

# Índices para el seguimiento de cultivos a partir de observaciones Sentinel-1 GRD

**Píldoras formativas - Grupo SAR**  
**Asociación Española de Teledetección**



*30 de mayo de 2024*

*Jesús Álvarez Mozos*

**upna**

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

- 1.-Introducción
- 2.-Conceptos básicos
- 3.-Mecanismos de retrodispersión en suelos agrícolas
- 4.-Índices para el seguimiento de cultivos
- 5.-Caso de estudio
- 6.-Ideas finales



# 1.-Introducción

La teledetección permite adquirir observaciones periódicas de la superficie terrestre, lo que resulta idóneo para el seguimiento de fenómenos dinámicos como el desarrollo de la vegetación. En el ámbito agrícola esto resulta de gran interés y utilidad para el seguimiento de los cultivos y su fenología, para la detección de anomalías o para la estimación de la cosecha.

Información como los datos de NDVI de Sentinel-2 o Landsat son utilizados por distintos actores del sector primario, desde las administraciones, empresas de todo tipo, empresas asesoras y proveedoras de servicios, cooperativas y asociaciones agrarias y agricultores individuales.



La teledetección radar también puede ser útil para el seguimiento de cultivos. Además de su independencia de la cobertura nubosa, las observaciones radar proporcionan información complementaria a las observaciones multiespectrales, que puede ser de interés para muchos casos. Entre los datos que proporcionan los sensores radar, los productos GRD son más fácilmente utilizables que los SLC, por su menor volumen de datos y procesado más sencillo. Además, últimamente se están poniendo a disposición del usuario datos ya procesados (*Analysis Ready Data, ARD*) que facilitan su uso por usuarios no expertos.

En esta píldora vamos a revisar algunos índices orientados al seguimiento de cultivos que se han propuesto para Sentinel-1.



## -Sentinel-1:

Sentinel-1 es la misión radar del programa Copernicus. Es una constelación de dos satélites idénticos que incorporan un sensor radar en banda C (5.405 GHz, 5.6 cm):

-Sentinel-1A: 3/abril/ 2014 – activo

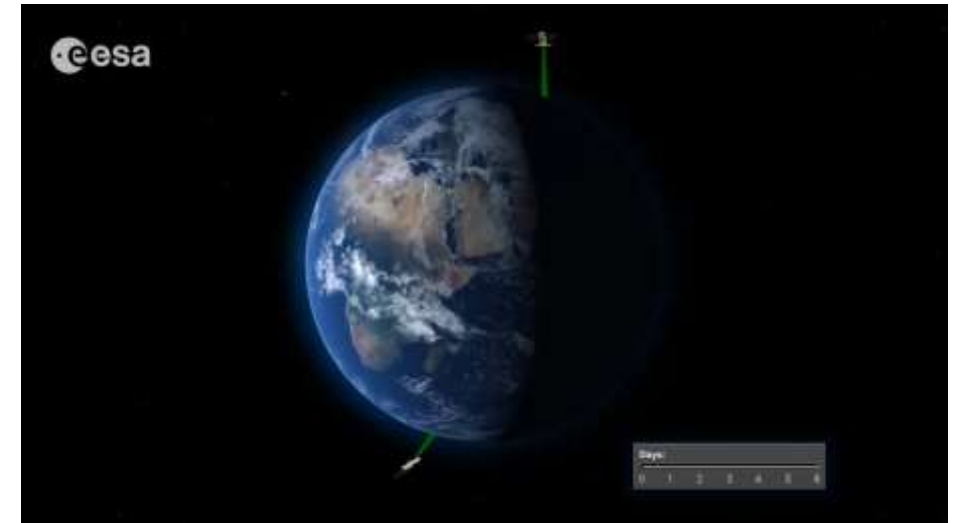
-Sentinel-1B: 25/abril/2016 – 23/diciembre/2021

Proporciona observaciones sistemáticas:

-Revisita de 12 días

- 6 días combinando S-1A y B

- incluso menos combinando distintas órbitas



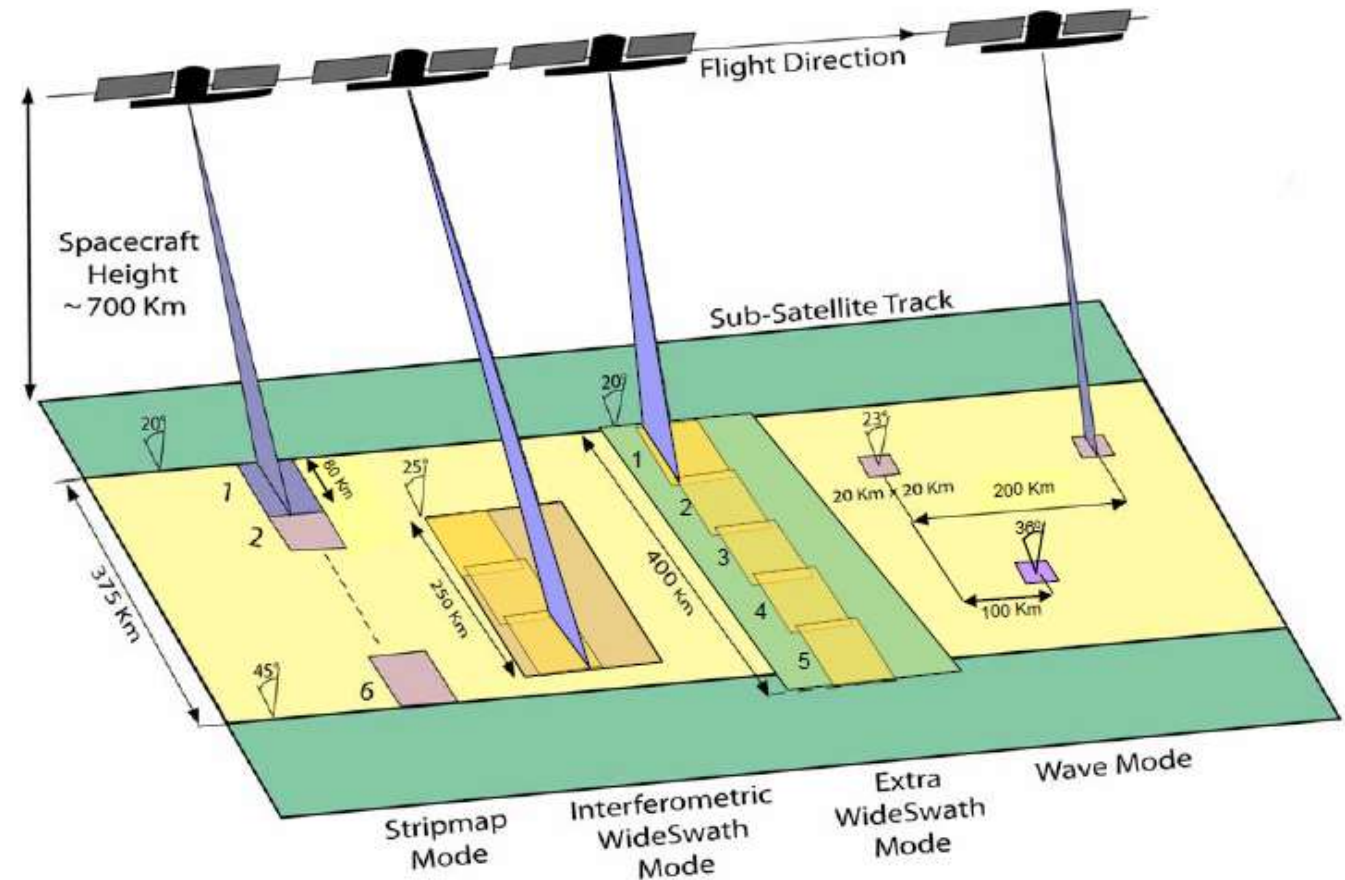
Su independencia de la cobertura nubosa hace que sea un tipo de sensor idóneo para el seguimiento de fenómenos dinámicos.

# 1.-Introducción

## -Sentinel-1:

El modo de observación predeterminado sobre las masas continentales es el Interferometric WideSwath mode (IW) que permite generar un swath de 250 km de ancho:

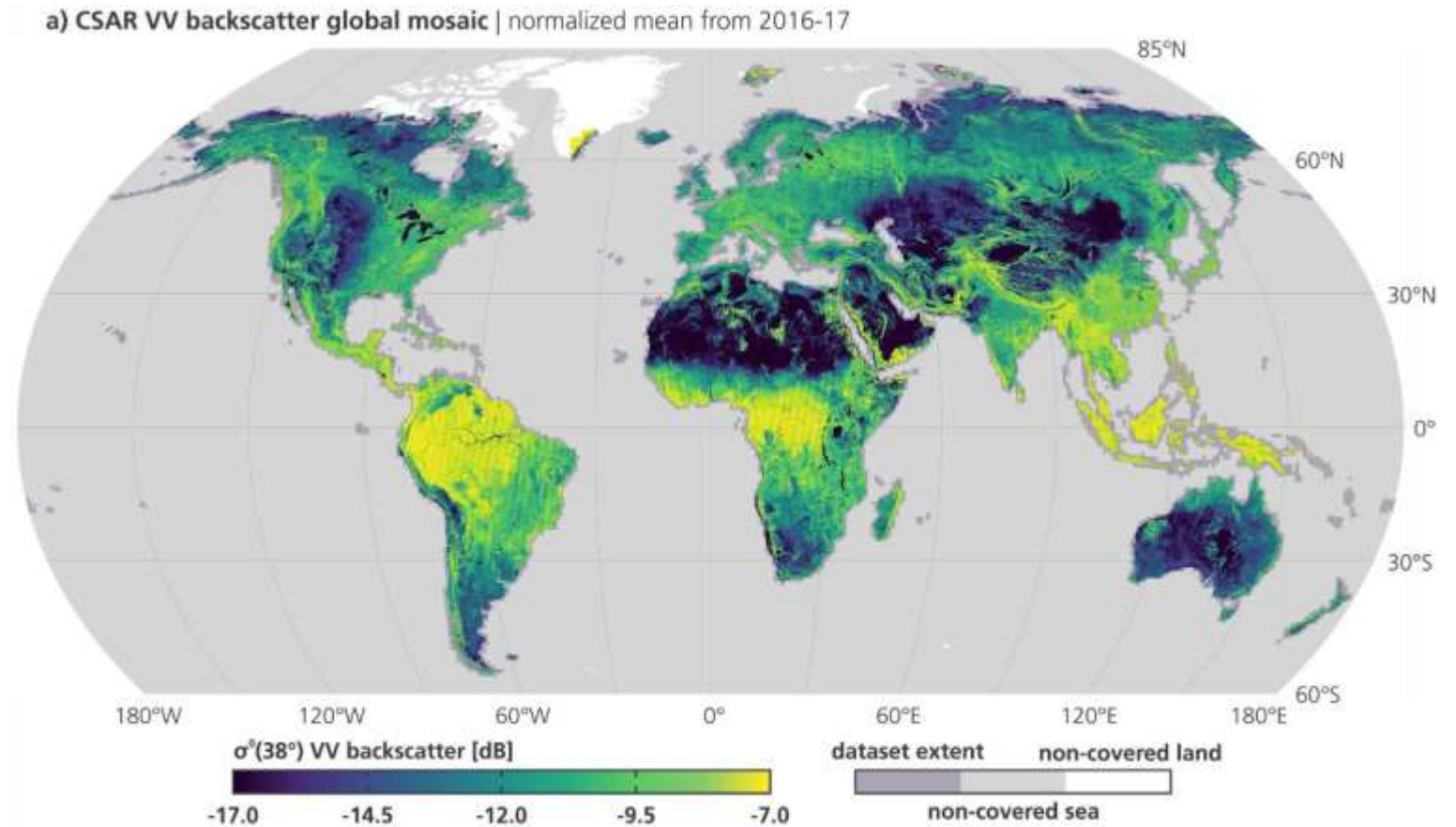
Parameter	Interferometric Wide-swath mode (IW)
Polarisation	Dual (HH+HV, VV+VH)
Access (incidence angles)	31° - 46°
Azimuth resolution	20 m
Ground range resolution	5 m



## -Sentinel-1:

Su ámbito de aplicación es diverso:

- Polos, criosfera
- Desastres y emergencias
- Vigilancia del medio marino
- Riesgos geológicos
- Mapeo de los bosques, agua y agricultura





## -Sentinel-1:

Para el estudio de cubiertas vegetales hay que tener en cuenta que proporciona información complementaria a la que aportan otros sensores.

Sus observaciones responden principalmente a características geométricas (forma, tamaño y orientación) y características dieléctricas (contenido de humedad, salinidad, etc.) de las cubiertas o de sus elementos.





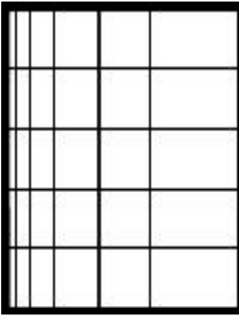
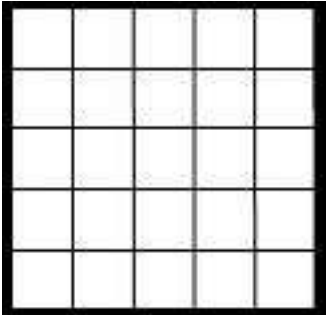


## -Sentinel-1:

Las imágenes adquiridas por Sentinel-1 se distribuyen principalmente como productos de nivel 1 de dos tipos:

-Single Look Complex (SLC)

-Ground Range Detected (GRD)

	SLC	GRD
Geometría		
	Slant range	Ground range
Dato	Complejo Amplitud y fase	Detectado Intensidad (16 bit)
N Looks	1	4x1
Tamaño	~4 GB	~600MB

### -Retrodispersión:

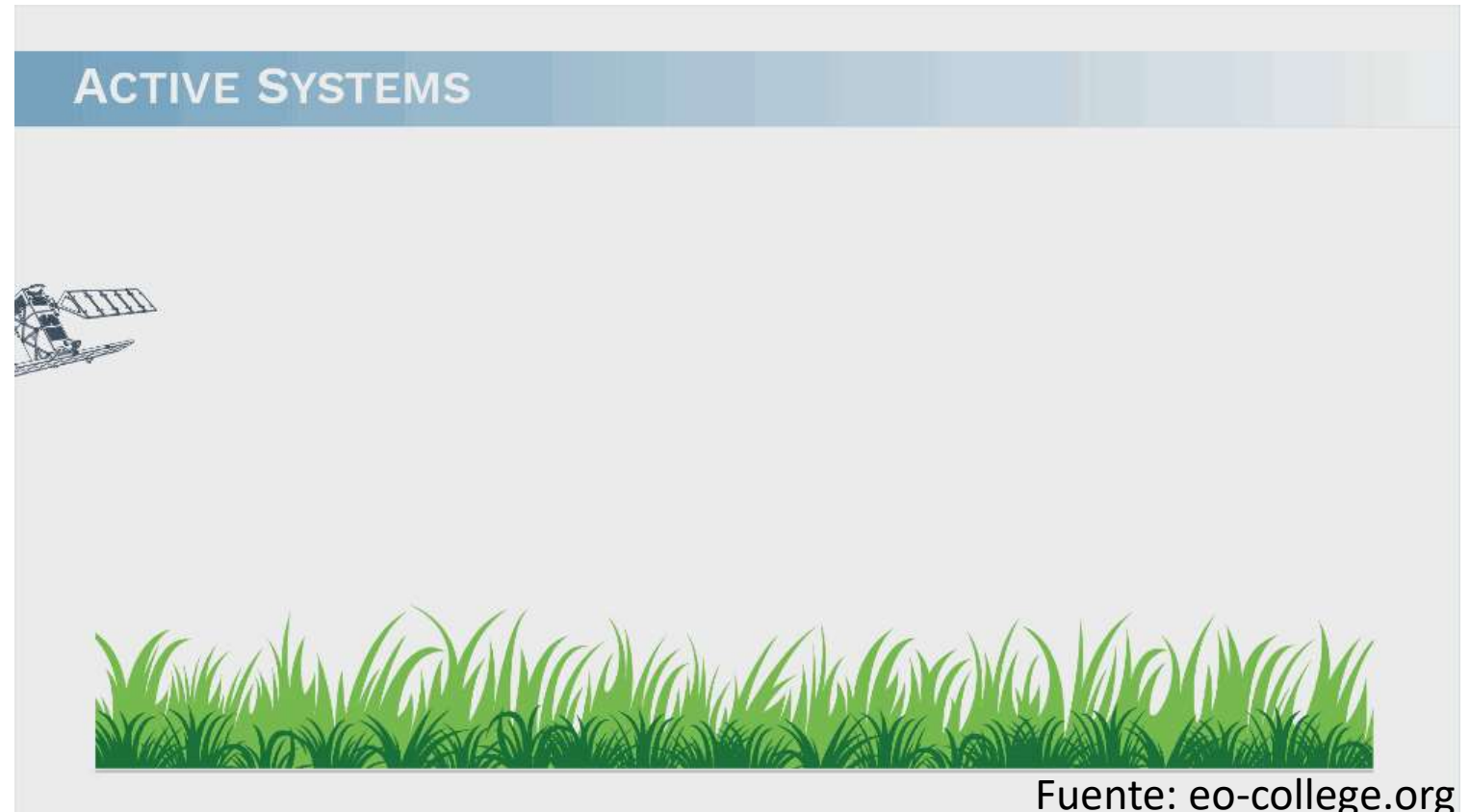
Los sensores radar emiten un pulso de microondas con unas características determinadas hacia la superficie terrestre y reciben el eco de retorno, cuyas características variarán en función de las propiedades de las cubiertas y elementos observados.

La potencia recibida de retorno depende de la transmitida inicialmente y de características del sensor y del objeto observado.

$$P_r = P_t \frac{GA_e}{(4\pi R^2)^2} \cdot \sigma$$

$\sigma$  es la sección equivalente del radar (rcs, *radar cross section*) y representa la capacidad de un objeto de dispersar el pulso recibido en la dirección de retorno al sensor.

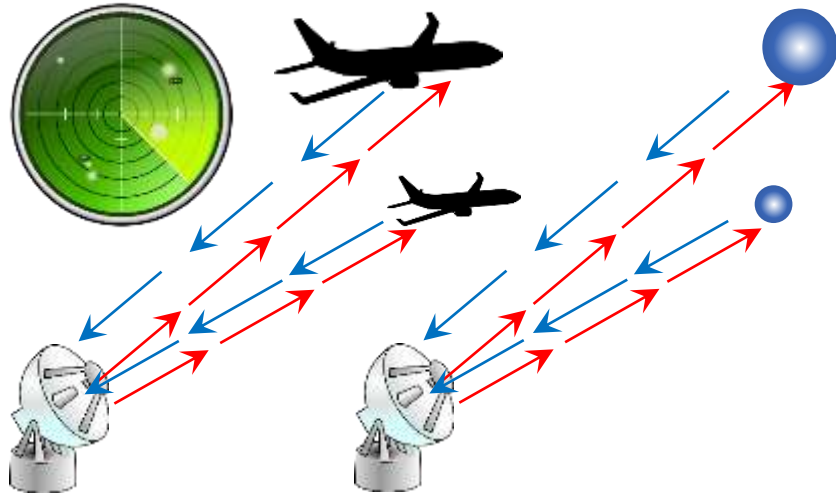
Depende del tamaño y material (carac. dieléctricas) del objeto observado.



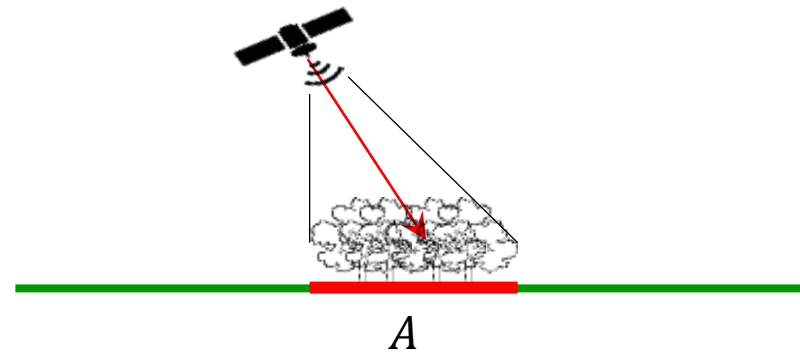
Fuente: eo-college.org

### -Retrodispersión:

Para objetos puntuales,  $\sigma$  se define como el área de un reflector isotrópico ideal (esfera) que retrodispersa la misma cantidad de energía que el objeto observado. Se mide, por tanto, en unidades de superficie ( $m^2$ ).



En objetos distribuidos, como las cubiertas del terreno observadas por sensores de observación de la Tierra,  $\sigma$  se normaliza por el área observada, de modo que obtenemos el coeficiente de retrodispersión  $\sigma^0$  que representa el comportamiento dispersivo medio de los objetos presentes en un píxel:



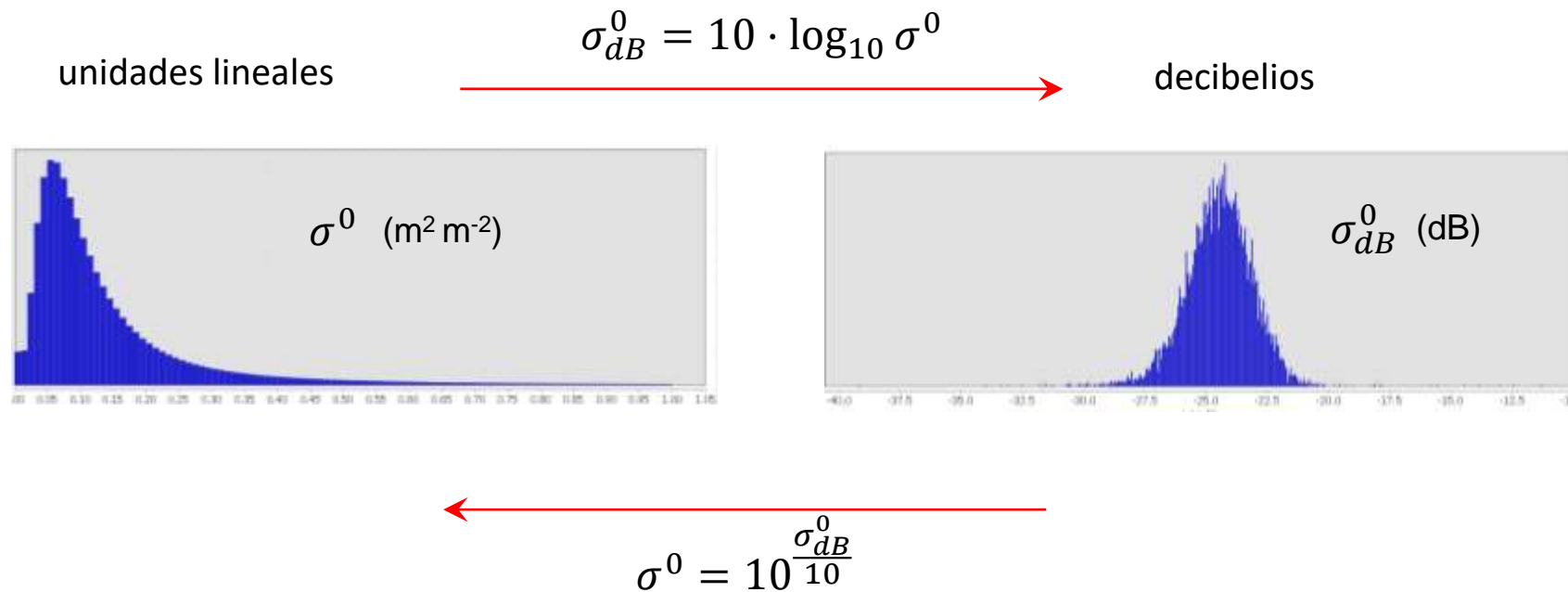
$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} \quad (m^2 m^{-2})$$

$\sigma^0$  es en principio una magnitud adimensional aunque se dice que tiene unidades lineales.

### -Retrodispersión:

$\sigma^0$  puede variar en diversos órdenes de magnitud. Típicamente toma valores muy bajos pero pueden producirse retornos muy intensos en determinadas condiciones.

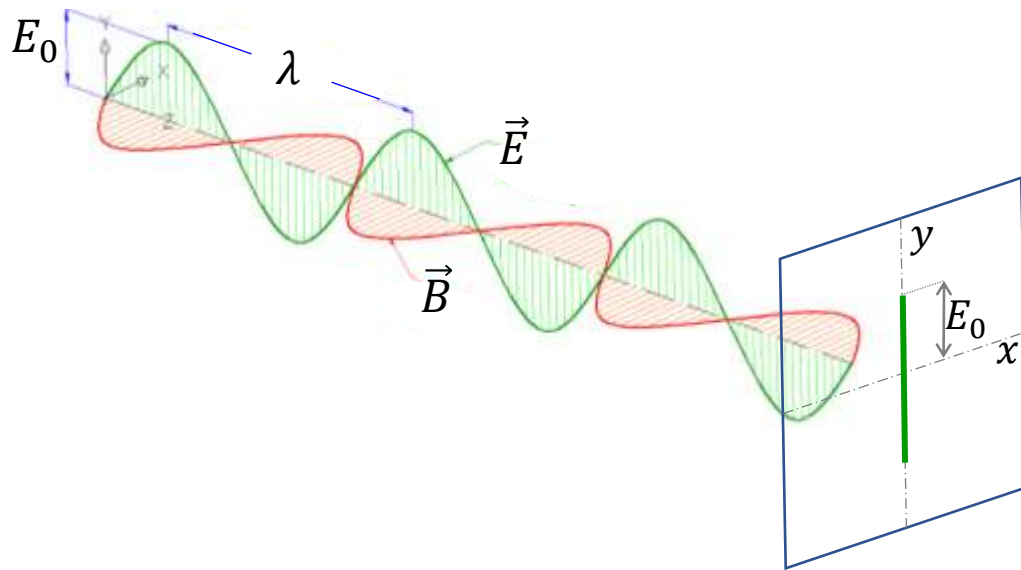
Por este motivo es habitual transformar sus unidades a decibelios (dB) mediante la siguiente expresión logarítmica:



### -Polarización:

La polarización hace referencia a la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética.

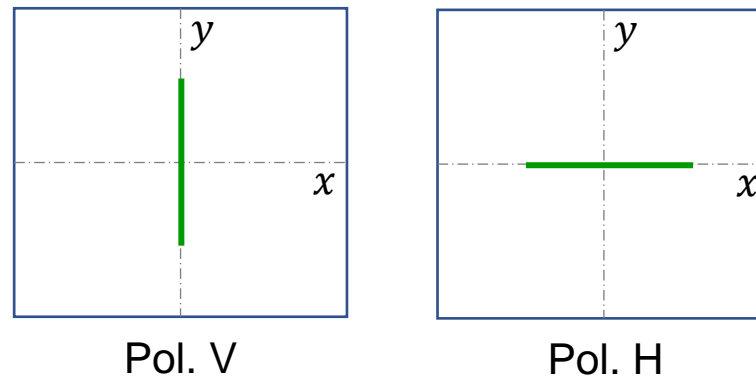
En el caso más sencillo (una onda plana) se considera que su polarización es lineal, dado que la proyección de la onda en un plano perpendicular a su dirección de propagación da como resultado una línea.



