

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL MONITOREO DE CULTIVOS A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE IMÁGENES ÓPTICAS Y SAR COSMO-SkyMed®

por Giovanni Mastronardi

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

MAGÍSTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Octubre, 2019

©IG - CONAE/UNC 2019

© FAMAFA - UNC 2019

Director: Ing. Luigi DINI

Co-Directora: Dra. Carolina TAURO



Desarrollo de una herramienta software para evaluar la capacidad de monitoreo de cultivos de la constelación COSMO-SkyMed®. Por Giovanni Mastronardi. Se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

*A mis abuelos
Giovanni, Maria,
Andrea y Maria Rosaria*

ABSTRACT

In this thesis work, it has been developed a software tool that allows a user to upload, pre-process and analyze the results derived from a heterogeneous set of satellite data and vector files in order to evaluate the growth monitoring capability of the agricultural species using both optical and radar (SAR) images. In particular, the tool was used to evaluate the crop monitoring capability of the COSMO-SkyMed® constellation SAR data. For the implementation, the Matlab® programming environment was used, since it offers many functions to handle satellite data, to construct a graphical interface and to graph the results. To facilitate its use, a graphic interface and its user manual were also developed. The developed tool was evaluated by comparing the outputs presented to the user by the developed interface with the results obtained through other commercial software on the same data, in order to corroborate the validity of the algorithms implemented in the application. Both validation tests verified the reliability of the interface. Once the validity of the application was developed and tested, the results of the tool for a particular use case were analyzed. As input data, we used WDVl and LAI maps from a study area located in the Marchfeld Region (Eastern Austria), a heterogeneous set of SAR COSMO-SkyMed® images and 5 vector files for 5 different agricultural species obtained during a work on-site acquisition. The results show that the agricultural species with the greater correlation between the backscatter coefficient σ and the LAI using COSMO-SkyMed® images in Himage mode and VH polarization is the carrot, while if we compare LAI with Ping Pong images, the sugarbeet shows the best performance and also has the highest correlation between σ and WDVl with both COSMO-SkyMed® images in Himage mode and VH polarization and with Ping Pong images with both polarizations. All the values related to this example of use of the tool are shown in Chapter 4. Based on the results obtained, we can conclude that the tool developed is reliable and useful for studies that involve the integration of optical and radar data for the monitoring of agricultural species. The ability to merge optical images and SAR COSMO-SkyMed® images to monitor crop growth is of great importance as it allows increasing the time frequency of acquisitions and improving the statistical reliability of the results. Both the developed application and the corresponding code are available so that any user can use it in their studies.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se desarrolló una herramienta software que permite al usuario cargar, pre-procesar y analizar los resultados derivados de un conjunto heterogéneo de datos satelitales y archivos vectoriales con el fin de evaluar la capacidad de monitoreo del crecimiento de las especies agrícolas utilizando tanto imágenes ópticas como de radar (SAR), en particular de la constelación COSMO-SkyMed®. Para la implementación, se utilizó el ambiente de programación Matlab®, ya que ofrece muchas funciones para manejar datos satelitales, para construir una interfaz gráfica y para graficar los resultados. Para facilitar su uso, se desarrolló la herramienta en forma de una interfaz gráfica con su manual de usuario. La herramienta desarrollada fue evaluada comparando las salidas que presenta al usuario la misma herramienta con los resultados obtenidos a través de otros softwares comerciales sobre los mismos datos, a fin de corroborar la validez de los algoritmos implementados en la aplicación. Ambas pruebas de validación comprobaron la confiabilidad de la interfaz. Una vez desarrollada y comprobada la validez de la aplicación, se presentaron los resultados que arroja la herramienta para un caso de uso particular. Como datos de entrada se utilizaron mapas de WDVl y de LAI de un área de estudio localizada en la *Región Marchfeld* (Austria oriental), un conjunto heterogéneo de imágenes SAR COSMO-SkyMed® y 5 archivos vectoriales para 5 diferentes especies agrícolas obtenidos durante un trabajo de adquisición in situ. Los gráficos muestran que la especie agrícola que presenta más correlación entre el coeficiente de retrodispersión σ y el LAI utilizando imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Himage y polarización VH es la zanahoria, mientras comparando el LAI con imágenes en modalidad Ping Pong la remolacha azucarera muestra el mejor desempeño y presenta también la más alta correlación entre σ y el WDVl tanto con imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Himage y polarización VH como con imágenes Ping Pong con ambas polarizaciones. Todos los valores relacionados con este ejemplo de uso de la herramienta se muestran en el Capítulo 4. Basados en los resultados obtenidos, podemos concluir que la herramienta desarrollada resulta fiable y útil para realizar estudios que impliquen la integración de datos ópticos y de radar para el monitoreo de las especies agrícolas. La posibilidad de poder integrar las imágenes ópticas y las imágenes SAR COSMO-SkyMed® a fin de monitorear el crecimiento de los cultivos resulta de gran importancia, ya que permite incrementar la frecuencia temporal de las adquisiciones y mejorar la confiabilidad estadística de los resultados. Tanto la aplicación desarrollada como el correspondiente código son de libre acceso para cualquier usuario que quiera utilizarlos en sus estudios.

PALABRAS CLAVE

SAR, COSMO-SkyMed®, WDVl, LAI, especies agrícolas, interfaz gráfica, imágenes satelitales, Matlab.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 OBJETIVOS DE LA TESIS.....	1
1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	2
1.3 EL RADAR SAR.....	2
1.4 INTERACCIÓN ENTRE LA SEÑAL SAR Y LA VEGETACIÓN: TELEDETECCIÓN APLICADA AL ESTUDIO DE CULTIVOS.....	5
1.5 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR SAR A BORDO DEL SATÉLITE COSMO-SkyMed®.....	7
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	10
2.2 IMÁGENES COSMO-SkyMed®.....	11
2.3 MAPAS DE WDVY Y DE LAI.....	14
2.4 ARCHIVOS VECTORIALES (SHAPEFILES).....	17
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA.....	19
3.1 PROCEDIMIENTO DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	19
3.2 LA INTERFAZ GRÁFICA: MANUAL DE USUARIO.....	21
3.3 VALIDACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	34
3.3.1 PRIMER TEST DE VALIDACIÓN: RECORTE.....	34
3.3.2 SEGUNDO TEST DE VALIDACIÓN: GRÁFICOS.....	39

CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO:	
EJEMPLO DE USO DE LA INTERFAZ.....	42
4.1 GRÁFICOS Y MODELOS.....	42
4.2 CONSIDERACIONES ESTADÍSTICAS.....	53
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	62
AGRADECIMIENTOS.....	65
REFERENCIAS.....	66

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

1.1 OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo general de este trabajo de tesis es desarrollar una herramienta software de procesamiento de imágenes que permita fusionar productos satelitales ópticos, imágenes SAR COSMO-SkyMed® y archivos vectoriales para el estudio de cultivos.

En particular, esta herramienta permitirá al usuario cargar, pre-procesar y analizar los resultados derivados de un conjunto heterogéneo de datos satelitales y archivos vectoriales para evaluar la capacidad de monitoreo del crecimiento de las especies agrícolas utilizando imágenes de radar (SAR), estableciendo una correlación entre datos derivados de imágenes de radar (coeficiente de retrodispersión) y datos derivados de imágenes ópticas (mapas de WDVI/LAI), que al estado del arte son las que mas se utilizan para este tipo de aplicación.

Otros objetivos específicos de esta tesis son:

- Desarrollar una interfaz gráfica para la herramienta con su correspondiente manual de usuario.
- Poner a disposición de la comunidad de usuarios todo el código generado en esta tesis.
- Comparar las salidas de la herramienta desarrollada con las salidas de otros software comerciales de uso común, al fin de corroborar la solidez de la herramienta.

- Presentar un ejemplo de utilización de la herramienta con datos satelitales heterogéneos de un área de estudio localizada en la *Región Marchfeld* (Austria oriental).

El software desarrollado en este trabajo de tesis constituye una herramienta adicional a las ya existentes, útil para evaluar la capacidad de integrar los datos SAR y las imágenes ópticas para modelar el crecimiento de los cultivos. El análisis realizado a lo largo de este trabajo involucra las condiciones puntuales desarrolladas y explicadas en el mismo. Sin lugar a dudas, es un campo sumamente fértil para seguir desarrollando la investigación, teniendo en cuenta nuevos estados del arte y posibles cambios y repercusiones halladas en el futuro.

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis está organizada en 5 Capítulos. En el Capítulo 1 se presenta la motivación y objetivos del trabajo y un marco teórico. En el Capítulo 2 se describe el área de estudio y los datos disponibles para realizar la evaluación de la herramienta software, cuyo desarrollo junto con la interfaz gráfica y manual de usuario son explicadas en el Capítulo 3. Además, en el Capítulo 3 se presenta una evaluación del desempeño de la herramienta software mediante la ejecución de diferentes pruebas de comparación con otros software comerciales. El Capítulo 4 presenta un ejemplo de uso de la aplicación con datos reales. Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones del trabajo junto con las posibles futuras extensiones del mismo.

1.3 EL RADAR SAR

En este trabajo de tesis se utilizan imágenes adquiridas por un sensor de radar de apertura sintética (SAR) a bordo del Satélite COSMO-SkyMed® perteneciente a la

Agencia Espacial Italiana (ASI). Este instrumento permite obtener resoluciones espaciales del orden de los metros a partir de la síntesis de una antena sintética mediante la generación y procesamiento avanzado de una onda electromagnética en la región de las microondas [52].

La ecuación de radar da cuenta de la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida. Esta expresa la potencia recibida por el sensor del radar en función de la potencia transmitida por la antena y la reflexión de la señal en un blanco. La relación fundamental entre las características del radar, el blanco y la señal recibida está dada por esta ecuación que en el caso de un reflector puntual y lambertiano es:

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R_t^2} \sigma \frac{A_r}{4\pi R_r^2} \quad [1.1]$$

Donde:

- P_t es la potencia enviada por el transmisor a la antena que transmite.
- G es la ganancia de la antena, que multiplicada por P_t da cuenta de la potencia irradiada por la antena.
- R_t es la distancia entre el blanco reflector y el transmisor.
- σ es la sección eficaz de retrodispersión (al radar) del blanco y es el factor que relaciona la fuente de iluminación con la superficie. Esta depende de las características dieléctricas y estructurales del blanco, del área y de la respuesta angular. Este concepto es equivalente al de reflectancia en el óptico. Tiene unidades de superficie.
- R_r es la distancia entre el reflector y el receptor (en el caso de un satélite la antena que emite es la misma que recibe entonces $R_r=R_t$)
- A_r es la superficie efectiva de la antena que recibe la señal (en el caso de satélites es la misma que envía)

Por otro lado, la ecuación de antenas muestra que la ganancia G es inversamente proporcional a la longitud de onda (λ) involucrada y directamente proporcional al área efectiva (A_t) como se observa a continuación:

$$G = \frac{4\pi A_t}{\lambda^2} \quad [1.2]$$

Si se reemplaza la Ec 1.2 en la Ec 1.1 y se toma la posición del sensor igual a la del transmisor entonces se obtiene la ecuación de radar en función de la longitud de onda y la distancia al blanco R:

$$P_r = \frac{P_t G \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad [1.3]$$

De la Ec. 1.3. se ve que la intensidad de la radiación cae como la cuarta potencia de la distancia. Para aumentar la radiación recibida habría que contar con una antena mayor o trabajar con longitudes de onda menores. Esto último está limitado por las capacidades tecnológicas y por la absorción de las especies químicas presentes en la atmósfera respectivamente.

