Otro método muy utilizado y que se utilizará en el presente estudio, será la combinación de imágenes SAR e imágenes ópticas multiespectrales utilizando algoritmos específicos para la estimación del contenido de HS. Las imágenes ópticas son muy útiles para la estimación de parámetros biofísicos como la vegetación, calculada mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Combinando este índice junto a la información SAR se puede reducir el efecto producido por la vegetación y rugosidad de la superficie en la señal radar (Wang *et al.*, 2004).

2.- Objetivos

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una metodología para estimar la HS en distintas parcelas situadas en la cuenca del Jarama a partir de datos de imágenes radar (Sentinel-1) y multiespectrales (Sentinel-2) para un período de 3 años.

2.1.- Objetivos específicos

- Procesar las imágenes radar de Sentinel-1 mediante el software SNAP.
- Obtener la relación existente entre la HS y factores climáticos como la precipitación.
- Obtener la interacción existente entre distintos tipos de vegetación y la señal de retrodispersión radar.
- Desarrollar una metodología para estimar la HS aplicando técnicas de teledetección para validar el potencial de las imágenes satelitales como herramienta de investigación y seguimiento.

3.- Materiales y métodos

3.1.- Área de estudio

Las parcelas de estudio se sitúan en la finca “La Isla”, situada en la cuenca del Jarama (Madrid, España). Se trata de una finca experimental del instituto madrileño de investigación y desarrollo rural, agrario y alimentario (IMIDRA) en la que se realizan proyectos de investigación en horticultura y ensayos de nuevas técnicas de riego, cultivos alternativos y demostrativos de aplicación de fertilizantes y herbicidas (Comunidad de Madrid, 2018). Esta finca experimental cuenta con parcelas con diferentes tipos de cultivos de secano y regadío: pistachos, encinas, maíz, patatas, etc. Además, en las proximidades de la finca existe suelo desnudo con vegetación silvestre y una gravera.

Es una zona compuesta por gravas, arenas y limos del cuaternario y un clima mediterráneo continental, con una temperatura media anual de 15°C y una precipitación media de 450 mm. Es característico de este tipo de clima una etapa seca, generalmente en los meses de julio y agosto, y una etapa más húmeda donde se concentra el máximo de precipitación en los meses de otoño (de octubre a diciembre) y los meses primaverales de abril y mayo.

Para el estudio de HS en el que uno de los factores importantes es la interacción de la señal radar con la vegetación, tener diferentes tipos de cultivo y densidad de vegetación en cada una de las parcelas es una gran ventaja para hallar en qué medida afecta cada tipo de cultivo en el valor de retrodispersión. A continuación se muestra en la figura 4 un mapa de la zona de estudio y las parcelas que se han seleccionado para la estimación de la humedad de suelo.

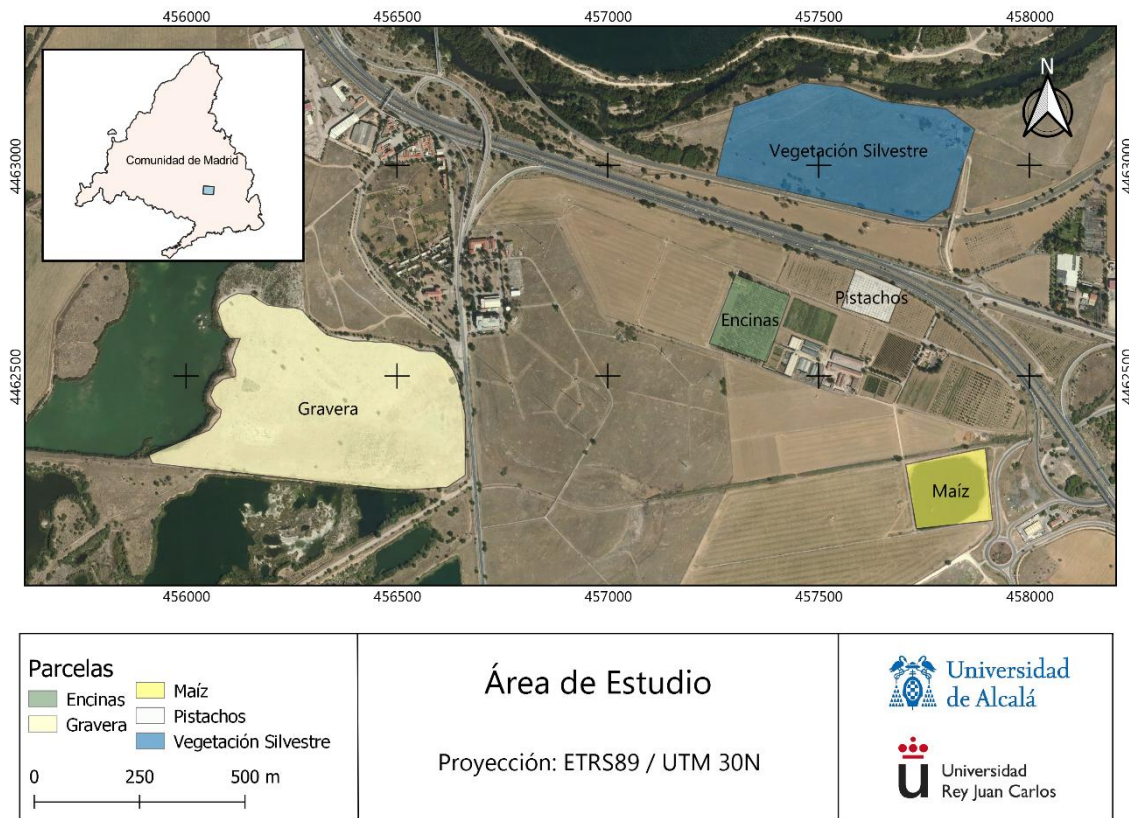


Figura 4: Localización de las distintas parcelas donde se ha realizado el estudio.

3.2.- Imágenes Satelitales

Para llevar a cabo este estudio se obtuvieron las imágenes de radar pertenecientes a la misión Sentinel-1 y las imágenes ópticas multiespectrales de la misión Sentinel-2 del servidor de la Agencia Espacial Europea (ESA), Copernicus Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

El procesado y tratamiento para las imágenes radar de Sentinel-1 ha sido realizado por el software SNAP (Sentinel Application Platform) desarrollado por la ESA, mientras que para el tratamiento de las imágenes ópticas Sentinel-2 y el posterior cálculo del índice NDVI se ha utilizado el software QGIS 3.4.

3.3.- Imágenes Radar: Sentinel-1

Sentinel-1 es la primera misión del programa Copernicus, desarrollada por la ESA. Es una misión que se comprende por la constelación de dos satélites en órbita polar y una diferencia de fase de 180° , con una resolución temporal cada 12 días en cada satélite. Como la misión se compone de dos

satélites tendremos imágenes con una frecuencia temporal de 6 días. La misión se inició el 3 de abril de 2014 con la puesta en órbita del satélite Sentinel-1A y el 25 de abril de 2016 se lanzó el segundo satélite de la misión, el Sentinel-1B (ESA, 2020a).

Sentinel-1 es un satélite radar de apertura sintética (SAR) en banda C y polarizaciones VH y VV, lo que permite obtener imágenes en horario diurno y nocturno y bajo cualquier condición climática con una resolución espacial de 10 m. (ESA, 2020a). Para este estudio se han obtenido todas las imágenes radar disponible en el servidor Copernicus Hub en el período comprendido entre 2016 y 2018, siendo un total de 177 imágenes recogidas en la tabla II de los anexos. Narvekar *et al.*, 2015 afirma que la polarización VV presenta una mayor sensibilidad para la estimación de HS que la polarización cruzada VH, por ello, en la realización de este estudio se ha utilizado polarización VV.

Las imágenes radar están sujetas a imperfecciones definidas por distorsiones radiométricas, geométricas y ruido de imagen denominado “*speckle*”. Para corregir dichas distorsiones se realizará un tratamiento de la imagen con el software SNAP, descargado en la página web oficial de la ESA.

3.3.1.- Archivo de órbita

El primer paso del procesamiento de la imagen radar Sentinel-1 se trata de aplicar el archivo de órbita, denominado en el software como “*Apply orbit file*”. Existen datos precisos de la órbita satelital como posición y velocidad que no vienen dadas en los paquetes de datos satelitales SAR. Aplicar este proceso inicialmente proporcionará una mejora tanto en la geocodificación como en la precisión de procesos de corrección posteriores a este.

3.3.2.- Calibración radiométrica

Las imágenes SAR no calibradas radiométricamente son suficientes para realizar estudios cualitativos, sin embargo, para realizar estudios cuantitativos que requieran mayor precisión, las imágenes deben ser calibradas previamente. Para ello, se emplea la herramienta del software SNAP “*radiometric calibration*”, con lo que se obtienen los valores de retrodispersión de la banda sigma (σ).

3.3.3.- Filtro Speckle

Una de las distorsiones que degrada en gran medida la calidad de la imagen es el ruido de sal y pimienta, también denominado como “*speckle*”. Para eliminar este ruido de nuestra imagen, se ha aplicado el filtro Lee 7x7 de la herramienta “*speckle filter*” en el software, cuyo principio de funcionamiento se basa en las propiedades geométricas de la imagen, es decir, en el tamaño y forma de los objetos terrestres.

3.3.4.- Corrección del terreno

El relieve produce efectos de acortamiento e inversión del terreno. Para su corrección SNAP aplica en su herramienta “*terrain correction*” un modelo digital de elevaciones (DEM) con el que elimina cualquier tipo de distorsión producida por la rugosidad del terreno.

A continuación, se muestra en la figura 5 un diagrama de flujo en el que se resumen los procesos descritos anteriormente.

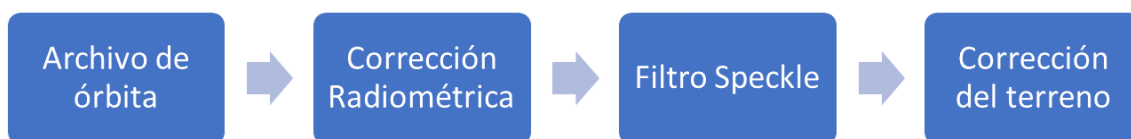


Figura 5: Diagrama de flujo del procesamiento de imagen de Sentinel-1 realizado con SNAP.

En la figura 6 se muestra el resultado del procesamiento de la imagen SAR de Sentinel-1.

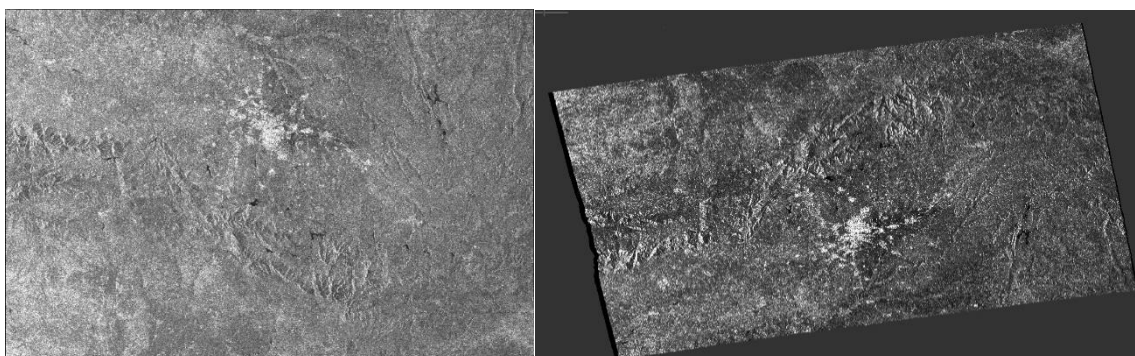


Figura 6: A la izquierda se encuentra la imagen original de Sentinel-1 antes del procesamiento. A la derecha se muestra la imagen obtenida tras realizar todos los procesos del tratamiento de imagen obteniendo la imagen Sentinel-1 procesada.

En el último paso del procesamiento se realiza un recorte de la zona de estudio y se transforman los valores de los píxeles de la imagen de formato digital a decibelios (dB), que será la unidad de medida con la que se trabaje posteriormente. Para realizar todas las correcciones se ha utilizado el modelador gráfico del software SNAP para poder realizar todos los procesos descritos en un único paso. En la figura 7 se muestra el resultado final de la imagen radar Sentinel-1 en la zona de estudio tras el tratamiento y corrección de las distorsiones explicadas previamente.

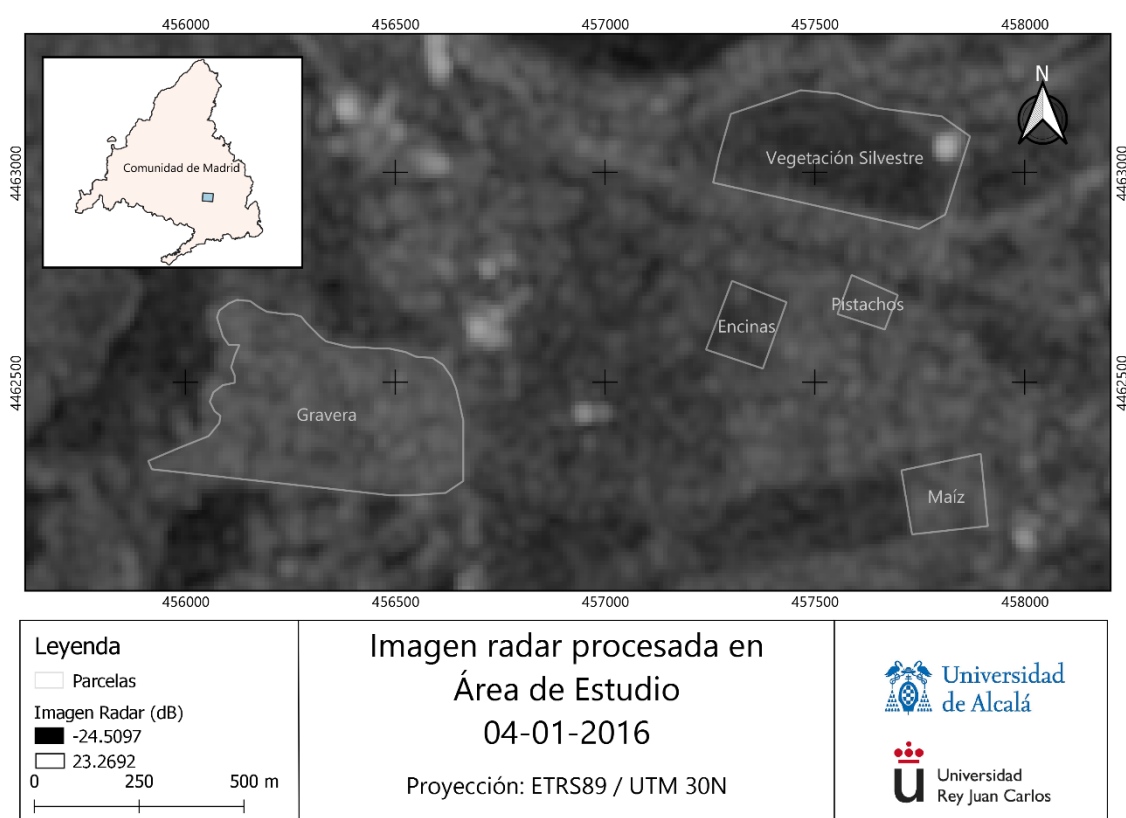


Figura 7: Imagen radar Sentinel-1 resultante del tratamiento realizado con SNAP con fecha 04/01/2016.