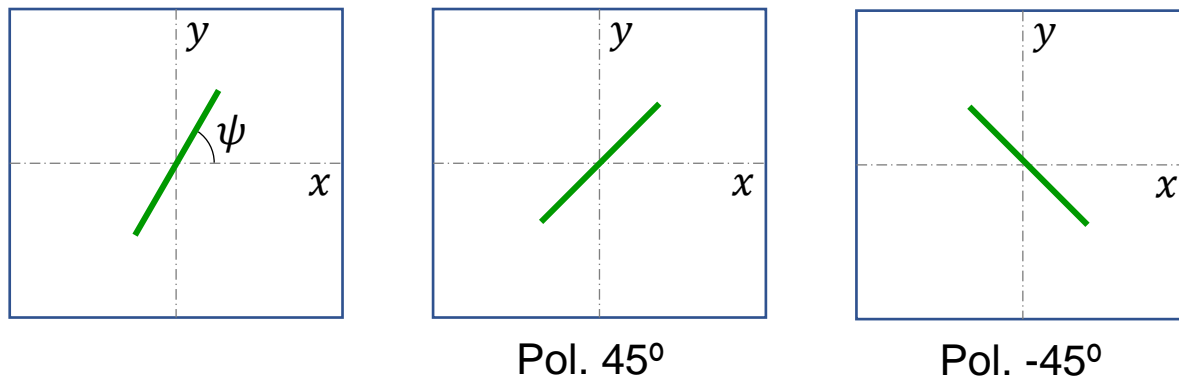
Cuando esa línea es vertical, representa que el campo eléctrico  $\vec{E}$  oscila en el plano vertical (yz) y se habla de una onda con polarización vertical (V).

### -Polarización:

Las ondas planas pueden tener polarización Vertical, Horizontal:



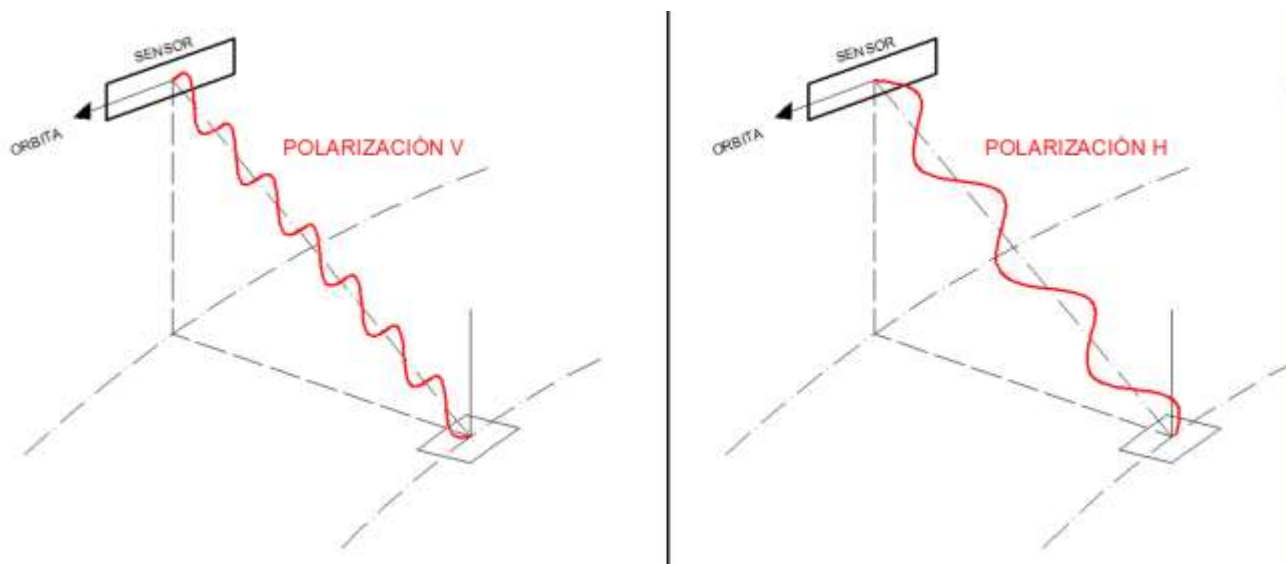
u otras en función del ángulo de orientación ( $\psi$ ) que define el campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) respecto al plano horizontal ( $xz$ ):



También hay ondas con polarización circular...

### -Polarización:

Los sensores radar transmiten un pulso y reciben el pulso retrodispersado. En este caso se tiene en cuenta la polarización del pulso transmitido y la del pulso recibido, con lo que la polarización en la que opera un sensor se denomina mediante dos letras (en base lineal H o V) y puede ser directa (HH o VV) o cruzada (HV o VH).



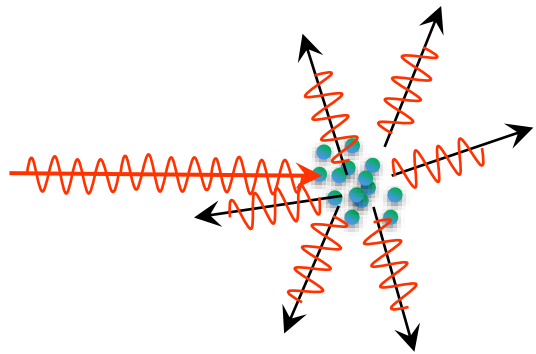
**Pol directa: VV, HH**  
**Pol cruzada: HV, VH**

Un sensor radar, en cuanto a su polarización, puede ser de: polarización simple (single pol): VV o HH  
polarización doble (dual pol): VV-VH o HH-HV  
polarización cuádruple (quad pol): VV-VH-HV-HH

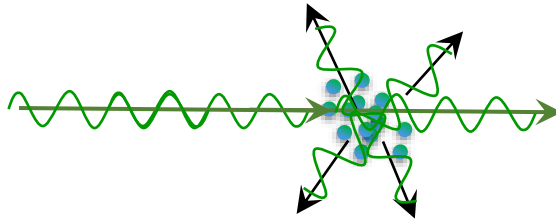
### 3.-Mecanismos de retrodispersión

#### -Propagación de ondas:

Una onda que se propaga en el espacio y se encuentra con una serie de objetos, sufrirá procesos distintos en función de la relación entre el tamaño de los objetos y la longitud de onda ( $\lambda$ ):



$\lambda \approx \text{objetos}$   
**Dispersión difusa**



$\lambda > \text{objetos}$   
**Atenuación**



$\lambda \gg \text{objetos}$   
**Propagación**

Las características dieléctricas, la densidad, la forma-orientación de los objetos también influyen en el proceso:

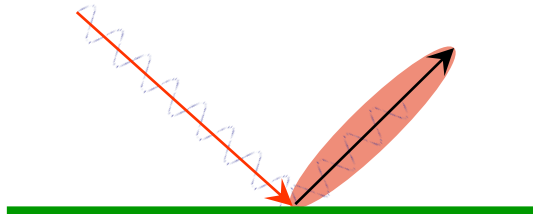
- Constante dieléctrica y densidad alta  $\rightarrow$  Dispersión difusa
- Orientación y forma aleatoria  $\rightarrow$  Dispersión difusa
- Orientación y forma ordenada  $\rightarrow$  Fenómenos distintos en función de la polarización



### 3.-Mecanismos de retrodispersión

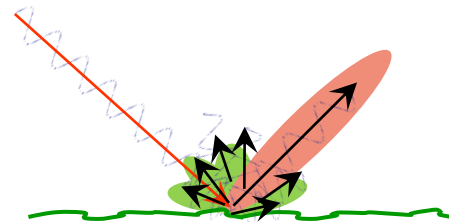
#### -Propagación de ondas:

Cuando la onda se encuentra con una superficie o interfaz entre dos medios (suelo, agua, etc.), la forma o rugosidad de la interfaz también determina el tipo de interacción:



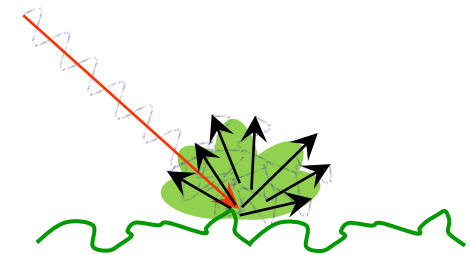
Superficie lisa  
disposición ordenada

**Reflexión especular**



Caso intermedio

**Combinación  
especular – difusa**

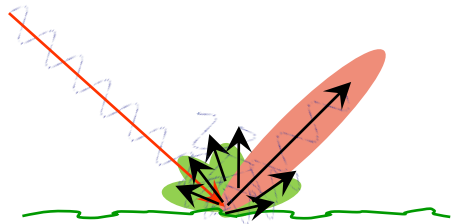


Superficie rugosa  
disposición aleatoria

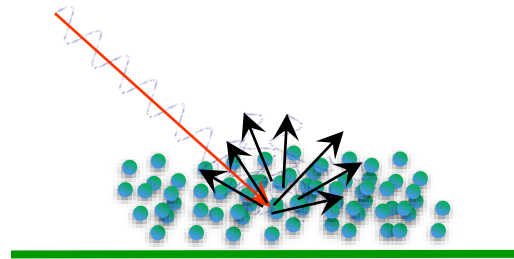
**Dispersión difusa**

#### -Mecanismos de retrodispersión:

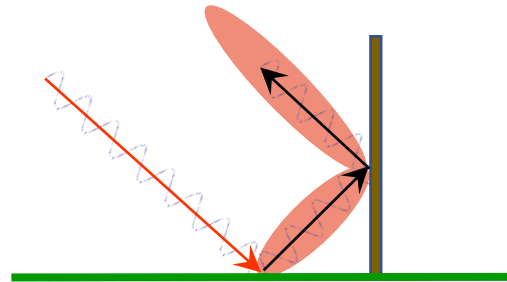
Para describir el comportamiento retrodispersor de los objetos observados se habla de cuatro tipos o mecanismos básicos de retrodispersión:



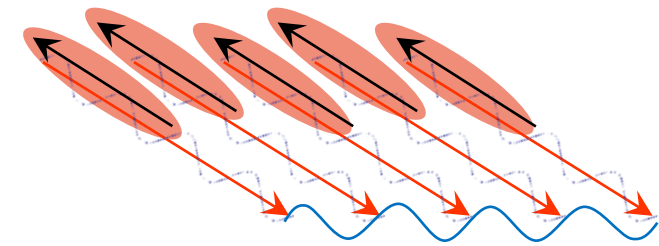
**Retrodispersión de superficie**



**Retrodispersión de volumen**



**Retrodispersión de doble rebote**



**Retrodispersión de Bragg**

### 3.-Mecanismos de retrodispersión

-En cubiertas agrícolas:

Podemos tener distintos mecanismos de retrodispersión en función de las características de la vegetación y su fase fenológica.

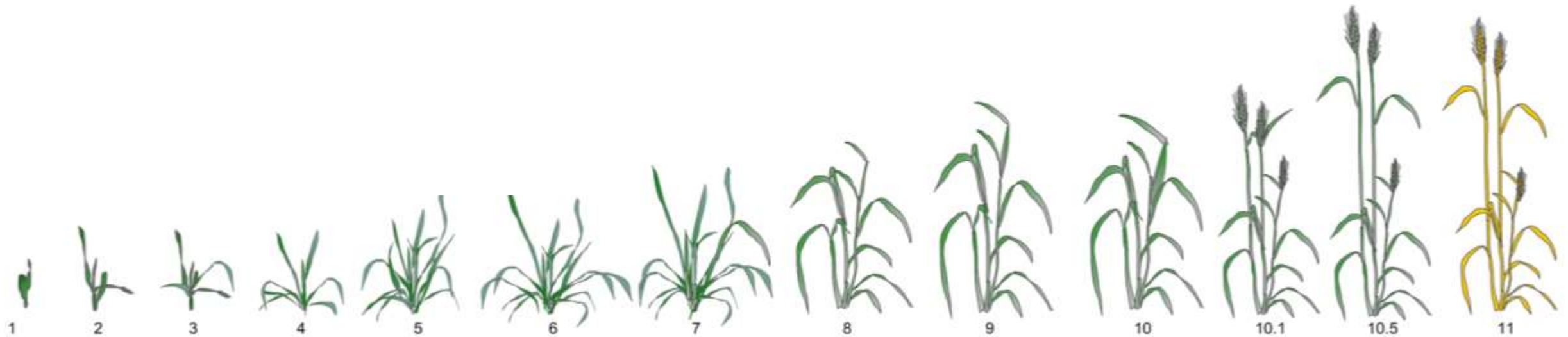
**Trigo en banda C:**

Tamaño elementos  $< \lambda$

Disposición ordenada

Orientación vertical

→ Retrodispersión de superficie (suelo) atenuada en la polarización VV



### 3.-Mecanismos de retrodispersión

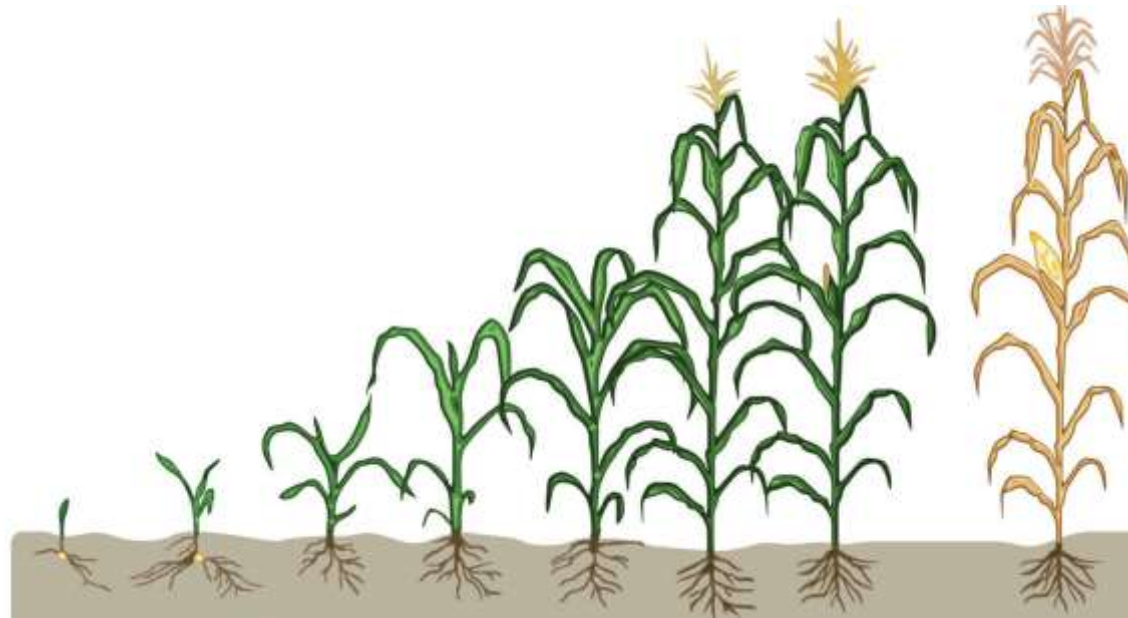
-En cubiertas agrícolas:

Podemos tener distintos mecanismos de retrodispersión en función de las características de la vegetación y su fase fenológica.

**Maíz en banda C:**

Tamaño elementos  $\geq \lambda$   
Disposición ordenada  
Orientación diversa

→ Retrodispersión de volumen, sobre todo aparente en VH



### -Ratios de polarización:

Los ratios de polarización directa y de polarización cruzada permiten extraer información de interés:

Ratio de polarización directa: 
$$p = \frac{\sigma_{HH}^0}{\sigma_{VV}^0}$$

$p$  es sensible tanto a la humedad del suelo como a su rugosidad,  $p \leq 1$  para retrodispersión superficial, pero se aproxima a 1 cuando la rugosidad aumenta. En cubiertas con retrodispersión de doble rebote toma valores superiores a 1.

En cultivos y condiciones de observación que producen doble rebote (e.g. arroz en banda X) ha demostrado sensibilidad al desarrollo de la vegetación (Lopez-Sanchez et al., 2011).

*Lopez-Sanchez, J.M., Ballester-Berman, J.D., Hajnsek, I., 2011. First Results of Rice Monitoring Practices in Spain by Means of Time Series of TerraSAR-X Dual-Pol Images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 4, 412–422. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2047634>*



### -Ratios de polarización:

Los ratios de polarización directa y de polarización cruzada se han propuesto desde hace tiempo:

$$\text{Ratio de polarización cruzada: } q = \frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0}$$

En condiciones donde predomina la retrodispersión superficial  $q$  es prácticamente insensible a la humedad del suelo pero es muy sensible a su rugosidad.

En cubiertas vegetales  $q$  se relaciona con la cantidad de vegetación o biomasa, y potencialmente es un buen índice para el seguimiento de cultivos como el trigo (Schlund & Erasmi, 2020) y otros cultivos de invierno (cebada o colza) y verano (maíz, girasol o soja) (Veloso et al., 2017).

*Schlund, M., Erasmi, S., 2020. Sentinel-1 time series data for monitoring the phenology of winter wheat. Remote Sensing of Environment 246, 111814. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111814>*

*Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J.-F., Ceschia, E., 2017. Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. Remote Sensing of Environment 199, 415–426. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.015>*



### -Ratios de polarización:

Al igual que los datos de  $\sigma^0$  los ratios pueden presentar distribuciones muy asimétricas, por lo que se suelen transformar a dB:

$$p_{dB} = 10 \log_{10} p = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{HH}^0}{\sigma_{VV}^0} \right) = \sigma_{HH,dB}^0 - \sigma_{VV,dB}^0$$

$$q_{dB} = 10 \log_{10} q = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0} \right) = \sigma_{VH,dB}^0 - \sigma_{VV,dB}^0$$

Hay estudios en los que se ha trabajado en unidades lineales (Schulz et al., 2024), pero más habitualmente se ha optado por los dB (Lopez-Sanchez et al., 2011; Veloso et al., 2017).

Schulz, C., Förster, M., Vulova, S.V., Rocha, A.D., Kleinschmit, B., 2024. Spectral-temporal traits in Sentinel-1 C-band SAR and Sentinel-2 multispectral remote sensing time series for 61 tree species in Central Europe. *Remote Sensing of Environment* 307, 114162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114162>



### -Ratios de polarización:

Algunos autores han trabajado con una versión normalizada del ratio  $q$ , que en este caso pasa a tomar valores entre 0 y 1. Rolle et al. (2022) han denominado a este ratio normalizado *Polarimetric Ratio Index*:

$$IPR_t = \frac{q_t - q_{min}}{q_{max} - q_{min}}$$

Donde  $q_{max}$  y  $q_{min}$  son los valores máximo y mínimo de  $q$  para la parcela de interés durante la campaña agrícola. Se puede tomar  $q$  en unidades lineales o dB, aunque resulta más conveniente calcularlo en dB.

Rolle, M., Tamea, S., Claps, P., Ayari, E., Baghdadi, N., Zribi, M., 2022. Analysis of Maize Sowing Periods and Cycle Phases Using Sentinel 1&2 Data Synergy. *Remote Sensing* 14, 3712. <https://doi.org/10.3390/rs14153712>





### -Radar Vegetation Index:

Para tratar de hallar un índice sensible únicamente a la vegetación Kim y Van Zyl (2001) propusieron el denominado Radar Vegetation Index (RVI), formulado como:

$$RVI = \frac{8\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0 + 2\sigma_{HV}^0}$$

RVI normalmente toma valores entre 0 y 1 y da una indicación de la retrodispersión de volumen. Valores de RVI cercanos a 0 indican dispersión superficial y valores crecientes se relacionan con el desarrollo de las cubiertas vegetales.

RVI es relativamente insensible a otros parámetros de las cubiertas como la humedad del suelo o la rugosidad. Además, es también poco sensible a variaciones en el ángulo de incidencia de las observaciones.

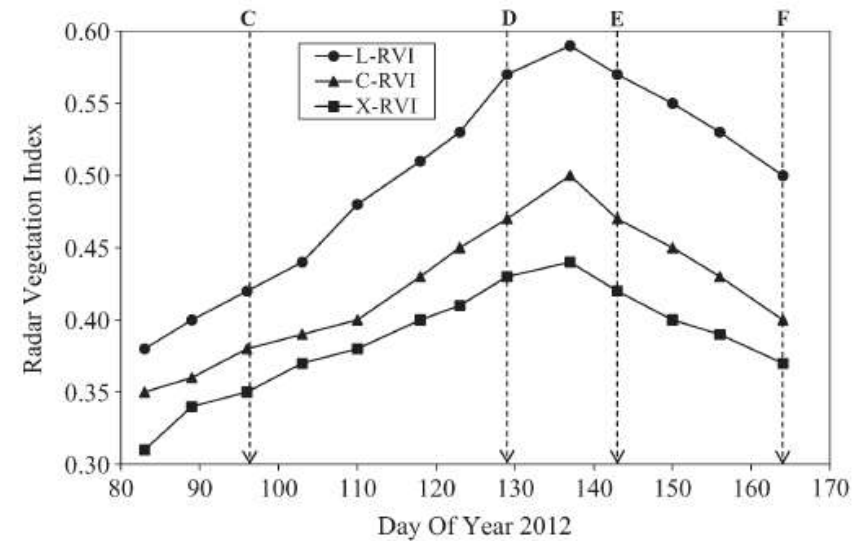
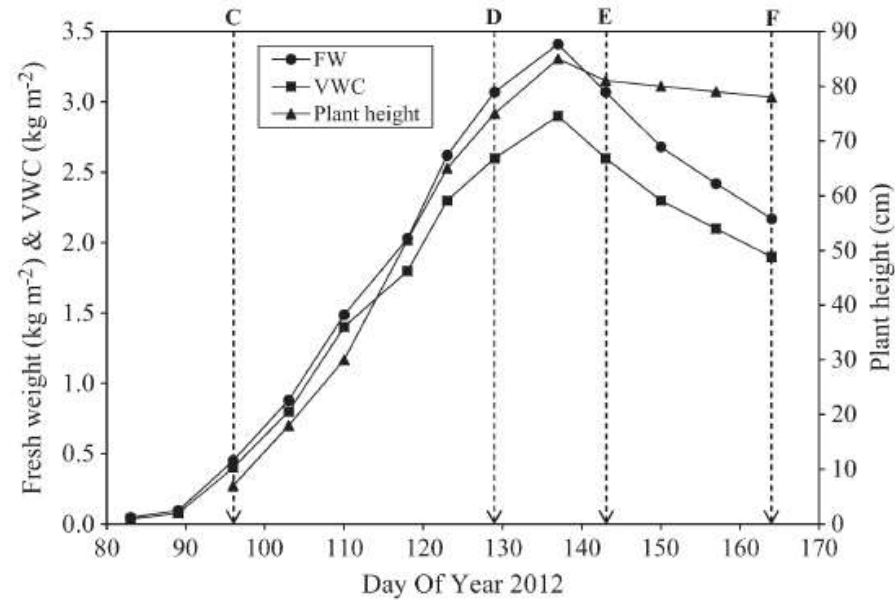
*Kim, Y., Van Zyl, J., 2001. Comparison of forest parameter estimation techniques using SAR data, in: IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2001) Proceedings, IEEE, Sydney, NSW, Australia, pp. 1395–1397. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.976856>*



## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

### -Radar Vegetation Index:

Distintos estudios han demostrado la relación entre RVI y la biomasa de distintos cultivos:



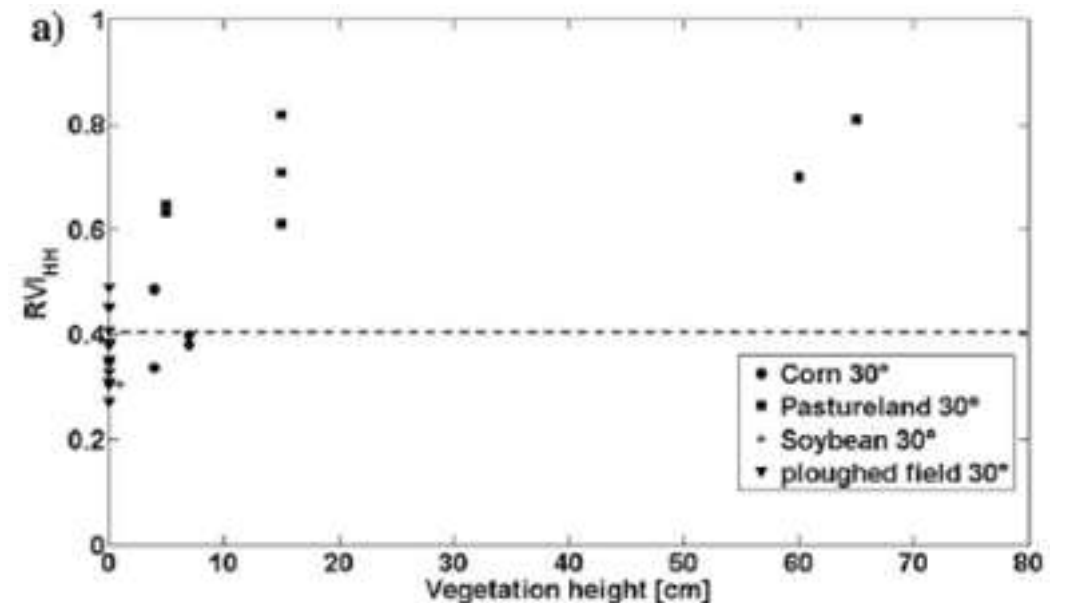
Fuente: Kim et al., 2014



### -Radar Vegetation Index:

Como el RVI requiere de observaciones en polarización cuádruple (HH, HV, VH, VV), se han propuesto variantes aplicables a configuraciones de polarización doble HH, HV (Trudel et al., 2012):

$$RVI_{HH} = \frac{4\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{HV}^0}$$

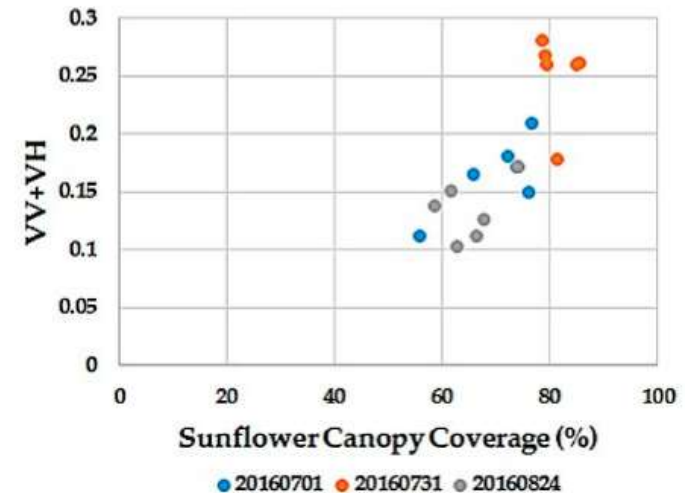
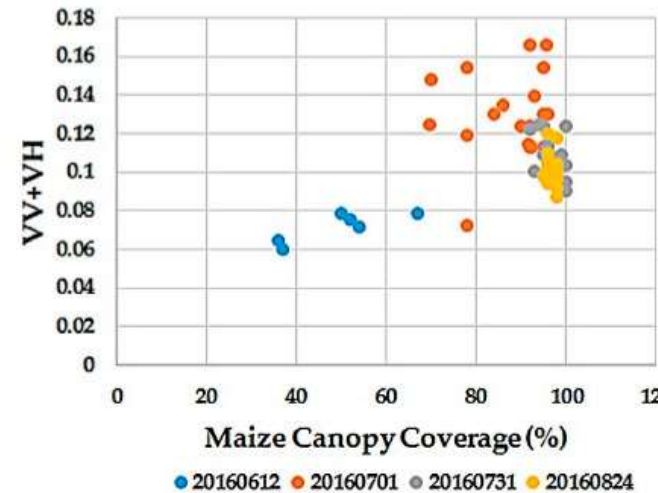


Trudel, M., Charbonneau, F., Leconte, R., 2012. Using RADARSAT-2 polarimetric and ENVISAT-ASAR dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields. *Can. J. Remote Sens.* 38, 514–527.

### -Radar Vegetation Index:

O a partir de observaciones de polarización doble VV, VH (Nasirzadehdizaji et al., 2019):

$$RVI_{VV} = \frac{4\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}$$



Estas adaptaciones facilitan el uso del RVI, dado que los sensores quadpol son aun relativamente escasos y configuraciones de polarización doble tienen mejores prestaciones en cuanto a resolución temporal, espacial, etc.