El coeficiente de retrodispersión o “coeficiente de backscattering” es la sección eficaz de retrodispersión de un determinado blanco, σ , normalizada por el área y se denomina σ^0 . Este coeficiente es adimensional ya que al realizar la división se cancelan las unidades de área. La Ec. 1.4 muestra la sección eficaz, σ , despejada de la Ec.1.3 y la Ec. 1.5 presenta la manera de calcular el coeficiente de backscattering, σ^0 :

$$\sigma = \frac{P_r (4\pi)^3 R^4}{P_t G^2 \lambda^2} \quad [1.4]$$

$$\sigma^0 = \frac{\sum \sigma_i}{A} = \frac{\sigma}{A} \quad [1.5]$$

Donde σ_i es la sección eficaz individual de cada porción del terreno de proporciones similares a la longitud de onda incidente y A es el área total en donde se promedian todas esas respuestas para dar como resultado la sección eficaz de cada píxel [52].

1.4 INTERACCIÓN ENTRE LA SEÑAL SAR Y LA VEGETACIÓN: TELEDETECCIÓN APLICADA AL ESTUDIO DE CULTIVOS

Los datos de radar derivados de observaciones remotas contienen una cantidad considerable de información relacionada con la dinámica de la vegetación. La habilidad de extraer y analizar esta información puede aumentar la capacidad de monitoreo del crecimiento de las especies agrícolas y de su estrés hídrico [1]. La retrodispersión radar de las superficies cubiertas con vegetación incluye contribuciones de retrodispersión directa proveniente de la propia vegetación, retrodispersión desde el suelo que es atenuada por la capa superficial de la vegetación y la retrodispersión debida a las interacciones entre la vegetación y el suelo subyacente [2-4]. Las interacciones entre las microondas y la capa superficial de la vegetación dependen de las propiedades intrínsecas del radar, o sea la frecuencia, la polarización y el ángulo de incidencia bajo el cual se mira la capa de vegetación [5-8], como también de las propiedades dieléctricas, del tamaño, de la forma, de la orientación y de la rugosidad de cada uno de los dispersores individuales (hojas, tallos, frutos) [9-11] y de su distribución a lo largo de la capa [12,13]. Las propiedades dieléctricas de la vegetación dependen principalmente de su contenido de agua y, en menor medida, de su temperatura y salinidad [14,15]. Estas características específicas de la capa superficial de cada especie agrícola varían a lo largo de la temporada de crecimiento y están influenciadas por las condiciones ambientales y por el estrés hídrico de las plantas [16-24]. La dispersión del suelo subyacente está influenciada por su rugosidad y por sus propiedades dieléctricas [25,26], que dependen principalmente de su contenido de humedad [27,28].

En general, las propiedades intrínsecas del medio que afectan la señal son:

- La humedad: la constante dieléctrica del agua es mucho mayor que la de otros medios (como suelo, hielo seco, etc) y cuanto más grande es la razón entre la constante dieléctrica del medio y la del vacío, mayor es la reflexión de la onda electromagnética en la superficie. Por este motivo, la presencia de agua en el medio provoca mayores coeficientes de retrodispersión. Es importante

destacar que la rugosidad en la superficie hace posible que la respuesta sea detectada en la dirección de mirada del sensor cuando se utilizan ángulos grandes.

- Densidad: este parámetro tiene que ver con la cantidad de masa por unidad de volumen. Cuando una onda interactúa con un medio, la reflexión y la refracción que se producen dependen de la constante dieléctrica de éste que, para un medio homogéneo, varía cuando cambia la densidad del material en función de su naturaleza química y/o de las condiciones ambientales (presión, temperatura). Si el medio no es homogéneo se observará la respuesta promedio de sus componentes.
- Temperatura: la constante dieléctrica del medio depende de sus propiedades químicas las cuales varían con la temperatura y por lo tanto cambios en este parámetro provocan cambios en la respuesta a la perturbación. Por ejemplo la densidad y composición de la atmósfera terrestre varían con la temperatura, que es una función de la altura, entre otros factores. La onda interactúa con diferentes medios a medida que atraviesa esta capa estratificada pero a diferencia del óptico las ondas de radar no son absorbidas y las variaciones registradas son generalmente despreciables. Por otro lado cuando la onda incide sobre un fluido, los cambios de temperaturas modifican su viscosidad y por lo tanto la rugosidad que pueda generar un viento (olas) se verá aumentada o disminuída dependiendo de la temperatura del fluido.
- Química de fluidos: las propiedades macroscópicas de los fluidos dependen de su naturaleza química, de la presión y la temperatura y por lo tanto la respuesta al radar puede reflejar cambios de estas propiedades si se eligen adecuadamente las condiciones de medición. Por ejemplo la diferencia de viscosidad entre agua y petróleo facilita la detección de derrames de este compuesto en océanos. Para ello se deben cumplimentar condiciones de medida del sensor y de velocidad del viento para que la respuesta del petróleo sea la de una superficie lisa mientras que la del océano la de una rugosa.
- Superficie específica: el coeficiente de retrodispersión es un promedio de la respuesta individual de pequeñas superficies que forman el área iluminada de cada pixel. Para una misma área iluminada, la superficie real que sensa la onda

es una función de su rugosidad. Si la superficie es detectada como rugosa, es decir si tiene una superficie específica alta, se observará un coeficiente de retrodispersión mayor.

Consecuentemente, hay un potencial significativo para el uso de datos de radar derivados de sensores remotos para aplicaciones agrícolas, en particular para la clasificación, el monitoreo de cultivos y el monitoreo de la humedad sea del suelo como de la vegetación. Además, la capacidad de las microondas de baja frecuencia (1-10 GHz) de penetrar las nubes y de permitir adquisiciones sin la necesidad de luz solar, asegura la disponibilidad de observaciones oportunas y fiables [29].

1.5 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR SAR A BORDO DEL SATÉLITE COSMO-SkyMed®

El monitoreo global, nacional y regional de la producción agrícola es fundamental para una gran cantidad de usuarios. Estos usuarios incluyen los que se ocupan de la seguridad alimentaria, que necesitan estimaciones de la producción para abordar la posible escasez de alimentos, operadores financieros de materias primas que buscan información para facilitar la toma de decisiones financieras, y las agroempresas, que necesitan estimaciones de cosecha con antelación para desplegar recursos sea de cosecha como de transporte. La estimación de la producción no es una tarea trivial y, como se describe en Chipanshi et al. [30], los métodos se dividen en estadísticos, mecánicos y funcionales, donde los datos de observación de la Tierra son cada vez más utilizados como entrada de modelos, sea para la estimación de las condiciones de las plantas como para predecir la producción. Los agrónomos están a menudo interesados en utilizar tanto el índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés) como la biomasa y otros índices de vegetación como indicadores de rendimiento potencial de los cultivos [31]. La estructura de la capa superficial de una especie agrícola influye de manera significativa en la intensidad de la respuesta al radar, como también en el tipo de respuesta y en las características de la fase. Esta

estructura es específica del tipo de especie agrícola, y por cada especie agrícola varía a lo largo del ciclo fenológico. En relación a esto, muchos estudios a lo largo del tiempo han demostrado la correlación entre los índices de vegetación, como por ejemplo el LAI, y la intensidad del coeficiente de retrodispersión derivado por el radar, por ejemplo [32,33] y otros enumerados en [1]. Los datos adquiridos por sensores ópticos, que son los que más se utilizan para el estudio de las especies agrícolas, presentan dos tipos de problemáticas:

- el mismo satélite óptico pasa generalmente sobre la misma zona cada 16 días (por ejemplo Landsat 8), entonces para un periodo fenológico de tres meses obtendría como mucho 6 imágenes, que representan un conjunto de datos insuficiente para construir un modelo de crecimiento estadísticamente razonable.
- puede ocurrir que algunas de las 6 imágenes adquiridas sobre la zona de estudio resulten afectadas por presencia de nubes o bandeo, disminuyendo aún el conjunto de datos analizable.

Las imágenes SAR COSMO-SkyMed® [44], adquiridas por 4 satélites de la Agencia Espacial Italiana (ASI), pueden proveer información sobre la misma zona con una frecuencia temporal promedio de 3 días y, como todas las imágenes SAR [52], por su naturaleza no son afectadas por presencia de nubes. Básicamente por esta dos razones, se intenta verificar en qué medida es posible integrar los dos tipos de datos para poder incrementar la frecuencia temporal de las adquisiciones y poder suplir a la falta de datos ópticos con datos de radar en las fechas en donde sea necesario [45 - 49].

COSMO-SkyMed® (**CO**nstellation of small **S**atellites for **M**editerranean basin **O**bservation) es la más importante inversión italiana en los sistemas de Observación de la Tierra. Ha sido comisionada y financiada por la Agencia Espacial Italiana (ASI) y por el Ministerio Italiano de la Defensa y está pensado desde el principio como una misión para un doble uso (civil y militar) con el fin de establecer un servicio de soporte global y proveer datos, productos y servicios para una amplia gama de aplicaciones, como por ejemplo el manejo del riesgo, la cartografía, la agricultura, el estudio de las forestas, la hidrología, la geología, el ámbito marino, la arqueología y las aplicaciones de

inteligencia/defensa. El sistema consiste en una constelación de 4 satélites medianos en órbita baja, cada uno equipado con un sistema SAR multi modal en alta resolución en banda X, capaz de adquirir con múltiples resoluciones, varios ángulos y diferentes polarizaciones sobre amplias regiones. Está equipado con una antena fija capaz de variar su escaneo electrónicamente [50].

Además, los satélites COSMO-SkyMed® pertenecen al proyecto SIASGE (Sistema Italo Argentino para la Gestión de Emergencias), constelación de cuatro satélites italianos con sensores SAR en banda X y dos satélites argentinos con sensores SAR en banda L, de los cuales, contando el último lanzamiento de SAOCOM-1A, cinco ya están en órbita. La figura 1.1 muestra la constelación del sistema SIASGE.



Figura 1.1: SIASGE: Sistema Italo Argentino para la Gestión de Emergencias.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los datos de campo y satelitales utilizados en esta tesis fueron adquiridos en el ámbito de un proyecto de adquisición más amplio realizado en la región agrícola situada en la parte Este de Austria, durante la temporada de verano del hemisferio Norte del año 2014.