3.4.- Imágenes Ópticas: Sentinel-2

Sentinel-2 es una misión que se inició con el lanzamiento del satélite desarrollado por la ESA, del programa Copernicus, el 23 de junio de 2015. Esta misión la comprenden dos satélites situados en fases de 180°, lo que nos permite obtener información cada 2-3 días en latitudes medias y cada 5 días en el resto de latitudes.

Sentinel-2 lleva instrumentación óptica MSI (MultiSpectral Instrument) que toma datos de alta resolución espectral y nos da como resultado 13 bandas espectrales. Su objetivo principal es monitorizar la cubierta vegetal, usos de las aguas, cauces navegables, zonas costeras y también toma datos para los servicios de emergencias (ESA, 2020b). En la tabla I se muestran las 13 bandas espectrales de este satélite con sus correspondientes longitudes de onda y resolución de cada imagen.

Tabla I: Características de las bandas de Sentinel-2 (Fuente: ESA).

Banda	Resolución	Longitud de onda	Descripción
B1	60 m	443 nm	Ultra azul (Costa y aerosol)
B2	10 m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	Rojo
B5	20 m	705 nm	Visible e Infrarrojo Cercano
B6	20 m	740 nm	Visible e Infrarrojo Cercano
B7	20 m	783 nm	Visible e Infrarrojo Cercano
B8	10 m	842 nm	Visible e Infrarrojo Cercano
B8a	20 m	865 nm	Visible e Infrarrojo Cercano
B9	60 m	940 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)

Al igual que en el caso anterior, las imágenes Sentinel-2 se han descargado a través del servidor Copernicus Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) en el período comprendido entre 2016 y 2018, habiéndose descargado un total de 111 imágenes recogidas en la tabla III de los anexos. Aunque la frecuencia temporal en este caso sea de 2-3 días para latitudes medias, las imágenes ópticas sólo son útiles en horario diurno y cuando no hay presencia de nubes, ya que éstas impiden la obtención de reflectividad de la superficie terrestre.

El procesamiento de estas imágenes se ha realizado con el software QGIS 3.4, con la herramienta “Semi-Automatic Classification Plugin” (SCP). Inicialmente se descargaron las imágenes Sentinel-2 en el nivel 1-C, es decir, con datos de reflectividad al nivel de la atmósfera. Al utilizar esta herramienta aplicando la corrección atmosférica, se elimina el efecto producido por las nubes y se obtiene la reflectividad al nivel terrestre, teniendo como resultado una imagen Sentinel-2 en nivel 2-A, con el cual se podrá trabajar posteriormente para la obtención del índice NDVI. A continuación, se muestra

un diagrama con todos los procesos realizados para el tratamiento de la imagen y cálculo del índice NDVI.

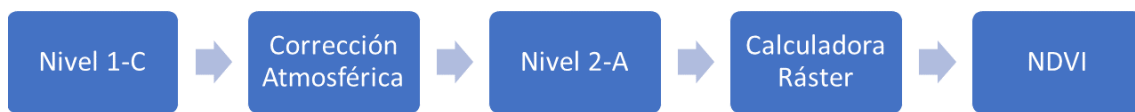


Figura 8: Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes ópticas Sentinel-2 y posterior cálculo del índice NDVI realizado con el software QGIS.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se utiliza para conocer la cantidad y calidad de la vegetación a partir de la combinación en las bandas rojas (RED) e infrarrojas (NIR) del espectro electromagnético (Jönsson, 2010). El índice NDVI viene definido por la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (3)$$

En este estudio donde la vegetación tiene un papel fundamental en la interacción con la señal radar, es imprescindible obtener la densidad de vegetación en cada una de las parcelas estudiadas. En la siguiente figura se muestra la imagen resultante tras el procesado y obtención del índice NDVI de la zona de estudio.

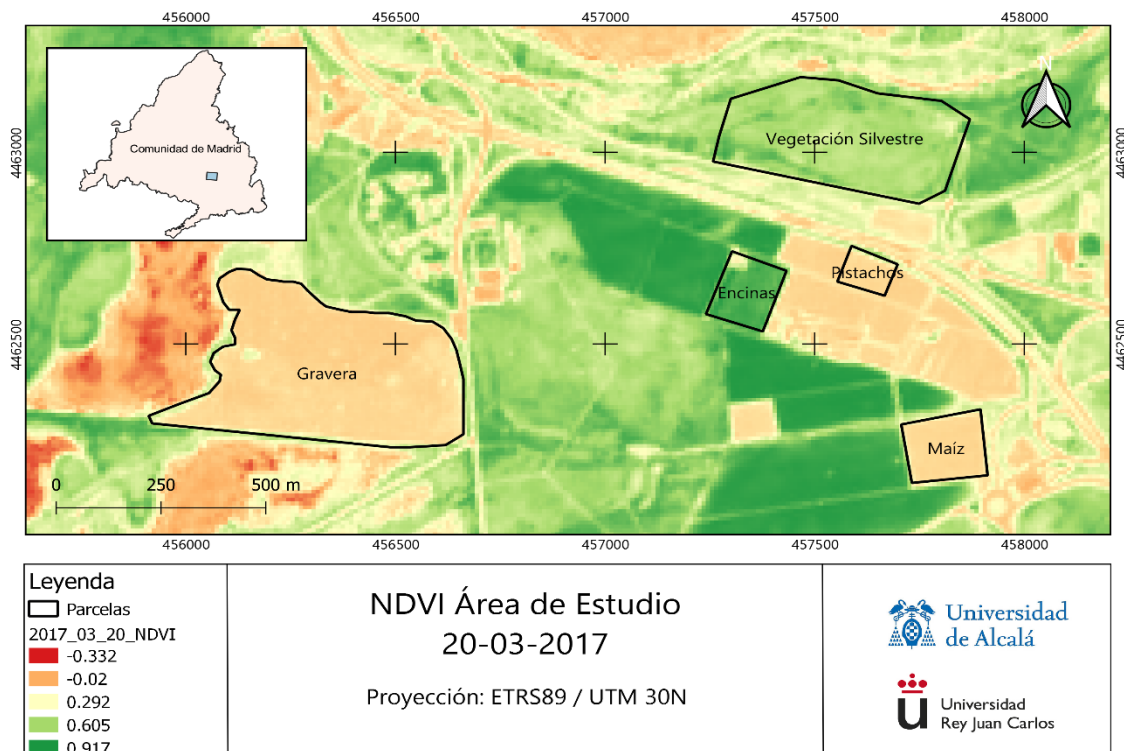


Figura 9: NDVI obtenido de la imagen Sentinel-2 tras su procesamiento con fecha 20-03-2017.

3.5.- Datos meteorológicos

El SIAR es un servicio de la Consejería de Agricultura que, con la colaboración de la Universidad de Castilla-La Mancha, suministra un apoyo científico para optimizar el uso del agua en agricultura y hacer de ésta una actividad sostenible y compatible con el medio ambiente (SIAR, 2020). Entre sus servicios destacan su ayuda a la programación del riego y manejo de los cultivos. También en la planificación de los cultivos en escenarios de recursos disponibles limitados.

Se ha accedido a los datos de la estación meteorológica ubicada en la finca experimental de IMIDRA a través de su página web (<http://eportal.mapa.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>) para obtener los datos de precipitación de los años 2016, 2017 y 2018 que servirán para establecer correlaciones entre los datos de retrodispersión hallados en las imágenes radar de Sentinel-1 con eventos climatológicos como la precipitación para realizar estimaciones de HS. Los datos adquiridos de la estación meteorológica están recogidos en las tablas IV, V y VI de los anexos.

3.6.- Mapas de Humedad

El programa Copernicus de la ESA, además de proporcionar imágenes satelitales de radar y ópticas, también realiza mapas de humedad en formato ráster de precisión 1 km a los cuales se ha tenido acceso mediante su página web (<https://land.copernicus.eu/global/products/ssm>). Se han descargado los mapas con fechas coincidentes a las imágenes radar de Sentinel-1 con las que se ha realizado este trabajo. Los datos adquiridos de los mapas de humedad están recogidos en la tabla VII de los anexos.

4.- Resultados y discusión

Los valores hallados se extraen de los píxeles de las imágenes procesadas anteriormente en puntos distribuidos por toda la superficie de cada parcela para caracterizar lo mejor posible cada área. En el caso de las imágenes radar se tienen como resultado los valores de retrodispersión en decibelios (dB) y para las imágenes ópticas se obtienen valores del índice NDVI, con valores adimensionales entre -1 y 1. Los valores cuanto más próximos a 1 implica mayor densidad de vegetación. Por el contrario, según se acerque el valor a 0 o incluso valores negativos, expresarán la ausencia o mal estado de esta.

A continuación, se muestran los puntos donde se han tomado los valores de cada parcela para caracterizar su valor medio tanto en vegetación como en retrodispersión.

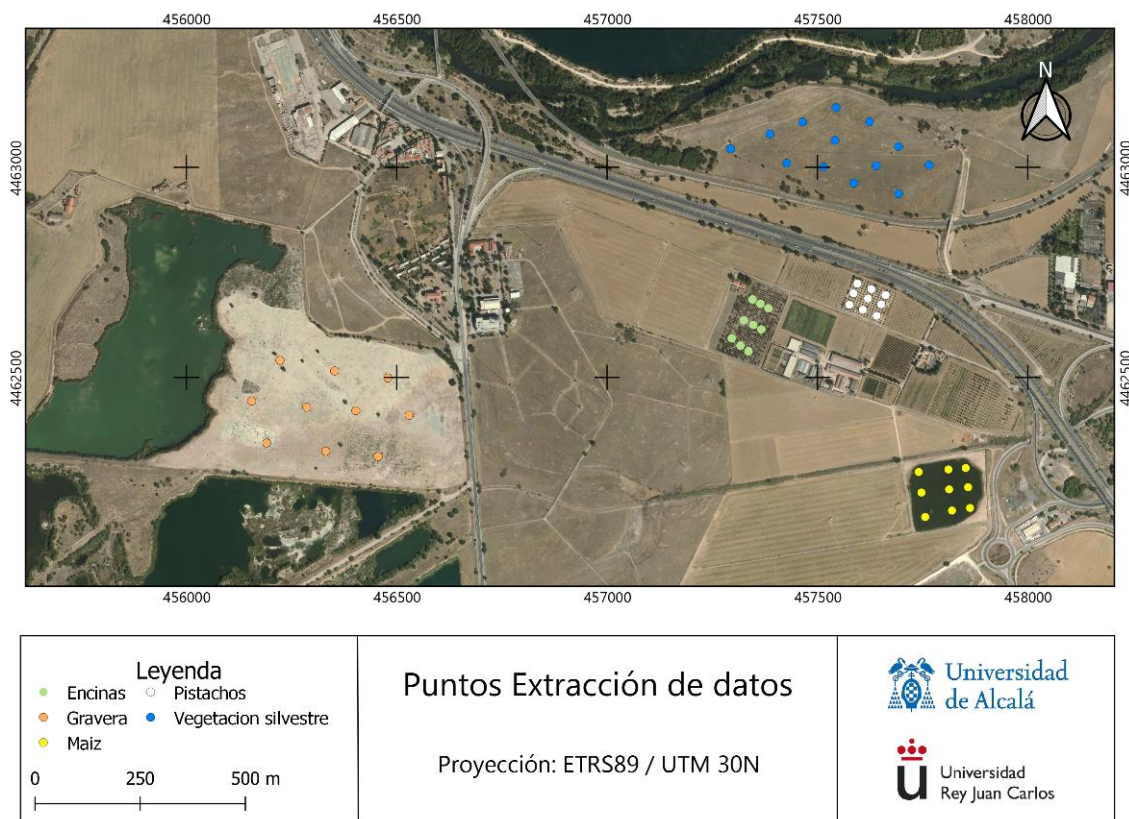


Figura 10: Puntos de extracción de datos de cada parcela para las imágenes radar y ópticas.

4.1.- Gravera

Como se ha visto anteriormente, la vegetación influye en la señal retrodispersada, por tanto, se va a analizar primero la gravera puesto que al carecer de vegetación se podrán establecer los valores de retrodispersión máximos y mínimos para un suelo desnudo y así poder comparar posteriormente con los valores en las distintas parcelas de cultivos y ver la afección de los distintos tipos de cultivo en la señal radar. En la figura 11 se muestran los valores de retrodispersión y su variación con la serie histórica de precipitación.