Nasirzadehdizaji, R., Balik Sanli, F., Abdikan, S., Cakir, Z., Sekertekin, A., Ustuner, M., 2019. Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage. *Applied Sciences* 9, 655. <https://doi.org/10.3390/app9040655>

## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

Periasamy (2018) exploró la relación entre las observaciones de polarización doble (VV, VH) de Sentinel-1 y la biomasa de algunos cultivos tropicales (cúrcuma, sorgo, etc.).

Propuso una serie de índices tomando como hipótesis de partida la representación de un triángulo en el espacio bidimensional ( $\sigma_{VV}^0, \sigma_{VH}^0$ ) cuyos vértices corresponderían con:

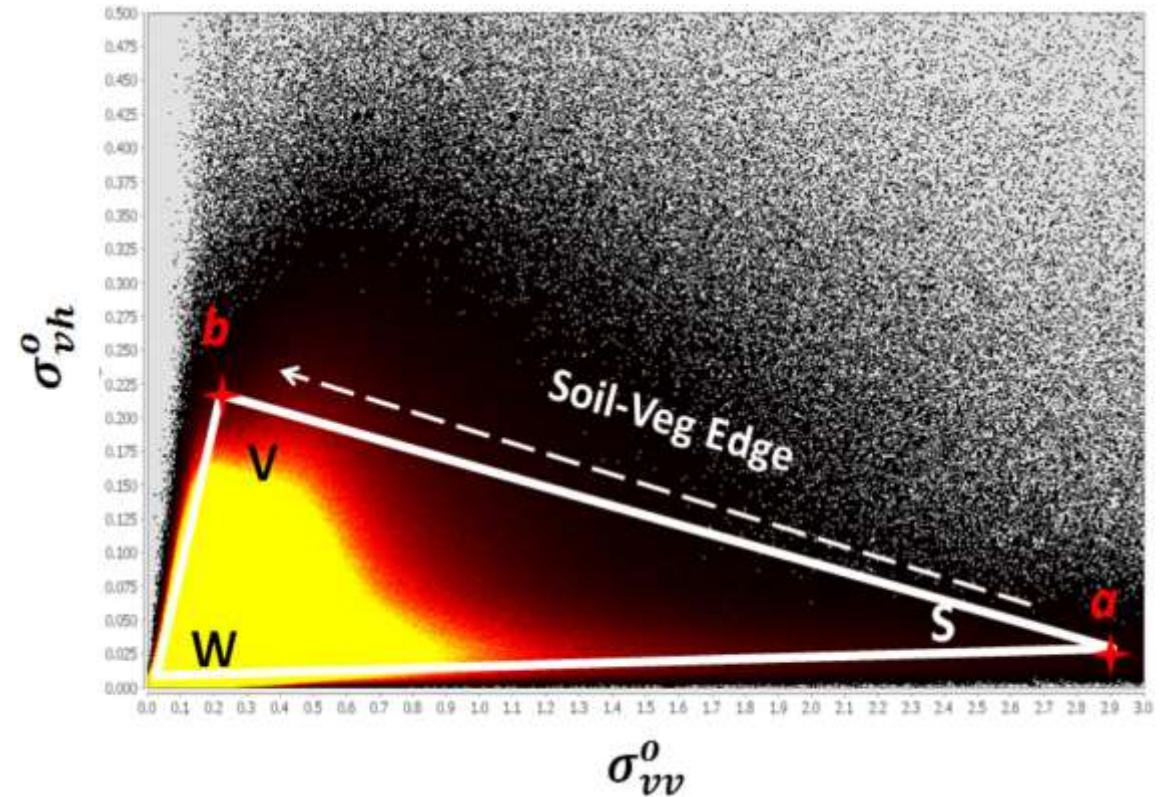
$\sigma_{VV,MAX}^0 \rightarrow$  Suelo, urbano

$\sigma_{VH,MAX}^0 \rightarrow$  Vegetación

$\sigma_{VV,min}^0, \sigma_{VH,min}^0 \rightarrow$  Agua

Tomando estos puntos se propusieron una serie de índices a partir de las magnitudes del triángulo.

Periasamy, S., 2018. Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1. *Remote Sensing of Environment* 217, 537–549. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.003>



## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

El primero es una medida de la diagonal (soil-veg edge), denominado *Inverse dual-pol diagonal distance* (IDPDD):

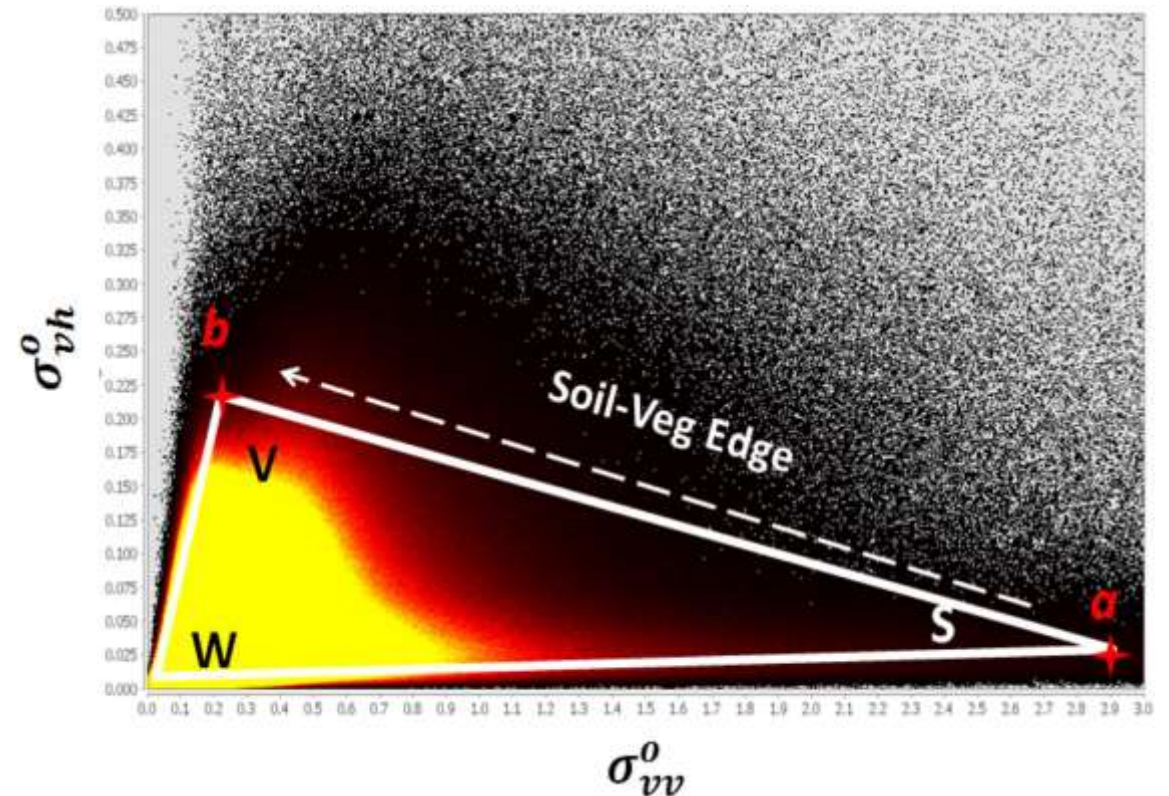
$$\text{IDPDD} = \frac{(\sigma_{VV,MAX}^0 - \sigma_{VV}^0) + \sigma_{VH}^0}{\sqrt{2}}$$

Siendo  $\sigma_{VV,MAX}^0 = 3.0$

Un segundo índice es el ratio entre la retrodispersión total y la co-polarizada, denominado *Vertical dual de-polarization index* (VDDPI):

$$\text{VDDPI} = \frac{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0}$$

VDDPI mide el grado en el que el objeto observado depolariza el pulso vertical incidente. Un suelo desnudo poco rugoso tendrá valores cercanos a 1 y cuanto mayor cantidad de vegetación haya, su valor aumentará.



## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

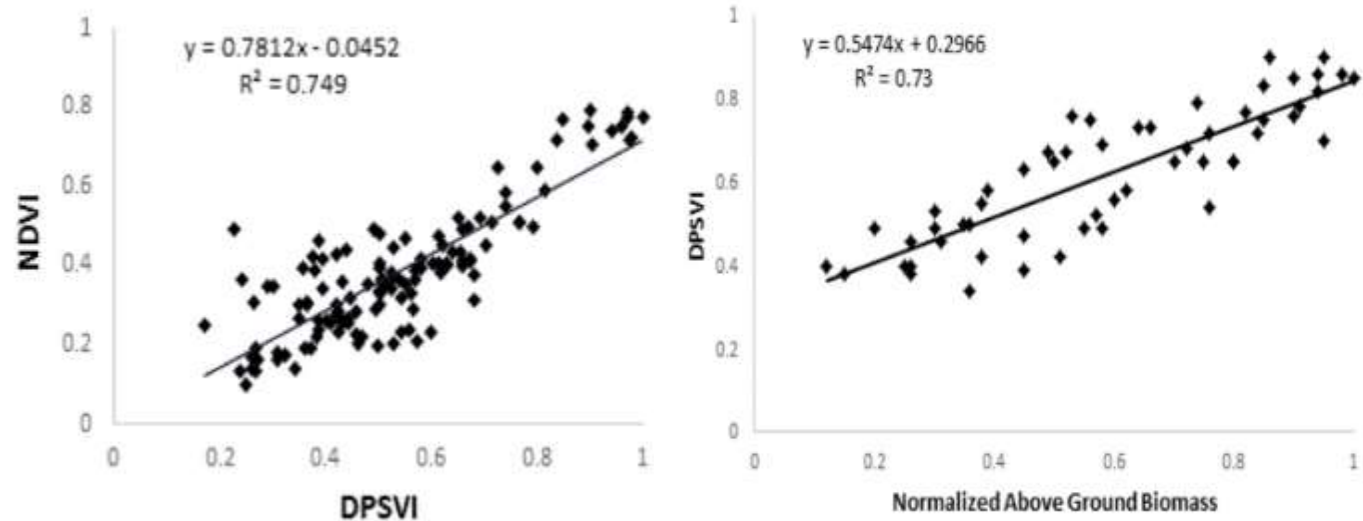
Finalmente se calcula el producto entre esos dos índices (IDPDD y VDDPI) y  $\sigma_{VH}^0$  para obtener el *Dual Pol SAR Vegetation Index* (DPSVI):

$$DPSVI = \sigma_{VH}^0 \cdot VDDPI \cdot IDPDD = \frac{\sigma_{VH}^0 [(\sigma_{VV,MAX}^0 \sigma_{VH}^0 - \sigma_{VV}^0 \sigma_{VH}^0 + (\sigma_{VH}^0)^2) + (\sigma_{VV,MAX}^0 \sigma_{VV}^0 - (\sigma_{VV}^0)^2 + \sigma_{VV}^0 \sigma_{VH}^0)]}{\sqrt{2} \sigma_{VV}^0}$$

Perisamy (2018) indica que este índice toma generalmente valores entre 0 y 1 (aunque puede ser >1) y propone los siguientes umbrales:

- DPSVI = 0.0 – 0.2 → Agua
- DPSVI = 0.2 – 0.4 → Suelo desnudo
- DPSVI = 0.4 – 0.6 → Vegetación dispersa
- DPSVI = 0.6 – 0.8 → Vegetación densa

Además observa una buena correlación con el NDVI y la biomasa de los cultivos en su área de estudio:



## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

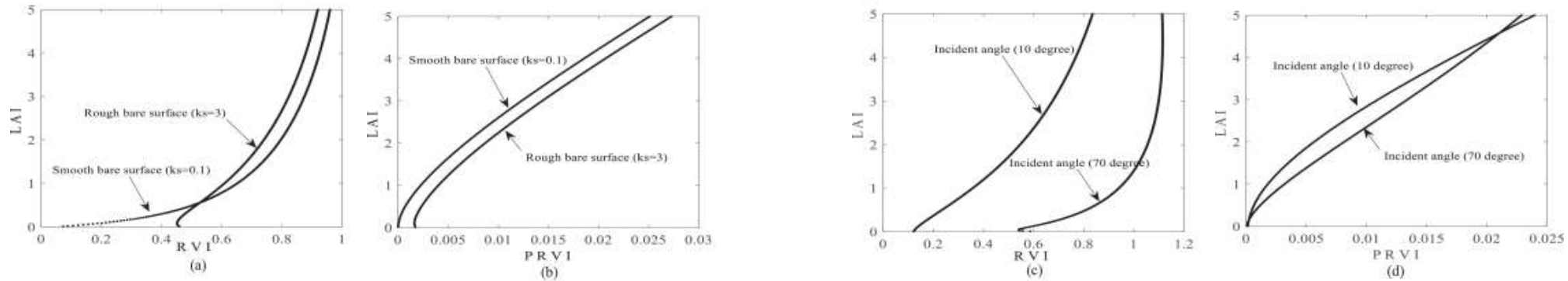
### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

Chang et al. (2018) propusieron el polarimetric RVI (PRVI) como una mejora frente al RVI:

$$\text{PRVI} = (1 - \text{DOP}) \cdot \sigma_{VH}^0$$

Donde, Degree of Polarization:  $\text{DOP} = \frac{\text{Polarized power}}{\text{Total power}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}$  que en Sentinel-1 VV-VH  $\text{DOP} \approx \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}$

Los autores reivindican una sensibilidad más homogénea al rango completo de LAI de la vegetación (arbustiva), una mayor independencia a las variaciones en la rugosidad o en el ángulo de incidencia y una buena sensibilidad al LAI y biomasa de la vegetación (sobre todo en banda L), sobre todo cuando  $\sigma_{VH}^0$  se expresa en dB:



Chang, J.G., Shoshany, M., Oh, Y., 2018. Polarimetric Radar Vegetation Index for Biomass Estimation in Desert Fringe Ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 56, 7102–7108. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2848285>





### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

Bhogapurapu et al. (2021) partiendo de trabajos previos con datos SLC, propusieron parámetros pseudo-polarimétricos que se pueden calcular a partir de datos GRD dual-pol y que permiten describir de un modo aproximado el tipo o mecanismo de dispersión dominante y el grado de mezcla de tipos de dispersión:

Pureza de copolarización:

$$m_c = \frac{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0} = \frac{1 - q}{1 + q}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} m_c = 0 \text{ depolarización total} \\ m_c = 1 \text{ copolarización total} \end{array} \right.$$

Ángulos auxiliares:

$$\tan \zeta_1 = \frac{\sigma_{VV}^0}{m_c(\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0)} = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}$$
$$\tan \zeta_2 = \frac{\sigma_{VH}^0}{m_c(\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0)} = \frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}$$

Bhogapurapu, N., Dey, S., Bhattacharya, A., Mandal, D., Lopez-Sanchez, J.M., McNairn, H., López-Martínez, C., Rao, Y.S., 2021. Dual-polarimetric descriptors from Sentinel-1 GRD SAR data for crop growth assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 178, 20–35.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.013>



## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

Partiendo de estos parámetros proponen el cálculo de un ángulo ( $\theta_c$ ) y un parámetro de entropía ( $H_c$ ) equiparables a los descriptores clásicos de la descomposición de Cloude-Pottier (H y  $\alpha$ ):

Pseudo-ángulo de tipo de dispersión:  $\tan\theta_c = \tan(\zeta_1 - \zeta_2) = \frac{(1-q)^2}{1+q^2-q}$

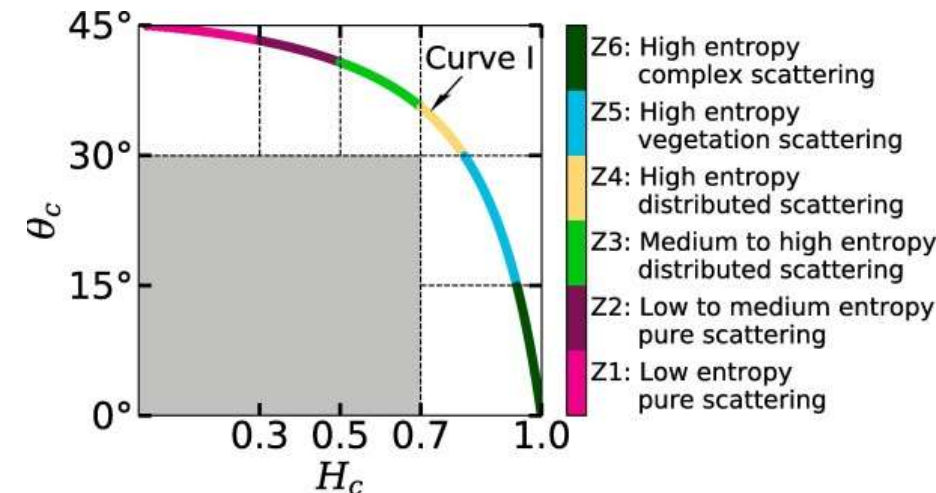
$\left\{ \begin{array}{l} \theta_c = 0^\circ \text{ dispersión compleja} \\ \theta_c = 45^\circ \text{ dispersión simple} \end{array} \right.$

Pseudo-entropía de dispersión:  $H_c = -\sum_{i=1}^2 p_i \log_2 p_i$

Donde,  $p_1 = \frac{1}{1+q}$ ;  $p_2 = \frac{q}{1+q}$

Con estos dos parámetros se define un espacio bidimensional que permite determinar las características de los objetos observados. La dinámica temporal de  $\theta_c$  y  $H_c$  puede ser útil para el seguimiento multitemporal de cubiertas vegetales.

$\left\{ \begin{array}{l} H_c = 0 \text{ único mecanismo de dispersión} \\ H_c = 1 \text{ mezcla de mecanismos de dispersión} \end{array} \right.$



### -Otros índices para polarización doble VV-VH:

Bhogapurapu et al. (2022) proponen el índice DpRVI para observaciones radar de polarización doble (VH-VV) GRD:

Pureza de copolarización: 
$$m_c = \frac{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}$$
 
$$\left\{ \begin{array}{l} m_c = 0 \text{ depolarización total} \\ m_c = 1 \text{ copolarización total} \end{array} \right.$$

Intensidad co-pol normalizada: 
$$\beta_c = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}$$
 
$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_c = 0 \text{ depolarización total} \\ \beta_c = 1 \text{ copolarización total} \end{array} \right.$$

Índice de vegetación radar dualpol: 
$$DpRVI = 1 - m_c \cdot \beta_c$$
 
$$\left\{ \begin{array}{l} DpRVI = 0 \text{ suelo desnudo, urbano} \\ DpRVI = 1 \text{ vegetación densa} \end{array} \right.$$

DpRVI es proporcional a la aleatoriedad de la onda dispersada, que depende de la morfología de las cubiertas vegetales, su grado de desarrollo, densidad y biomasa. Al tomar valores entre 0 y 1 su interpretación es intuitiva.

Bhogapurapu, N., Dey, S., Mandal, D., Bhattacharya, A., Karthikeyan, L., McNairn, H., Rao, Y.S., 2022. Soil moisture retrieval over croplands using dual-pol L-band GRD SAR data. *Remote Sensing of Environment* 271, 112900. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112900>





### -Equivalencias:

Se pueden transformar las ecuaciones de algunos índices para demostrar que, en su mayoría, los índices propuestos son dependientes de  $q$ :

$$RVI_{VV} = \frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0} = \frac{4q}{1+q}$$

$$PRVI = (1 - DOP) \cdot \sigma_{VH}^0 = \left(1 - \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}\right) \cdot \sigma_{VH}^0 = \left(\frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0}\right) \cdot \sigma_{VH}^0 = \left(\frac{q}{1+q}\right) \cdot \sigma_{VH}^0$$

$$\left. \begin{aligned} m_c &= \frac{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0} = \frac{1-q}{1+q} \\ \beta_c &= \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0} = \frac{1}{1+q} \end{aligned} \right\} DpRVI = 1 - m_c \cdot \beta_c = 1 - \frac{1-q}{(1+q)^2} = \frac{q(q+3)}{(1+q)^2}$$

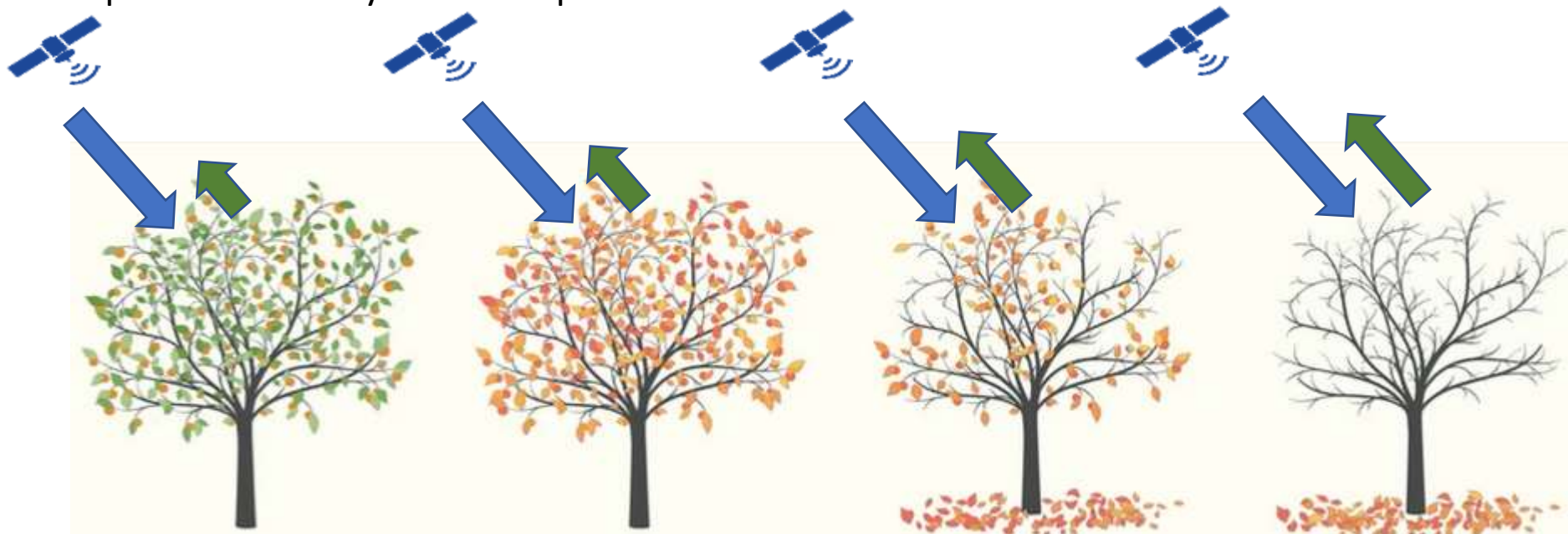


### -Índices para aplicaciones forestales:

Se han realizado investigaciones similares en bosques, orientadas a hallar índices obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1 VV-VH GRD que permitan hacer un seguimiento de la fenología y de otras variables de interés forestal.

En especies caducifolias se ha observado una dinámica estacional que revela un comportamiento retrodispersor a dos niveles en la banda C:

- Ramas: producen retrodispersión de volumen
- Hojas: atenúan el pulso incidente y el retrodispersado

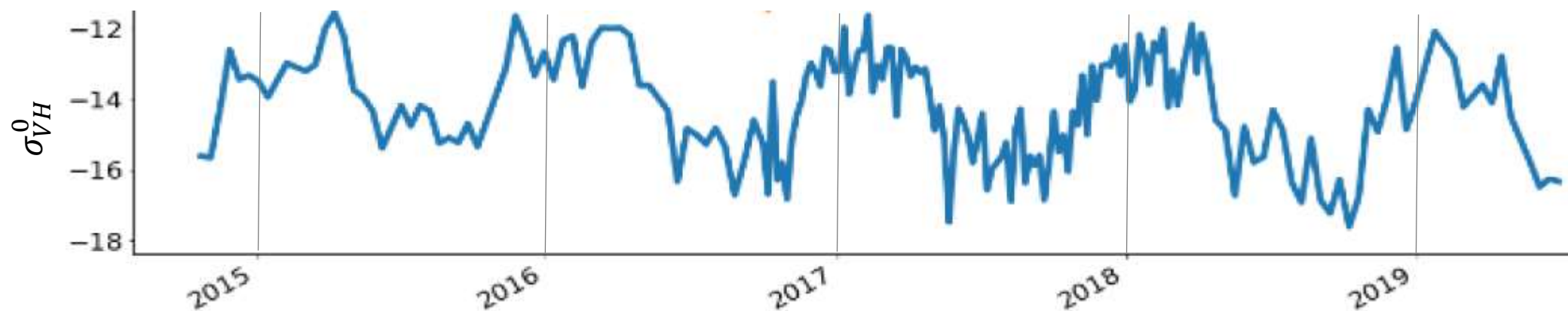


## 4.-Índices para el seguimiento de cultivos

### -Índices para aplicaciones forestales:

De tal modo que se observa un incremento en el canal VH tras la pérdida de la hoja que vuelve a reducirse en primavera. En VV no se observa este comportamiento.

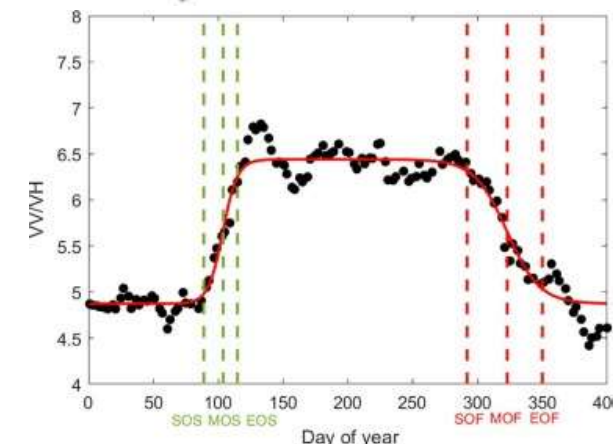
#### Roble americano



Por ello, se han propuesto índices que cuantifican esta reducción, como:

$$\text{ratio } VV/VH_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VH}^0} \right) = \sigma_{VV,dB}^0 - \sigma_{VH,dB}^0 \quad (\text{Soudani et al., 2021})$$

$$NDIVV = \frac{\sigma_{VV,dB}^0 - \sigma_{VH,dB}^0}{\sigma_{VV,dB}^0 + \sigma_{VH,dB}^0} \quad (\text{Schulz et al., 2024})$$



### -Estadísticos multitemporales:

Por último, algunos autores (e.g., Schulz et al., 2021) han utilizado estadísticos multitemporales para caracterizar la dinámica temporal de la retrodispersión en las distintas polarizaciones, como por ejemplo la desviación estándar:

$$SD_{VV} = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_{VV,i}^0 - \overline{\sigma_{VV}^0})^2}{N - 1}} \quad SD_{VH} = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_{VH,i}^0 - \overline{\sigma_{VH}^0})^2}{N - 1}}$$

Y otros estadísticos como los valores máximos y mínimos o el coeficiente de variación, que pueden ser útiles para identificar y clasificar distintos tipos de cubiertas una vez concluida la campaña.

Estos estadísticos se pueden calcular para toda la campaña agrícola, por periodos: cultivos de primavera vs. verano; o por fases fenológicas concretas (emergencia-crecimiento vegetativo, fase reproductiva, senescencia).