En particular, esta campaña de adquisición fue realizada dentro de los 1000 km² de la *Región Marchfeld*, en el Austria oriental (Lat. 48.20°N, Long. 16.72°E). Los tipos de suelo predominantes son Chernozem y Fluvisol, basado en la Clasificación Mundial de Suelos de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [34]. La región se caracteriza por un clima semi-árido, con una precipitación anual promedio de 500-550 mm que puede disminuir hasta 300 mm, lo que la hace la región más seca de Austria. Las precipitaciones durante la temporada de crecimiento de los cultivos (de Abril a Septiembre) son de 200-440 mm. El riego en Baja Austria ha hecho posible el establecimiento de una gran variedad de cultivos, contribuyendo así a la importancia de la producción agrícola en la Región Marchfeld. Alrededor de 65.000 hectáreas de esta Región se utilizan para la producción agrícola. Los principales cultivos son la remolacha (10%), las papas (7%) y otras hortalizas (11%) [35].

La figura 2.1 muestra una imagen de la *Región Marchfeld*, tomada por Google® Earth, con la ciudad de Viena demarcada en azul. Las coordenadas de la zona son: 48°28'24.9"N, 16°14'51.5"E (esquina superior izquierda); 48°28'24.9"N, 17°12'21.5"E (esquina superior derecha); 48°3'21.2"N, 17°12 '21.5E (esquina inferior derecha); 48°3'21.2"N, 16°14'51.5"E (esquina inferior izquierda).

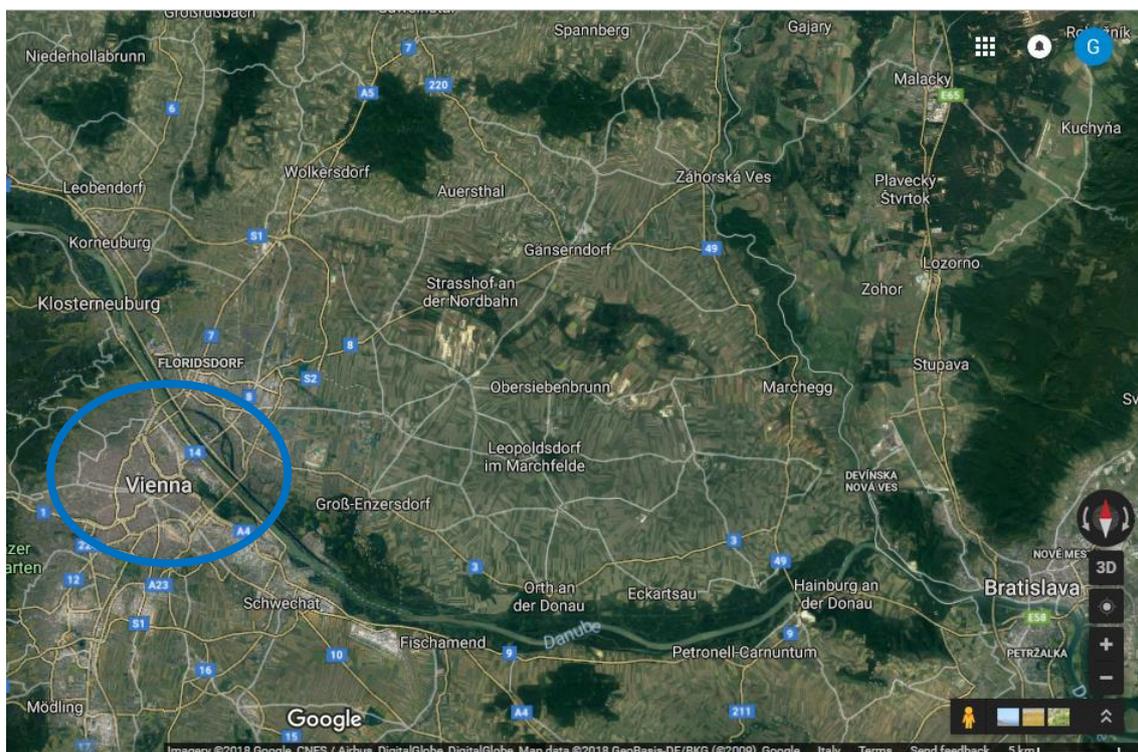


Figura 2.1: Área de estudio.

2.2 IMÁGENES COSMO-SkyMed®

Gracias a la colaboración y al soporte de la Agencia Espacial Italiana (ASI), se tuvo a disposición un robusto conjunto de imágenes COSMO-SkyMed® [36,37,44], adquiridas sobre el área de estudio.

El conjunto completo de datos fue adquirido desde Abril hasta Noviembre 2014 sobre la *Región Marchfeld*. Se eligió esta región tanto por su heterogénea variedad de especies agrícolas como así también por la disponibilidad de mapas de Índice de Area Foliar (**LAI** por sus siglas en inglés) y de Índice de Vegetación Diferencial Ponderado (**WDVI** por sus siglas en inglés).

El conjunto de imágenes COSMO-SkyMed® (Banda X, ~9.56 GHz) consiste en 25 imágenes, nivel 1-D GTC, o sea geolocalizadas y con corrección del terreno a través de un Modelo Digital de Terreno (DEM). Los productos de nivel GTC 1D son procesados

utilizando un DEM que se usa para aproximar la superficie real de la Tierra y también para evaluar factores de calibración geométricos. Además, a los datos se realiza un proceso de multi-looking para incrementar el Número Equivalente de Miradas (ENL por sus siglas en inglés) desde 1.3 hasta 4.1 veces el valor original y mejorar la resolución radiométrica de las imágenes SAR reduciendo el ruido intrínseco de tipo multiplicativo, llamado *speckle*. [36].

En particular, el conjunto de datos COSMO-SkyMed® se compone de:

- 10 imágenes Stripmap Himage en polarización VH, tomadas en modalidad *Right Ascending* (con el sensor mirando hacia la derecha) con un ángulo de mirada de aproximadamente 35.9° (Haz CSK® “H4-9”, ángulo cercano 34.6°, ángulo lejano 37.2°) y una resolución espacial de 2.5 metros [4].
- 15 imágenes Stripmap Ping Pong en doble polarización VV/VH (para un total de 30 imágenes), tomadas en modalidad *Right Ascending* (con el sensor mirando hacia la derecha) con un ángulo de mirada de aproximadamente 40.7° (Haz CSK® “PP-13”, ángulo cercano 39.63°, ángulo lejano 41.74°) y una resolución espacial de 10 metros [37].

Todas las imágenes en modalidad *Right Ascending* son adquiridas aproximadamente a las 4.30 hora local de la mañana (la ventana de adquisición dura aproximadamente 5.6 segundos). La serie de imágenes COSMO-SkyMed® Himage empieza el 17 de Abril 2014 y termina el 10 de Octubre 2014, mientras la serie de imágenes COSMO-SkyMed® Ping Pong empieza el 12 de Abril 2014 y termina el 13 de Octubre 2014.

A modo de ejemplo, la figura 2.2 muestra el extracto de una imagen COSMO-SkyMed® Himage (resolución de 2.5 metros), adquirida el 23 de Agosto 2014 sobre el área de estudio (*Región Marchfeld*, figura 2.1), con polarización VH y ángulo de mirada de 35.9°.

La figura 2.3 muestra el extracto de una imagen COSMO-SkyMed® Ping Pong (resolución de 10 metros), adquirida el 26 de Agosto 2014 sobre el área de estudio (representa la misma area de la imagen representada en figura 2.2), con polarización VH y ángulo de mirada de 40.7°. Las coordenadas de los dos extracotos son: 48°13'10.7"N, 16°33'49.73"E (esquina superior izquierda); 48°13'08.65"N,

16°36'18.27"E (esquina superior derecha);48°11'50.69"N, 16°36'15.84"E (esquina inferior derecha); 48°11'52.73"N, 16°33'47.36"E (esquina inferior izquierda).



Figura 2.2: *Extracto de una imagen COSMO-SkyMed® Himage (23 de Agosto 2014)*



Figura 2.3: *Extracto de una imagen COSMO-SkyMed® Ping Pong (26 de Agosto 2014)*

Cada producto CSK® es un conjunto de archivos, en principio encriptados, en los cuales se incluyen un conjunto de metadatos, además de la imagen en si misma. Los datos Stripmap Himage (única polarización) contienen solo una imagen, mientras los datos Stripmap Ping Pong contienen dos imágenes (una por cada polarización). Los metadatos son fundamentales porque contienen una descripción detallada de todas las características de los datos, incluido la modalidad de adquisición, la resolución, la polarización, el tipo de producto y el ángulo de vista, solo para nombrar algunos. Además los metadatos contienen la información de georeferencia, muy útil para superponer varias imágenes en un sistema de referencia y para comparar datos heterogéneos.

El formato de los productos COSMO-SkyMed® es el Hierarchical Data Format (HDF) version 5, un modelo de representación versátil que permite representar una gran variedad de datos muy complejos. Originariamente desarrollado por el National Center for Supercomputing Applications, actualmente está suportada por el no-profit HDF Group [38].

2.3 MAPAS DE WDVY Y DE LAI

Gracias a la colaboración del Dr. Francesco Vuolo, Investigador de la Universidad de Viena (BOKU), se dispone de un considerable conjunto de mapas de LAI (16 mapas) y de WDVY (14 mapas) adquiridos sobre la zona de interés (Marchfeld, Austria) entre el 26 de Marzo y el 24 de Septiembre de 2014. Estos mapas fueron generados a partir de un procesamiento de imágenes ópticas de los satélites DEIMOS-1 y Landsat-8, con resoluciones de 22 metros y 30 metros, respectivamente. Después de una calibración de los valores digitales y de una corrección atmosférica, se calcularon los valores de WDVY y LAI para cada píxel. En particular, el cálculo del WDVY se realiza a partir de la reflectancia en la banda del rojo (ρ_R) y del infrarojo cercano (ρ_{NIR}) según la siguiente fórmula:

$$WDVI = \rho_{NIR} - \rho_R * \frac{\rho_{sNIR}}{\rho_{sR}} \quad [2.1]$$

donde la relación $\frac{\rho_{sNIR}}{\rho_{sR}}$ representa la “pendiente de la línea de suelo”, una relación lineal entre las reflectancias del rojo y del infrarojo cercano del suelo desnudo [35].

A partir del WDVI es posible calcular el LAI a través de una relación logarítmica utilizando el modelo CLAIR (Cortical Coherence, Links, Associating, Integrating, and Responsive areas) [39] según la siguiente formula:

$$LAI = -\frac{1}{\alpha} * \ln\left(1 - \frac{WDVI}{WDVI_{\infty}}\right) \quad [2.2]$$

donde α es un coeficiente de extinción y dispersión y $WDVI_{\infty}$ es el valor límite asintótico para el WDVI [35]. La figura 2.4 muestra un extracto de un mapa de WDVI adquirido el 29 de Agosto sobre la zona de interés, mientras la figura 2.5 muestra el correspondiente mapa de LAI sobre la misma zona. Las coordenadas de las figuras 2.4 y 2.5 son las mismas de las figuras 2.2 y 2.3.