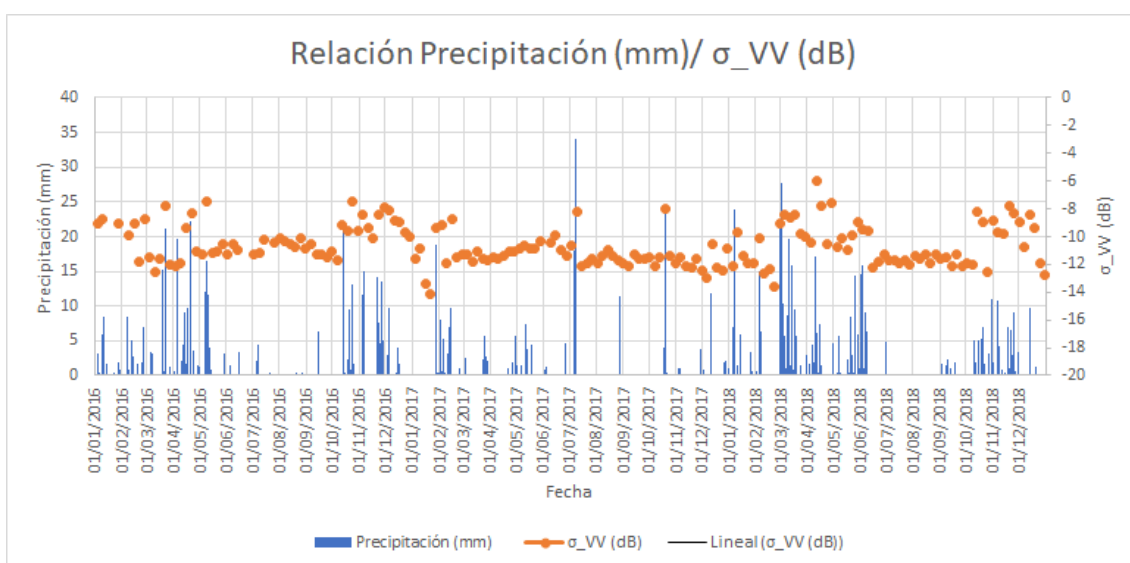


Figura 11: Relación entre la retrodispersión obtenida y la serie histórica de precipitación para los años 2016, 2017 y 2018.

En la figura anterior se observa cómo la señal sigma (σ) aumenta cuando existen eventos de precipitación y disminuye en la ausencia de esta. Para establecer los valores de σ que den como resultado la humedad mínima se han escogido los resultados hallados en el período 04/07/2018 – 21/08/2018 puesto que no hay precipitación y se asume que el suelo se encuentra completamente seco. Por el contrario, los valores de σ para estimar la humedad máxima se han escogido los máximos que coinciden tras eventos de grandes precipitaciones. Se establece un valor medio de $\sigma_{seco} = -11.7$ dB y $\sigma_{húmedo} = -7.5$ dB. En el caso de los valores húmedos existe mayor variación y éstos varían entre -7 y -9 dB respectivamente.

La temperatura es otro factor importante a tener en cuenta, pues en etapas donde la temperatura sea menor, la humedad en el suelo permanecerá mayor tiempo. En los meses de noviembre y diciembre de 2016, con una temperatura media de 7.2°C y, tras varios episodios continuos de precipitación, se necesitan hasta 5 medidas (entre una medida y otra hay una diferencia temporal de 6 días) para llegar a un valor mínimo de humedad cuando las precipitaciones cesan. Sin embargo, en el período entre 28/05/2018 y 30/06/2018, con una temperatura media de 21.2°C y volúmenes de precipitación similares, se llega al valor mínimo de retrodispersión con dos medidas únicamente. Por tanto, la permanencia de la humedad en el suelo depende también de la temperatura.

A continuación, se va a comprobar la correlación existente entre los datos de retrodispersión hallados en la gravera con los datos de humedad proporcionados por el programa Copernicus y a los que se ha tenido acceso.

En la figura 12 se observa una buena correlación entre ambos parámetros, con un $R^2=0.62$. Cabe a destacar que la precisión de la imagen radar es de 10 metros mientras que la precisión de los mapas de humedad es de 1 kilómetro. Esto indica que, aun obteniendo ya una correlación buena, con datos de mayor precisión en nuestra zona se esperaría tener una correlación todavía mejor.

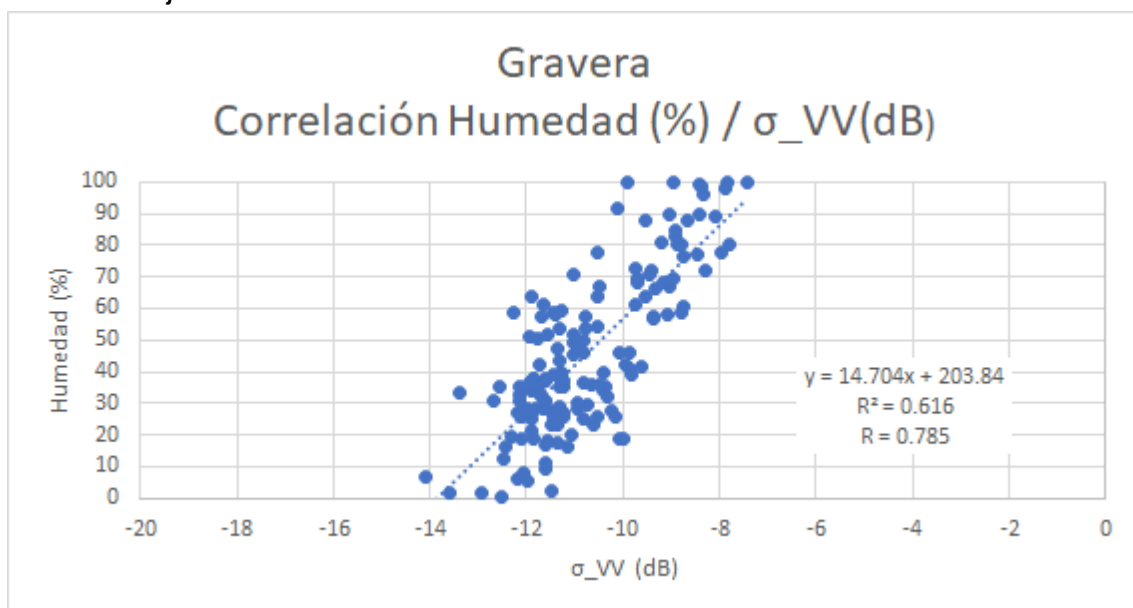


Figura 12: Correlación existente entre los valores de humedad y retrodispersión (σ) en la gravera.

En estos resultados se aprecia que para valores de humedad superiores al 90% los valores de retrodispersión oscilan entre [-7.4,-10.1] dB mientras que para valores inferiores al 10% de humedad, se tienen valores en un rango de [-11.6,-14.1] dB. Por tanto, los resultados demuestran que el análisis realizado para la figura 11 tienen coherencia y se aproxima a la realidad.

4.2.- Vegetación Silvestre

Esta zona se compone de un terreno de vegetación natural donde la ésta crece en primavera con el aumento de las precipitaciones y temperaturas. En la siguiente figura se muestran los valores de retrodispersión de esta área en comparación a la gravera. También se muestran los datos del índice NDVI para conocer cuándo existe mayor densidad de vegetación.

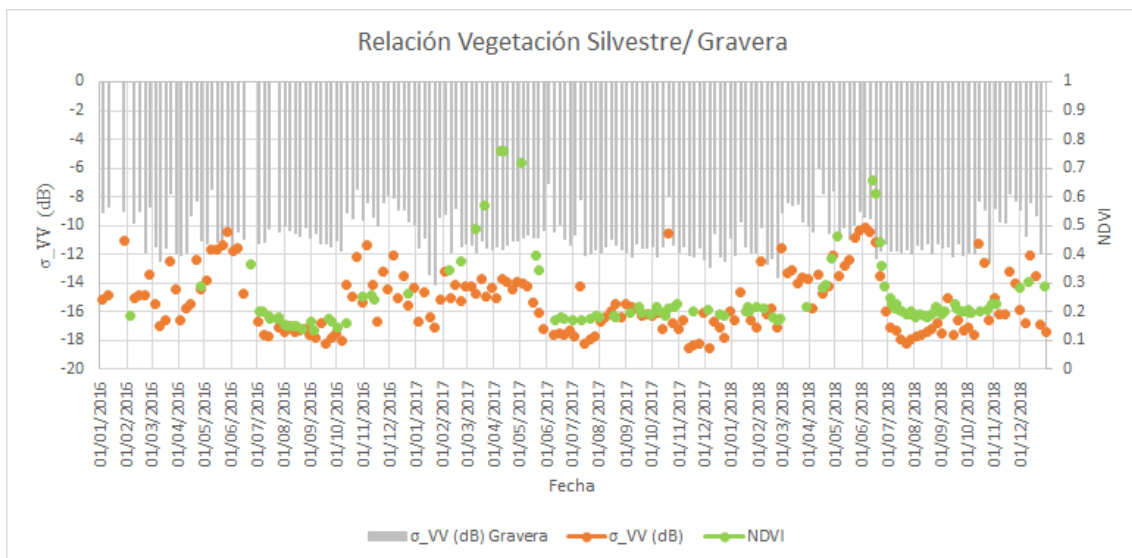


Figura 13: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el área de vegetación silvestre junto a sus valores de NDVI.

En la figura anterior se aprecia perfectamente que en esta área los valores de la señal $\sigma_{VegSilv}$ son menores a los obtenidos en la gravera. Los niveles de vegetación son mínimos durante la mayor parte del año, desarrollándose en la primavera de 2017 y 2018.

Para establecer los valores medios de σ máximos y mínimos se consideró el mismo criterio que en el caso anterior, obteniendo así un $\sigma_{seco} = -17.6$ dB y $\sigma_{húmedo} = -11$ dB, siendo el rango de valores para la humedad máxima de [-10,-12] dB. Esto muestra que los valores son más bajos respecto a los

hallados en la gravera, habiendo una diferencia de 5.9 dB cuando el suelo se encuentra seco y de 3.56 dB cuando se encuentra muy húmedo.

Al igual que en el caso anterior, en la siguiente figura se ha comprobado la correlación existente entre la retrodispersión en esta área y los hallados en el mapa de humedad.

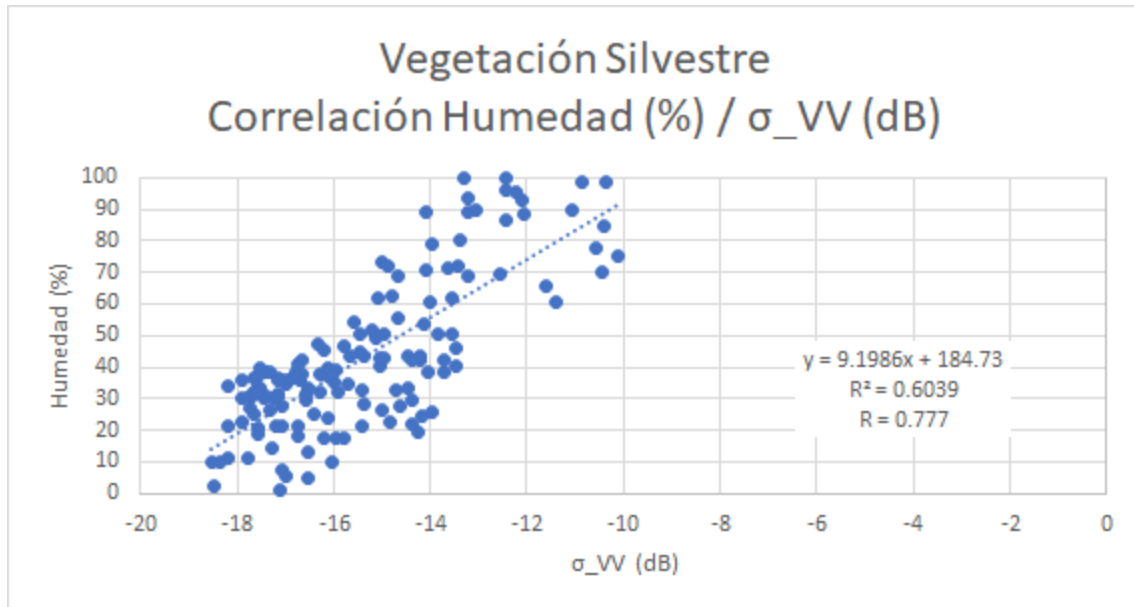


Figura 14: Correlación existente entre los valores de humedad y retrodispersión (σ) en la zona de vegetación silvestre.

En este caso también se obtiene una buena correlación con un $R^2=0.60$. En el análisis anterior se estimaron valores máximos y mínimos de -17.6 y -11 dB respectivamente. Al contrastar con los mapas de humedad se ha obtenido que para valores superiores al 90% de humedad, los valores de σ son entre [-10.9, -13.3] dB y para valores con una humedad inferior al 10% se tienen valores en un rango de [-16,-18.5] dB, por lo que se aproxima a la realidad. En este caso, al tratarse de una vegetación de baja densidad ($NDVI_{m\acute{a}ximo}=0.79$), ha influido en los valores de la señal radar disminuyendo su valor, pero no ha influido negativamente en su correlación con la humedad. Esto indica que este tipo de vegetación no afecta negativamente en la estimación de humedad mediante la señal radar.

4.3.- Cultivo de pistachos

Los pistachos son un cultivo de secano, por lo que su riego debe estar muy controlado para evitar encharcamientos y situaciones de humedad

extrema. Es un cultivo de baja densidad, por lo que se esperan valores de NDVI bajos y que afecten menos que otro tipo de vegetación a la señal retrodispersada. A continuación, se muestra en la figura 15 los valores de sigma y NDVI de esta parcela en comparación a los valores de sigma obtenidos en la gravera.

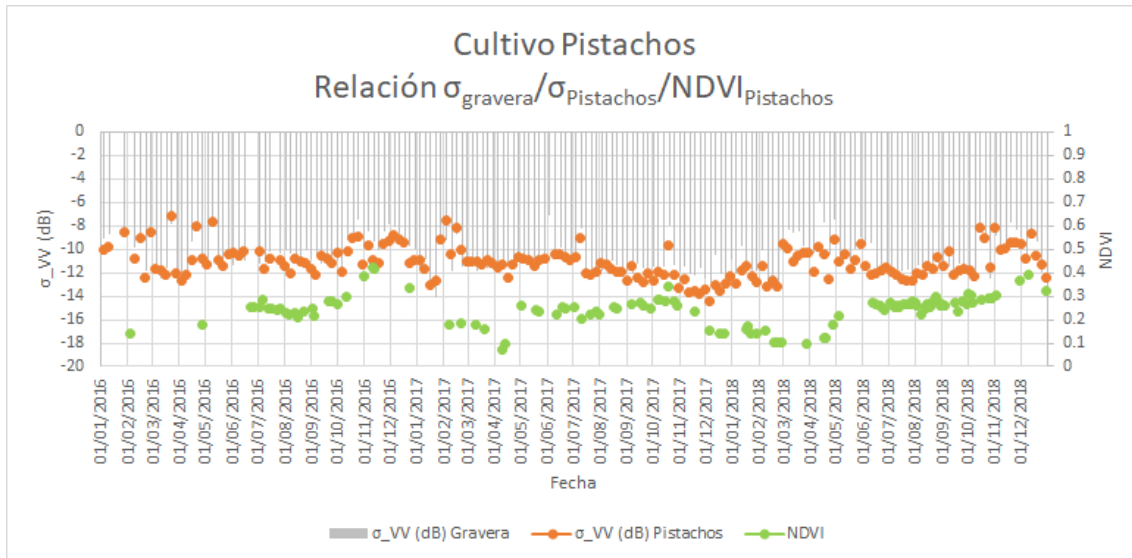


Figura 15: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el cultivo de pistachos junto a sus valores de NDVI.