Schulz, D., Yin, H., Tischbein, B., Verleysdonk, S., Adamou, R., Kumar, N., 2021. Land use mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series in a heterogeneous landscape in Niger, Sahel. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 178, 97–111.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.005>



## 5.-Caso de estudio

### -Zona de estudio:

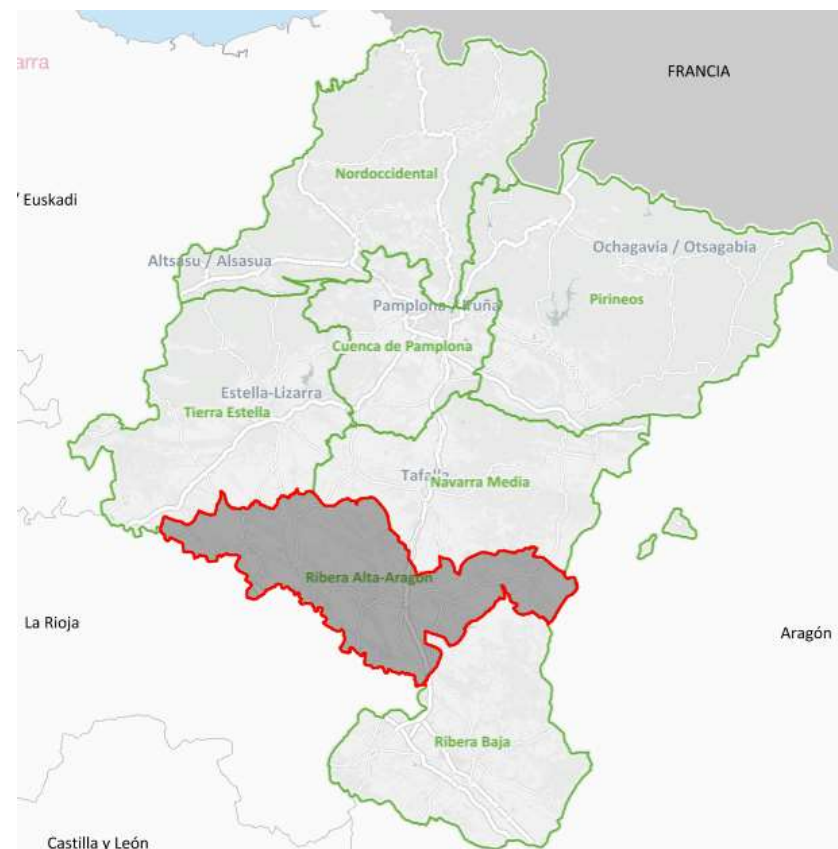
Se toma como caso de estudio la comarca agraria de la Ribera Alta (VI).  
Situada en el sur de Navarra a orillas del río Ebro.

Esta zona tiene un clima Mediterráneo, con una precipitación anual de unos 350 mm y una temperatura media de 14 °C.

Es una comarca eminentemente agrícola, con unas ~80.000 ha dedicadas a la agricultura (el 63% del total).

La diversidad de cultivos en esta comarca es grande:

Cultivos		Riego		Periodo
Herbáceos				
Hortícolas				Invierno
Leñosos	X	Secano	X	Verano
Pastos		Regadío		Permanente
Otros				





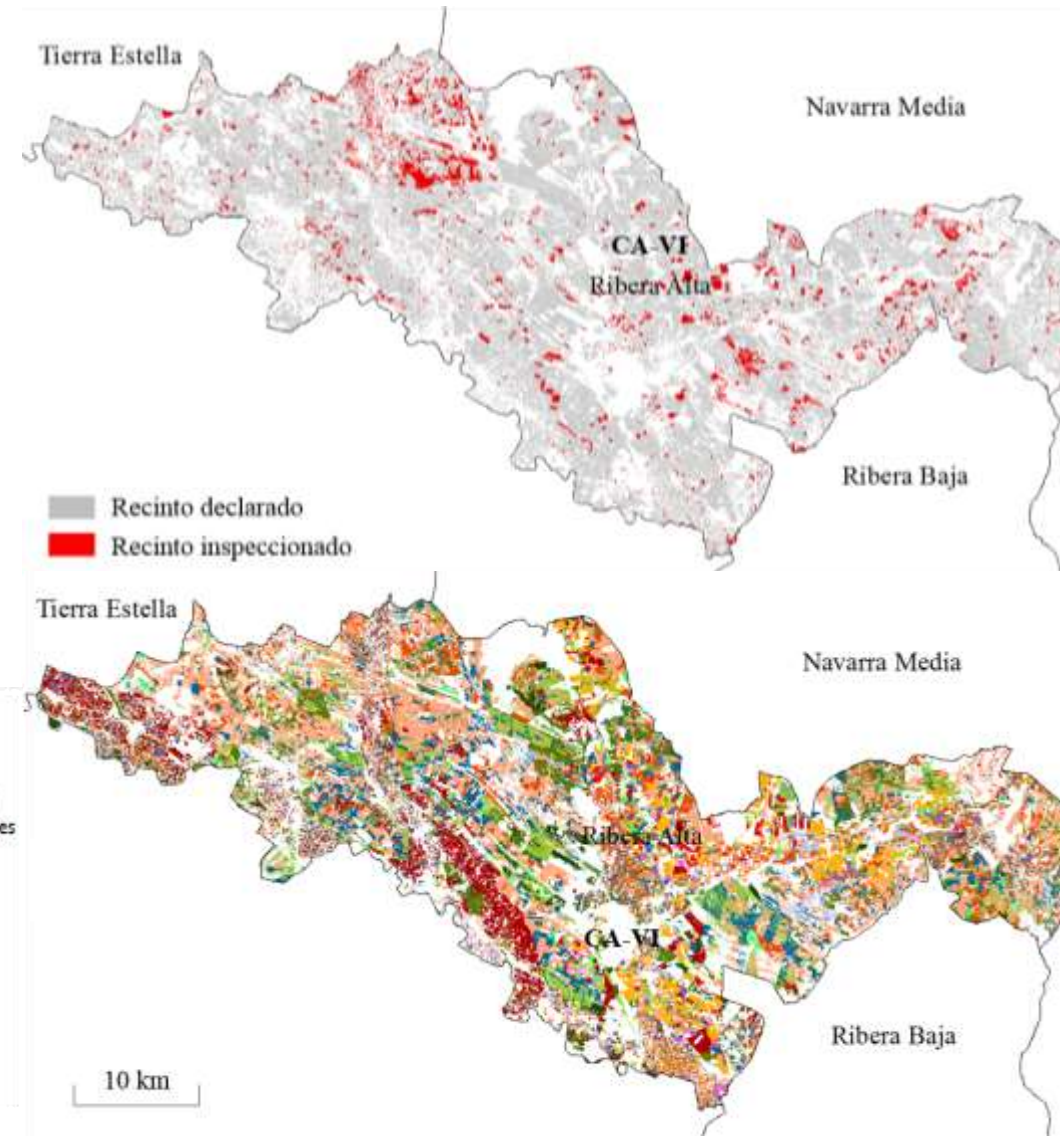
## 5.-Caso de estudio

### -Zona de estudio:

Clase	Dec (%sup)	Insp (Nº)
Cebada	25.9	1278
Pastos arbustivos	8.4	676
Trigo	11.1	520
Barbecho	11.2	513
Viña	8.5	221
Maiz	7.5	215
Pastos herbáceos	7.4	112
Frutales	1.4	108
Arroz	1.1	105
Olivar	1.5	101
Hortícola de verano	1.4	97
Alfalfa	2.3	91
Avena	2.3	55
Tomate	1.1	34
Mezclas con cereal	0.2	31
Almendros	0.5	29
Pastos arbolados	0.4	27
Guisante	1.6	24
Espárragos	0.6	20
Hortícola de invierno	1.5	16
Girasol	0.3	15
Veza	0.3	10
Otros cultivos herbáceos	3.0	18
TOTAL	100	4316

Trabajamos con las declaraciones de la PAC y las inspecciones realizadas en la campaña agrícola 2016-2017.

Se cuenta con un archivo de inspecciones obtenido mediante visitas a campo.

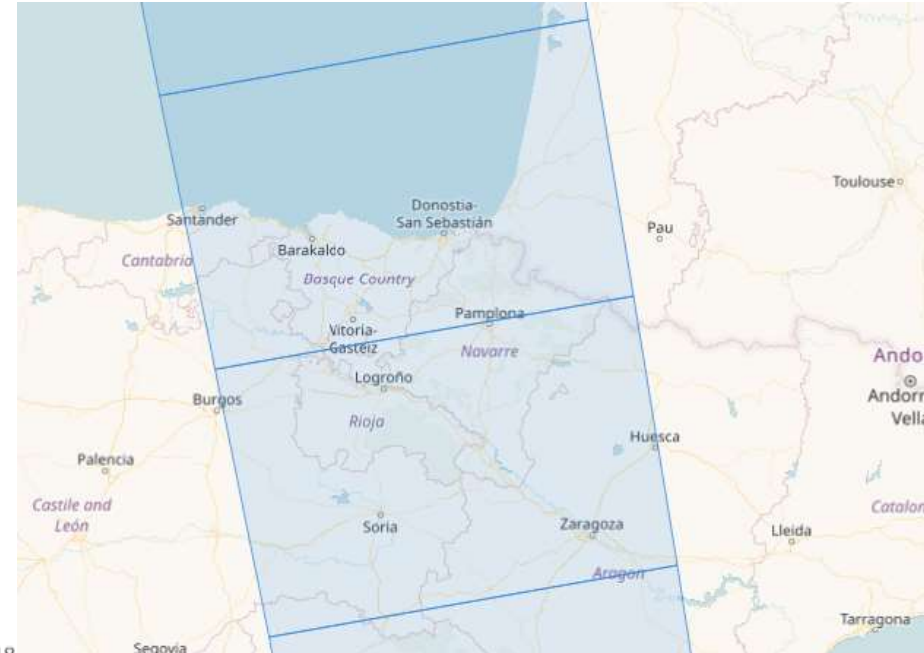
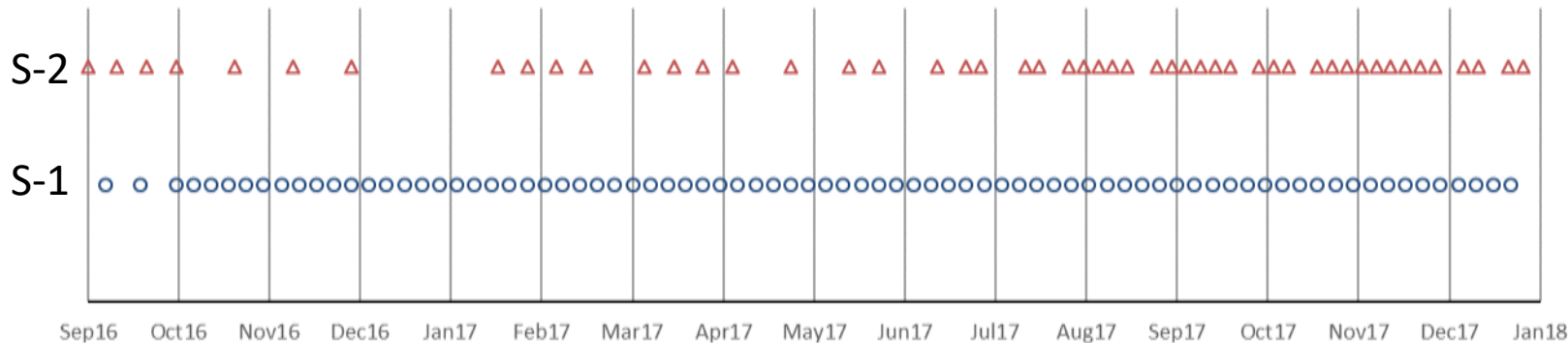


## 5.-Caso de estudio

### -Imágenes y procesamiento:

Se procesan las imágenes Sentinel-1 (A y B) IW VV-VH adquiridas en la pasada 103ASC, que cubre toda Navarra y toma las imágenes a las ~18:00 hs.

El periodo de análisis: 01/09/2016 – 31/12/2017



Las imágenes se descargan en formato GRD y se procesan en SNAP siguiendo un proceso convencional:



También se descargan las imágenes Sentinel-2 libres de nubes se procesan con Sen2Cor y se obtiene el NDVI como referencia.





### -Análisis:

Se calculan los distintos índices a partir de los canales de retrodispersión VV y VH.

Se extraen los valores medios de las parcelas de inspecciones para los cultivos de interés y se representan series temporales representativas de cada cultivo.

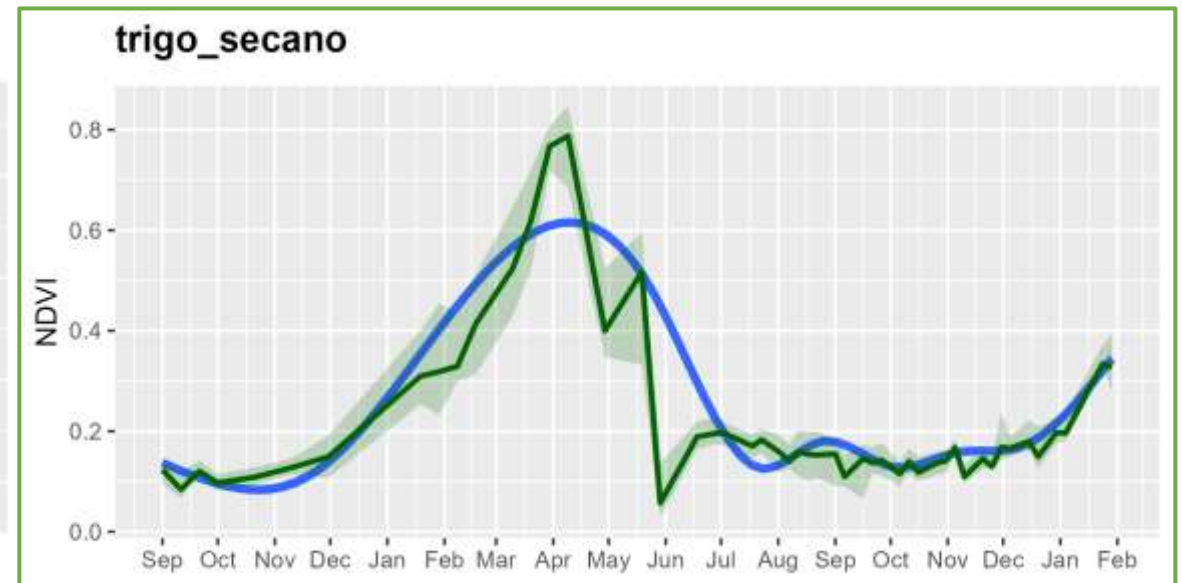
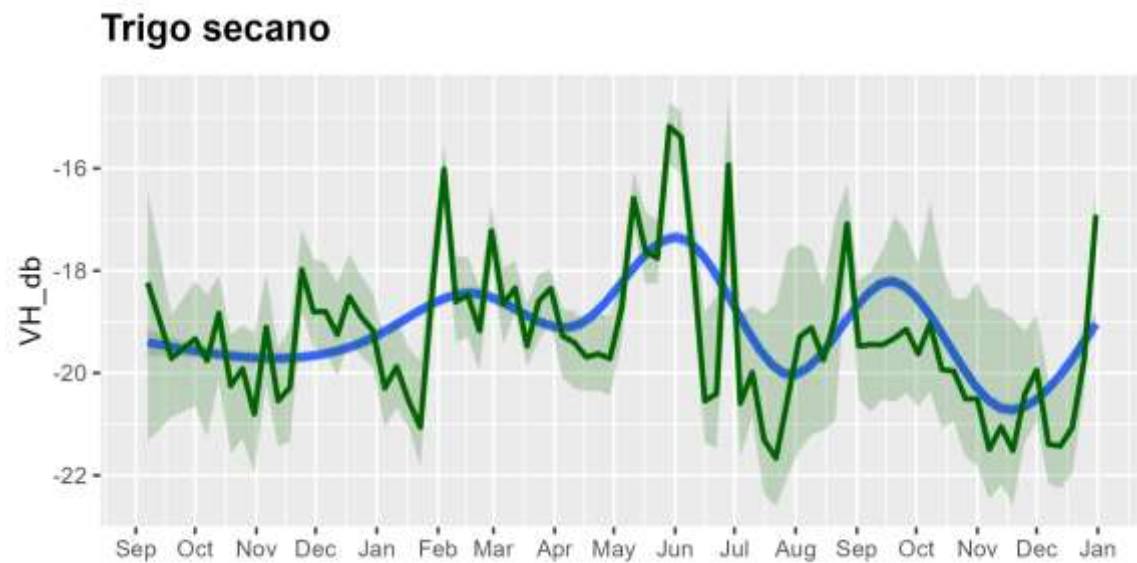
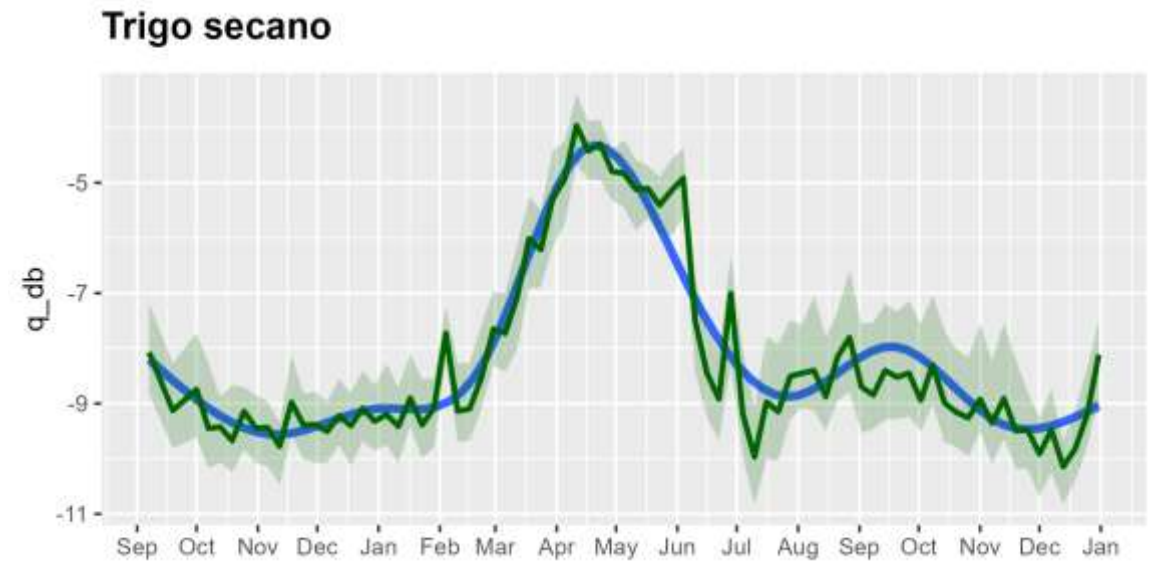
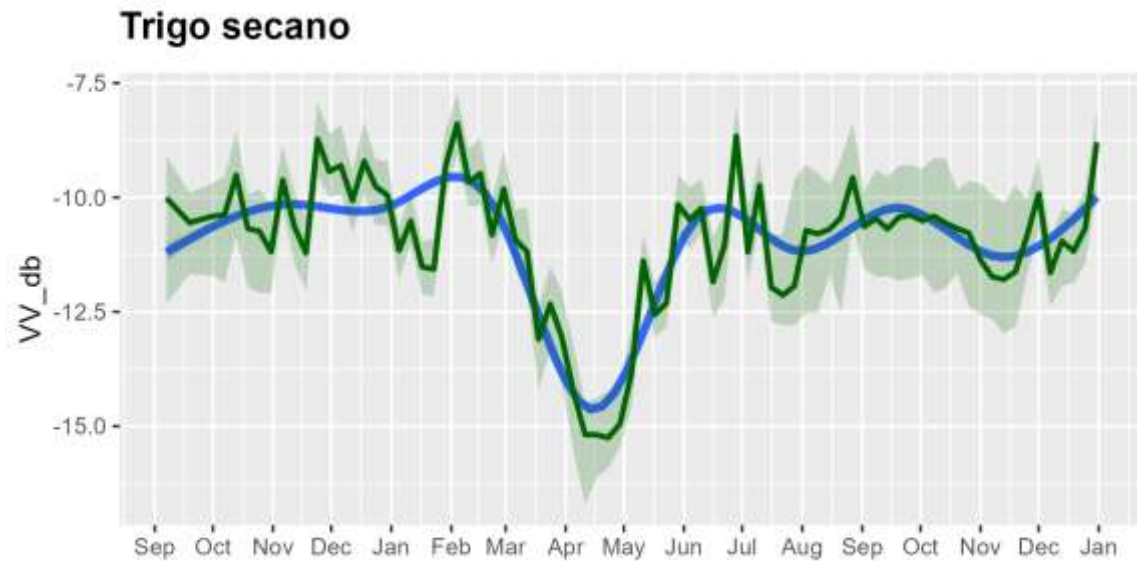
Se interpretan las series temporales y se comparan con la serie de NDVI.



-Trigo:

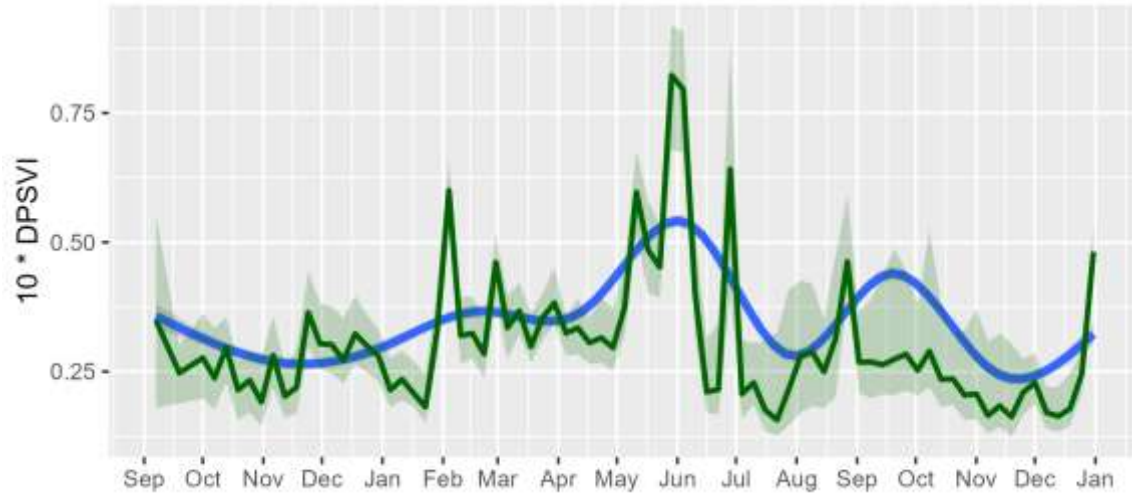


## 5.-Caso de estudio

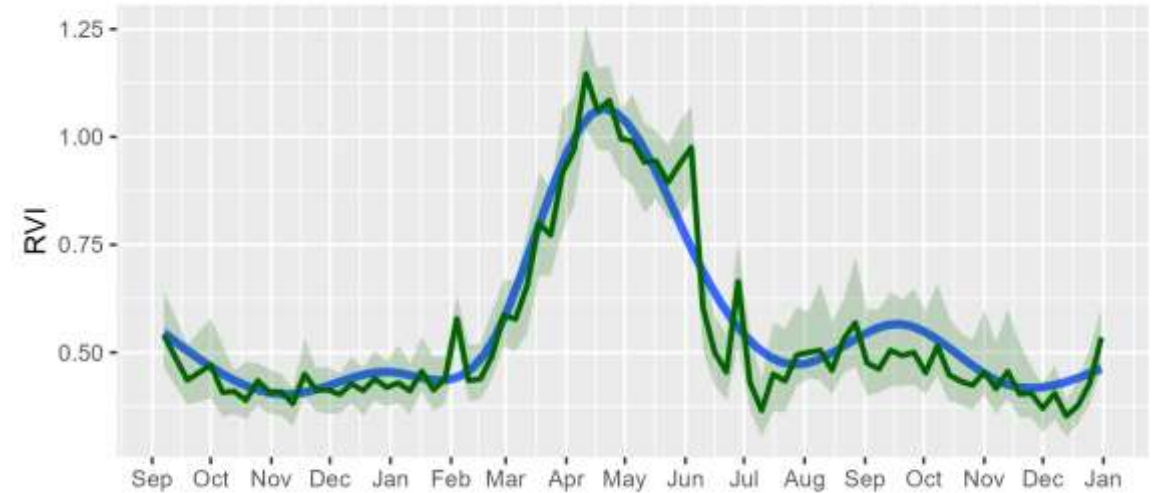


## 5.-Caso de estudio

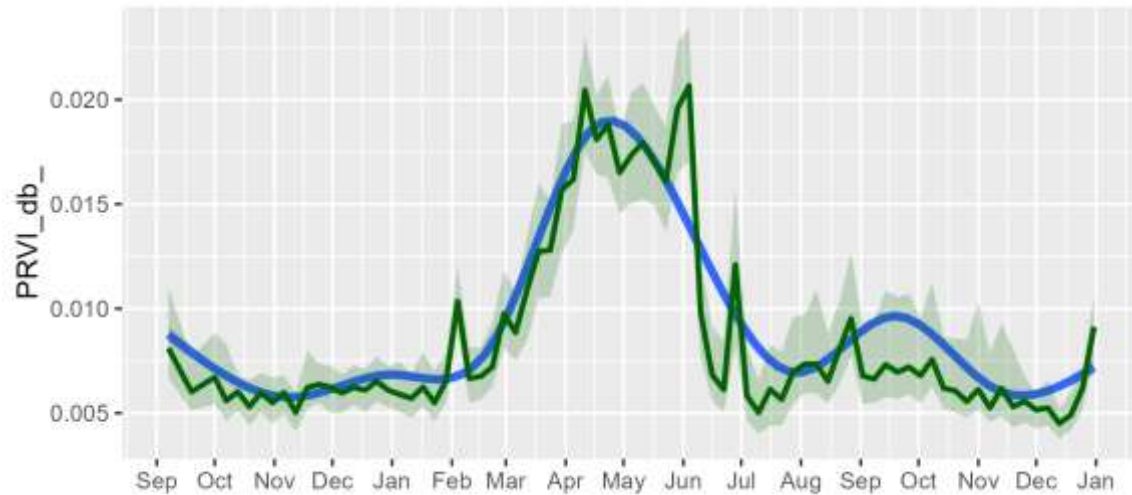
Trigo seco



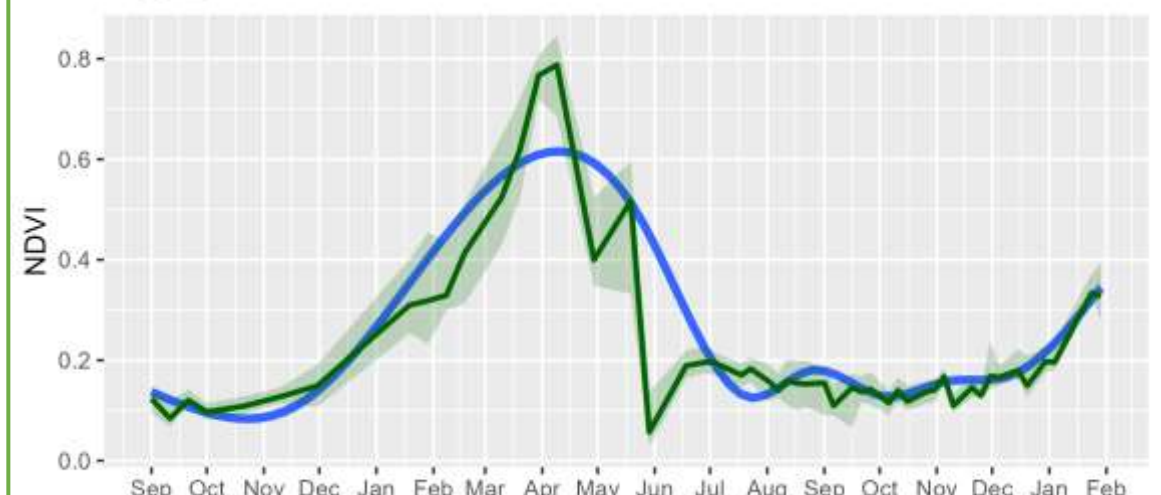
Trigo seco



Trigo seco

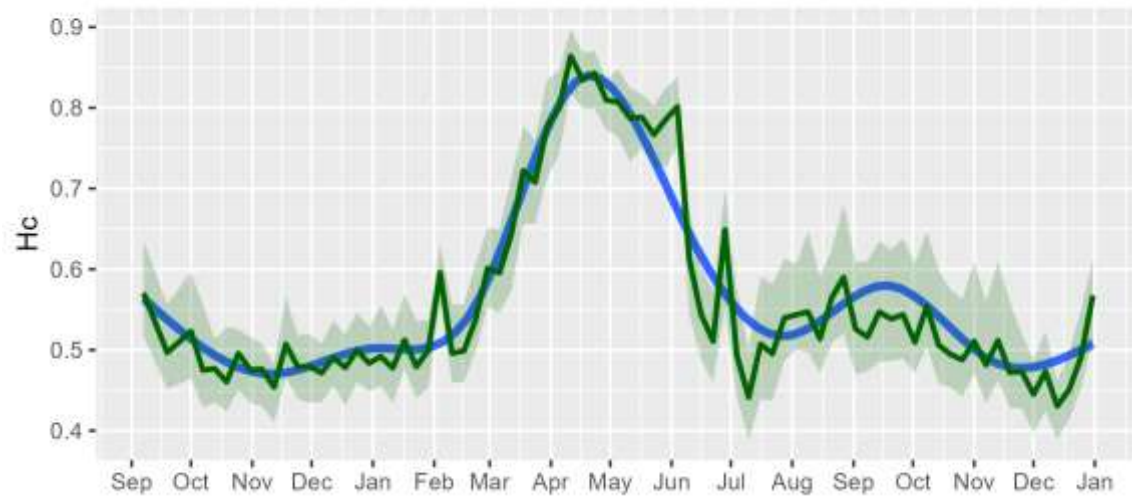


trigo\_secano

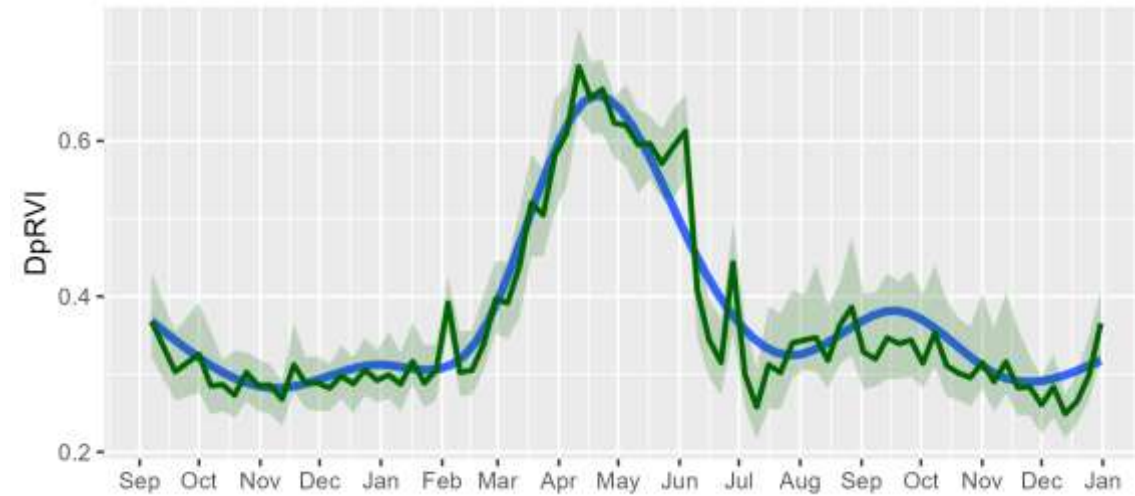


## 5.-Caso de estudio

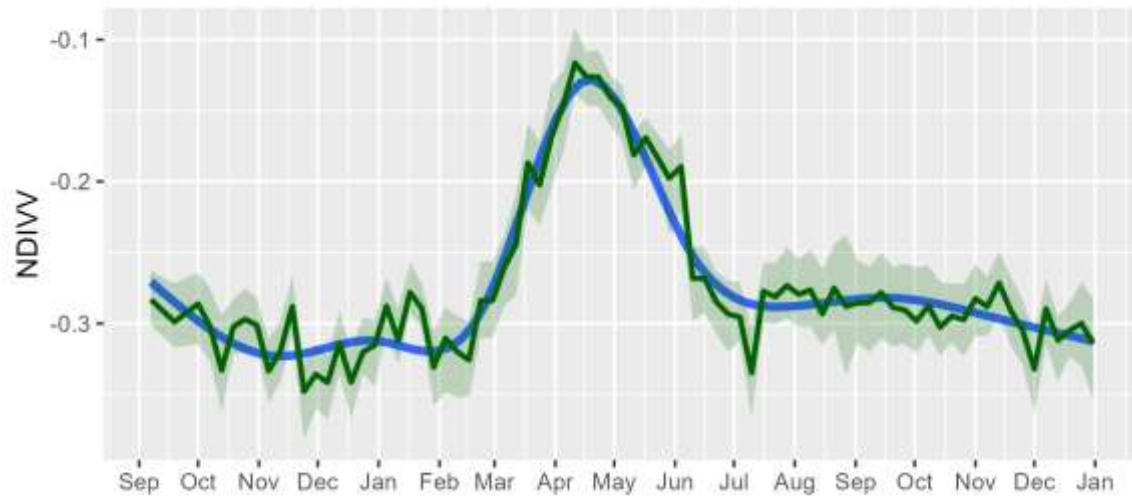
Trigo seco



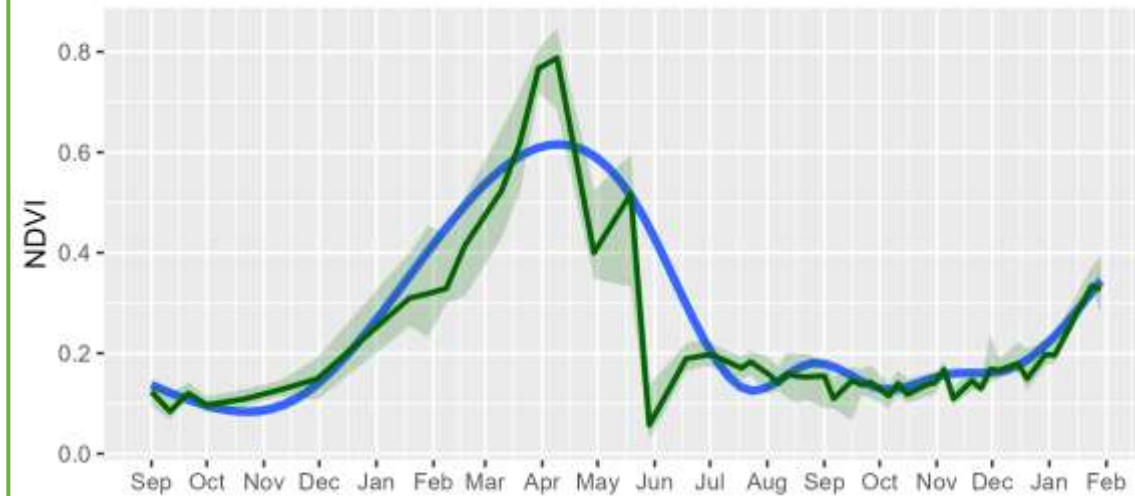
Trigo seco



Trigo seco

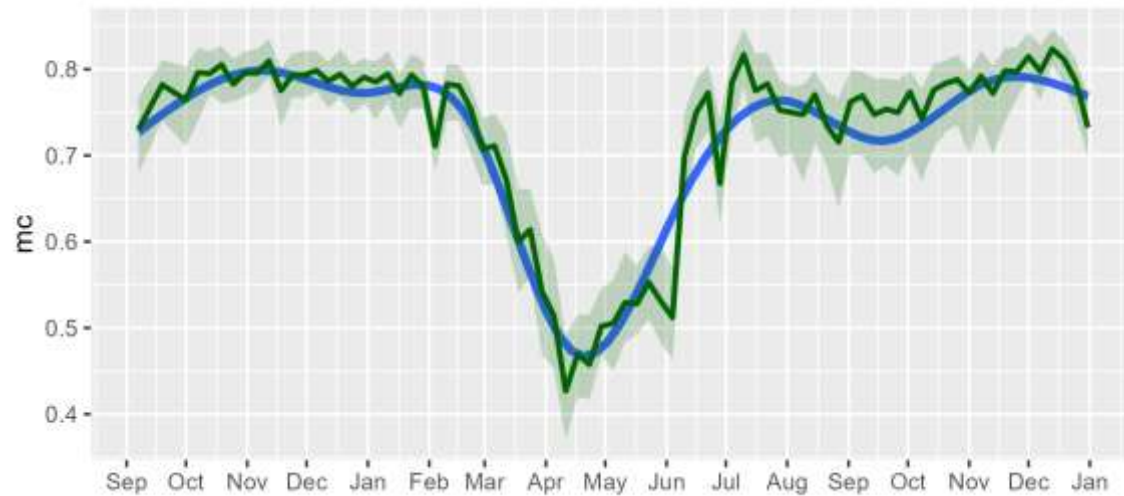


trigo\_secano

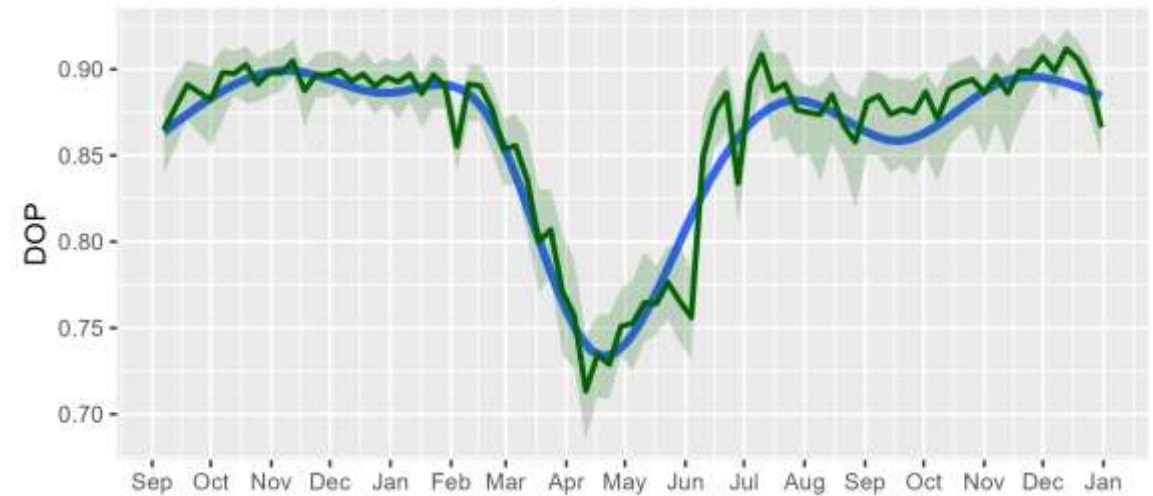


## 5.-Caso de estudio

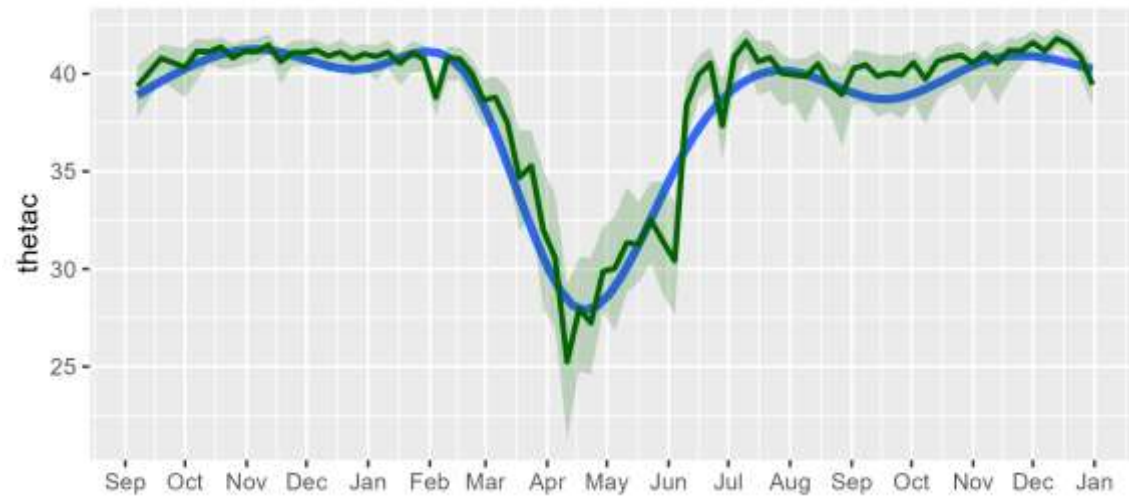
Trigo seco



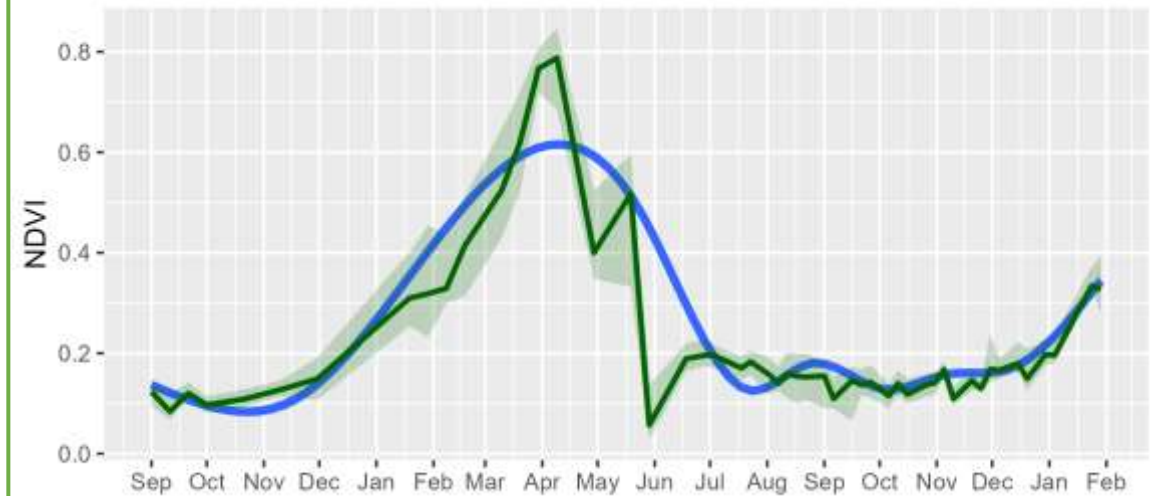
Trigo seco



Trigo seco



trigo\_secano



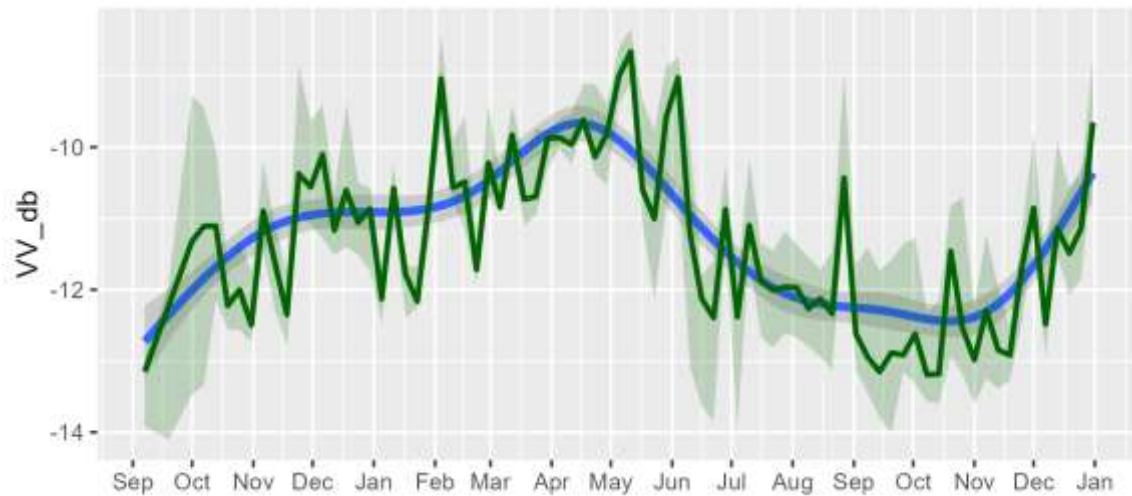


-Guisante:

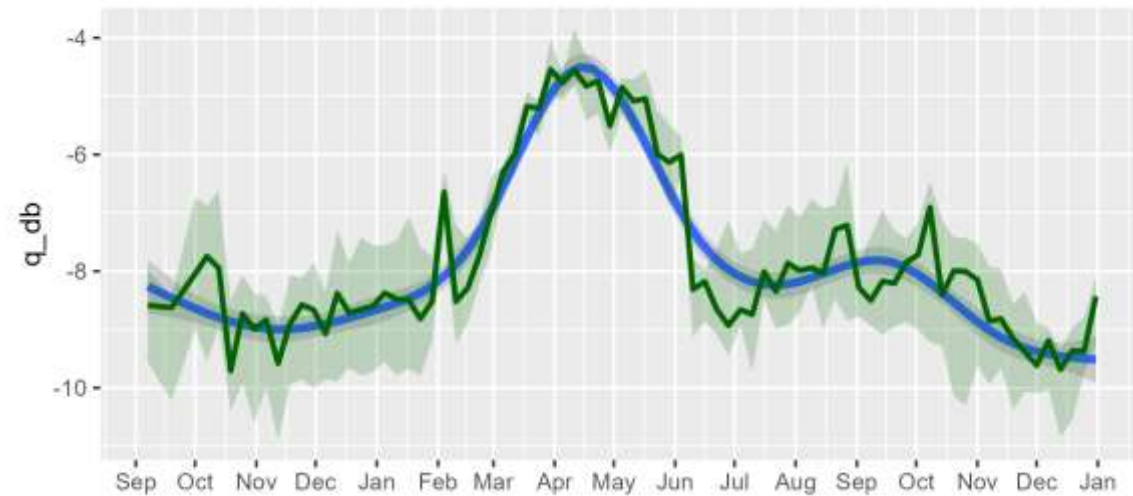


## 5.-Caso de estudio

Guisantes\_secano



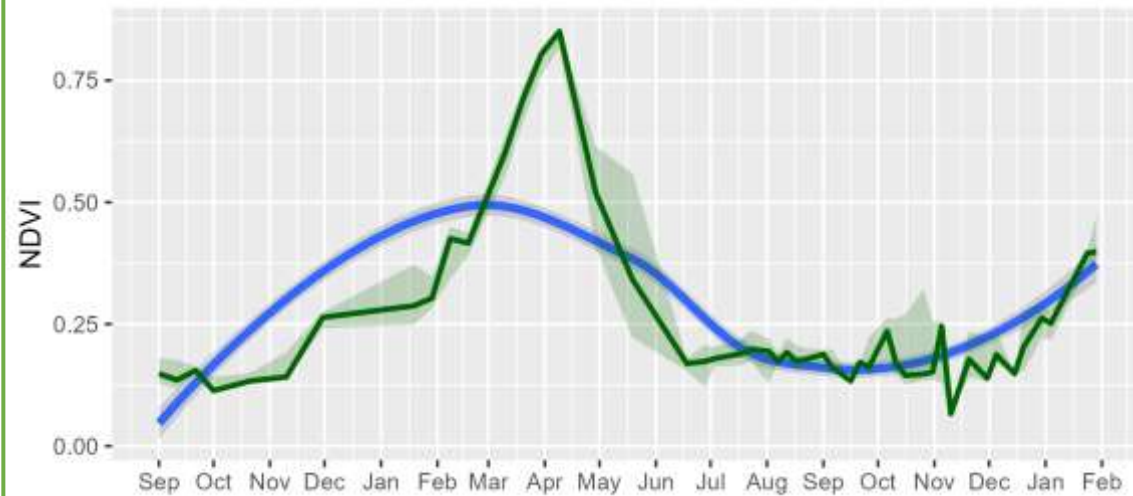
Guisantes\_secano



Guisantes\_secano

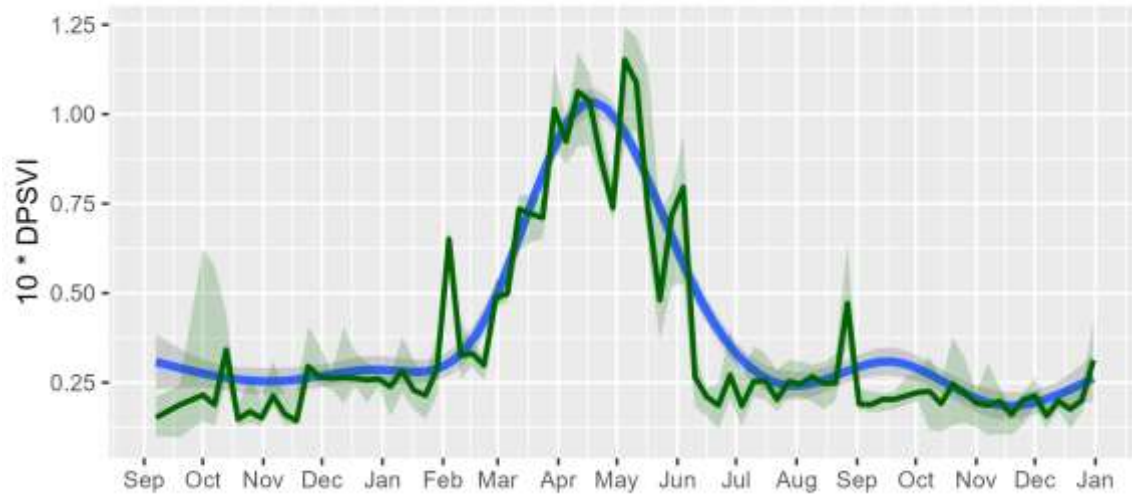


Guisantes\_secano

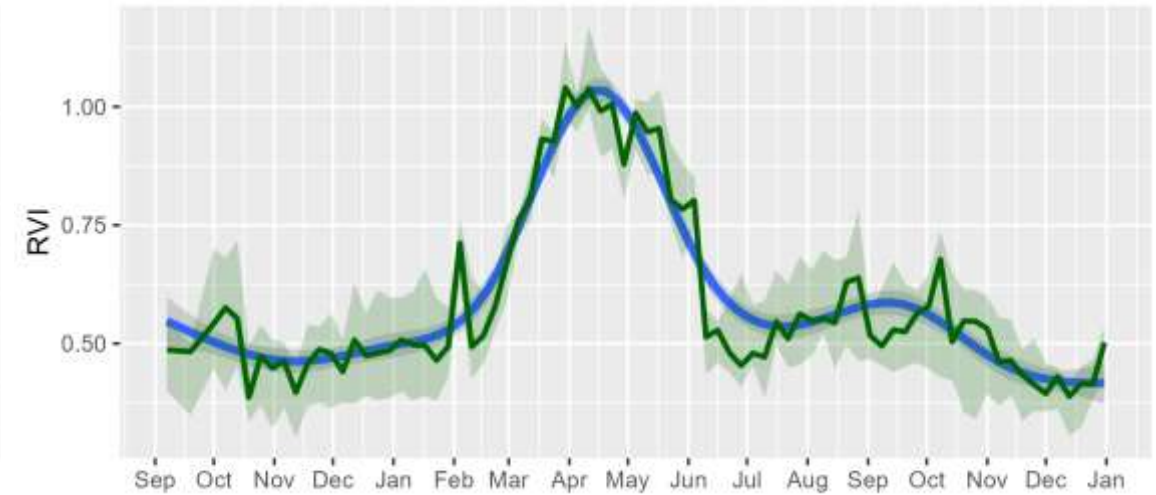


## 5.-Caso de estudio

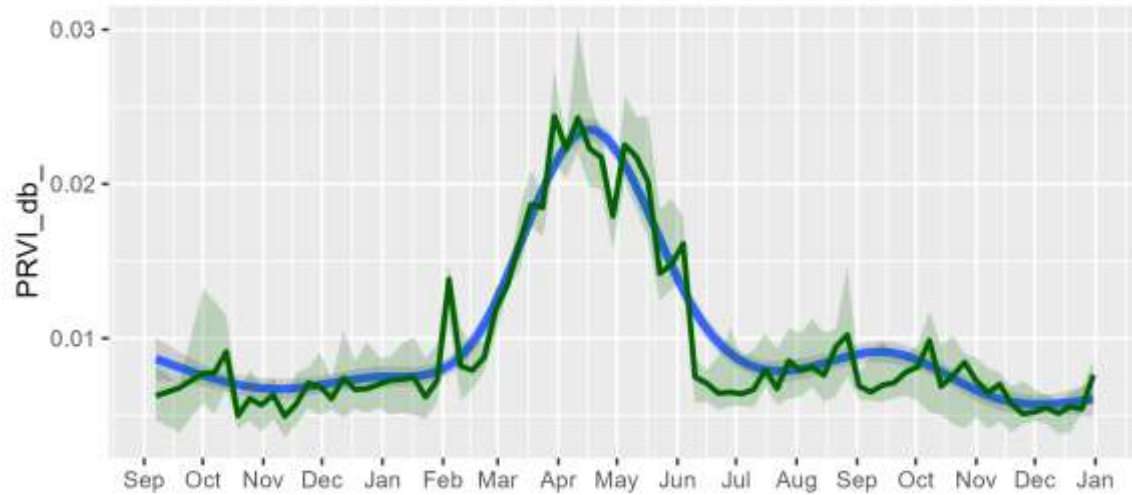
Guisantes\_secano



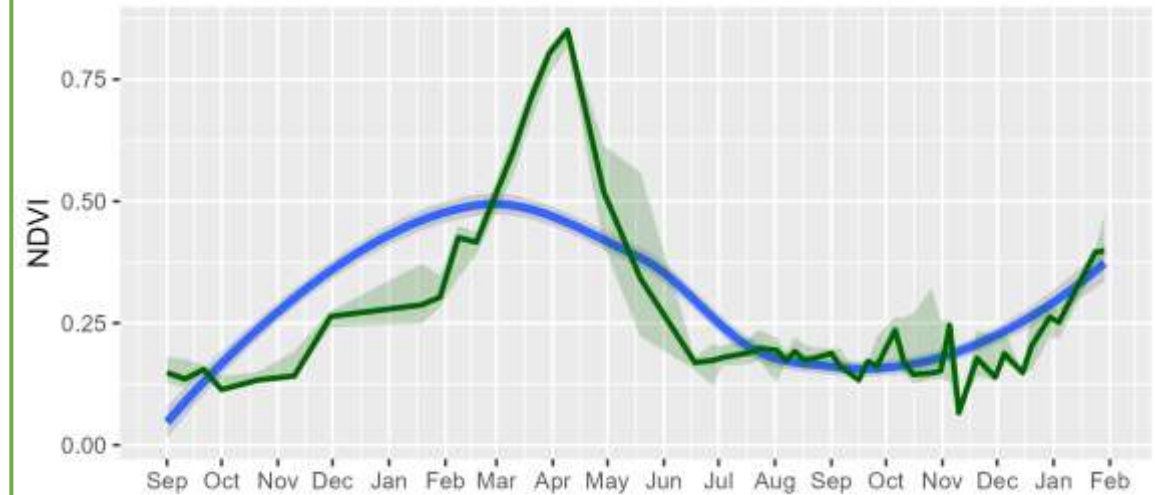
Guisantes\_secano



Guisantes\_secano

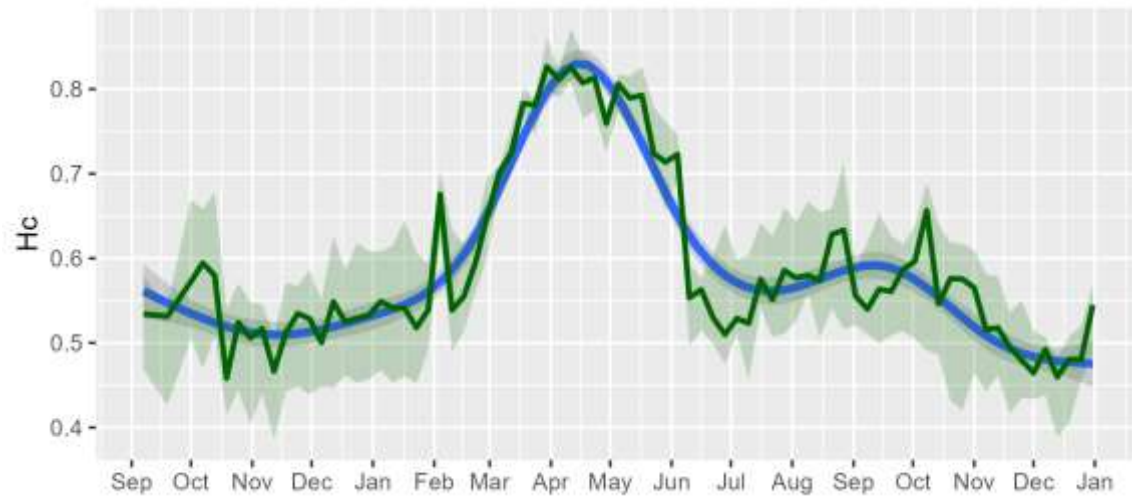


Guisantes\_secano

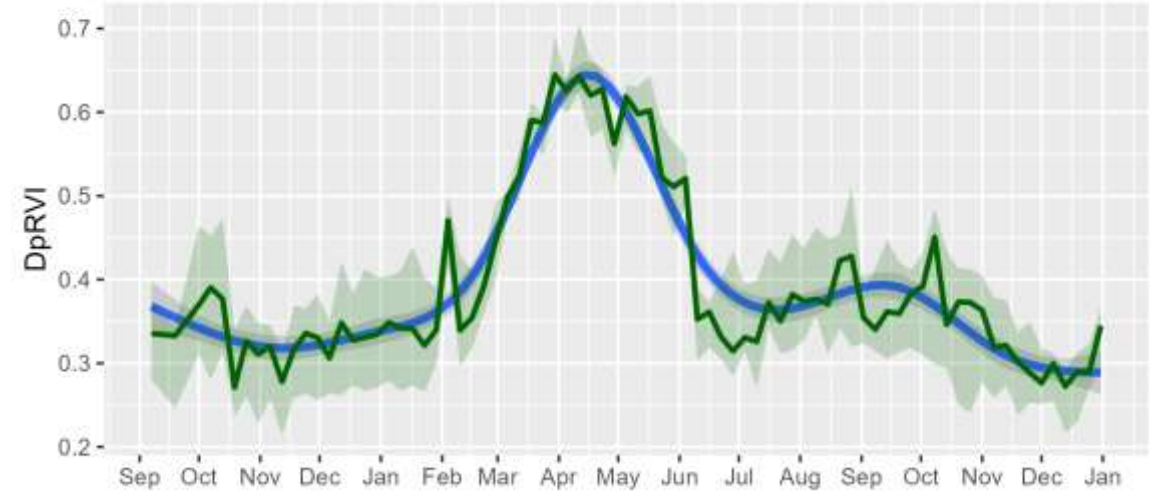


## 5.-Caso de estudio

Guisantes\_secano



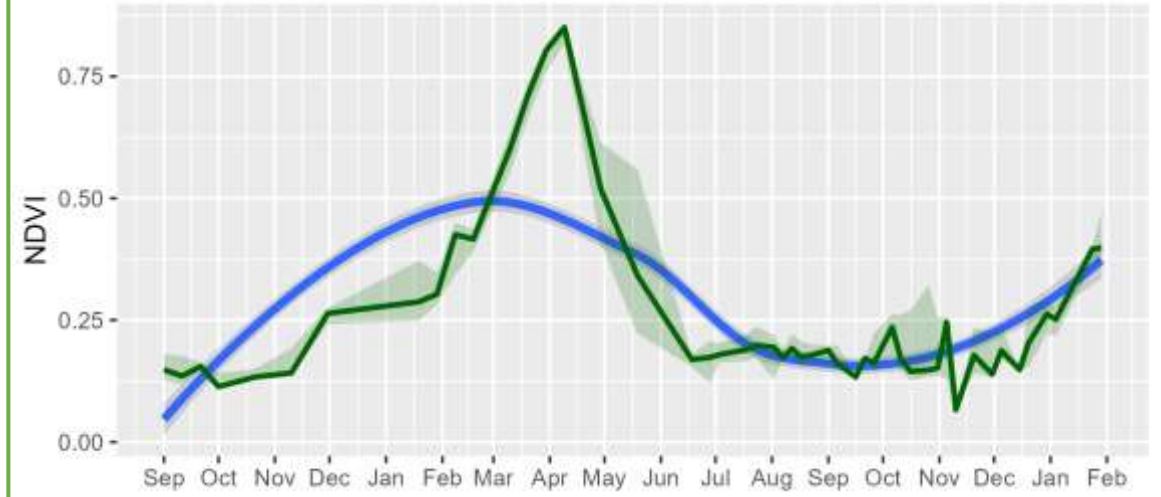
Guisantes\_secano



Guisantes\_secano

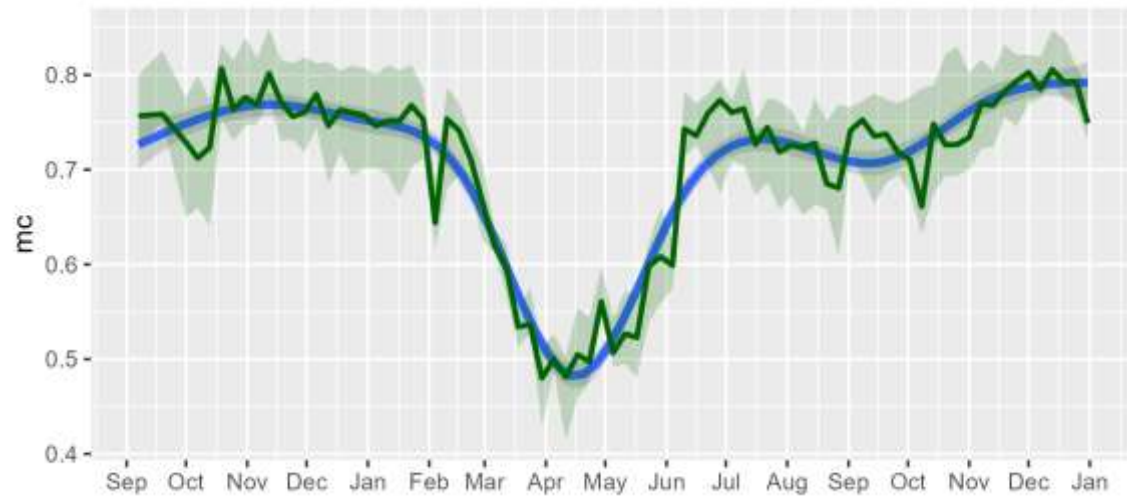


Guisantes\_secano

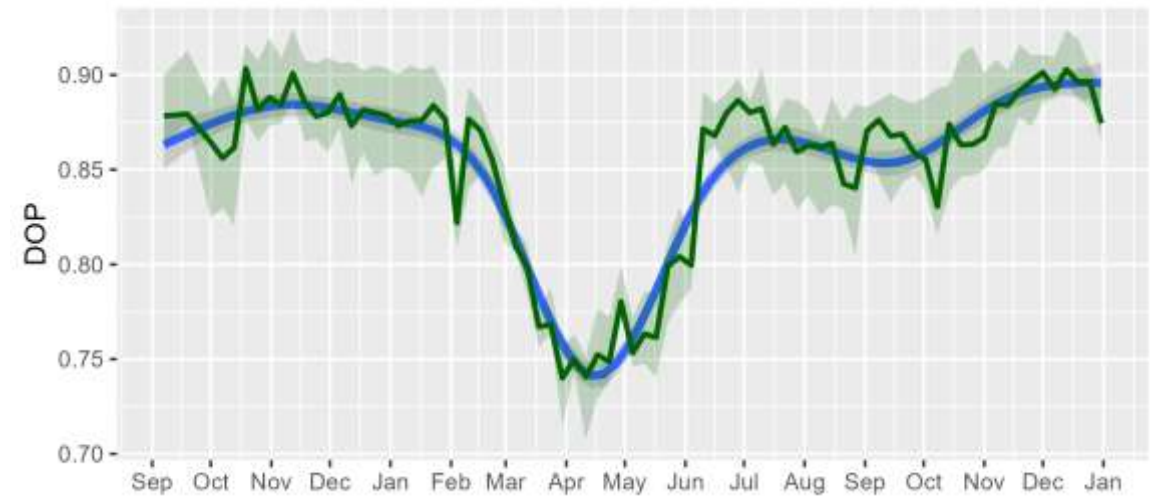


## 5.-Caso de estudio

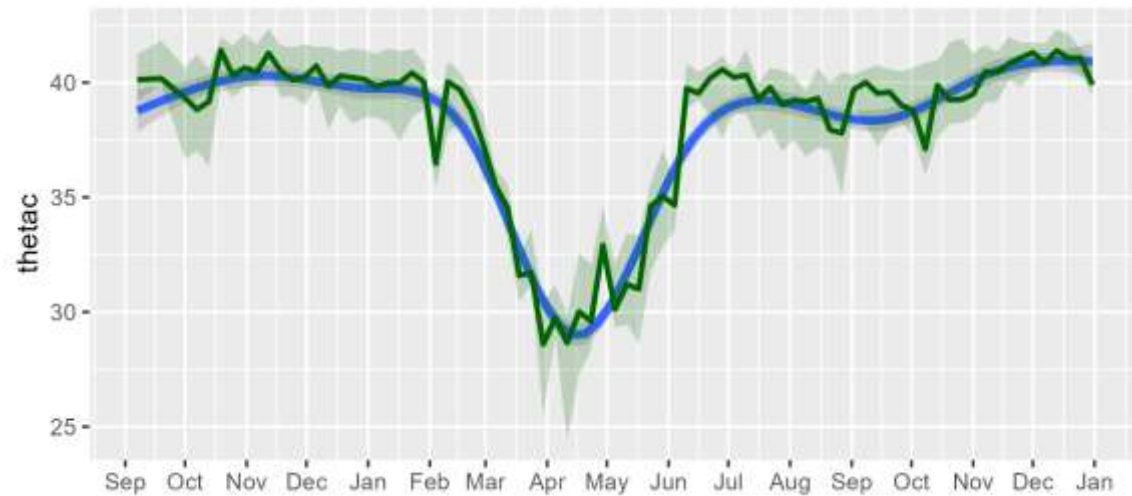
Guisantes\_secano



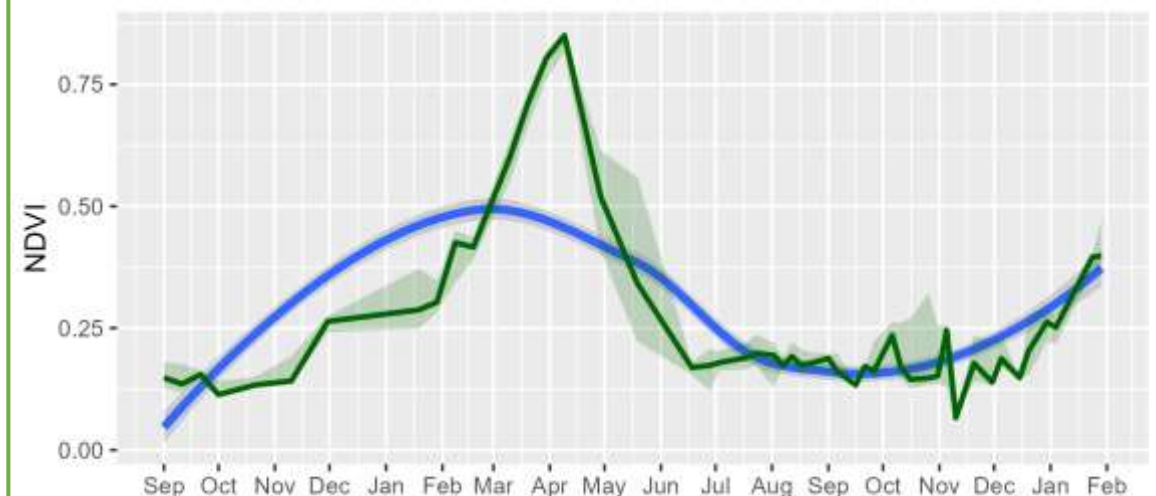
Guisantes\_secano



Guisantes\_secano



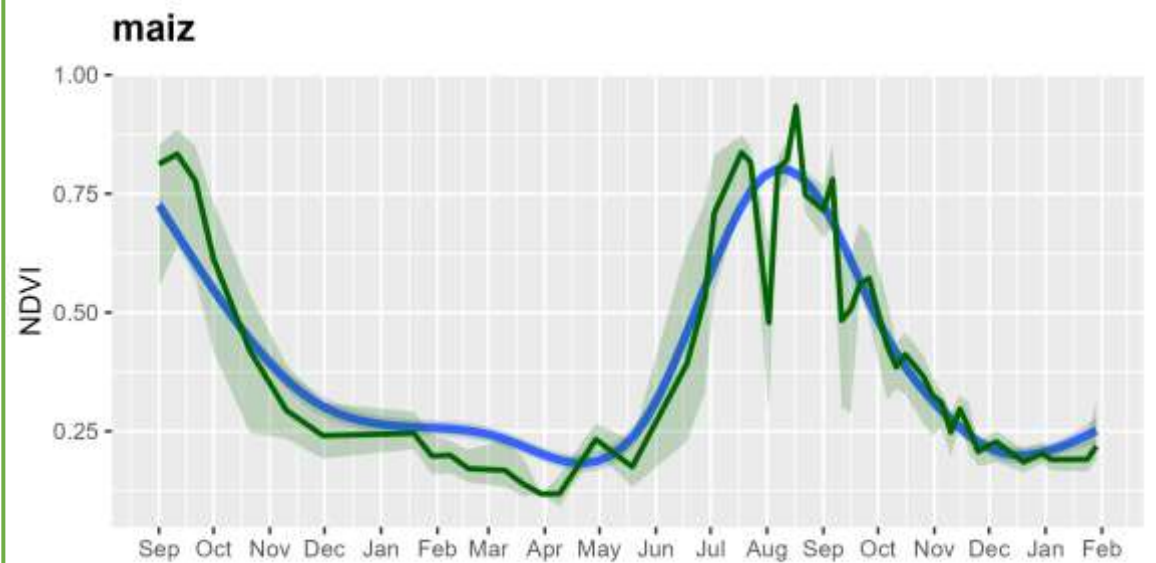
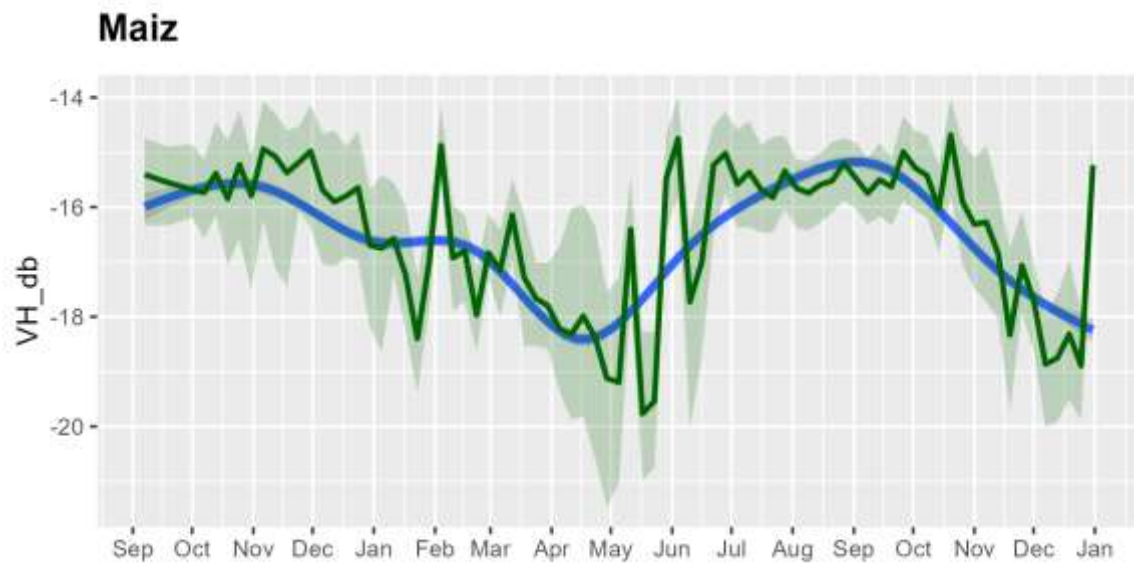
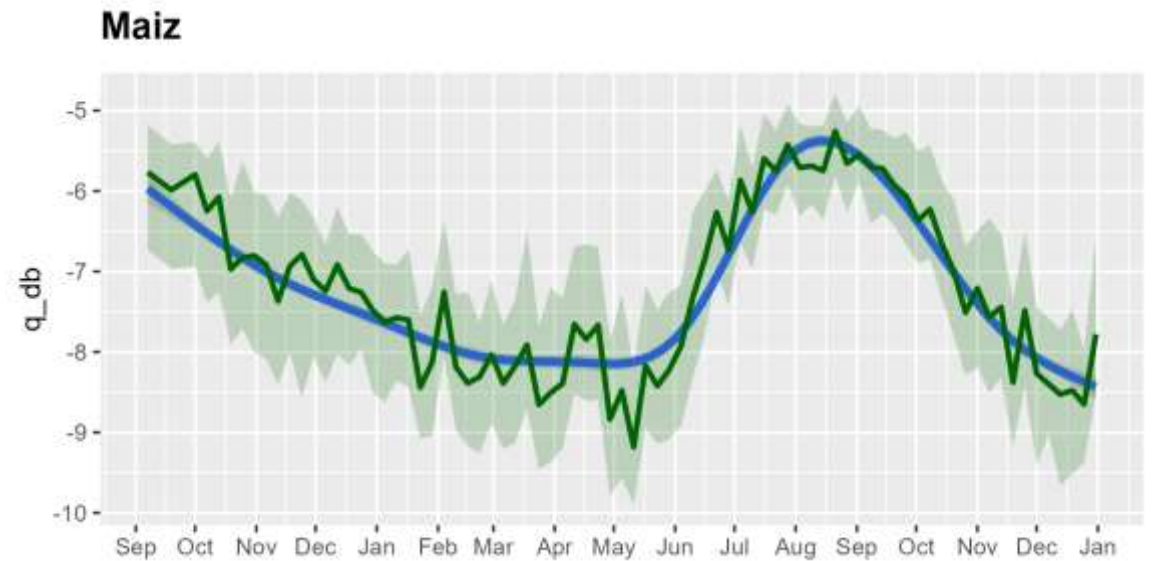
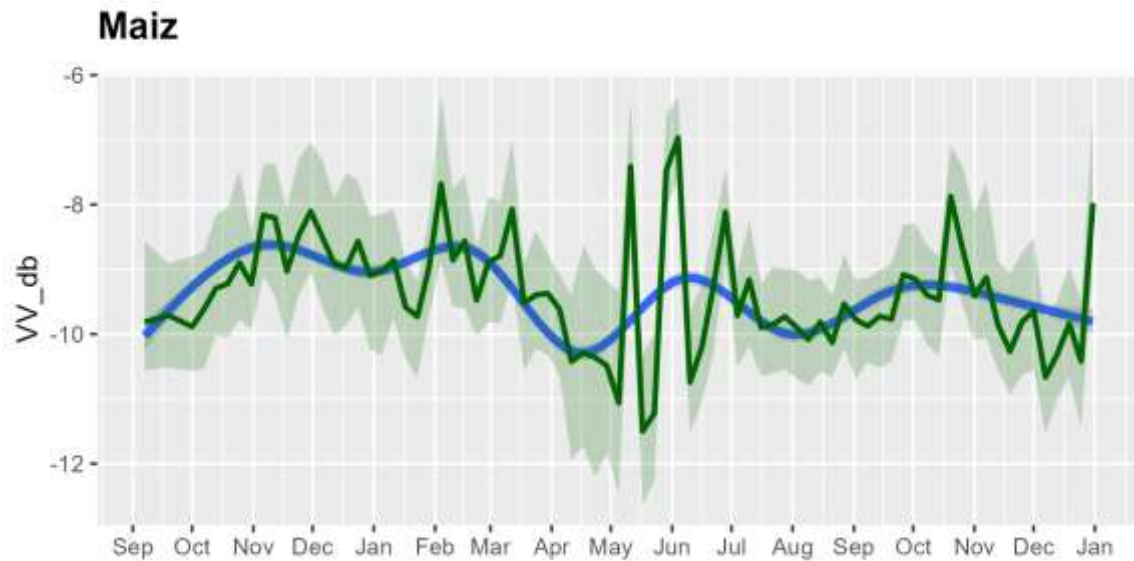
Guisantes\_secano



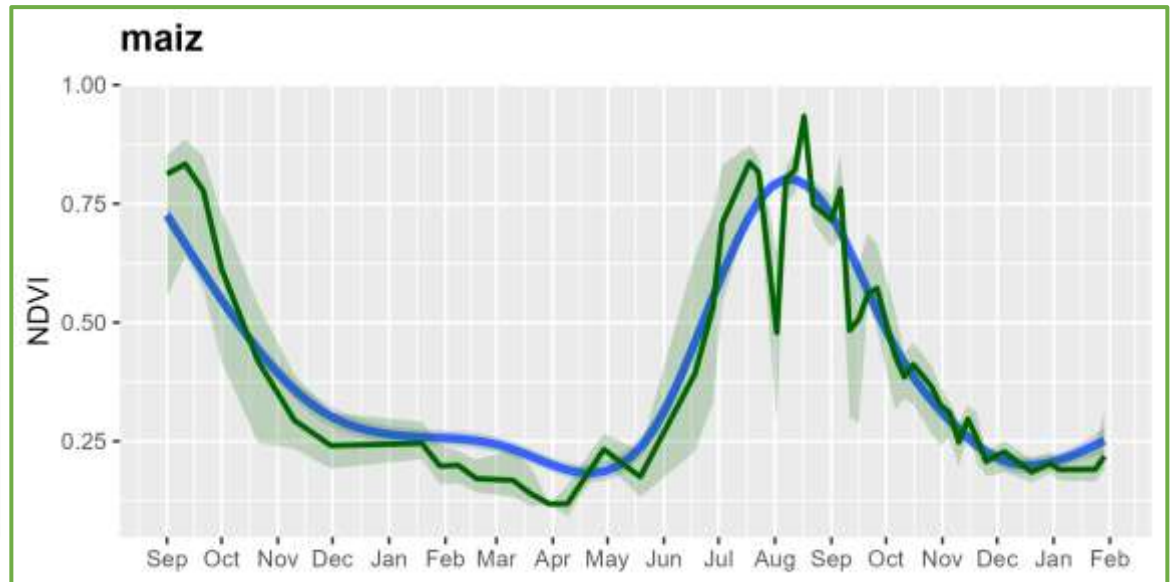
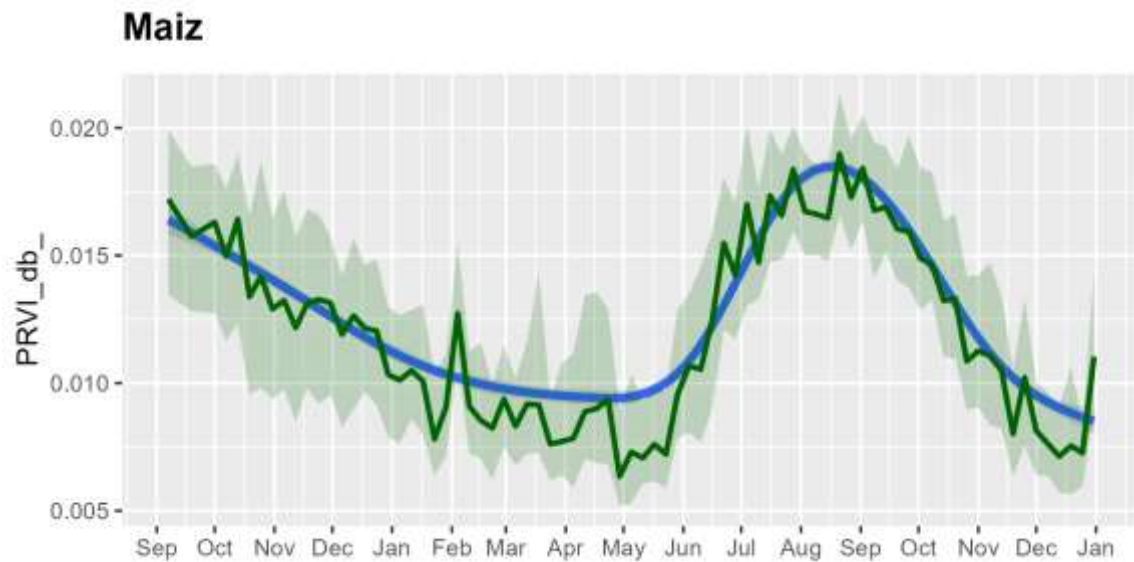
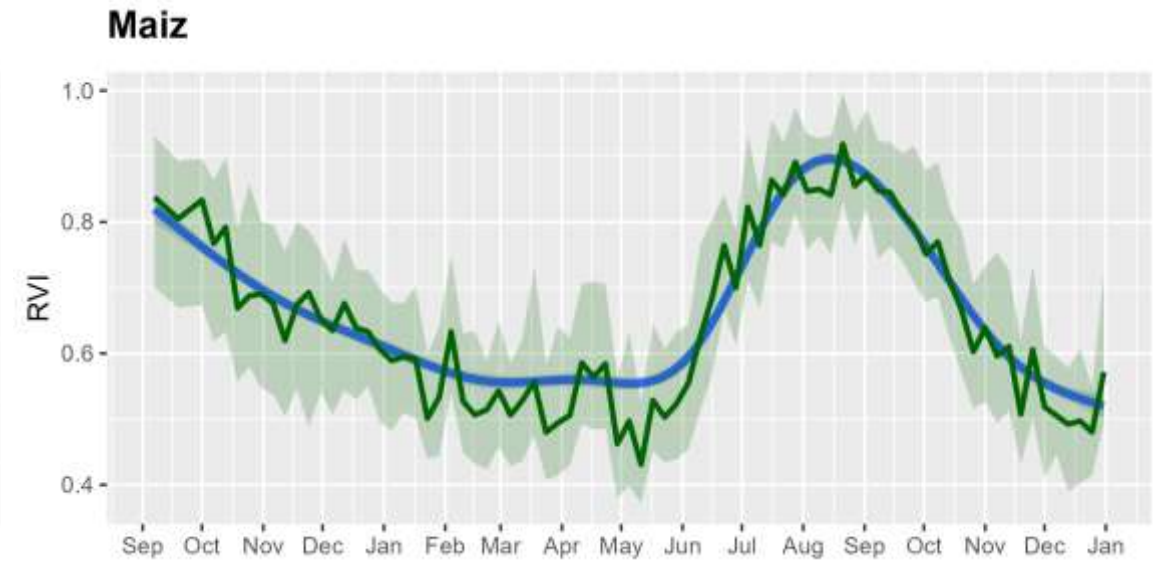
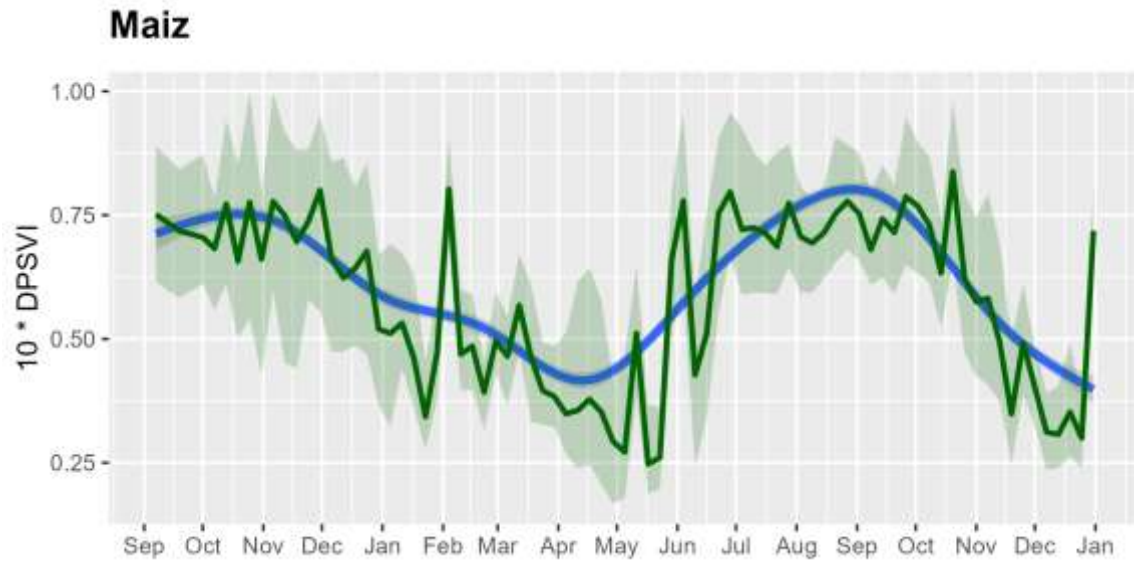
-Maíz:



## 5.-Caso de estudio



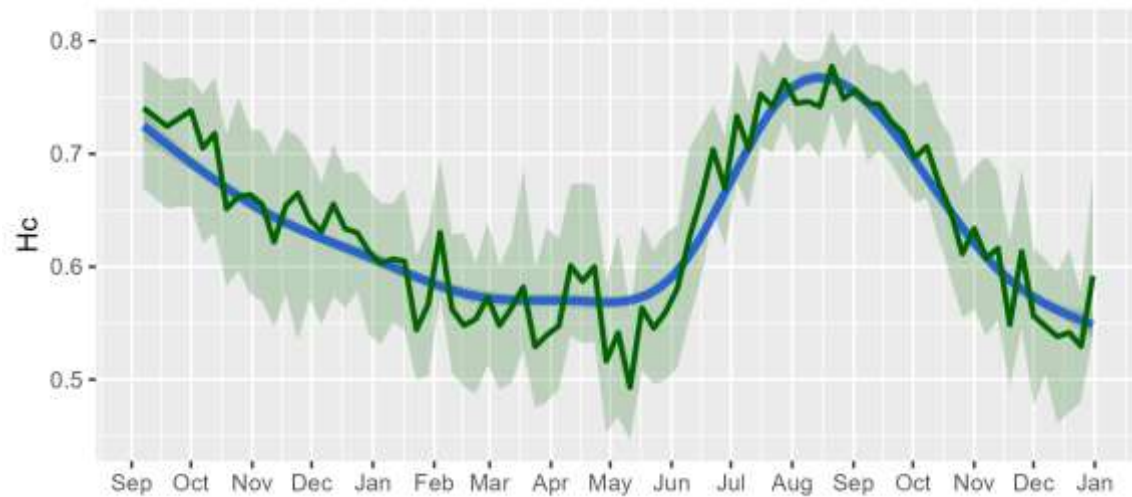
## 5.-Caso de estudio



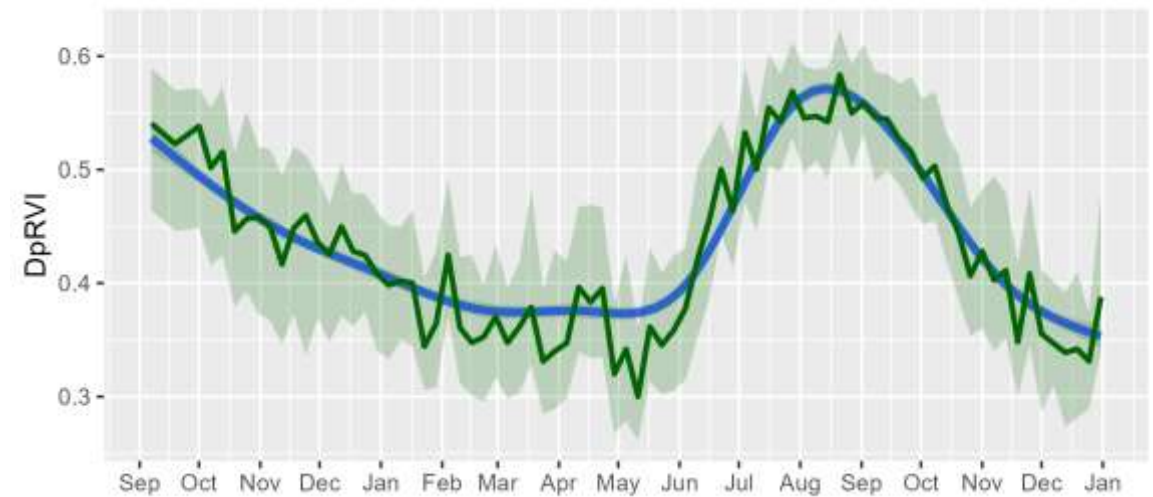


## 5.-Caso de estudio

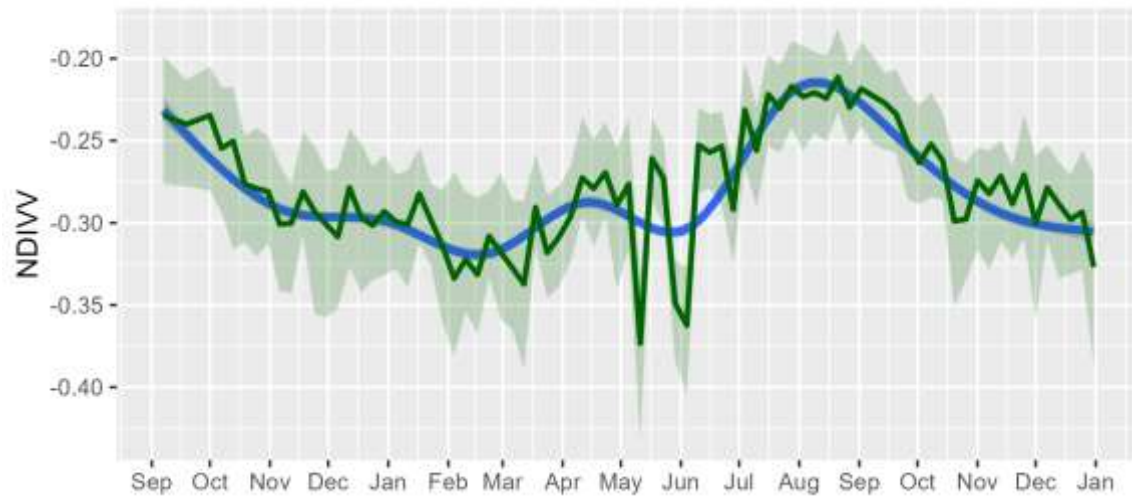
Maiz



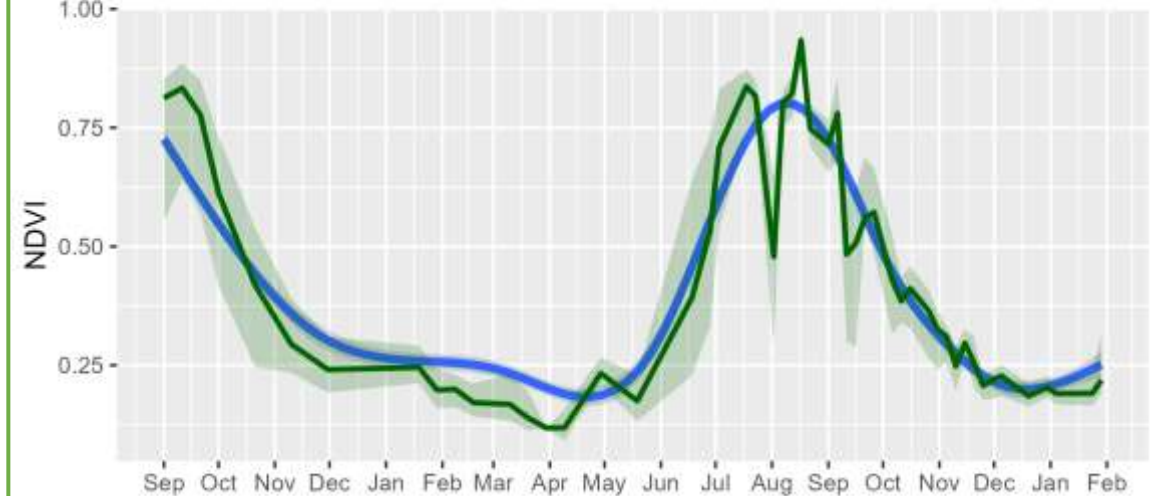
Maiz



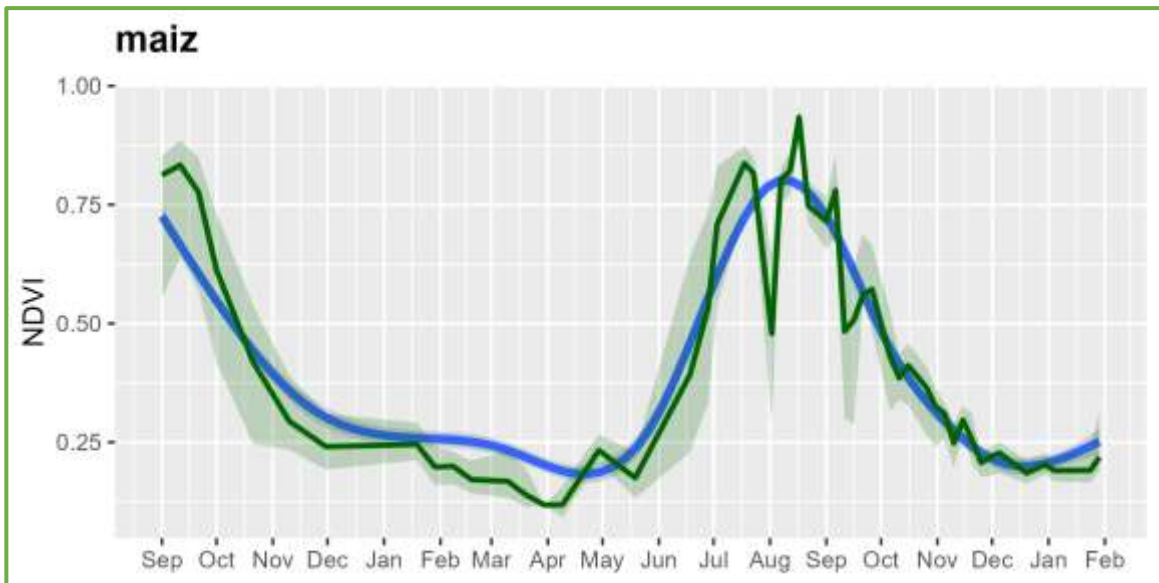
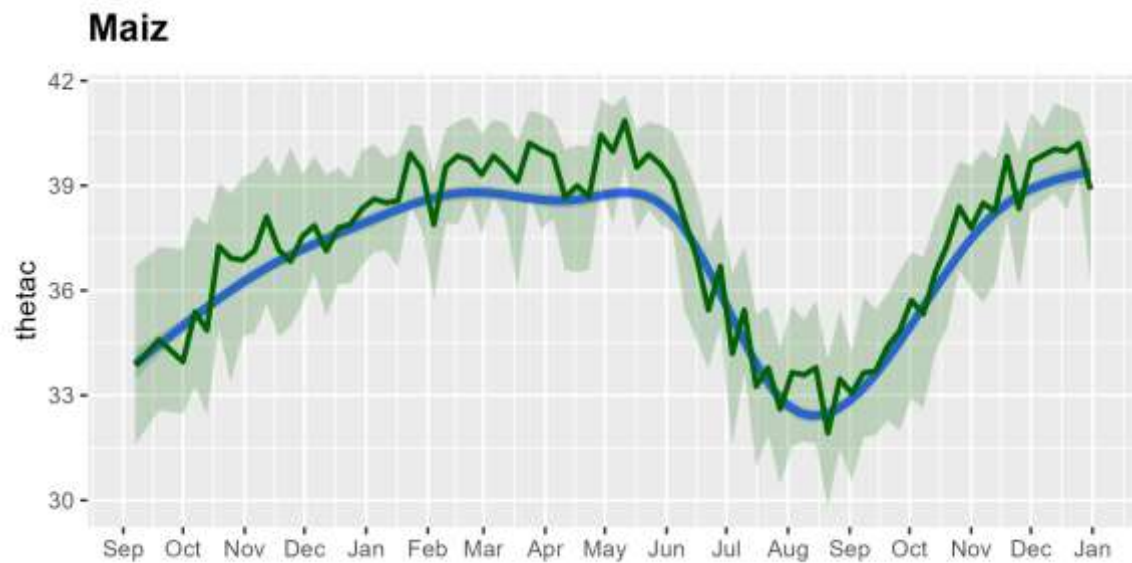
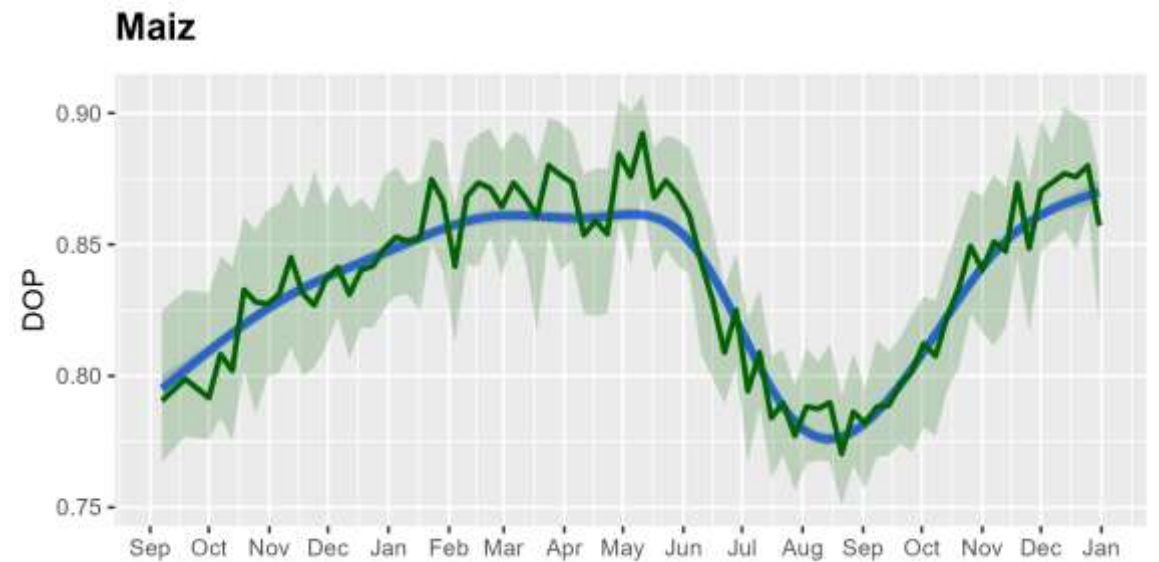
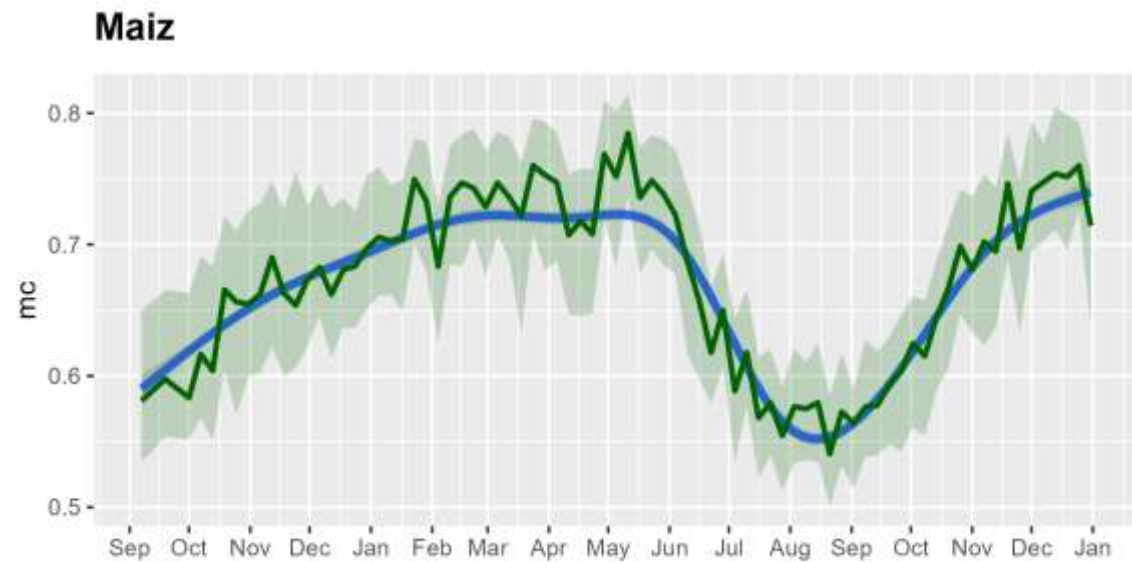
Maiz



maiz



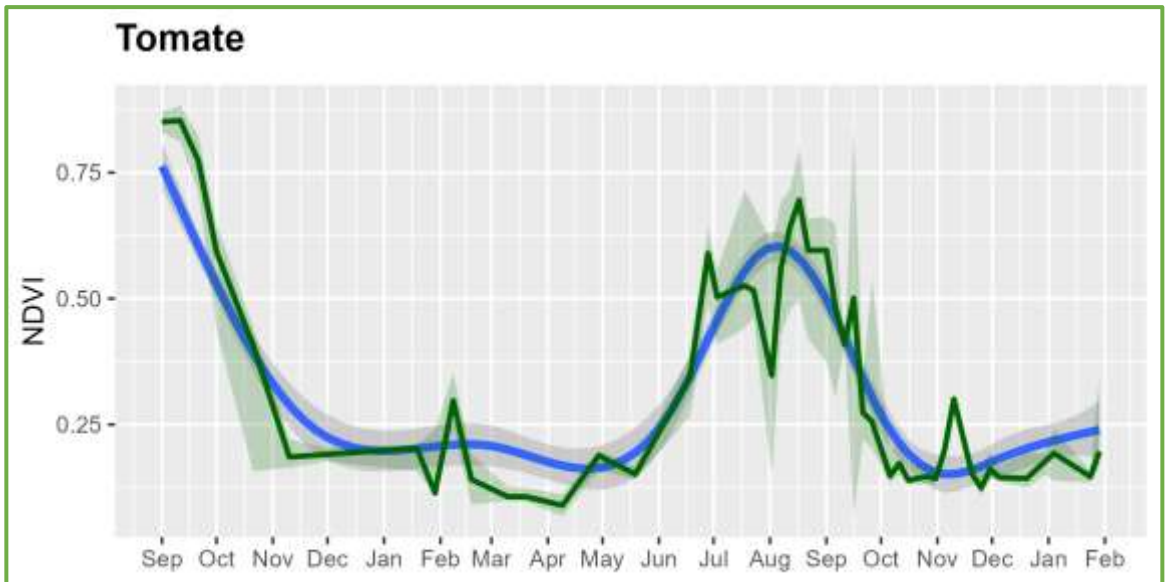
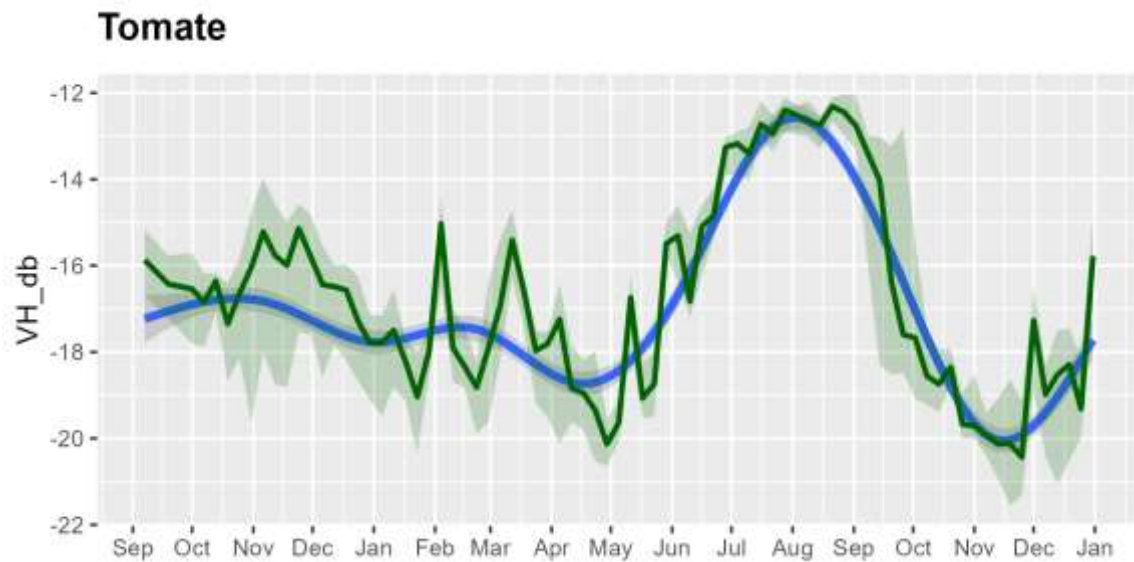
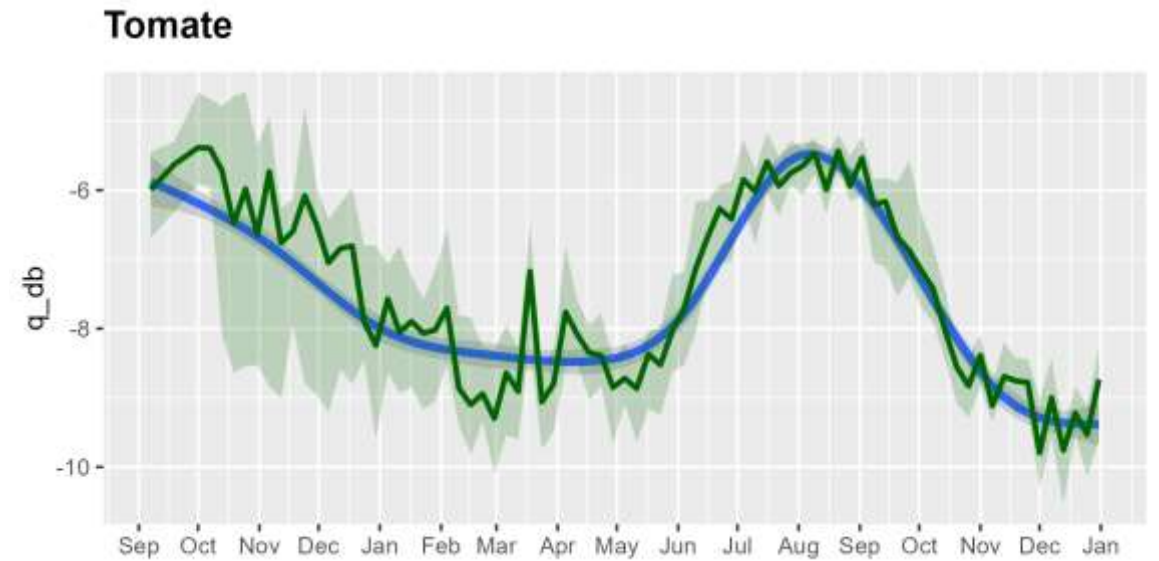
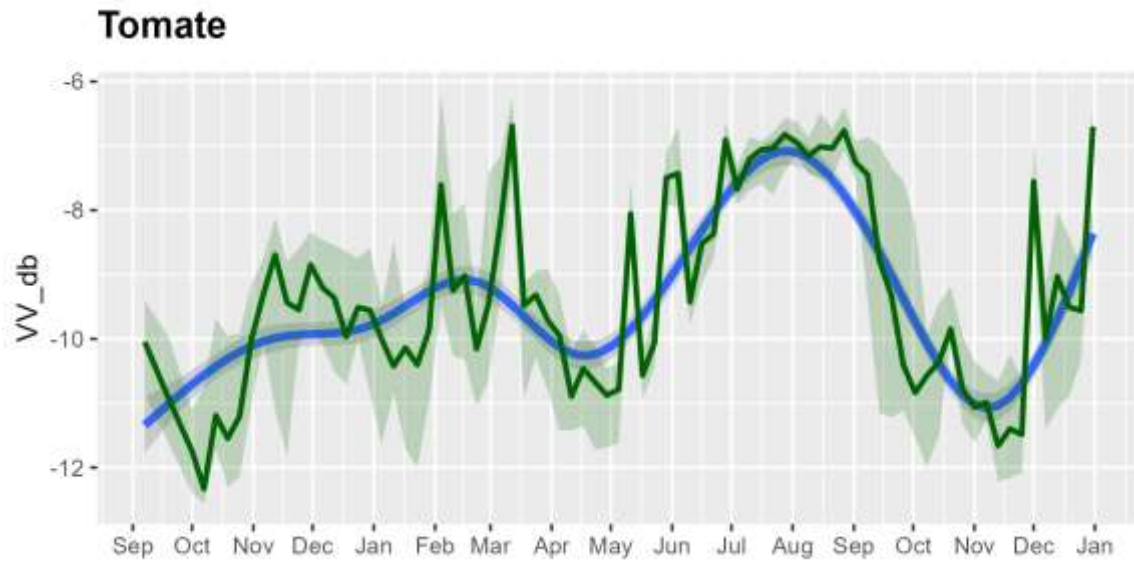
## 5.-Caso de estudio



-Tomate:

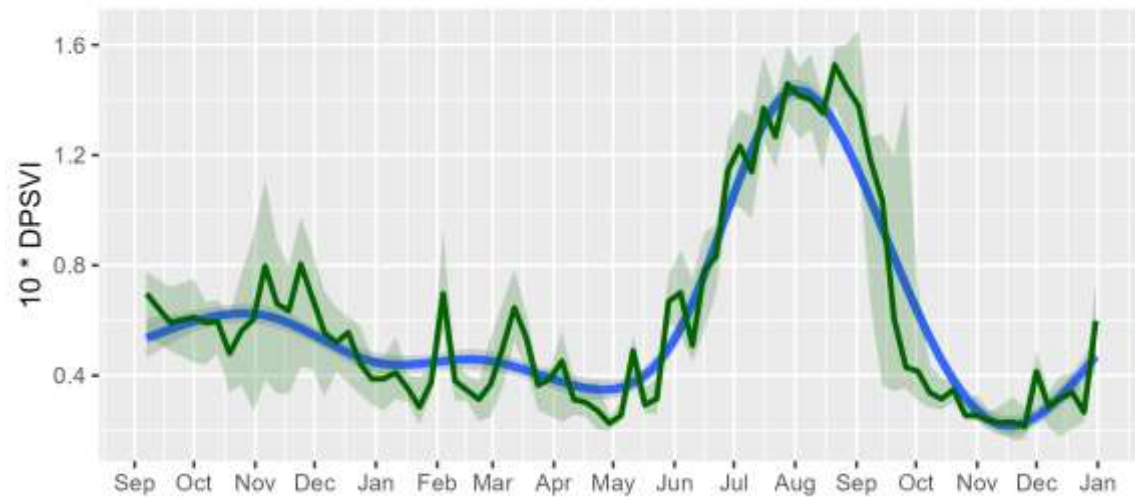


## 5.-Caso de estudio

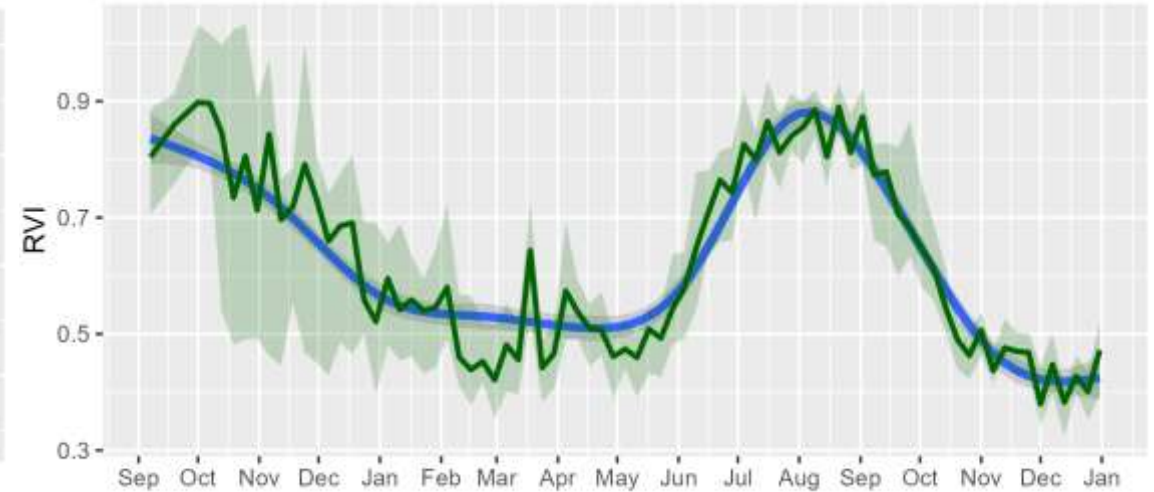


## 5.-Caso de estudio

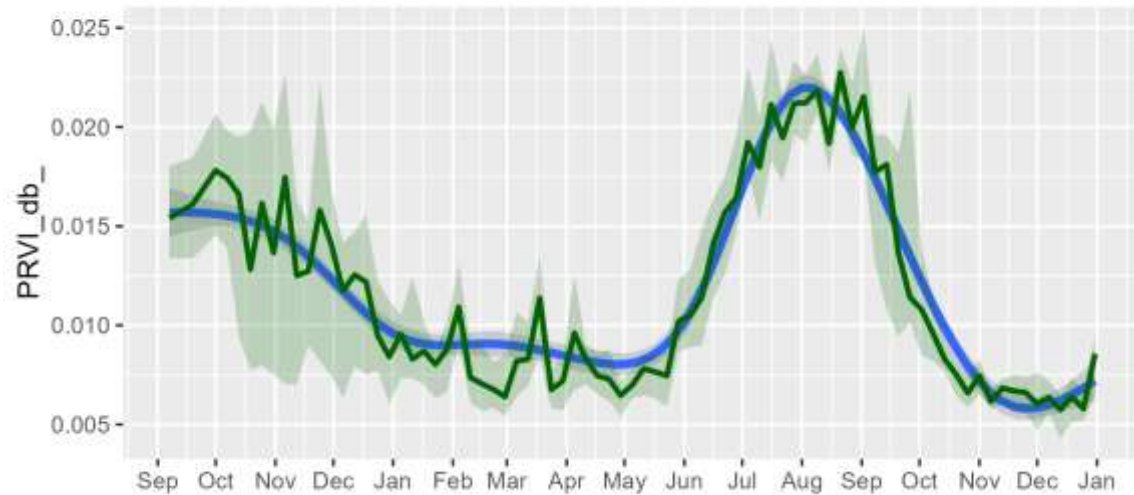
Tomate



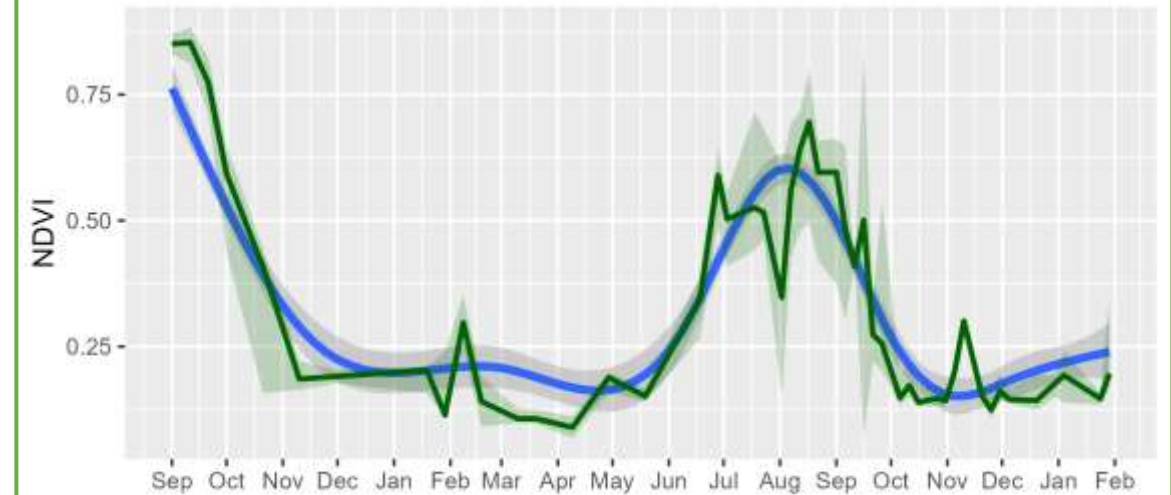
Tomate



Tomate

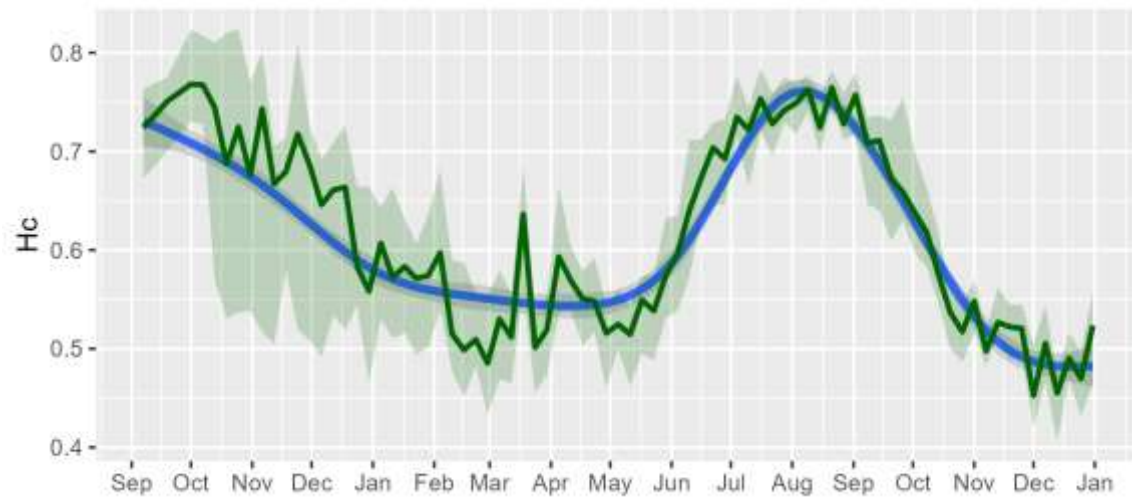


Tomate

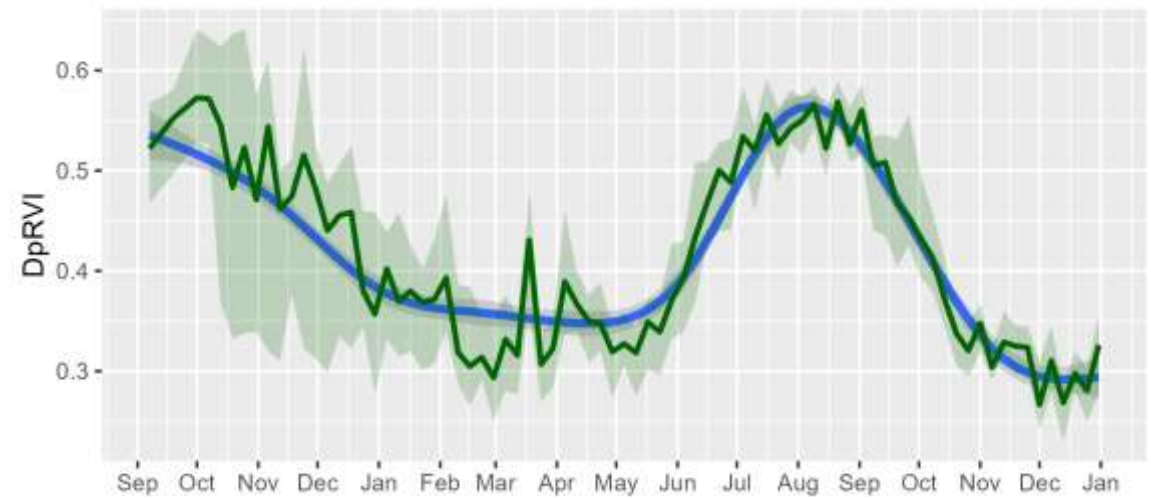


## 5.-Caso de estudio

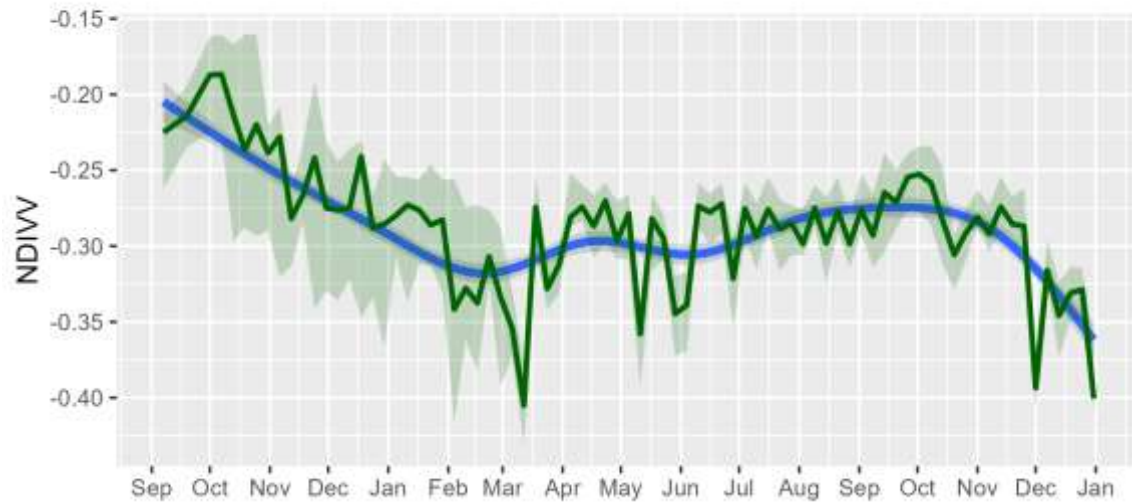
Tomate



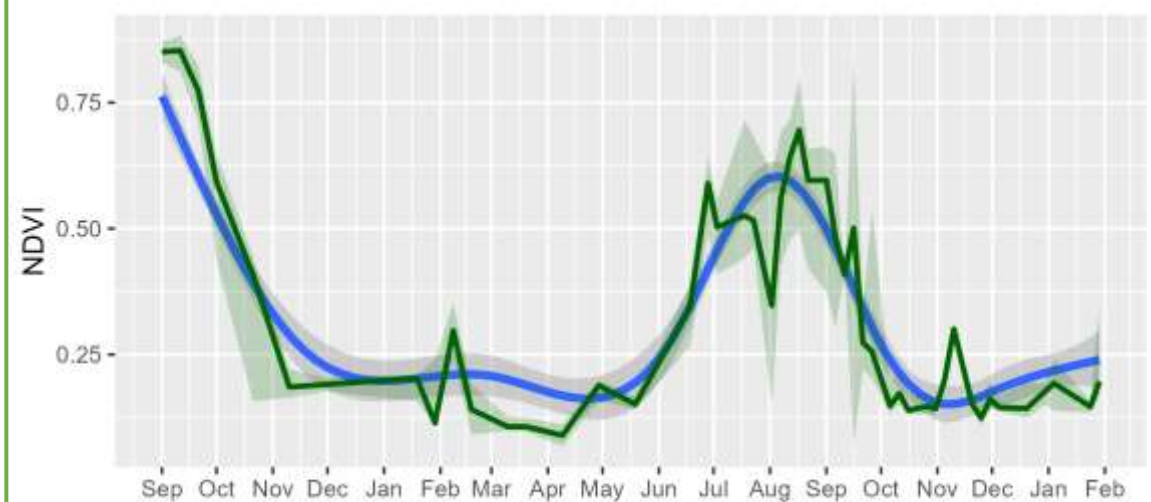
Tomate



Tomate

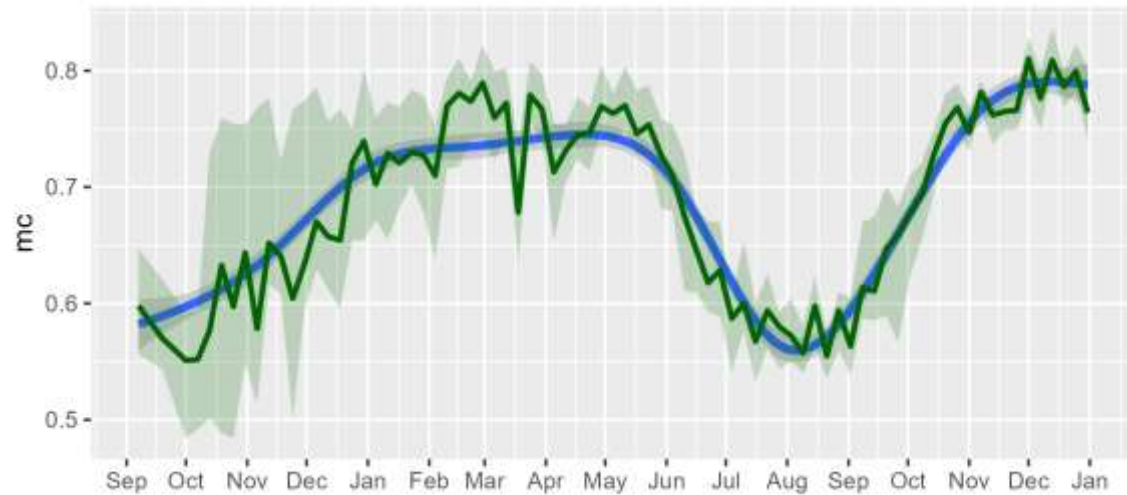


Tomate

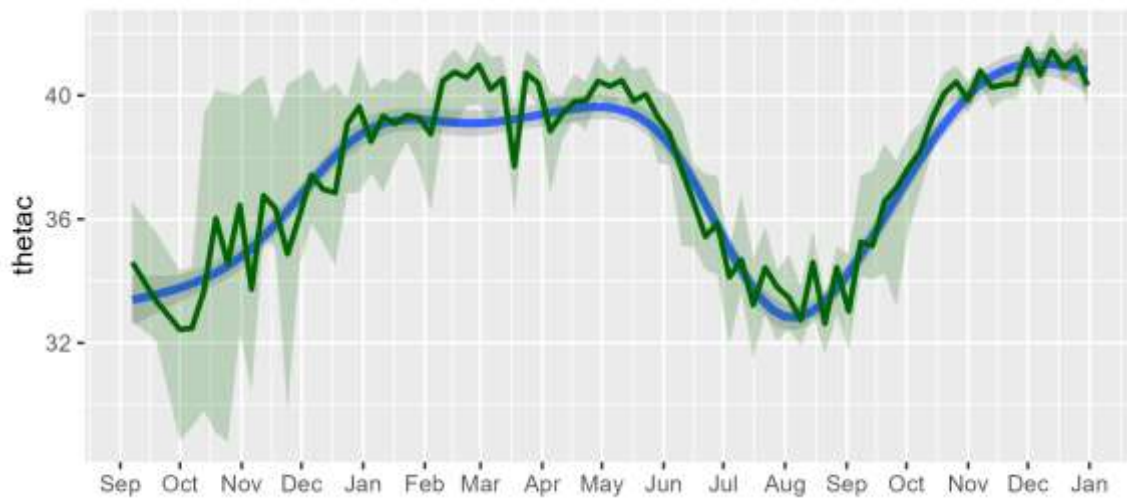
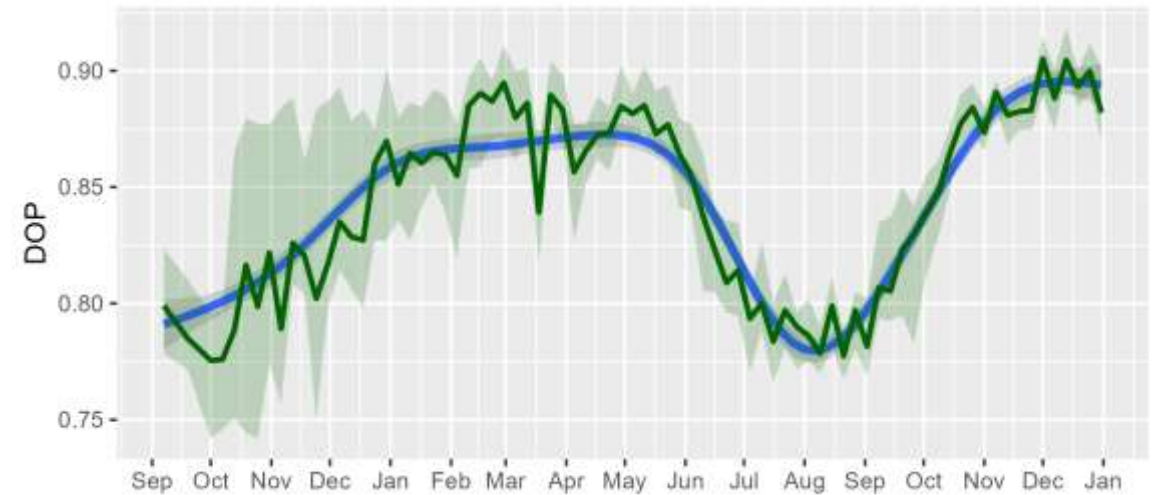


## 5.-Caso de estudio

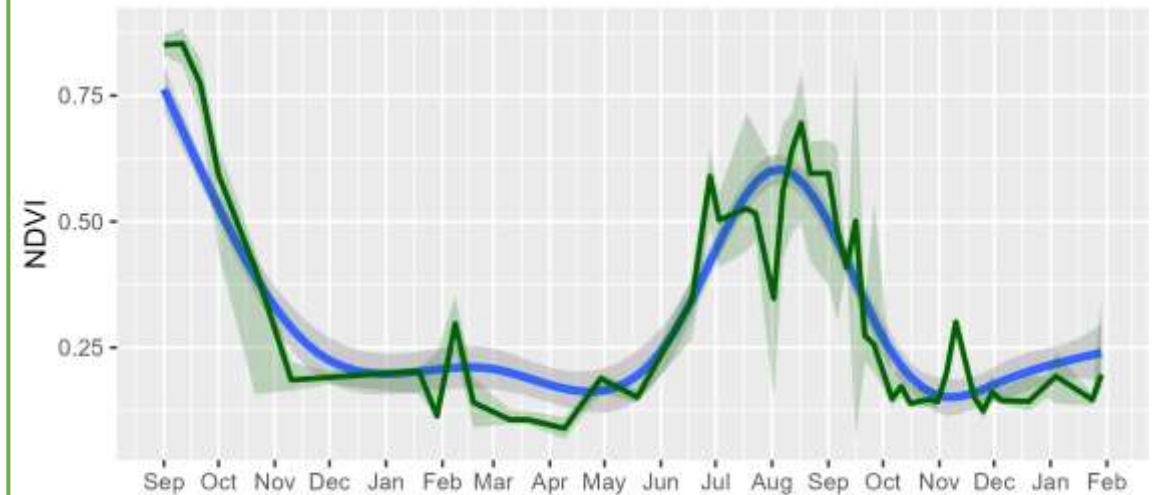
### Tomate



### Tomate



### Tomate



-Tabla resumen:

Índice	Nombre	Unidades	Autores
q	Cross-pol ratio	dB	Schlund & Erasmi, 2020
RVlvv	Radar Vegetation Index (VV)	0 – 1	Nasirzadehdizaji et al., 2019
DPSVI	Dual Pol SAR Vegetation Index	0 – 1*	Periasamy, 2018
PRVI	Polarimetric Radar Vegetation Index	dB	Chang et al., 2018
mc	Co-pol purity	0 – 1	Bhogapurapu et al., 2022
betac	Normalized co-pol intensity	0 – 1	Bhogapurapu et al., 2022
DpRVI	Dual Pol Radar Vegetation Index	0 – 1	Bhogapurapu et al., 2022
Hc	Pseudo-scattering Entropy	0 – 1	Bhogapurapu et al., 2021
$\theta_c$	Pseudo-scattering angle	0 – 45	Bhogapurapu et al., 2021
NDIVV	Normalized Difference Index VV	-1 – 0	Schulz et al., 2024

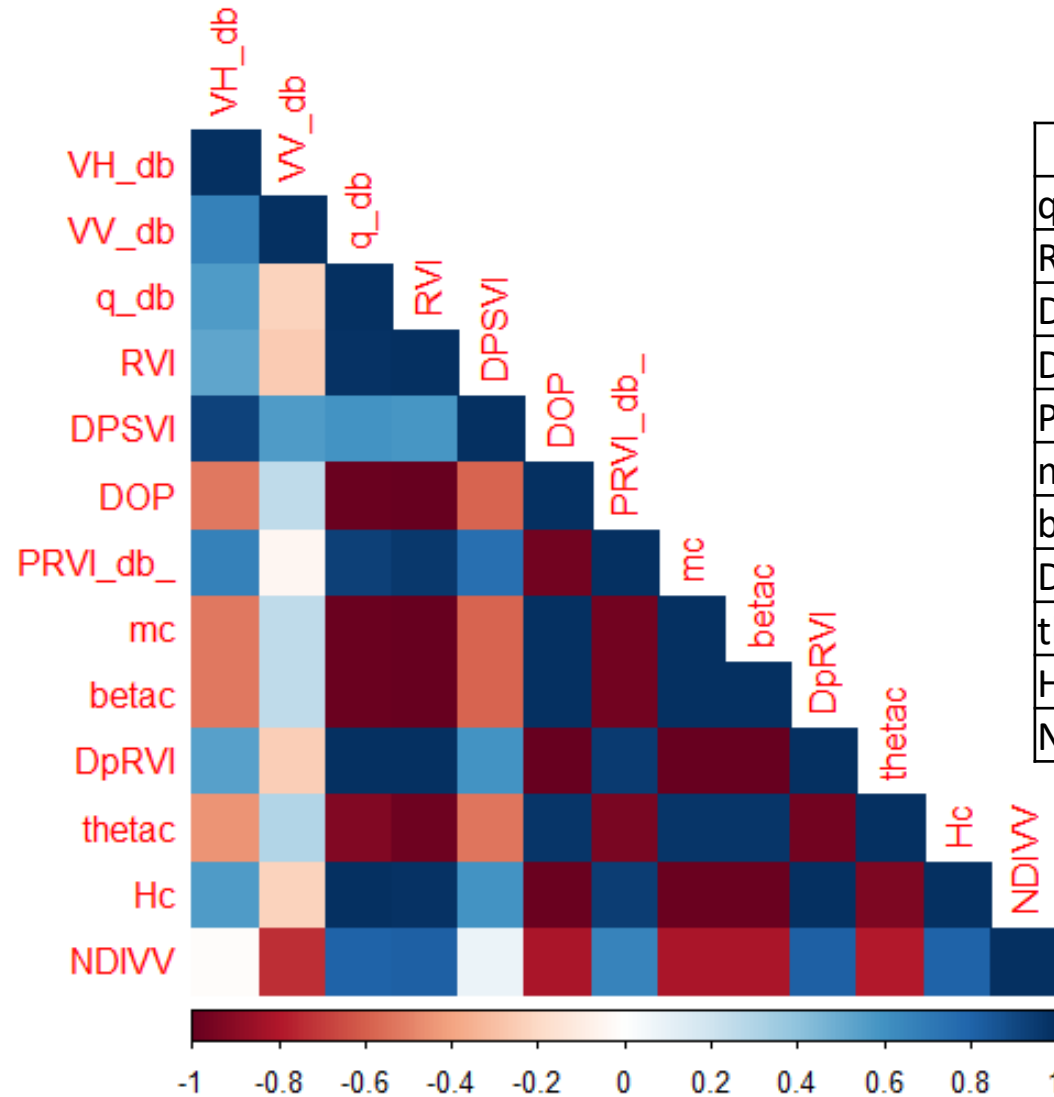
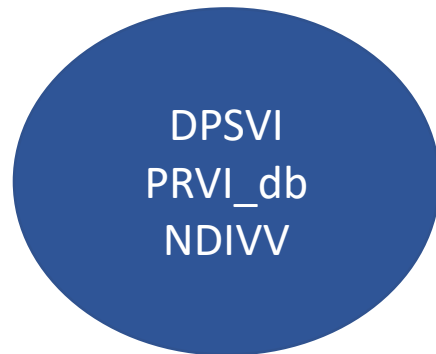
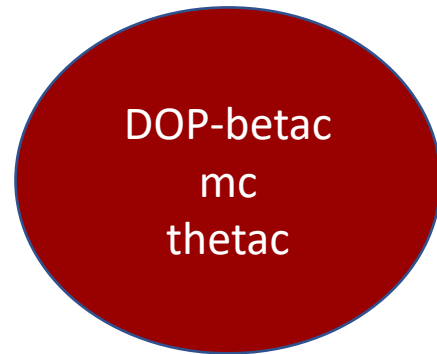
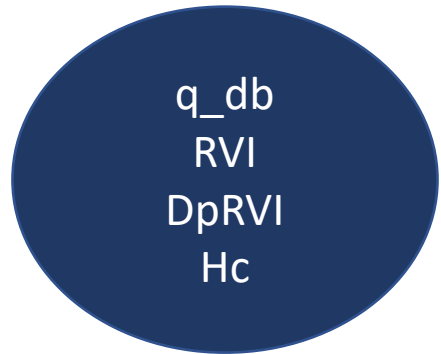




## 6.-Ideas finales

### -Correlación entre índices:

Tomando en cuenta todos los cultivos explorados en este caso de estudio se observa una correlación muy alta entre los distintos índices evaluados.



	R ~ NDVI
q_db	0.704
RVI	0.742
DPSVI	0.167
DOP	-0.742
PRVI_db_	0.673
mc	-0.742
betac	-0.742
DpRVI	0.728
thetac	-0.781
Hc	0.706
NDIVV	0.688



### -Mensaje final:

- A partir de observaciones Sentinel-1 en formato GRD es posible calcular índices que representan adecuadamente el desarrollo de cultivos de distintas características.
- Son índices sencillos que se pueden calcular a partir de productos ARD mediante una simple aritmética de los canales VV y VH.
- Aunque se han publicado distintos índices, la mayoría de ellos están muy correlacionados entre sí y algunos de ellos ofrecen información idéntica (al menos para los cultivos explorados en este análisis).
- La correlación de estos índices con el NDVI es alta en muchos casos.
- Típicamente tienen un desfase en el desarrollo fenológico respecto al NDVI, en la fase de emergencia el inicio del ascenso es posterior y en senescencia también la caída es posterior. El pico de desarrollo máximo generalmente coincide.
- Es conveniente probar estos índices en otros cultivos distintos, también en cubiertas forestales, y comparar su valor con datos de variables de la vegetación medidos en campo.