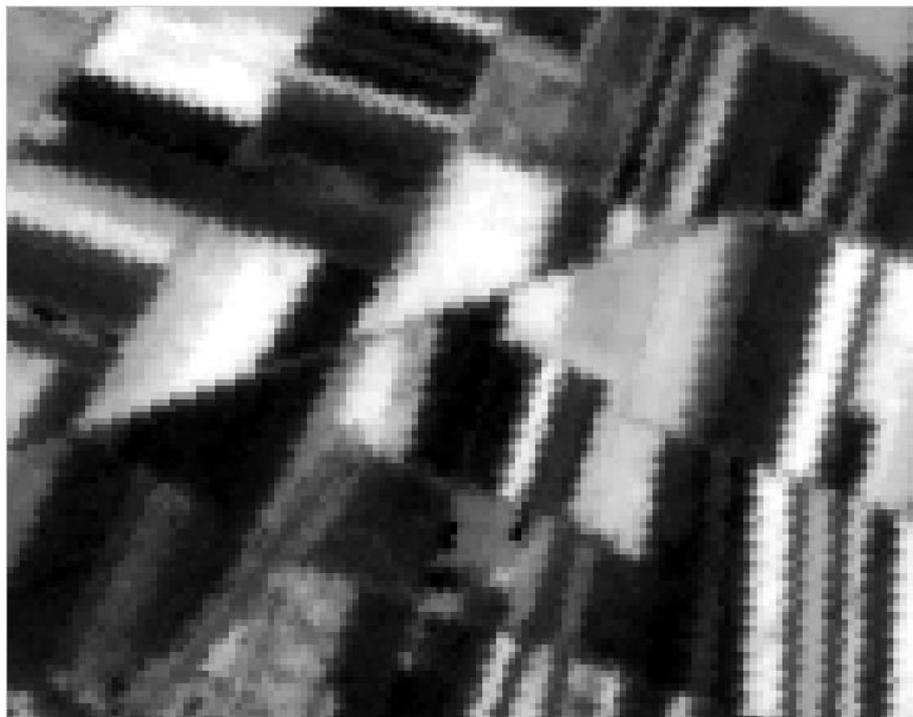


Figura 2.4: Extracto de un mapa de WDVI (@DEIMOS-1) del 29 de Agosto 2014

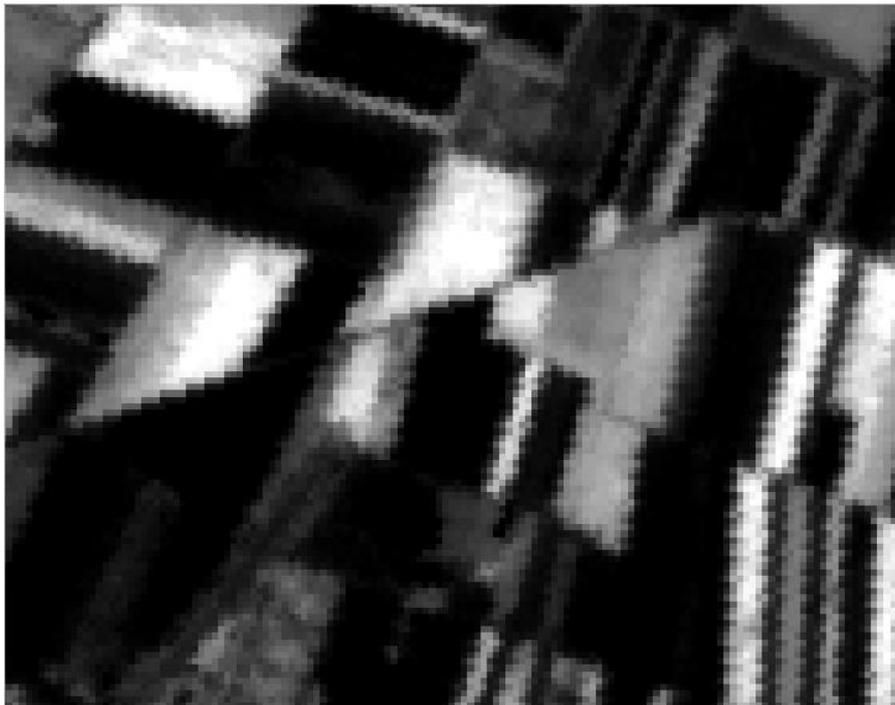


Figura 2.5: Extracto de un mapa de LAI (@DEIMOS-1) del 29 de Agosto 2014

Teóricamente, los valores de LAI pueden llegar hasta infinito, sin embargo están incluidos casi siempre entre 0 (los píxeles más oscuros en figura 2.5), correspondientes a zonas de agua, zonas urbanas y suelos desnudos, y 6 (píxeles más claros) correspondientes a áreas de vegetación muy densa (cultivos en plenitud de crecimiento, forestas).

Cada imagen está disponible en formato GeoTiff, por lo que es posible asociar a cada píxel una coordenada geográfica (Latitud/Longitud). En realidad, el archivo GeoTiff contiene solo la coordenada geográfica del píxel del vértice superior izquierdo, pero la mayoría de los programas de procesamiento de imágenes satelitales incluyen la herramienta software que permite de calcular de forma automática las coordenadas de cada píxel de la imagen. Gracias a esta propiedad, es posible superponer, con pequeños márgenes de error, imágenes que provienen de diferentes sensores y compararlas, por ejemplo imágenes ópticas y SAR. Esto resulta muy útil en varias aplicaciones en donde se requiere completar los datos de un sensor dado con datos provenientes de sensores de otra naturaleza, aprovechando las diferentes características que cada sensor puede aportar al resultado.

2.4 ARCHIVOS VECTORIALES (SHAPEFILES)

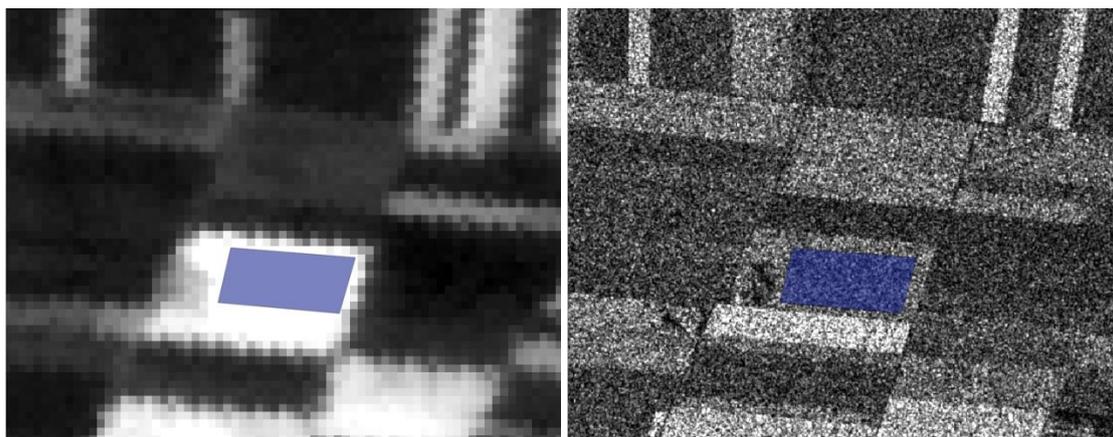
Gracias a la colaboración con un grupo de investigación de la Agencia Espacial Italiana (ASI), en particular del Ing. Luigi Dini y de las Investigadoras Federica Segalini y Rocchina Guarini, se obtuvieron los archivos vectoriales georeferenciados de las parcelas de cinco tipos de cultivos sembrados sobre la zona de interés:

- Maíz (*Zea Mays*).
- Soja (*Glycine Max*).
- Papa (*Solanum tuberosum*).
- Zanahoria (*Daucus carota*).
- remolacha azucarera (*Beta vulgaris*).

En particular, los cinco archivos vectoriales (uno por cada tipo de cultivo) están compuestos de la siguiente forma:

- El archivo del maíz contiene 19 parcelas.
- El archivo de las zanahorias contiene 11 parcelas.
- El archivo de la papa contiene 13 parcelas
- El archivo de la soja contiene 9 parcelas
- El archivo de la remolacha azucarera contiene 15 parcelas

Para evitar el efecto de los píxeles que están al borde de la parcela y asegurarse de tomar solo los valores de los píxeles internos en fase de procesamiento, cada elemento de cada archivo vectorial cubre exclusivamente la parte interna de la parcela. Esto se puede observar, a modo de ejemplo, en la figura 2.6 (izquierda), que muestra el extracto de una imagen de WdVI del 29 de Agosto 2014 (resolución de 22 metros) con una parcela de soja superpuesta. La figura 2.6 (derecha) muestra el extracto de una imagen COSMO-SkyMed® Himage (resolución de 2.5 metros), adquirida sobre la misma zona el 23 de Agosto 2014, con polarización VH y ángulo de adquisición de 35.9°. Como se puede observar, en ambos casos el elemento del archivo vectorial cubre solo la parte interna de la parcela, evitando entonces efectos de borde indeseados.



Figuras 2.6: Extracto de un mapa de WDV (a la izquierda) y de una imagen COSMO-SkyMed® Himage (a la derecha) y una parcela de soja superpuesta.

Las coordenadas geográficas de las esquinas de las dos imágenes de figura 2.6 son: 48°13'28.81"N, 16°37'38.01"E (esquina superior izquierda); 48°13'27.75"N, 16°38'52.29"E (esquina superior derecha); 48°12'48.77"N, 16°38'51.03"E (esquina inferior derecha); 48°12'49.83"N, 16°37'36.78"E (esquina inferior izquierda).

Las parcelas de cultivos superpuestas a los mapas de LAI/WDVI abarcan un número de píxeles que va desde 20 (por una superficie total de aproximadamente 1 hectárea) hasta 200 (por una superficie de aproximadamente 100 hectáreas).

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

En este Capitulo se presentará la herramienta de procesamiento, desarrollada en lenguaje de programación MatLab®. Para facilitar su uso, se implementó una interfaz gráfica, que se explicará en la Sección 3.2 y que representa el objetivo principal de esta tesis. Además, se realizó la validación de la herramienta a través de dos pruebas: una para verificar la validez del recorte (Sección 3.3.1) y la otra para corroborar los valores estadísticos (Sección 3.3.2)

3.1 PROCEDIMIENTO DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El esquema general de procesamiento de los datos realizado por la aplicación está representado en el Diagrama 3.1. Como se puede observar, en primera instancia el usuario puede seleccionar las imágenes COSMO-SkyMed®, ya sean Himage o Ping Pong, y los mapas de LAI y de WDVl de interés, y excluir eventualmente las imágenes que resultan visiblemente inadecuadas por presencia de nubes o bandeados o cualquier otro defecto que pueda afectar los resultados. Luego, para reducir sensiblemente el tamaño de las imágenes y poder trabajar después de forma mucho más rápida, se permite al usuario recortar todas las imágenes (tanto ópticas como SAR) como también los archivos vectoriales dentro de una zona de interés común entre todos estos datos, de forma interactiva. Además, los recortes de las imágenes COSMO-SkyMed® se convierten al formato GeoTiff, a fin de obtener un conjunto de datos con un formato homogéneo con respecto a las imágenes ópticas.