Los valores del índice NDVI muestran una densidad de vegetación bastante baja, tal y como se esperaba obteniendo valores inferiores a 0.5. En este caso, donde existe una densidad de vegetación baja, se refleja en sus valores de retrodispersión, ligeramente inferiores a los obtenidos en la gravera. Los valores medios obtenidos para la estimación de humedad máxima y mínima fueron de $\sigma_{\text{húmedo}} = -8.2$ y $\sigma_{\text{seco}} = -12.1$ dB respectivamente. Los valores para la humedad máxima oscilan entre [-7,-9] dB. Es significativo que en esta parcela donde la vegetación es bastante pobre, los valores máximos y mínimos de retrodispersión se diferencien respecto a los obtenidos en la gravera tan sólo en 0.7 dB cuando el suelo se encuentra muy húmedo y 0.8 dB cuando el suelo está completamente seco. La siguiente figura muestra la correlación entre los datos obtenidos en esta parcela y los datos de humedad en el mismo lugar.

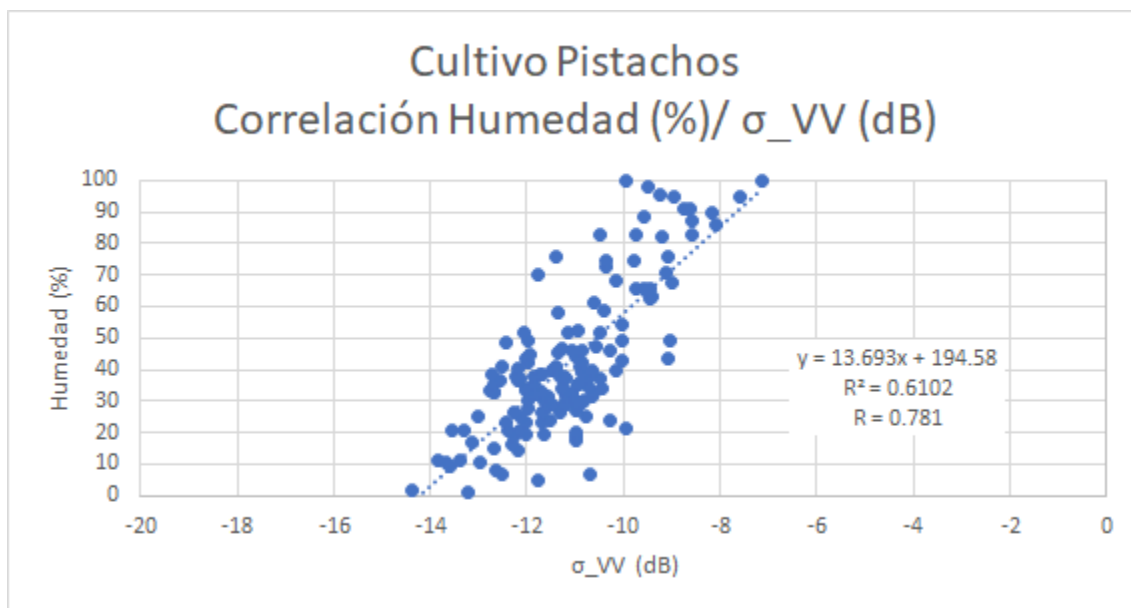


Figura 16: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de pistachos.

La correlación obtenida para este tipo de cultivo es prácticamente igual a la obtenida en la gravera, siendo ésta una buena correlación. Al contrastar los resultados de sigma para valores superiores al 90% de humedad, muestran una media de $\sigma_{\text{húmedo}} = -8.7$ dB y un rango de valores de $[-7.1, -9.9]$ dB, muy similar a lo esperado en el análisis de la figura 13. Lo mismo ocurre para los valores de humedad mínima inferiores al 10%, mostrando un valor medio de $\sigma_{\text{seco}} = -12.7$ dB difiriendo en 0.6 dB de lo analizado anteriormente.

Habiendo obtenido una correlación y valores de retrodispersión prácticamente idénticos a los de la gravera, se puede concluir que el cultivo de pistachos afecta mínimamente tanto en la señal radar como en la posterior obtención de HS.

4.4.- Cultivo de encinas

Al igual que los pistachos, las encinas se tratan de un cultivo de secano, pero a diferencia de éstos, las encinas son árboles de mayor altura y volumen, por lo que se espera que en el índice NDVI se detecte una densidad de vegetación mayor. A continuación, se muestran los resultados de retrodispersión y NDVI en comparación a la retrodispersión hallada en la gravera.

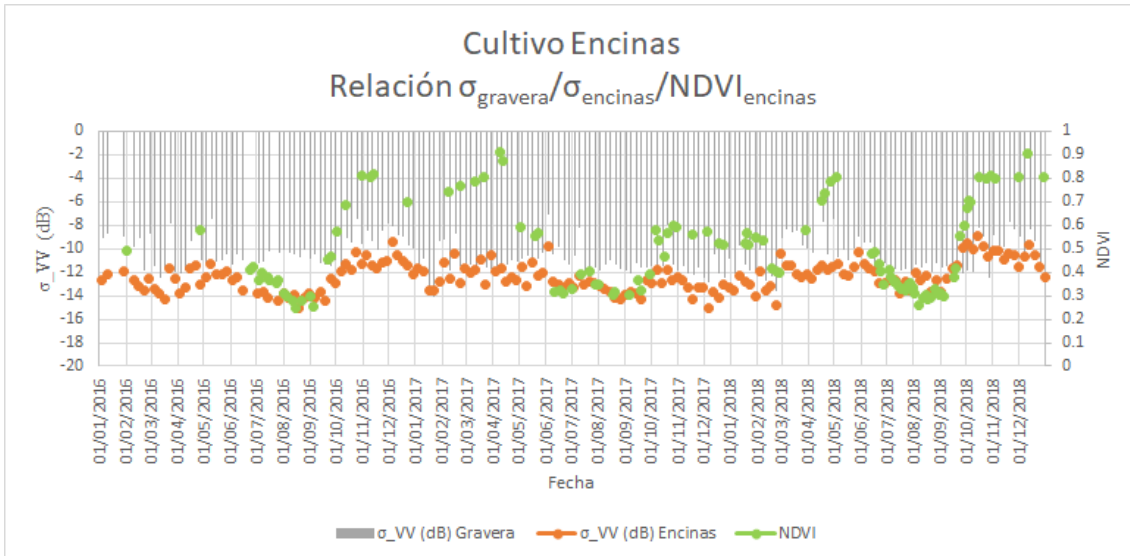


Figura 17: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el cultivo de encinas junto a sus valores de NDVI.

Tal y como se esperaba, los valores de NDVI son significativamente más altos a los hallados en el cultivo de pistachos, teniendo valores máximos de $\text{NDVI}=0.9$, por los máximos de $\text{NDVI}=0.5$ de los pistachos. Este aumento de la densidad de vegetación se percibe también en la señal radar de sigma, inferior a la retrodispersión de la gravera. Siguiendo el análisis realizado hasta ahora, se obtienen valores de sigma medios para condiciones de humedad máximas y mínimas de $\sigma_{\text{húmedo}} = -10.2$ dB con un rango de valores máximos entre $[-10, -12]$ dB, teniendo una diferencia de 2.7 dB en comparación a las condiciones húmedas de la gravera. Para las condiciones más secas se ha obtenido un valor medio de sigma de $\sigma_{\text{seco}} = -12.9$ dB, teniendo una diferencia 1.2 dB con la gravera. El periodo de máxima sequedad (04/07/2018-21/08/2018) coincide con los valores mínimos del índice NDVI, lo cual indica que cuando la densidad de las encinas es baja y las condiciones son muy secas, esa vegetación afecta mínimamente a la señal radar. A continuación, se muestra la correlación obtenida entre la señal sigma con los datos de humedad.

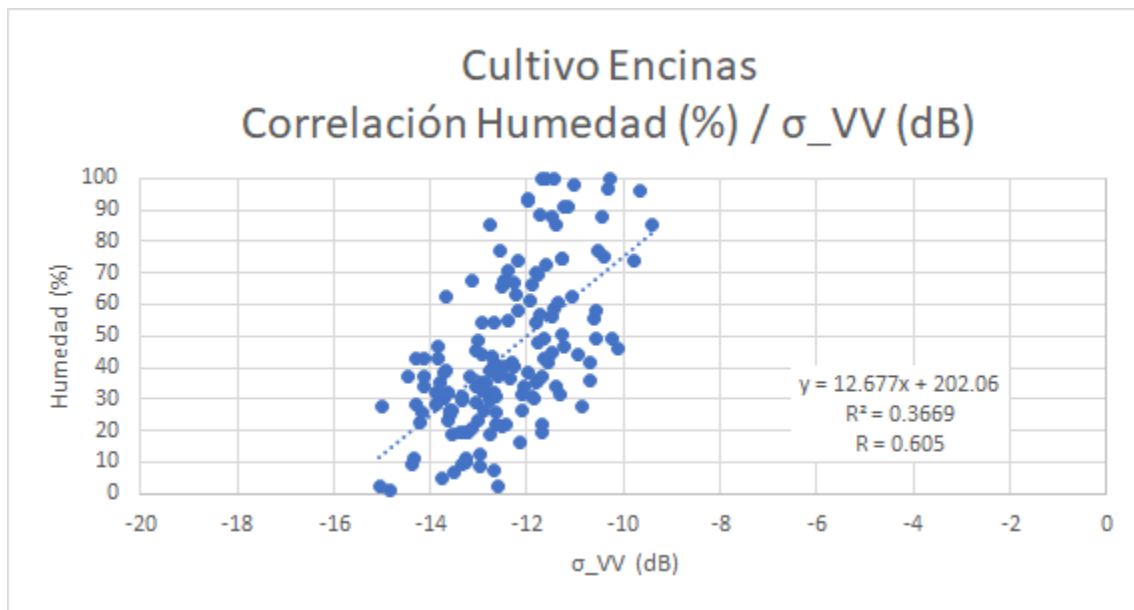


Figura 18: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de encinas.

En este caso la correlación obtenida es de $R^2=0.37$, siendo muy inferior al resto de parcelas. En la figura 15 se ha visto que existen períodos de densidad de vegetación muy altos, sin embargo, durante los tres años de estudio hay vegetación constante, con valores mínimos de $NDVI=0.25$. Esto indica que cuando se mide HS en suelos con vegetación constante, ésta afecta directamente en la precisión de los resultados. Por tanto, se puede afirmar que la afección del cultivo de las encinas en el valor de la retrodispersión radar es mayor al de los pistachos y la vegetación silvestre.

4.5.- Cultivo de maíz

El último cultivo que se ha estudiado es de maíz, caracterizado principalmente por ser un cultivo de regadío necesitando gran cantidad de humedad en el suelo para su desarrollo. En el período de tiempo estudiado se ha cultivado hasta en dos ocasiones, por lo que se va a poder visualizar perfectamente los valores de retrodispersión antes y después de su desarrollo en la figura 19 mostrada a continuación.

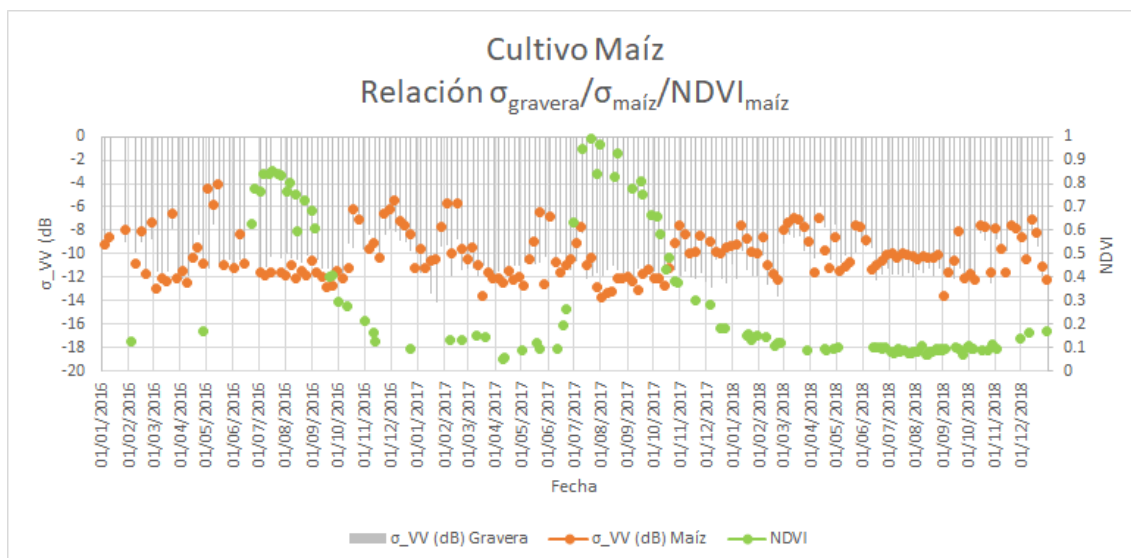


Figura 19: Relación entre los valores de retrodispersión de la gravera y el cultivo de maíz junto a sus valores de NDVI.