Una vez obtenidos los recortes, se le permite al usuario seguir con el procesamiento de las parejas de imágenes (COSMO-SkyMed® vs mapa de LAI/WDVI) que tienen una diferencia temporal recíproca de a lo sumo tres días, considerado el hecho de que es un tiempo en el cual no ocurren cambios ambientales significativos sobre los cultivos. Claramente este proceso es automático y realizado por la herramienta sobre todo el conjunto de datos disponibles para el usuario.

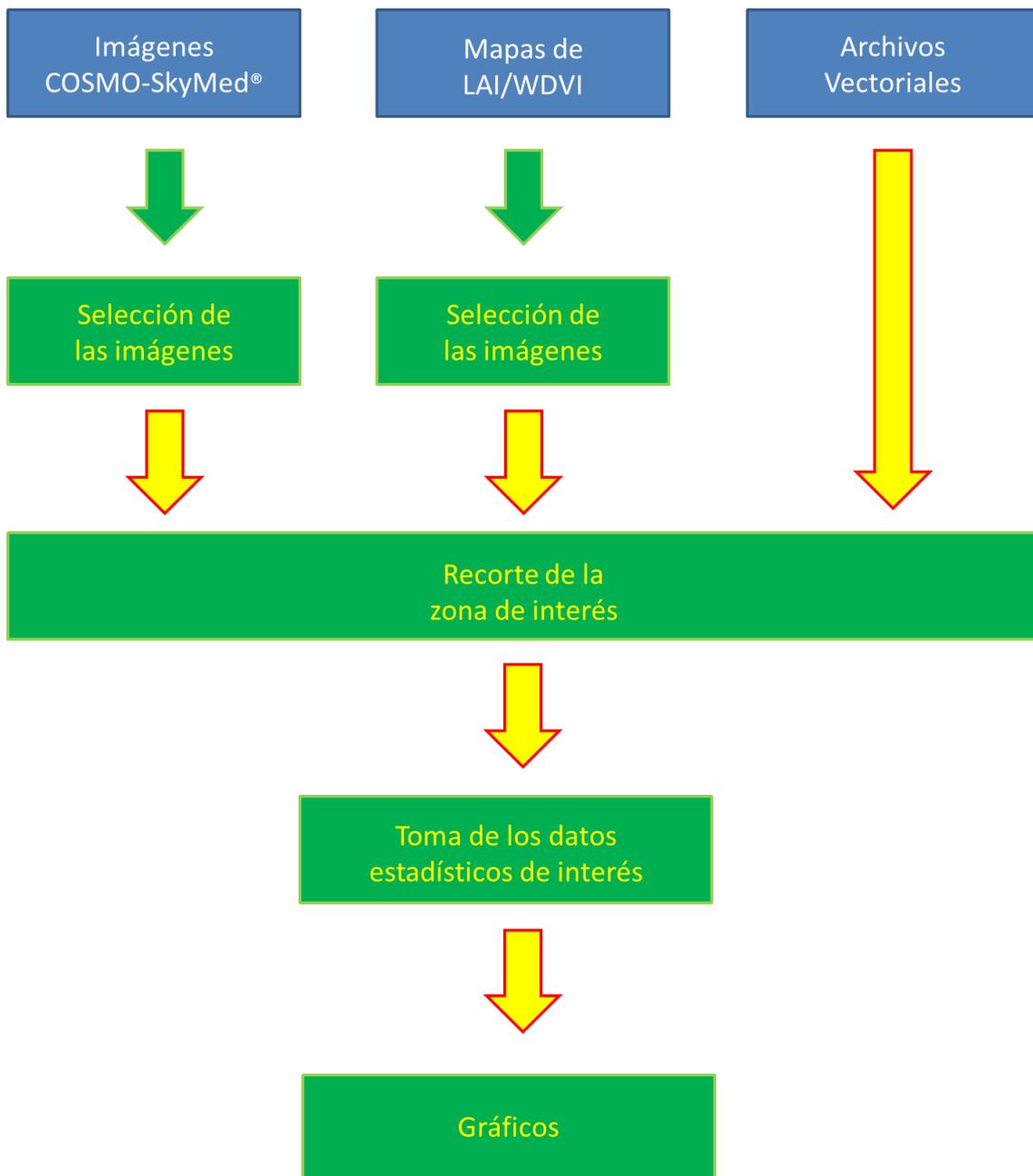


Diagrama 3.1: Diagrama de flujo general de procesamiento de los datos.

De este último procesamiento resultan dos archivos .csv en donde se almacenan de forma estructurada todos los valores estadísticos de interés, como se explica en el punto 4 del Parrafo 2 del Capítulo 3.

Luego de recolectar todos estos datos se generan los gráficos y los modelos para cada cultivo, tanto para imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Himage como para Ping Pong.

3.2 LA INTERFAZ GRÁFICA: MANUAL DE USUARIO

A fin de procesar todos los datos de forma automática, se desarrolló una interfaz gráfica en Matlab® (versión R2013a) [43], de manera tal que un usuario que no tenga conocimientos previos de programación pueda ejecutar todos los pasos para llegar a obtener gráficos de correlación entre el coeficiente de retrodispersión σ^0 , obtenido a partir de imágenes COSMO-SkyMed® y los índices de vegetación LAI o WdVI, obtenidos a partir de imágenes ópticas. Matlab® pone a disposición del programador una serie de herramientas gráficas personalizables (Matlab® GUIDE) y útiles al fin de obtener el resultado esperado. La figura 3.2 muestra la herramienta que permite construir la interfaz con todas las herramientas disponibles.

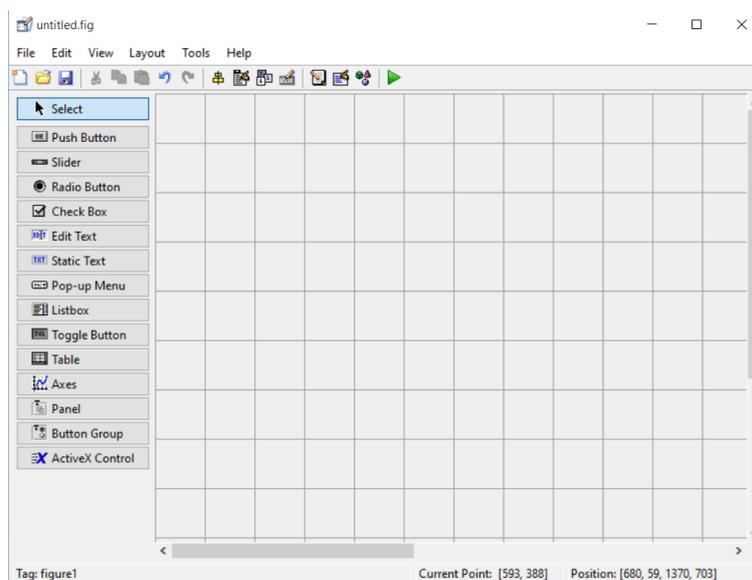


Figura 3.2: Herramienta de Matlab® que permite construir la interfaz gráfica.

Cada vez que se agrega un nuevo elemento a la interfaz, se produce automáticamente una función en código Matlab® que se va a ejecutar cada vez que ocurra un evento que involucre tal objeto gráfico: dicha función va a contener todo el código útil para lograr la funcionalidad deseada. La interfaz realizada en este trabajo de tesis, cuyo nombre es *Vegetation Analysis Processor*, se muestra en la figura 3.3. Tal como puede observarse en la figura siguiente, la interfaz gráfica presenta 5 secciones (Selección de la imágenes COSMO-SkyMed®, Selección de las imágenes auxiliares (LAI/WDVI), Selección del área de interés, Recolección de todos los valores, Generación de gráficos y modelos) que serán explicadas a continuación.

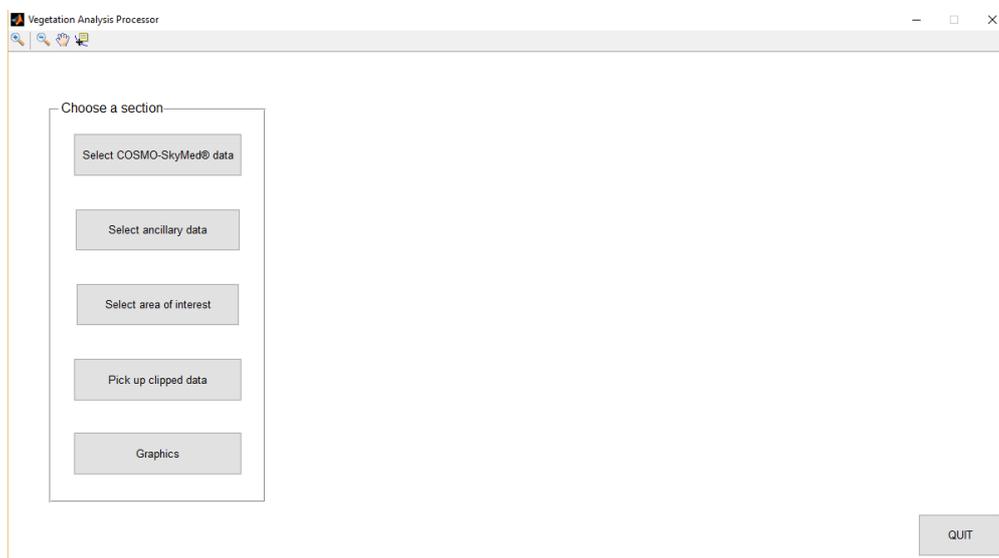


Figura 3.3: *Vegetation Analysis Processor*.

1. Selección de las imágenes COSMO-SkyMed®:

En esta primera sección el usuario puede seleccionar la carpeta que contiene las imágenes COSMO-SkyMed®. Todas las imágenes deben ser del mismo tipo (por ejemplo, Himage o Ping Pong) y cada imagen tiene que estar guardada en una carpeta (una por cada imagen) dentro de la carpeta general seleccionada. Esto quiere decir que la carpeta seleccionada por el usuario debe contener un número de carpetas igual al número de imágenes que desea procesar, por ejemplo:

- Carpeta seleccionada
 - Subcarpeta1
 - Imagen1
 - Metadatos_imagen1
 - Subcapeta2
 - Imagen2
 - Metadatos_imagen2
 - ...