Se observa que en ausencia del cultivo los valores de retrodispersión del maíz son, en muchos casos, más altos que los obtenidos en la gravera. Esto explica que el lugar óptimo para el crecimiento y desarrollo de este tipo de cultivo sea un terreno con un alto contenido en humedad. Sin embargo, en los períodos en los que el maíz se encuentra totalmente desarrollado, obteniendo valores de $NDVI=0.99$, la señal de retrodispersión desciende teniendo valores más bajos a los de la gravera, por lo que se ve una clara tendencia a que cuando el cultivo está desarrollado influye en la señal de sigma disminuyendo el valor obtenido. Siguiendo el análisis realizado en el resto de las parcelas, se estima un valor medio para la máxima sequedad de $\sigma_{seco} = -10.2$ dB y un valor máximo medio para la estimación de humedad máxima de $\sigma_{húmedo} = -5.7$ dB. Son valores más altos a los obtenidos en la gravera, pero tanto los valores en el período seco con ausencia de precipitaciones como los valores de máxima humedad obtenidos, coinciden cuando el maíz no se encontraba desarrollado, por lo que estos valores indican máxima y mínima HS en ausencia de vegetación. Sin embargo, tener resultados cuando el cultivo se encuentra totalmente desarrollado y cuando no lo está, ha servido para verificar la clara afección del maíz en la señal de retrodispersión disminuyendo su valor. A continuación, se muestra la correlación con los datos de humedad.

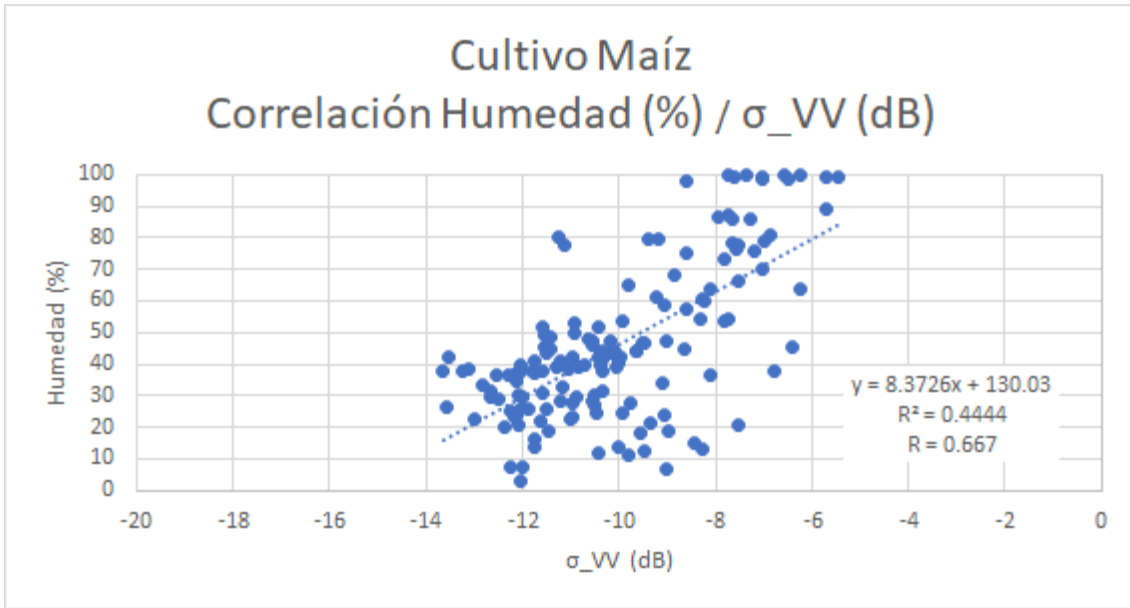


Figura 20: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de maíz.

Para este cultivo se ha obtenido una correlación de $R^2=0.44$, siendo una correlación inferior al de la gravera, vegetación silvestre y pistachos, pero mayor al de las encinas. Estos datos representan los valores tanto cuando el maíz se encuentra cultivado como cuando no lo está. Por tanto, se va a comprobar en las figuras 21 y 22 la correlación existente entre los valores de retrodispersión y humedad cuando el maíz se encuentra completamente desarrollado y se tiene una densidad de vegetación máxima y también cuando no está cultivado y el suelo se encuentra completamente desnudo. Esto ayudará a ver gráficamente cómo afecta una densidad de vegetación máxima para la estimación de humedad de suelo a partir de datos de retrodispersión.

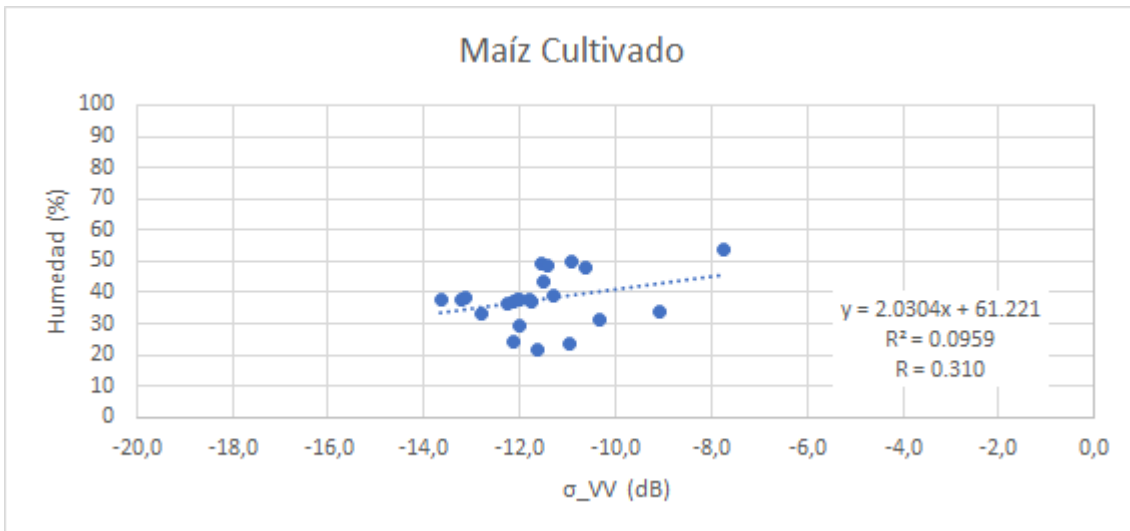


Figura 21: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de maíz cuando este se encuentra cultivado y la densidad de vegetación es máxima.

Se observa claramente en la figura 21 que cuando la densidad de vegetación del maíz es máxima, la estimación de humedad de suelo no será precisa, puesto que los datos no se correlacionan adecuadamente. Esto se debe a que la vegetación tiene una densidad tan alta que la señal radar es incapaz de penetrar en el suelo.

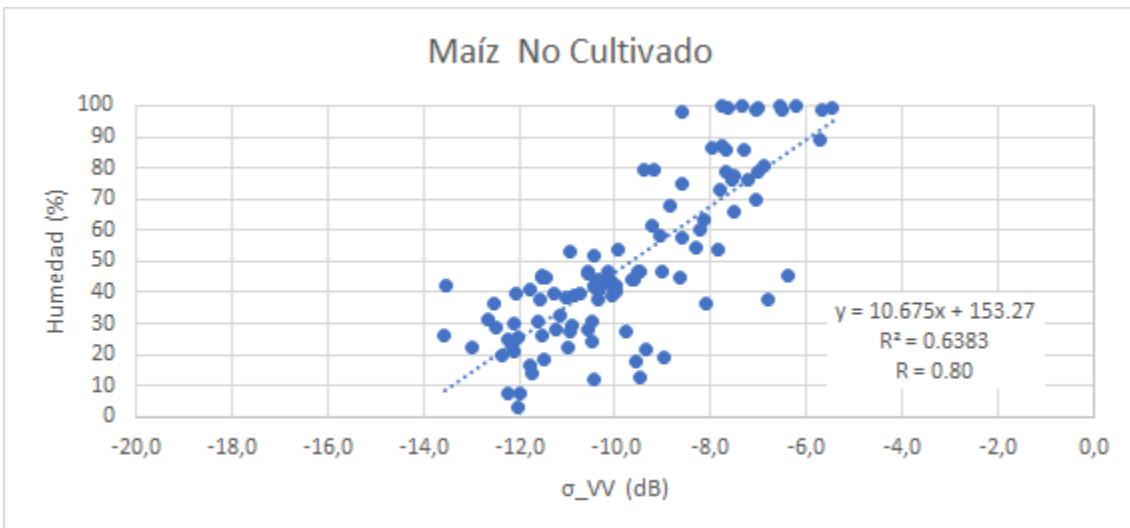


Figura 22: Correlación de los datos de humedad y retrodispersión (σ) en la parcela de cultivo de maíz cuando este no se encuentra cultivado y la densidad de vegetación es mínima.

Sin embargo, si se establece la relación cuando el suelo se encuentra desnudo y en ausencia del cultivo, la correlación es muy buena obteniendo un $R^2 = 0.64$. Por tanto, queda probado que la presencia de vegetación dificulta la estimación de HS a partir de la señal radar en banda C.

Anteriormente se ha mencionado que, con unos mapas de humedad más precisos, se esperaría obtener mejores resultados obteniendo mayor correlación con los valores de retrodispersión hallados en cada una de las parcelas. Otro factor importante a tener en cuenta para poder mejorar este trabajo sería realizar el mismo estudio con ángulos de incidencia inferiores a 30° , tal y como recomienda Filion *et al.*, 2015 en su estudio. En este trabajo el ángulo de incidencia en la zona de estudio es de 40° , por lo que con un ángulo inferior se esperaría tener mayor penetración en el suelo y obtener mejores resultados.

5.- Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede observar que existe una relación muy directa entre la retrodispersión radar medida con Sentinel-1 y la presencia de vegetación en el terreno. A medida que aumenta la densidad de vegetación se produce un descenso en la intensidad de retrodispersión radar.

Sin embargo, la presencia de vegetación no implica una afección negativa en la estimación de HS. En el caso del cultivo de pistachos y el terreno con vegetación silvestre, donde la densidad de vegetación es baja, los valores de retrodispersión son inferiores respecto a los obtenidos en la gravera, pero sus correlaciones con los valores de humedad han sido fuertes, siendo estas $R^2=0.61$ y $R^2=0.60$ respectivamente. Por el contrario, en las parcelas con densidad de vegetación alta, como es el caso de las encinas y los cultivos de maíz, las correlaciones obtenidas no fueron más débiles, siendo $R^2=0.44$ y $R^2=0.37$ respectivamente. En el caso del cultivo de maíz, se ha estudiado la correlación existente cuando este se encuentra cultivado, teniendo valores de densidad de vegetación máxima ($NDVI=0.99$), y cuando no se encuentra cultivado, con valores de $NDVI$ mínimos. Los resultados han mostrado que cuando la densidad de vegetación es máxima, los valores no se correlacionan con la humedad. Sin embargo, cuando el maíz no se encuentra muy desarrollado, la correlación aumenta hasta un $R^2=0.64$. Por tanto, se concluye que la señal radar de Sentinel-1 en banda C penetra adecuadamente en el terreno en situaciones donde la densidad de vegetación es baja. Por el contrario, conforme la densidad de vegetación aumenta, la correlación establecida entre los valores entre la señal radar y la HS va disminuyendo, dificultando su estimación.

Además, en el estudio realizado en la gravera, se ha establecido la relación existente entre la intensidad de retrodispersión radar y factores climatológicos. Existe una relación directa entre los valores de retrodispersión y precipitación. Además, tras contrastar volúmenes de precipitación similares entre las estaciones de invierno y verano, se ha observado que a bajas temperaturas el contenido de agua en el suelo permanece durante más tiempo

que en los meses con temperaturas más altas. Por tanto, la señal radar no depende únicamente de la precipitación sino también de otros factores climatológicos como la temperatura.

Por tanto, queda probado que las imágenes radar de Sentinel-1 son una herramienta útil para realizar estimaciones de HS, así como las imágenes ópticas de Sentinel-2 han dado un resultado satisfactorio en las estimaciones de densidad de vegetación mediante el índice NDVI para confirmar la relación existente entre la señal radar y el contenido de agua en el suelo en función de la cantidad de vegetación existente en el terreno.

Para futuros estudios, sería interesante repetir el estudio realizado con un ángulo de incidencia inferior a 30° donde la penetración de la señal radar sea mayor y con valores de humedad de mayor precisión a los que se ha tenido acceso.

6.- Bibliografía

- Barrett, B.W., Dwyer, E. and Whelan, P., 2009. Soil moisture retrieval from active spaceborne microwave observations: an evaluation of current techniques. *Remote Sens.* 1, 210-242.
- CAM (Comunidad de Madrid). Finca La Isla - Arganda del Rey. Recuperado el 20 de mayo de 2020. <https://www.comunidad.madrid/centros/finca-isla-arganda-rey>
- Chanzy, A. 2003. Evaporation from soils. In *Encyclopedia of water science*. B. A. Stewart and T. A. Howell Editors, Marcel Dekker Ed., USA
- Dubois, P. C., Van Zyl, J. y Engman., 1995. Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915-926.
- Enciso, J. M., Porter, D., y Périès, X. (2007). Uso de sensores de HS para eficientizar el riego. *Texas A&M AgriLife Extension Services*, 1-14.
- ESA (European Space Agency), 2020a. Descripción de SENTINEL-1. Recuperado el 15 de mayo de 2020. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
- ESA (European Space Agency), 2020b. Descripción de SENTINEL-2. Recuperado el 18 de mayo de 2020. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- Famiglietti, J.S., Rudnicki, J.W. and Rodell, M. 1998. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*. 210: 259-281.
- Filion, R., Bernier, M., Paniconi, C., Chokmani, K., Melis, M., Soddu, A., Talazac, M. and Lafortune, F-X, 2016. Remote sensing for mapping soil moisture and drainage potential in semi-arid regions: applications to the Campidano plain of Sardinia, Italy. *Science of the Total Environment*. 573, 862-876.
- Geogakakos, K.P. and Baumer, O.W. 1996. Measurement and utilization of on-site soil moisture data. *Journal of Hydrology*. 184: 131-152.
- Gorab, A., Zribi M., Baghdadi N., Mougnot B., Fanise P. and Chabaane Z. L., 2015. Retrieval of both soil moisture and texture using TerraSAR-X images. *Remote Sens.* 7, 10098-10116.
- Hégarat-Mascl, S. L., Zribi, M., Alem, F., Weisse, A. and Loumagne, C., 2002. Soil moisture estimation from ERS/SAR data: toward an operational methodology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12), 2647-2658.

- Huisman, J.A., Snepvangers, J., Bouten, W., Heuvelink, G.B. 2002. Mapping Spatial Variation in Surface Soil Water Content: Comparison of Ground-Penetrating Radar and Time Domain Reflectometry. *Journal of Hydrology*. 269: 194-207.
- Ines, A. V. M., Das, N. N., Hansen, J. W. and Njoku, E. G., 2013. Assimilation of remotely sensed soil moisture and vegetation with a crop simulation model for maize yield prediction, *Remote Sensing of Environment*, 138, 149-164.
- Jackson, T.J. 1980. Profile soil moisture from surface measurements. *Journal of Irrigation and Drainage*. 106(IR2): 81-92.
- Jönsson, A.M.; Eklundh, L.; Hellström, M.; Barring, L.; Jönsson, P. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 2719–2730.
- Li, X., Song, C., López, S., Li, Y. and López, J. F., 2015. Fast computation of bare soil surface roughness on a Fermi GPU. *Computers and Geosciences*, 82, 38-44.
- Lu, Z. and Meyer, D. J., 2002. Study of high SAR backscattering caused by an increase of soil moisture over a sparsely vegetated area: Implications for characteristics of backscattering. *Int. J. Rem. Sens.*, 23(6), 1063-1074.
- Narvekar, P. S., Entekhabi, D., Kim, S.-B. and Njoku, E.G., 2015. Soil moisture retrieval using L-band radar observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 53, 3492-3506.
- Ouchi, K. 2013. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. *Remote Sens*, 5(2), 716-807.
- Patel, P., Srivastava, H.S., Panigrahy S. and Parihar J.S., 2006. Comparative evaluation of the sensitivity of multipolarized multi-frequency SAR backscatter to plant density. *Int. J. Remo. Sens.*, 27(2), 293-305.
- Rodríguez-Iturbe, I. 2000. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*. 36: 3-9.
- SIAR (Servicio Integral de Asesoramiento al Regante), 2020. Información SIAR. Recuperado el 8 de junio de 2020. <http://crea.uclm.es/siar/informacion/#asesora>.
- 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.
- Wang, C., Qi, J., Moran, S. and Marsett, R., 2004. Soil moisture estimation in a semiarid rangeland using ERS-2 and TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 90, 178-189.

- Wang, L. and Qu, J. J., 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front Earth Sci Chin*, 3(2), 237-247.
- Wetzel, P.J. and CHANG, J.T. 1987. Concerning the relationship between evapotranspiration and soil moisture. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 26: 18-27.
- Zribi, M. and Dechambre, M., 2003. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 42-52.

7.- Anexos

Tabla II: Imágenes radar de Sentinel-1 con valores de retrodispersión en cada parcela.

Fecha	Gravera (dB)	Vegetación Silvestre (dB)	Pistachos (dB)	Encinas (dB)	Maíz (dB)
2016_01_04	-9.09	-15.12	-10.02	-12.71	-9.24
2016_01_10	-8.75	-14.80	-9.76	-12.19	-8.60
2016_01_28	-9.04	-11.05	-8.57	-11.97	-7.96
2016_02_09	-9.86	-15.04	-10.85	-12.61	-10.84
2016_02_15	-9.05	-14.87	-9.09	-13.13	-8.12
2016_02_21	-11.82	-14.85	-12.38	-13.58	-11.76
2016_02_27	-8.75	-13.41	-8.58	-12.54	-7.29
2016_03_04	-11.46	-15.43	-11.69	-13.39	-13.01
2016_03_10	-12.53	-17.01	-11.79	-13.74	-12.03
2016_03_16	-11.57	-16.55	-12.18	-14.36	-12.36
2016_03_22	-7.82	-12.43	-7.14	-11.68	-6.57
2016_03_28	-11.98	-14.40	-12.02	-12.54	-12.05
2016_04_03	-12.10	-16.59	-12.71	-13.74	-11.44
2016_04_09	-11.89	-15.71	-12.18	-13.32	-12.41
2016_04_15	-9.35	-15.45	-10.87	-11.72	-10.33
2016_04_21	-8.33	-12.42	-8.07	-11.46	-9.39
2016_04_27	-11.03	-14.47	-10.85	-13.00	-10.88
2016_05_03	-11.26	-13.83	-11.26	-12.39	-4.41
2016_05_09	-7.45	-11.68	-7.61	-11.28	-5.82
2016_05_15	-11.14	-11.62	-10.96	-12.20	-4.02
2016_05_21	-11.03	-11.40	-11.38	-12.23	-10.98
2016_05_27	-10.55	-10.45	-10.37	-11.90	-5.32
2016_06_02	-11.32	-11.82	-10.28	-12.69	-11.23
2016_06_08	-10.48	-11.60	-10.61	-12.40	-8.28
2016_06_14	-10.98	-14.75	-10.16	-13.59	-10.78
2016_07_02	-11.25	-16.66	-10.16	-13.85	-11.58
2016_07_08	-11.17	-17.56	-11.66	-13.63	-11.88
2016_07_14	-10.25	-17.66	-10.79	-14.17	-11.51
2016_07_26	-10.39	-17.04	-10.93	-14.45	-11.53
2016_08_01	-10.06	-17.43	-11.47	-13.80	-11.76
2016_08_07	-10.35	-16.98	-12.02	-14.13	-10.92
2016_08_13	-10.51	-17.40	-10.84	-13.90	-12.12
2016_08_19	-10.73	-17.24	-11.06	-15.01	-11.42
2016_08_25	-10.15	-17.15	-11.18	-14.14	-11.80
2016_08_31	-10.81	-17.63	-11.67	-13.83	-10.62
2016_09_06	-10.49	-17.75	-12.12	-14.22	-11.62
2016_09_12	-11.23	-16.81	-10.58	-13.65	-11.90
2016_09_18	-11.30	-18.24	-10.83	-14.40	-12.87
2016_09_24	-11.44	-17.75	-11.11	-12.52	-12.74
2016_09_30	-11.05	-17.51	-10.35	-12.95	-11.51
2016_10_06	-11.73	-17.99	-11.92	-11.92	-12.07

Tabla II: Imágenes radar de Sentinel-1 con valores de retrodispersión en cada parcela.

Fecha	Gravera (dB)	Vegetación Silvestre (dB)	Pistachos (dB)	Encinas (dB)	Maíz (dB)
2016_10_12	-9.15	-14.10	-10.15	-11.28	-11.14
2016_10_18	-9.53	-14.96	-9.02	-11.81	-6.25
2016_10_24	-7.43	-12.22	-8.94	-10.30	-7.03
2016_10_30	-9.62	-15.36	-11.31	-11.30	-4.70
2016_11_05	-8.44	-11.33	-9.64	-10.59	-9.55
2016_11_11	-9.38	-14.15	-10.96	-11.47	-9.08
2016_11_17	-10.06	-16.69	-11.21	-11.63	-10.37
2016_11_23	-8.42	-13.21	-9.56	-11.16	-6.51
2016_11_29	-7.87	-14.39	-9.24	-11.03	-6.22
2016_12_05	-8.07	-12.05	-8.76	-9.42	-5.45
2016_12_11	-8.87	-15.02	-9.12	-10.53	-7.21
2016_12_17	-8.95	-13.53	-9.47	-11.08	-7.56
2016_12_23	-9.70	-15.57	-11.14	-11.42	-8.29
2016_12_29	-9.97	-14.37	-10.95	-12.12	-11.17
2017_01_04	-11.59	-16.73	-10.97	-11.68	-9.57
2017_01_10	-10.82	-14.63	-11.70	-11.87	-11.22
2017_01_16	-13.40	-16.41	-13.00	-13.60	-10.56
2017_01_22	-14.10	-17.07	-12.63	-13.52	-10.44
2017_01_28	-9.42	-15.19	-9.20	-12.79	-7.66
2017_02_03	-9.21	-13.22	-7.60	-11.23	-5.69
2017_02_09	-11.90	-15.07	-10.42	-12.50	-9.94
2017_02_15	-8.79	-14.10	-8.18	-10.44	-5.72
2017_02_21	-11.44	-15.23	-10.05	-12.94	-9.62
2017_02_27	-11.22	-14.17	-10.99	-11.68	-10.48
2017_03_05	-11.32	-14.23	-11.09	-11.99	-9.48
2017_03_11	-11.83	-14.71	-11.08	-11.81	-10.95
2017_03_17	-11.01	-13.73	-11.29	-10.96	-13.55
2017_03_23	-11.56	-14.97	-10.89	-13.06	-11.52
2017_03_29	-11.71	-14.37	-11.20	-10.57	-12.10
2017_04_04	-11.45	-15.01	-11.52	-11.88	-12.09
2017_04_10	-11.64	-13.71	-11.30	-11.63	-12.50
2017_04_16	-11.35	-13.95	-12.42	-12.76	-11.47
2017_04_22	-11.02	-14.45	-11.24	-12.46	-12.25
2017_04_28	-11.06	-13.90	-10.70	-12.68	-11.99
2017_05_04	-10.81	-14.06	-10.75	-11.49	-12.65
2017_05_10	-10.63	-14.25	-10.98	-13.22	-10.50
2017_05_16	-10.88	-15.36	-11.38	-11.23	-9.00
2017_05_22	-10.81	-16.11	-10.96	-12.28	-6.40
2017_05_28	-10.31	-17.17	-10.82	-12.05	-12.52
2017_06_03	-7.05	-10.85	-7.19	-9.82	-6.79
2017_06_09	-10.47	-17.59	-10.45	-12.85	-10.72
2017_06_15	-9.88	-17.52	-10.48	-13.07	-11.53
2017_06_21	-10.95	-17.60	-10.61	-13.33	-10.92

Tabla II: Imágenes radar de Sentinel-1 con valores de retrodispersión en cada parcela.

Fecha	Gravera (dB)	Vegetación Silvestre (dB)	Pistachos (dB)	Encinas (dB)	Maíz (dB)
2017_06_27	-11.36	-17.27	-10.97	-12.98	-10.51
2017_07_03	-10.65	-17.72	-10.66	-13.35	-9.08
2017_07_09	-8.23	-14.23	-9.08	-12.32	-7.74
2017_07_15	-12.12	-18.21	-12.01	-13.00	-10.96
2017_07_21	-11.92	-17.92	-12.16	-12.78	-10.35
2017_07_27	-11.64	-17.74	-11.98	-12.91	-12.82
2017_08_02	-11.91	-16.65	-11.23	-13.18	-13.64
2017_08_08	-11.42	-16.41	-11.29	-13.46	-13.33
2017_08_14	-10.96	-15.99	-11.73	-13.72	-13.24
2017_08_20	-11.33	-15.45	-11.95	-14.14	-12.03
2017_08_28	-11.69	-16.32	-11.97	-14.30	-12.04
2017_09_01	-11.89	-15.43	-12.69	-13.87	-12.00
2017_09_07	-12.13	-15.68	-11.36	-13.70	-12.27
2017_09_13	-11.23	-15.81	-12.45	-13.85	-13.12
2017_09_19	-11.60	-16.27	-12.75	-14.29	-11.65
2017_09_25	-11.61	-16.14	-12.03	-12.68	-11.29
2017_10_01	-11.47	-16.28	-12.72	-12.94	-12.12
2017_10_07	-12.15	-16.11	-11.96	-11.76	-12.13
2017_10_13	-11.48	-17.16	-12.23	-12.93	-12.67
2017_10_19	-7.98	-10.56	-9.72	-11.80	-11.23
2017_10_25	-11.37	-16.73	-12.15	-12.63	-9.07
2017_10_31	-11.86	-17.22	-13.30	-12.43	-7.53
2017_11_06	-11.50	-16.53	-12.51	-12.62	-8.27
2017_11_12	-12.07	-18.54	-13.67	-13.35	-10.00
2017_11_18	-12.19	-18.34	-13.61	-14.36	-9.81
2017_11_24	-11.61	-18.20	-13.84	-13.26	-8.43
2017_11_30	-12.43	-16.05	-13.37	-13.26	-1.81
2017_12_06	-12.91	-18.48	-14.40	-15.04	-9.00
2017_12_12	-10.53	-16.66	-13.08	-13.66	-9.81
2017_12_18	-12.17	-17.08	-13.55	-14.20	-9.92
2017_12_24	-12.47	-17.79	-12.96	-12.99	-9.48
2017_12_30	-10.83	-15.95	-12.33	-13.30	-9.37
2018_01_05	-12.09	-16.53	-12.95	-13.59	-9.18
2018_01_11	-9.70	-14.67	-11.78	-12.28	-7.52
2018_01_17	-11.42	-15.94	-11.47	-12.77	-8.65
2018_01_23	-11.86	-16.56	-12.27	-13.05	-9.76
2018_01_29	-11.91	-17.04	-12.84	-14.10	-9.92
2018_02_04	-10.11	-12.44	-11.47	-11.98	-8.59
2018_02_10	-12.69	-16.19	-13.15	-13.55	-11.00
2018_02_16	-12.31	-15.79	-12.66	-13.14	-11.75
2018_02_22	-13.60	-17.12	-13.22	-14.85	-12.26
2018_02_28	-9.09	-11.52	-9.51	-10.40	-7.90
2018_03_06	-8.41	-13.31	-9.94	-11.45	-7.36

Tabla II: Imágenes radar de Sentinel-1 con valores de retrodispersión en cada parcela.