Las imágenes tienen que tener el nombre original, por ejemplo:

CSKS2_GTC_B_PP_13_CV_RA_SF_20140420043910_20140420043917.h5

Una vez que el usuario elige la carpeta, el programa arma un menú con el nombre de todas las imágenes dentro de ella de modo que el usuario pueda verlas. Cuando el usuario elige una imagen, también aparecen una barra de desplazamiento, que le permite de cambiar de imagen (además del menú) y una herramienta que le permite decidir con que imágenes quedarse para la etapa de procesamiento posterior. Una vez que complete la selección de las imágenes, el usuario puede terminar esta sección guardando automáticamente un archivo de texto (a través del botón correspondiente) que va a contener el path de todas las imágenes seleccionadas. Este archivo va a servir para la etapa siguiente. La figura 3.4 muestra un ejemplo de esta sección.

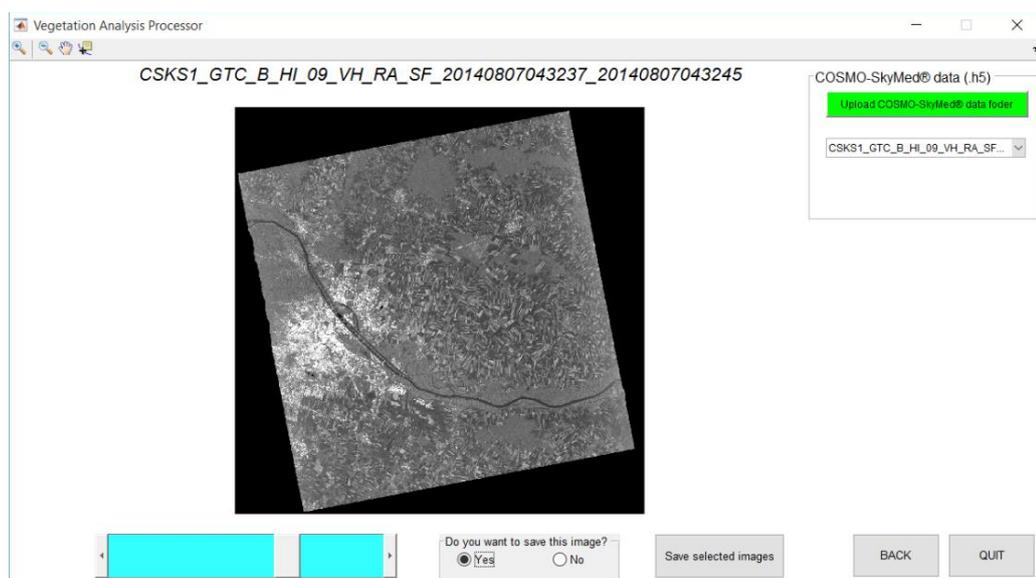


Figura 3.4: Sección útil para visualizar y seleccionar imágenes COSMO-SkyMed®

2. Selección de las imágenes auxiliares (LAI/WDVI):

Esta sección tiene la misma funcionalidad de la anterior, pero se refiere a los mapas de LAI o WDVI. Aquí también el usuario elige la carpeta que contiene todas las imágenes. El nombre de cada imagen debe ser del tipo *yyyymmdd_indice*, por ejemplo *20140418_lai*. La figura 3.5 muestra un ejemplo:

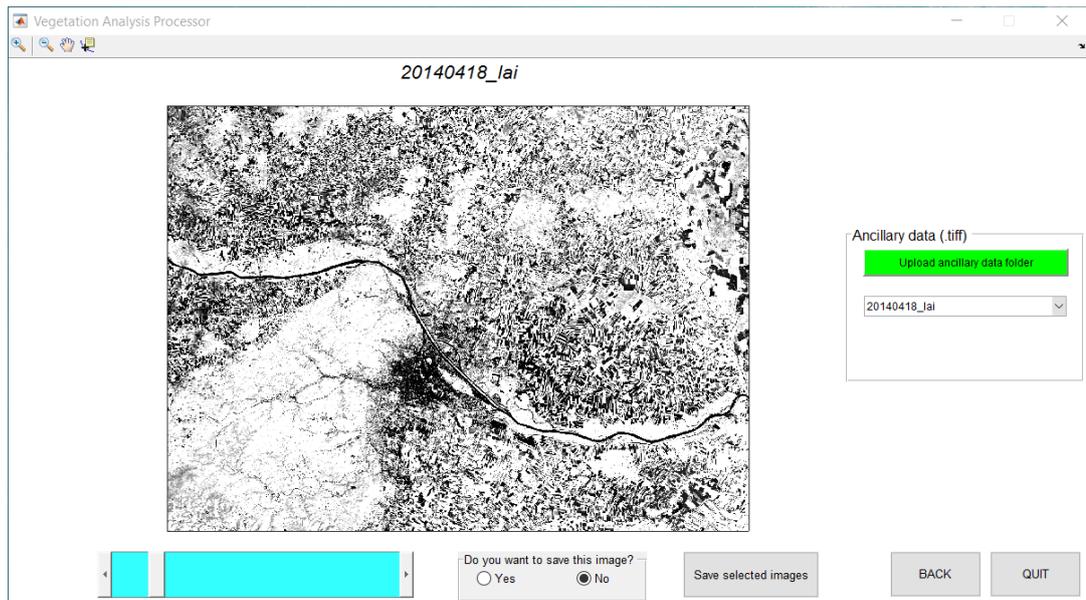


Figura 3.5: Sección útil para visualizar y seleccionar mapas de LAI o WDVI.

3. Selección del área de interés:

Esta sección permite al usuario subir los archivos previamente producidos (que contienen las rutas de todas las imágenes seleccionadas) y la carpeta con todos los shapefiles (cada shapefile tiene que estar dentro de su propia carpeta dentro de la carpeta general seleccionada). Como salida el programa permite al usuario visualizar los bordes de todas las imágenes seleccionadas y los shapefiles dentro de una grilla georeferenciada, tal como se muestra en la figura 3.6.

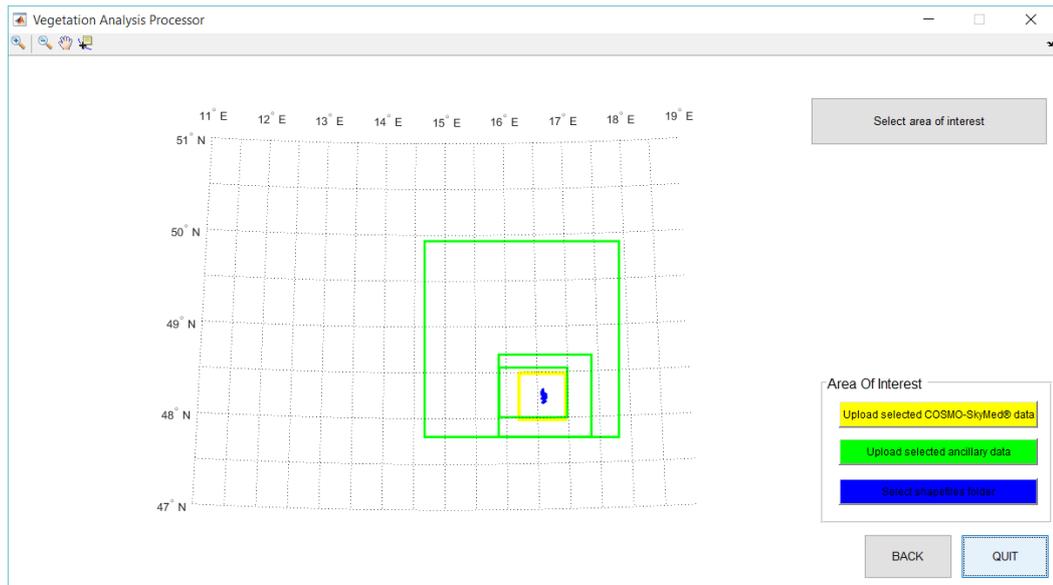


Figura 3.6: *Grilla georeferenciada con los bordes de las imágenes y los shapefiles.*

Una vez cargados todos los datos, el usuario puede hacer un zoom en la zona de interés y seleccionar una zona común entre todas las imágenes y los shapefiles, dando confirmación con el botón específico. Cuando todo esté listo y el usuario presiona el botón correspondiente (*Crop data*), la aplicación procede a recortar todas las imágenes y los shapefiles dentro de la zona de interés. Todos los recortes serán producidos en formato Geotiff, incluidas las imágenes COSMO-SkyMed® que tienen formato h5. Todas las imágenes mantendrán el mismo nombre, con la adición de *_cropped* al final del mismo y serán guardadas en una carpeta dentro de la carpeta de trabajo de Matlab® (cada conjunto de imágenes, COSMO-SkyMed® y LAI/WDVI, tendrá su propia carpeta).

En la figura 3.7 se muestra un ejemplo del recorte de los datos.



Figura 3.7: Recorte de los datos.

Con respecto a las imágenes COSMO-SkyMed®, además de hacer el recorte se le aplica un factor de escala de los valores digitales (DN) de manera tal que cada píxel de las imágenes recortadas represente un valor del coeficiente de retrodispersión σ^0 . Esta operación se realiza teniendo en cuenta las directivas del proveedor de las imágenes [40] y los valores que se encuentran en los metadatos de cada imagen.

En particular, para las imágenes utilizadas en este trabajo (GTC_B nivel 1D), los valores digitales de los píxeles están directamente relacionados al coeficiente de retrodispersión a través de un factor de escala (*Rescaling factor*).

El coeficiente σ^0 en dB se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma^0(i,j)_{dB} = 10 * \log_{10}\sigma^0(i,j) \quad [3.1]$$

4. Recolección de todos los valores:

Una vez obtenidos los recortes, el usuario tiene a disposición dos conjuntos de datos, uno de imágenes COSMO-SkyMed® y el otro de mapas de LAI/WDVI, además del conjunto de shapefiles. En esta sección el usuario puede cargar

estos datos y elegir un umbral máximo (en días) de diferencia temporal entre cada una de las imágenes de los dos conjuntos de datos. De esta manera, se tomarán solamente los valores de los píxeles correspondientes a las imágenes que cumplen esta condición. La figura 3.8 muestra una captura de pantalla correspondiente a esta sección.