Fecha	Gravera (dB)	Vegetación Silvestre (dB)	Pistachos (dB)	Encinas (dB)	Maíz (dB)
2018_03_12	-8.65	-13.07	-11.03	-11.42	-6.88
2018_03_18	-8.47	-13.98	-10.49	-12.20	-7.04
2018_03_24	-9.75	-13.64	-10.35	-12.47	-7.67
2018_03_30	-10.01	-13.71	-10.29	-12.15	-8.96
2018_04_05	-10.40	-15.72	-11.90	-12.54	-11.52
2018_04_11	-6.01	-13.42	-9.79	-11.79	-7.00
2018_04_17	-7.74	-14.68	-10.47	-11.37	-9.63
2018_04_23	-10.53	-14.20	-12.51	-11.78	-11.26
2018_04_29	-7.53	-12.12	-9.23	-11.56	-8.52
2018_05_05	-10.79	-13.48	-10.99	-11.27	-11.44
2018_05_11	-10.14	-12.77	-10.48	-12.16	-11.09
2018_05_17	-10.96	-12.41	-11.73	-12.36	-10.64
2018_05_23	-9.92	-10.85	-10.97	-11.59	-7.62
2018_05_29	-8.96	-10.37	-9.49	-10.29	-7.75
2018_06_04	-9.44	-10.13	-11.39	-11.29	-8.83
2018_06_10	-9.54	-10.40	-12.15	-11.71	-11.31
2018_06_16	-12.26	-11.15	-12.06	-11.95	-10.93
2018_06_22	-11.78	-13.47	-11.86	-12.93	-10.55
2018_06_28	-11.29	-15.91	-11.58	-12.94	-10.01
2018_07_04	-11.73	-17.06	-11.98	-12.62	-10.00
2018_07_10	-11.74	-17.32	-12.17	-12.66	-10.33
2018_07_16	-11.92	-17.91	-12.57	-13.79	-9.98
2018_07_22	-11.68	-18.21	-12.67	-12.83	-10.07
2018_07_28	-11.98	-17.92	-12.67	-13.54	-10.17
2018_08_03	-11.33	-17.70	-12.02	-12.08	-10.44
2018_08_09	-11.62	-17.63	-12.17	-12.62	-10.16
2018_08_15	-11.27	-17.40	-11.44	-12.34	-10.38
2018_08_21	-11.93	-17.16	-11.68	-13.62	-10.34
2018_08_27	-11.29	-16.76	-10.66	-12.68	-10.09
2018_09_02	-11.59	-17.52	-11.38	-13.68	-13.54
2018_09_08	-11.48	-15.00	-10.19	-12.50	-11.61
2018_09_14	-12.13	-17.56	-12.14	-11.67	-10.56
2018_09_20	-11.23	-16.53	-11.83	-11.41	-8.11
2018_09_26	-12.09	-17.31	-11.64	-9.90	-12.06
2018_10_02	-11.91	-17.11	-11.85	-9.56	-11.76
2018_10_08	-12.00	-17.58	-12.26	-9.99	-12.17
2018_10_14	-8.25	-11.21	-8.19	-8.92	-7.61
2018_10_20	-8.93	-12.57	-9.00	-9.79	-7.75
2018_10_26	-12.54	-16.59	-11.58	-10.68	-11.57
2018_11_01	-8.80	-15.03	-8.22	-10.13	-7.83
2018_11_07	-9.73	-16.20	-10.05	-10.22	-9.51
2018_11_13	-9.82	-16.12	-9.94	-10.88	-11.60
2018_11_19	-7.78	-13.22	-9.47	-10.42	-7.53

Tabla II: Imágenes radar de Sentinel-1 con valores de retrodispersión en cada parcela.

Fecha	Gravera (dB)	Vegetación Silvestre (dB)	Pistachos (dB)	Encinas (dB)	Maíz (dB)
2018_11_25	-8.31	-14.01	-9.40	-10.56	-7.80
2018_12_01	-8.93	-15.81	-9.59	-11.60	-8.59
2018_12_07	-10.79	-16.78	-10.74	-10.71	-10.44
2018_12_13	-8.39	-12.11	-8.63	-9.66	-7.05
2018_12_19	-9.34	-13.56	-10.56	-10.61	-8.21
2018_12_25	-11.94	-16.88	-11.25	-11.57	-11.04
2018_12_31	-12.75	-17.40	-12.46	-12.46	-12.15

Tabla III: Imágenes ópticas de Sentinel-2 con valores del índice NDVI de cada una de las parcelas.

Fecha	Gravera	Vegetación Silvestre	Pistachos	Encinas	Maíz
2016_02_04	0.13	0.19	0.14	0.49	0.14
2016_04_27	0.12	0.29	0.18	0.58	0.21
2016_06_23	0.16	0.37	0.25	0.41	0.43
2016_06_26	0.16	0.31	0.25	0.42	0.60
2016_07_03	0.15	0.20	0.25	0.36	0.56
2016_07_06	0.16	0.20	0.28	0.40	0.66
2016_07_13	0.12	0.19	0.25	0.38	0.69
2016_07_16	0.11	0.18	0.25	0.37	0.69
2016_07_23	0.11	0.18	0.24	0.36	0.65
2016_07_26	0.12	0.18	0.25	0.36	0.72
2016_08_02	0.10	0.16	0.23	0.31	0.62
2016_08_05	0.10	0.15	0.22	0.30	0.68
2016_08_12	0.10	0.15	0.23	0.28	0.58
2016_08_15	0.11	0.15	0.21	0.25	0.49
2016_08_22	0.09	0.14	0.23	0.28	0.61
2016_09_01	0.11	0.17	0.25	0.30	0.56
2016_09_04	0.09	0.14	0.21	0.25	0.50
2016_09_21	0.13	0.17	0.28	0.46	0.39
2016_09_24	0.13	0.17	0.28	0.47	0.39
2016_10_01	0.12	0.15	0.27	0.57	0.28
2016_10_11	0.14	0.16	0.30	0.69	0.26
2016_10_31	0.19	0.25	0.38	0.81	0.28
2016_11_10	0.20	0.26	0.42	0.80	0.27
2016_11_13	0.20	0.24	0.41	0.81	0.22
2016_12_23	0.27	0.26	0.34	0.70	0.18
2017_02_08	0.28	0.35	0.18	0.74	0.21
2017_02_21	0.31	0.37	0.19	0.77	0.18
2017_03_10	0.16	0.49	0.18	0.79	0.23
2017_03_20	0.13	0.57	0.16	0.81	0.21
2017_04_09	0.06	0.76	0.07	0.91	0.17
2017_04_12	0.07	0.76	0.09	0.87	0.15
2017_05_02	0.10	0.72	0.26	0.59	0.12

Tabla III: Imágenes ópticas de Sentinel-2 con valores del índice NDVI de cada una de las parcelas.

Fecha	Gravera	Vegetación Silvestre	Pistachos	Encinas	Maíz
2017_05_19	0.13	0.40	0.24	0.55	0.16
2017_05_22	0.12	0.34	0.23	0.56	0.15
2017_06_11	0.11	0.17	0.22	0.32	0.08
2017_06_18	0.08	0.18	0.25	0.32	0.10
2017_06_21	0.08	0.18	0.25	0.31	0.09
2017_07_01	0.08	0.17	0.25	0.33	0.12
2017_07_11	0.05	0.17	0.20	0.39	0.06
2017_07_21	0.06	0.18	0.22	0.41	0.08
2017_07_28	0.09	0.19	0.24	0.35	0.09
2017_07_31	0.07	0.18	0.22	0.35	0.07
2017_08_17	0.09	0.19	0.25	0.30	0.08
2017_08_20	0.08	0.18	0.24	0.32	0.05
2017_09_06	0.11	0.20	0.27	0.31	0.11
2017_09_16	0.13	0.22	0.27	0.36	0.11
2017_09_19	0.13	0.20	0.26	0.32	0.13
2017_09_29	0.11	0.19	0.25	0.39	0.11
2017_10_06	0.12	0.22	0.29	0.58	0.13
2017_10_09	0.13	0.20	0.29	0.54	0.12
2017_10_16	0.10	0.19	0.28	0.47	0.11
2017_10_19	0.16	0.21	0.34	0.57	0.17
2017_10_26	0.11	0.22	0.28	0.60	0.14
2017_10_29	0.13	0.23	0.26	0.59	0.18
2017_11_18	0.13	0.20	0.24	0.56	0.12
2017_12_05	0.14	0.21	0.15	0.57	0.13
2017_12_18	0.15	0.19	0.14	0.52	0.15
2017_12_23	0.13	0.18	0.14	0.52	0.11
2018_01_17	0.20	0.20	0.16	0.53	0.18
2018_01_19	0.20	0.22	0.17	0.57	0.18
2018_01_22	0.18	0.20	0.14	0.51	0.17
2018_01_29	0.16	0.22	0.14	0.55	0.17
2018_02_08	0.17	0.21	0.16	0.54	0.18
2018_02_18	0.13	0.18	0.10	0.42	0.13
2018_02_22	0.13	0.17	0.10	0.41	0.13
2018_02_26	0.12	0.17	0.10	0.40	0.12
2018_03_28	0.12	0.22	0.10	0.58	0.11
2018_04_17	0.09	0.28	0.12	0.71	0.16
2018_04_19	0.09	0.29	0.12	0.73	0.22
2018_04_27	0.10	0.39	0.18	0.78	0.15
2018_05_04	0.09	0.46	0.21	0.80	0.19
2018_06_13	0.11	0.66	0.27	0.48	0.14
2018_06_16	0.08	0.61	0.26	0.48	0.14
2018_06_21	0.08	0.44	0.26	0.43	0.19
2018_06_23	0.08	0.36	0.26	0.40	0.13

Tabla III: Imágenes ópticas de Sentinel-2 con valores del índice NDVI de cada una de las parcelas.

Fecha	Gravera	Vegetación Silvestre	Pistachos	Encinas	Maíz
2018_06_26	0.08	0.29	0.24	0.34	0.13
2018_07_03	0.07	0.25	0.27	0.41	0.14
2018_07_06	0.07	0.23	0.26	0.38	0.13
2018_07_08	0.08	0.21	0.25	0.36	0.14
2018_07_11	0.08	0.23	0.26	0.36	0.16
2018_07_13	0.07	0.21	0.25	0.34	0.10
2018_07_18	0.09	0.20	0.27	0.33	0.15
2018_07_23	0.08	0.19	0.26	0.32	0.12
2018_07_26	0.07	0.19	0.27	0.35	0.09
2018_07_28	0.08	0.20	0.28	0.35	0.15
2018_07_31	0.08	0.19	0.27	0.33	0.17
2018_08_02	0.08	0.18	0.26	0.31	0.12
2018_08_07	0.11	0.19	0.22	0.26	0.15
2018_08_12	0.08	0.18	0.25	0.29	0.13
2018_08_15	0.07	0.18	0.27	0.30	0.11
2018_08_17	0.08	0.18	0.25	0.28	0.14
2018_08_20	0.09	0.19	0.27	0.29	0.18
2018_08_25	0.11	0.22	0.30	0.33	0.14
2018_08_27	0.10	0.21	0.28	0.32	0.17
2018_08_30	0.09	0.20	0.26	0.30	0.17
2018_09_01	0.08	0.19	0.26	0.31	0.11
2018_09_04	0.09	0.20	0.26	0.30	0.12
2018_09_16	0.09	0.23	0.28	0.38	0.17
2018_09_19	0.08	0.21	0.24	0.42	0.19
2018_09_24	0.07	0.20	0.28	0.55	0.10
2018_09_29	0.08	0.20	0.27	0.60	0.20
2018_10_01	0.09	0.21	0.31	0.67	0.15
2018_10_04	0.08	0.20	0.30	0.70	0.12
2018_10_06	0.08	0.20	0.27	0.70	0.17
2018_10_16	0.08	0.20	0.29	0.80	0.15
2018_10_24	0.09	0.21	0.29	0.80	0.13
2018_10_29	0.11	0.23	0.29	0.81	0.22
2018_11_03	0.11	0.23	0.30	0.80	0.17
2018_11_30	0.13	0.28	0.36	0.81	0.22
2018_12_10	0.12	0.31	0.39	0.91	0.24
2018_12_30	0.14	0.29	0.32	0.80	0.24

Tabla IV: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2016

Día	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16
1	2.45	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
3	0.41	0.2	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	2.86

4	3.26	0	3.31	19.58	0	1.43	2.04	0	0	0	11.63	9.79
5	0	0.2	0	0.82	0	0	0.61	0	0	0	15.1	0.2
6	0.41	1.43	0	0	12.04	0	4.49	0	0	0	0	0
7	0	8.36	3.14	0	1.22	0	0	0	0	0	0.2	0.2
8	0.82	0	0	0	16.52	0	0	0	0	0	0	0.2
9	5.92	0.82	0	0	11.02	0	0	0.2	0	0	0	0.2
10	5.1	0	0	2.04	11.63	0	0	0	0	0	0.2	0
11	8.36	3.88	0	4.49	4.08	0	0	0	0	0	0.2	0.2
12	0.2	5.1	0	9.18	0.61	0	0	0	0	21.62	0	0.41
13	0	2.65	0	0	0.82	0	0	0	6.32	1.02	0	0
14	1.63	0.82	0	0	0	0	0	0	0.2	0.41	0.2	4.08
15	0	0	0	1.63	0	3.47	0	0	0	0.2	0	1.43
16	0	0	0	9.79	0	0	0	0	0	0.2	0	1.63
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.24	0.2	0
18	0	1.63	4.08	0	0	0	0	0	0	2.04	0	0
19	0	0	15.3	8.98	0	0	0	0.41	0	6.53	0.2	0
20	0.2	0	0.61	22.24	0	0	0.41	0	0	9.59	14.28	0
21	0	0	21.22	0	0	0	0	0	0	0.82	3.88	0.2
22	0.41	0	4.08	3.67	0	0	0	0	0	8.57	1.63	0
23	0	0	0	3.26	0	0	0	0	0	13.06	7.55	0.2
24	0.2	1.84	0	0.2	0	0	0	0	0	1.63	4.69	0.2
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.69	0
26	0.2	6.94	0.2	0	0	0	0	0.41	0	0.2	13.46	0.2
27	0.2	0.2	1.22	0	0	0	0	0.2	0	0	5.1	0
28	1.84	0	0.2	1.43	3.26	0	0	0	0	0.2	0	0.2
29	0.82	0	0	1.22	0.2	0	0	0	0	0.2	0	0
30	0		0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2
31	0		0.61		0		0	0		0.2		0.2

Tabla V: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2017

Día	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	ago-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17
1	0	0.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79
2	0	7.96	0	0	0	0.82	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2.45	0	0	1.22	0	0	0	0	0.98	0
4	0.2	0.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0.98	0
5	0	5.3	0	0	1.43	0	0.2	0	0	0	0.2	0
6	0.2	0	0	0	0	0	17.93	0	0	0	0	0
7	0	0.41	0	0	0	0	34.08	0	0	0	0	0
8	0.2	0	0	0	0	0	1.38	0	0	0	0.2	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	3.26	0	0	6.12	0	0	0	0	0	0	0.79
11	0	4.08	0	0	7.34	0	0	0	0	0	0	11.82
12	0.2	6.94	0	0	3.88	0	0	0	0	0	0	0
13	0	9.79	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla V: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2017

Día	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	ago-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17
15	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	3.94	0	0
18	0	0	0	0	4.49	0	0	0	0	23.84	0	0
19	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0	0
20	0	0.2	0	1.02	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.39	0.2	0.2
22	0	0	2.24	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0
23	0	1.02	0.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
24	0	0	0.82	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2
25	0	0	5.71	1.84	0	4.73	0	0	0	0	0.2	0.98
26	0	0	2.65	0	0.2	1.58	0	0	0	0.2	0	1.97
27	18.77	0	2.04	0	0	0	0	0.39	0	0	0	2.17
28	0	0	0	0	0	0	0	11.43	0	0	3.74	0
29	0.41		0	5.71	0	0	0	0	0	0	0.79	0
30	0.41		0	1.43	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0		0		0		0	0		0		0.98

Tabla VI: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2018

Día	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18	ago-18	sep-18	oct-18	nov-18	dic-18
1	0	0.59	27.78	0	0.2	14.6	0	0	0	0	0	0.2
2	0	0	9.65	0.79	0	15.8	0	0	1.6	0	0	0
3	0	0	6.11	1.77	0	0	0	0	0.2	0	0	0
4	0	14.97	10.44	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
5	6.9	6.3	5.71	0	0.39	1	0	0	0	0	10.8	0.2
6	23.84	0	0.98	4.53	0.2	9	0	0	0	0	0	0.2
7	7.29	0	0	1.97	5.71	0.2	0	0	0	0	2	0.2
8	0.2	0	1.97	0.98	0.39	6.4	0	0	1.4	0	4.2	0.2
9	1.38	0	8.67	5.32	0.2	0	0	0	2.4	5	0	0.2
10	1.18	0	19.7	17.14	0	0.2	0	0	0	2.4	0.8	0.2
11	0.2	0	1.58	0.2	0	0	0	0	0	2	0.8	0.2
12	0	0.2	0.59	6.11	0	0	0	0	1	0.4	0.2	0
13	5.91	0	1.77	0.39	0	0	0	0	0	0	0.2	9.8
14	0	0	15.96	0.2	0	0	0	0	0	5	0.4	0.2
15	0.2	0	0.79	7.49	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2
16	0	0	4.14	1.38	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2
17	0.2	0	9.46	0.2	2.36	0	0	0	1.8	0	0	0.2
18	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.2	5.2	7	0.2
19	0	0	5.71	0	0.39	0	0	0	0	7	1	1.2
20	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	4.2	6.6	0
21	0	0	0	0	8.44	0	0	0	0	1.6	3	0

Tabla VI: Registro de precipitaciones de la estación meteorológica de la Finca para el año 2018

Día	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18	ago-18	sep-18	oct-18	nov-18	dic-18
22	0.2	0	0	0	3.02	0	0	0	0	0.2	0	0
23	0	0	1.58	0	0.4	0	0	0	0	0	3	0.2
24	0.2	0	1.38	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2
25	3.35	0	0	0	14.47	0	0	0	0	0	9	0.2
26	0.59	0	0	0	0.2	0	0	0	0	1.4	0.6	0.2
27	0	10.05	0	0	0	0	0	0	0	3.2	0	0
28	0	21.28	0	0	5.83	0	0	0	0	0	0.2	0.2
29	0		0	4.73	4.42	0.4	0	0	0	0	3.4	0.2
30	0		2.96	4.14	1	4.8	0	0	0	11	1.2	0
31	0.2		0		0		0	0		1.8		0.2

Tabla VII: Registros de humedad para las distintas parcelas proporcionados por el programa Copernicus

Fecha	Gravera (%)	Vegetación Silvestre (%)	Pistachos (%)	Encinas (%)	Maíz (%)
2016_01_04	58.0	62.4	65.5	43.7	57.5
2016_01_10	60.5	89.6	87.5	58.1	86.5
2016_01_28	89.5	40.2	42.5	92.8	39.0
2016_02_09	46.0	72.2	75.5	37.2	63.5
2016_02_15	67.0	22.4	20.5	67.3	16.5
2016_02_21	28.5	80.3	83.0	25.2	86.0
2016_02_27	76.5	21.5	23.0	77.0	22.5
2016_03_04	26.0	5.2	5.0	19.6	3.0
2016_03_10	0.5	13.0	14.5	5.2	20.0
2016_03_16	18.0	100.0	100.0	11.2	100.0
2016_03_22	100.0	22.0	23.0	100.0	25.5
2016_03_28	28.5	50.6	46.0	21.3	38.0
2016_04_15	57.0	86.6	86.0	56.8	79.5
2016_04_21	96.0	43.2	39.0	87.7	29.5
2016_04_27	45.5	50.2	46.5	48.4	44.5
2016_05_03	59.5	60.3	58.0	55.0	42.0
2016_05_21	70.5	70.0	72.5	63.1	62.0
2016_05_27	77.5	49.5	46.0	66.4	41.0
2016_06_02	53.5	65.3	61.5	54.4	60.5
2016_06_08	67.0	42.4	39.5	70.8	52.0
2016_07_02	37.0	20.8	19.5	46.8	26.0
2016_07_08	16.5	25.0	25.0	23.1	43.5
2016_07_14	27.5	35.8	35.0	25.9	49.5
2016_07_26	34.0	30.2	29.0	37.2	37.0
2016_08_01	19.0	34.7	33.5	31.6	50.0
2016_08_07	35.5	30.7	29.5	36.9	37.0
2016_08_13	26.0	30.2	32.5	32.3	48.5
2016_08_19	29.5	31.1	29.0	27.6	38.0
2016_08_25	26.0	31.9	32.5	34.2	48.0

Tabla VII: Registros de humedad para las distintas parcelas proporcionados por el programa Copernicus

Fecha	Gravera (%)	Vegetación Silvestre (%)	Pistachos (%)	Encinas (%)	Maíz (%)
2016_08_31	33.5	70.6	68.5	31.6	78.0
2016_10_12	68.5	50.7	49.0	74.4	64.0
2016_10_18	63.5	95.3	94.5	54.5	99.5
2016_10_24	100.0	28.0	26.5	96.9	37.5
2016_10_30	41.5	53.5	52.5	31.4	58.5
2016_11_11	57.5	35.7	31.5	55.9	40.0
2016_11_17	46.0	89.3	88.5	42.9	98.5
2016_11_23	90.0	96.5	95.5	91.0	100.0
2016_11_29	98.0	88.3	91.0	98.0	99.5
2016_12_05	89.0	73.1	71.0	85.2	76.0
2016_12_11	80.0	61.7	62.5	76.9	76.5
2016_12_17	69.5	54.2	51.5	62.3	54.5
2016_12_23	68.0	29.6	29.0	58.9	32.5
2016_12_29	42.0	18.5	17.5	31.2	18.0
2017_01_04	9.5	27.7	26.5	19.7	28.0
2017_01_10	36.5	25.4	25.0	29.9	28.0
2017_01_16	33.5	7.2	8.0	26.6	12.0
2017_01_22	7.0	83.3	82.0	6.7	86.0
2017_01_28	72.0	93.3	95.0	85.0	99.0
2017_02_03	81.0	61.9	59.0	90.8	53.5
2017_02_09	64.0	89.2	90.0	65.9	89.0
2017_02_15	80.0	51.4	49.5	88.0	44.0
2017_02_21	59.0	24.7	27.0	54.4	24.5
2017_02_27	25.5	42.5	46.0	21.9	46.5
2017_03_05	43.5	32.8	31.5	38.6	27.5
2017_03_11	37.5	38.2	34.0	35.0	26.5
2017_03_17	49.5	42.5	41.0	44.1	45.0
2017_03_23	51.5	42.0	37.0	45.3	30.0
2017_03_29	57.5	26.7	24.0	49.4	21.0
2017_04_04	39.0	42.1	37.5	31.1	29.0
2017_04_10	61.5	25.8	23.5	48.9	18.5
2017_04_16	47.5	33.6	29.0	29.6	25.0
2017_04_22	51.5	6.5	6.5	40.4	7.5
2017_04_28	20.0	38.7	34.5	7.3	31.5
2017_05_04	50.0	19.4	20.0	44.6	30.5
2017_05_10	23.5	43.3	41.0	19.5	47.0
2017_05_16	48.5	37.1	35.0	46.7	45.5
2017_05_22	46.0	31.7	30.0	40.6	36.5
2017_05_28	32.0	32.7	33.5	33.8	38.0
2017_06_03	34.0	33.2	34.0	31.8	39.5
2017_06_09	36.0	33.5	37.0	32.1	45.5
2017_06_15	41.0	32.2	33.0	29.2	39.5
2017_06_21	30.5	14.6	19.0	30.7	27.0

Tabla VII: Registros de humedad para las distintas parcelas proporcionados por el programa Copernicus

Fecha	Gravera (%)	Vegetación Silvestre (%)	Pistachos (%)	Encinas (%)	Maíz (%)
2017_06_27	23.0	30.9	31.5	8.9	34.0
2017_07_03	36.0	42.2	43.5	29.8	54.0
2017_07_09	50.0	21.0	19.5	41.4	23.5
2017_07_15	26.0	22.3	25.0	23.2	31.5
2017_07_21	25.5	26.9	27.5	18.7	33.5
2017_07_27	28.0	37.5	37.5	26.2	38.0
2017_08_02	34.0	35.4	38.5	37.2	37.5
2017_08_14	28.5	44.6	45.0	30.5	37.5
2017_08_20	35.5	47.3	49.0	42.6	37.5
2017_08_26	32.0	33.0	35.5	42.9	29.5
2017_09_01	21.5	43.2	45.5	28.4	36.5
2017_09_07	31.0	47.0	48.5	38.6	38.5
2017_09_13	35.0	32.0	33.5	43.1	22.0
2017_09_19	17.0	39.1	43.5	28.3	39.0
2017_09_25	31.0	37.7	38.5	31.9	24.0
2017_10_01	23.0	39.9	42.0	35.0	34.5
2017_10_07	33.0	36.5	38.0	35.8	29.5
2017_10_13	27.5	77.5	82.5	32.8	80.5
2017_10_19	77.5	21.3	20.5	70.1	24.0
2017_10_25	17.5	21.6	21.0	21.8	20.5
2017_10_31	18.5	5.1	7.0	21.7	13.0
2017_11_06	2.5	10.1	10.5	2.5	13.5
2017_11_12	8.0	9.7	9.5	9.4	11.5
2017_11_18	6.0	11.0	11.0	9.6	15.0
2017_11_24	11.0	10.0	11.0	10.9	24.5
2017_11_30	16.0	2.0	2.0	9.7	7.0
2017_12_06	1.5	64.0	65.0	2.1	65.0
2017_12_12	64.0	21.3	20.5	62.4	24.5
2017_12_18	27.0	11.3	10.5	22.7	12.5
2017_12_24	12.5	17.5	16.5	12.3	21.5
2017_12_30	25.0	89.0	89.0	19.2	79.5
2018_01_05	93.0	68.8	70.0	88.0	66.0
2018_01_11	69.5	38.9	39.5	66.8	45.0
2018_01_17	58.0	29.6	26.5	39.1	27.5
2018_01_23	37.5	96.3	98.0	33.9	98.0
2018_02_04	91.5	17.4	17.0	93.6	22.5
2018_02_10	31.0	17.5	15.0	18.7	14.0
2018_02_16	19.5	1.0	1.0	20.6	7.5
2018_02_22	2.0	100.0	100.0	1.2	100.0
2018_03_06	99.5	89.8	92.5	99.9	81.0
2018_03_12	88.0	79.2	82.5	85.1	70.0
2018_03_18	77.0	71.6	74.5	73.8	78.5
2018_03_24	72.5	20.9	24.0	67.7	19.0

Tabla VII: Registros de humedad para las distintas parcelas proporcionados por el programa Copernicus

Fecha	Gravera (%)	Vegetación Silvestre (%)	Pistachos (%)	Encinas (%)	Maíz (%)
2018_03_30	18.5	34.9	32.0	16.1	26.0
2018_04_05	39.5	72.0	74.5	38.3	79.0
2018_04_11	87.0	55.5	51.5	69.4	44.0
2018_04_17	62.0	43.7	41.0	60.8	39.5
2018_04_23	54.5	46.3	44.0	47.6	44.5
2018_05_05	57.5	98.3	97.5	50.2	99.5
2018_05_23	100.0	98.8	98.0	99.6	100.0
2018_05_29	100.0	74.9	75.5	100.0	68.0
2018_06_04	70.5	84.6	82.5	74.2	91.0
2018_06_10	88.0	55.3	51.5	88.6	53.0
2018_06_16	58.5	40.1	38.0	61.3	47.0
2018_06_22	50.5	32.3	31.5	44.1	41.5
2018_06_28	36.0	27.9	30.0	33.6	40.5
2018_07_04	33.5	38.4	36.5	25.5	41.5
2018_07_10	42.0	36.1	36.5	40.7	42.0
2018_07_16	35.5	34.0	33.0	35.4	39.0
2018_07_22	36.5	30.1	33.0	35.1	43.5
2018_07_28	35.5	30.9	34.0	26.3	42.0
2018_08_03	29.0	36.5	40.5	26.4	47.0
2018_08_09	37.0	38.5	39.5	30.6	42.5
2018_08_15	40.0	36.0	38.5	36.4	44.0
2018_08_21	36.5	40.8	40.0	32.1	44.0
2018_08_27	38.0	39.5	39.5	40.9	42.0
2018_09_02	38.0	37.0	37.0	38.9	46.0
2018_09_14	35.5	33.2	32.0	37.1	36.5
2018_09_20	27.0	26.1	30.5	34.1	39.5
2018_09_26	18.5	35.9	35.5	19.9	41.0
2018_10_02	25.0	19.0	19.0	35.9	23.0
2018_10_08	5.5	69.4	67.5	18.4	87.0
2018_10_20	83.0	31.4	28.5	73.8	37.5
2018_10_26	35.5	43.0	42.0	35.9	53.5
2018_11_01	58.5	45.3	43.0	45.7	46.5
2018_11_07	61.0	23.6	21.5	48.9	31.0
2018_11_13	39.0	69.0	65.5	27.7	77.5
2018_11_19	80.5	60.5	63.0	74.9	73.0
2018_11_25	72.0	68.0	65.5	58.2	75.0
2018_12_01	84.5	38.3	37.0	72.6	52.0
2018_12_07	53.5	92.9	91.0	41.6	98.5
2018_12_13	98.5	50.2	47.5	96.1	60.0
2018_12_19	66.0	36.6	33.5	55.3	38.5