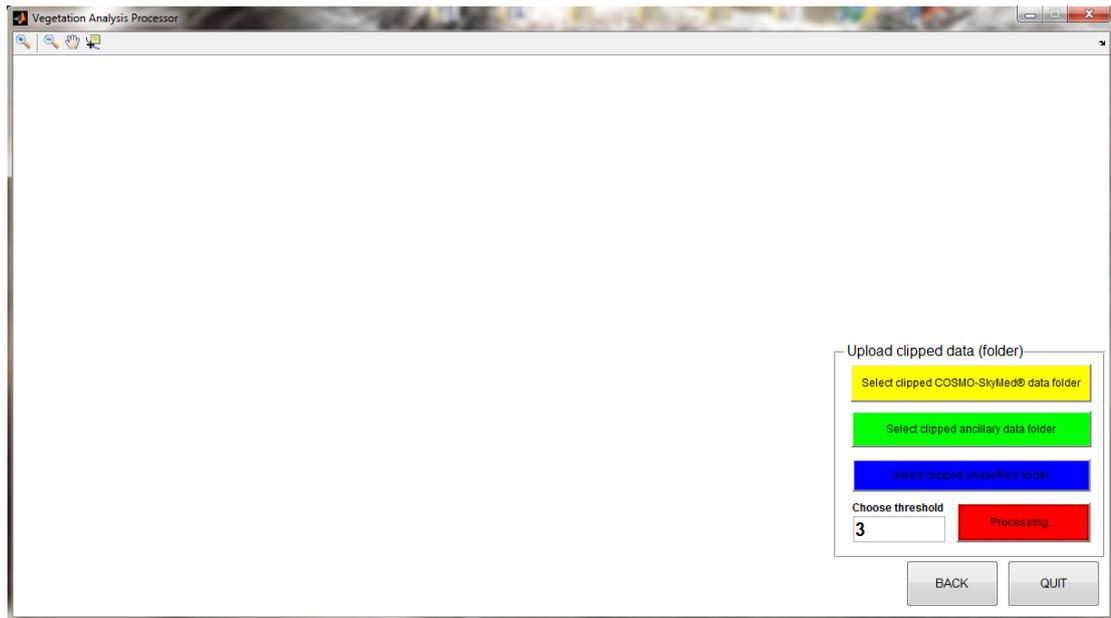


Figura 3.8: Sección relativa a la toma de datos sobre las imágenes.

Para cada imagen que cumple la condición, la aplicación tomará los siguientes datos por cada uno de los lotes de cada shapefile:

- Valor promedio
- Mediana
- Desvío estándar
- Número de píxeles.

Como resultado de esta operación se generarán dos archivos .xls (por cada shapefile), uno relacionado con las imágenes COSMO-SkyMed® y el otro relacionado con los mapas de LAI/WDVI. Cada archivo contendrá:

- en la primera hoja, una tabla de todos los valores previamente nombrados, por cada lote y por cada imagen involucrada

- en la segunda hoja, los valores de todos los píxeles dentro de todos los lotes (que van a servir posteriormente para armar un histograma).

Si las imágenes son Ping Pong, en la segunda hoja del archivo de las imágenes COSMO-SkyMed® estarán los datos relativos a las imágenes con polarización VV y en una tercera los correspondientes a polarización VH.

5. *Generación de gráficos y modelos:*

En esta última sección, el usuario puede finalmente visualizar los resultados de la aplicación. La figura 3.9 muestra la interfaz relativa a esta parte:

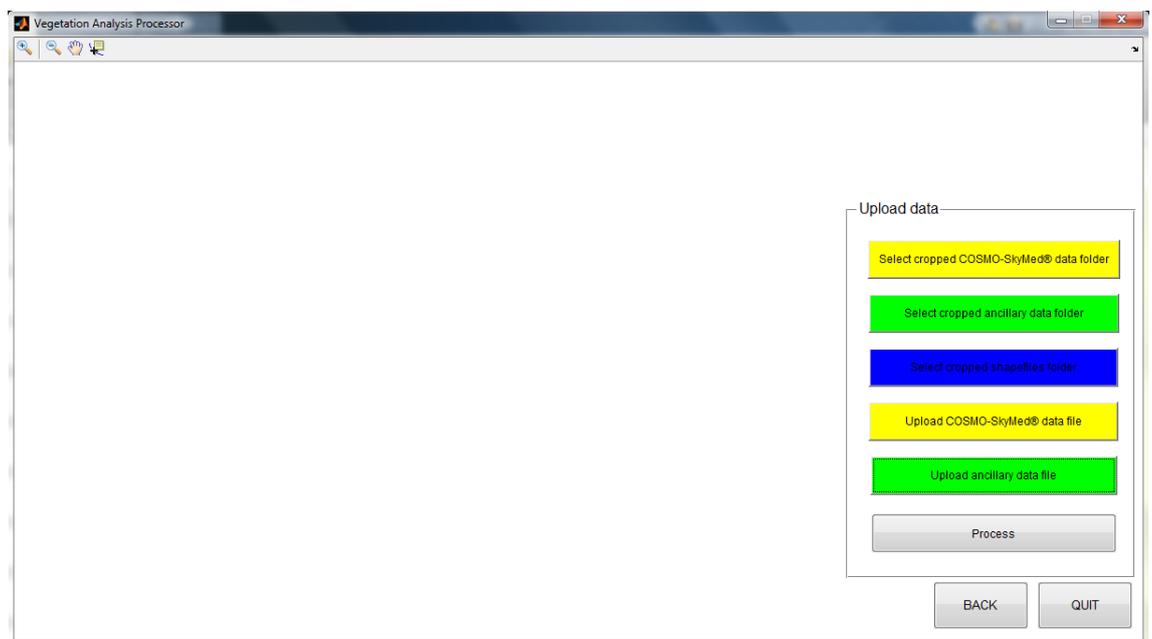


Figura 3.9: *Sección relativa a la generación de gráficos y modelos.*

En esta sección el usuario deberá cargar:

- La carpeta de los recortes de las imágenes COSMO-SkyMed®.
- La carpeta de los recortes de LAI/WDVI.
- La carpeta del shapefile que se quiere analizar.
- El archivo .xls relativo a los valores de las imágenes COSMO-SkyMed® del shapefile que se quiere analizar.

- El archivo .xls relacionado con los valores de los mapas de LAI/WDVI del shapefile que se quiere analizar.

Las salidas de la aplicación serán:

- Un gráfico de correlación σ^0 vs LAI/WDVI general, relacionado con las parejas de imágenes de los dos conjuntos que cumplen la condición elegida por el usuario (distancia en días entre las imágenes), con el correspondiente valor de coeficiente de correlación (o de Pearson), calculado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \rho_{X,Y} &= \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X) \cdot (Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m) \cdot (Y_i - Y_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_m)^2}} \end{aligned} \quad [3.2]$$

Este coeficiente mide la dependencia entre las dos variables y, por la forma en que está definido, toma valores entre -1 y 1. Si el valor del coeficiente de correlación calculado fuera mayor o igual a 0.33, el algoritmo realizará un ajuste de los datos usando dos modelos: uno lineal y el otro exponencial. El modelo de regresión exponencial tendrá la siguiente forma:

$$LAI = A_1 * 10^{(B_1 * \sigma^0)} \quad [3.3]$$

donde los coeficientes A_1 y B_1 serán calculados de forma de maximizar el coeficiente de determinación del mismo modelo. El coeficiente de determinación R^2 se calculará de la siguiente forma:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - y_m)^2} \quad [3.4]$$

Este parámetro indica el grado de ajuste del modelo a los valores reales y, por la forma en que está definido, puede tomar valores entre 0 y 1.

El modelo de tipo lineal parametrizado entre las dos mismas variables (σ^0 vs LAI/WDVI) tendrá la siguiente forma:

$$LAI = C_1 * \sigma^0 + D_1 \quad [3.5]$$

- Un histograma que representa la ocurrencia de los valores de los píxeles de las imágenes COSMO-SkyMed® y otro que representa la misma ocurrencia pero con respecto a los mapas de LAI/WDVI

Si los datos procesados se refieren a imágenes de tipo Ping Pong, se generarán dos gráficos de correlación y dos histogramas, uno para las imágenes con polarización VV y otro para VH. La figura 3.10 muestra un ejemplo de esta sección de la aplicación para una correlación entre imágenes de tipo Himage y mapas de WDVI (4 pares de imágenes), con un umbral de 3 días para el cultivo de la remolacha azucarera.

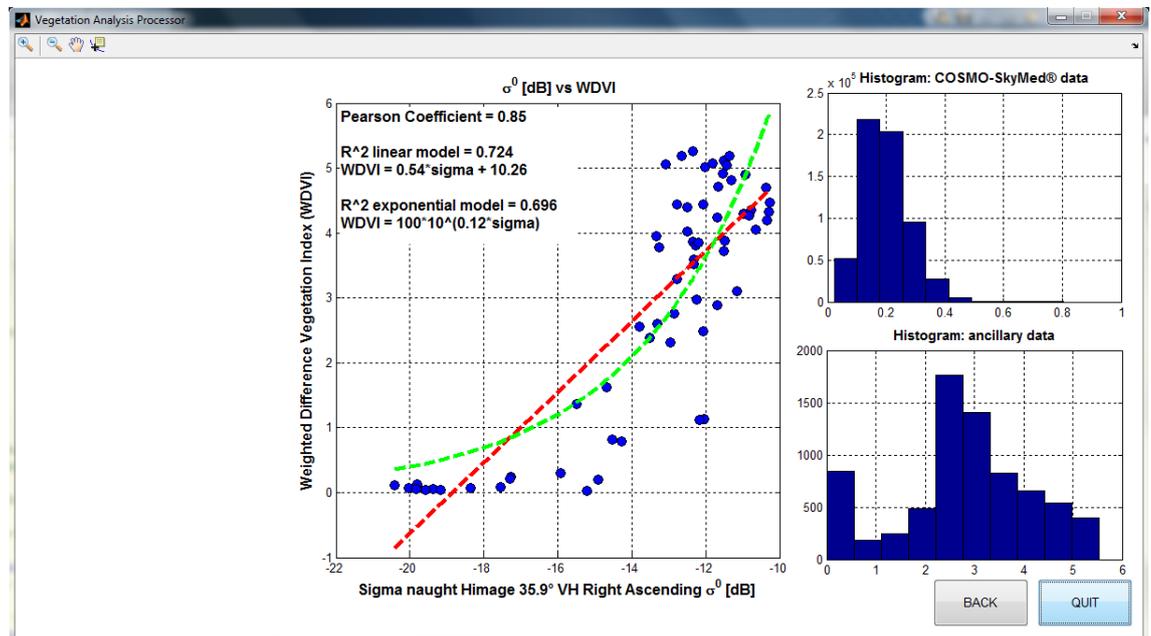


Figura 3.10: Gráficos y modelos para Himage vs WDVI (Remolacha azucarera).

Además, fue implementada otra funcionalidad: pulsando sobre cualquier punto del gráfico de correlación el usuario puede visualizar en la parte izquierda del gráfico una sección en donde se muestran:

- Las imágenes que dan origen a ese mismo punto del gráfico.
- El nombre del cultivo al cual se refiere el gráfico.
- Los valores que ese punto tiene en el gráfico (sea en dirección x como en y).
- El identificador de la parcela al cual ese punto se refiere.

Abajo de esta sección, el usuario puede visualizar los recortes, ya sea de la imagen COSMO-SkyMed® como del mapa de LAI/WDVI relativo a la parcela correspondiente al punto seleccionado, además de la parcela misma. Puede también seleccionar/deseleccionar cada una de estas tres capas.

En la figura 3.11 se muestra un ejemplo de esta funcionalidad.

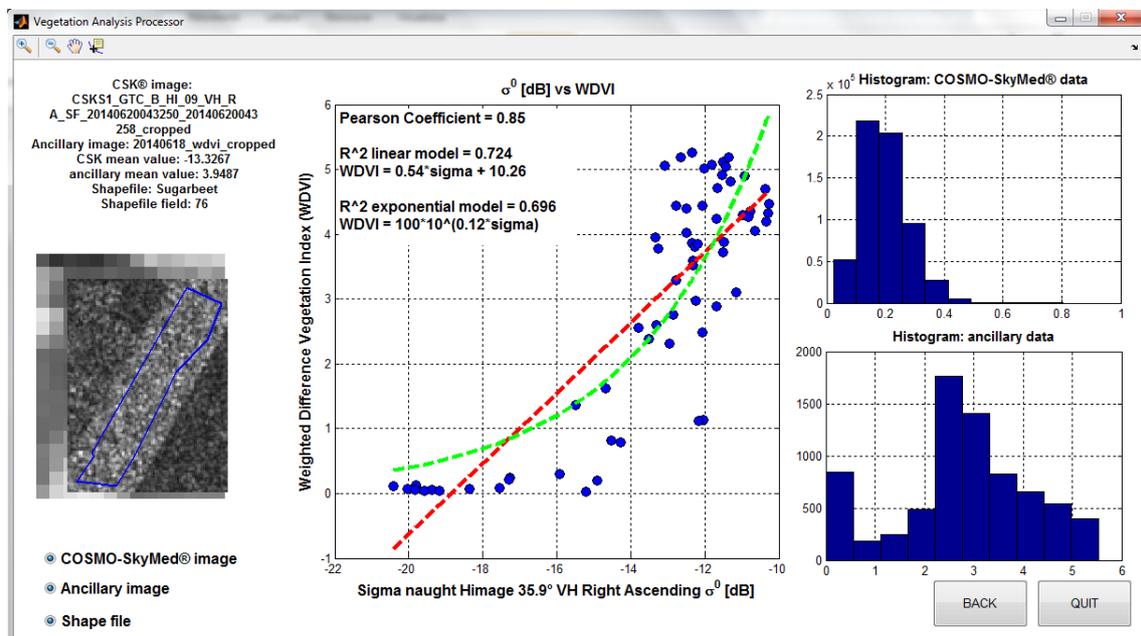


Figura 3.11: *Ejemplo de la funcionalidad de visualización de un lote en particular.*

Finalmente, se agregó un gráfico que muestra el historial de la parcela seleccionada, como herramienta adicional útil para el post-procesamiento de los datos. A modo de ejemplo, la figura 3.12 muestra los gráficos de correlación para la zanahoria entre imágenes Ping Pong y los mapas de WdVI con una diferencia temporal máxima entre ellas menor o igual a tres días. Apretando un punto del gráfico, se puede visualizar la parcela correspondiente a dicho punto y hacer un análisis visual de las imágenes sobre la misma parcela. Además, la aplicación produce un gráfico temporal y multisensor

[51] en donde se muestra, a lo largo del tiempo, el valor promedio del índice dentro de la misma parcela. Si además fueron calculados los modelos para estos datos, se visualizará en el mismo gráfico (en correspondencia de los días en los cuales fueron tomadas las imágenes COSMO-SkyMed® disponibles) el valor del “índice artificial”, o sea del coeficiente de retrodispersión obtenido a través de los modelos (Eq. 3.3 y 3.5).

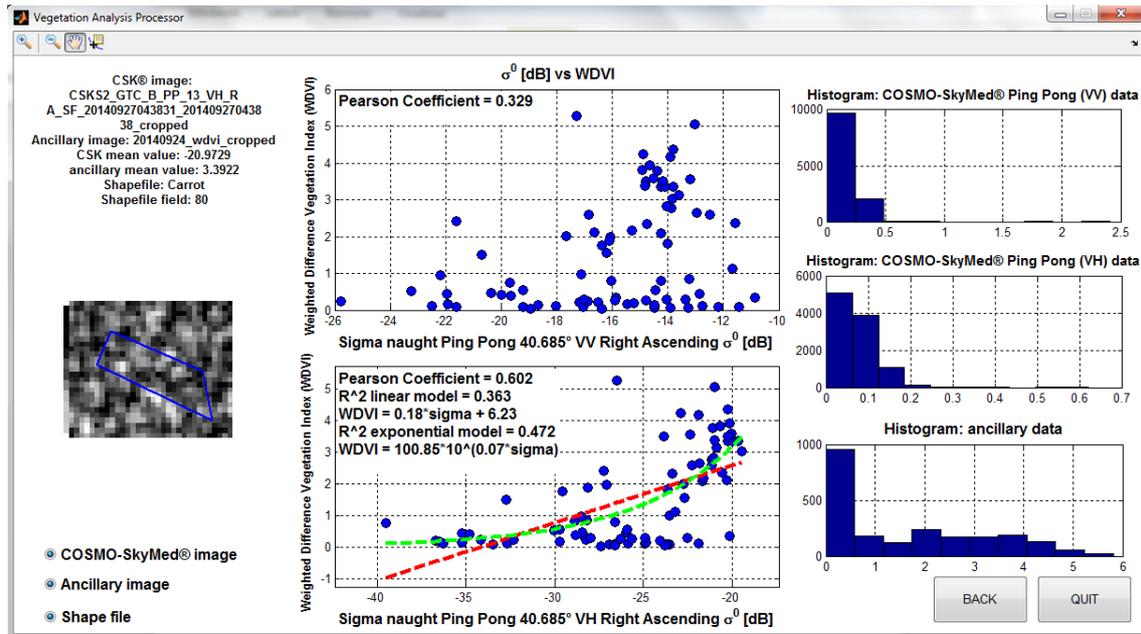


Figura 3.12: Ejemplo de correlación entre COSMO-SkyMed® Ping Pong y WdVI para la zanahoria.

La figura 3.13 muestra el ejemplo del gráfico temporal multisensor relativo a la parcela seleccionada (en este caso la parcela es la que tiene ID = 76) para el ejemplo de la figura 3.11.

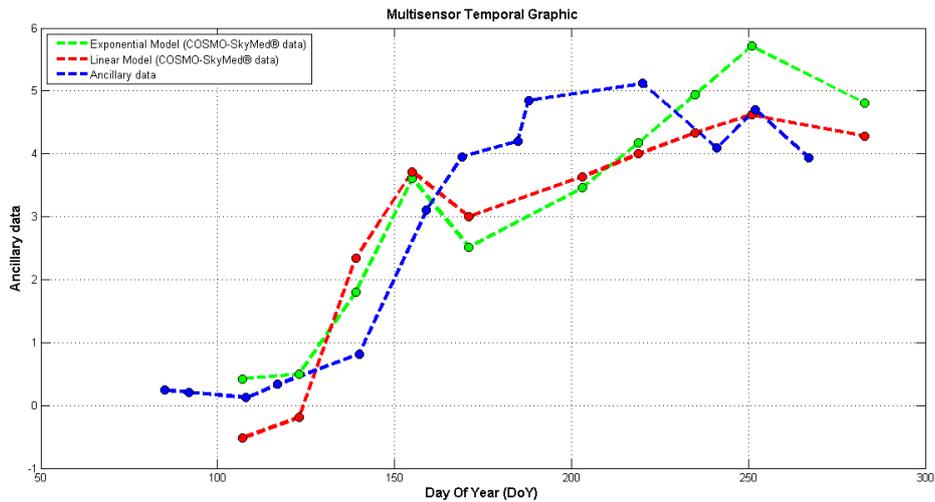


Figura 3.13: Gráfico temporal multisensor relativo a una parcela seleccionada (ID = 76)

Si, por el contrario, no fue calculado ningún modelo (debido a que el coeficiente de correlación resultó menor a 0.33), en el gráfico temporal se visualizarán solo los valores promedios sacados por los mapas del índice (WDVI en este caso), tal como sucede en el caso de polarización VV en la figura 3.12. En la figura 3.14 se muestra el resultado correspondiente a la parcela con ID = 80.

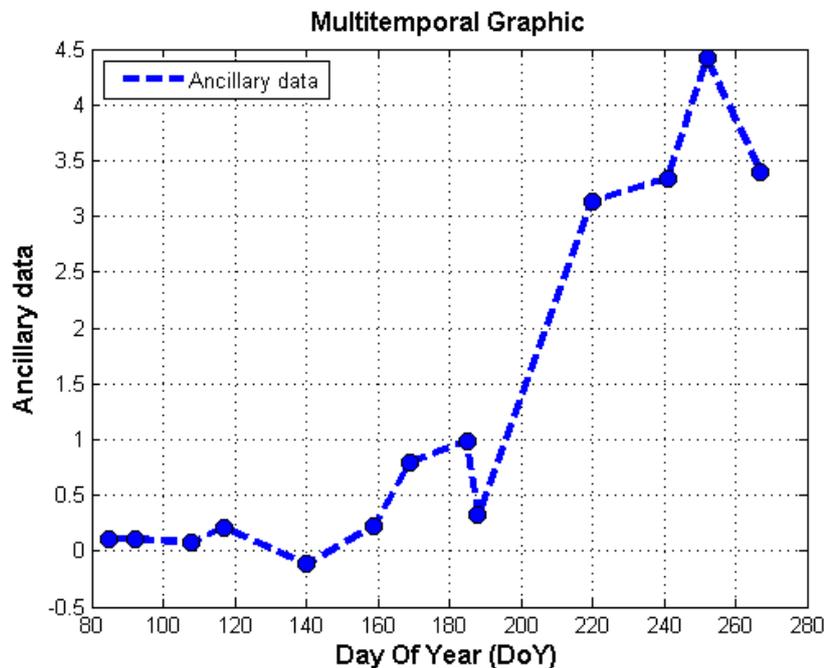


Figura 3.14: Gráfico temporal relativo a una parcela de zanahoria seleccionada (ID = 80)

3.3 VALIDACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

En los párrafos siguientes, se mostrarán ejemplos de tests de la interfaz gráfica. Se pretende comparar las salidas que presenta al usuario la interfaz desarrollada con los resultados obtenidos a través de otros software comerciales sobre los mismos datos, a fin de corroborar la validez de los algoritmos codificados en la aplicación.

En particular, se implementarán los siguientes tests:

1. Test para verificar la validez del recorte.
2. Test para corroborar los valores estadísticos.

3.3.1. PRIMER TEST DE VALIDACIÓN: RECORTE

En la sección tres de la GUI (*Selección del área de interés*) al usuario se le permite seleccionar interactivamente una zona geográfica de interés y recortar todas las imágenes y los shapefiles en esa área, a fin de producir un set de datos de dimensión mucho menor respecto a los originales y poder después trabajar mas rápido. Para comprobar la validez del algoritmo, se compararon algunos recortes al azar producidos por la aplicación con las imágenes originales utilizando un software comercial reconocido: el *ENvironment for Visualizing Images (ENVI)* [41].

A modo de ejemplo, se eligió el recorte de una de las imágenes COSMO-SkyMed® utilizadas en el desarrollo de esta tesis. Se utilizó la imagen adquirida por el satélite COSMO-SkyMed® 2, en modalidad Ping Pong (resolución de 10 metros), con ángulo de mirada entre 39.63° y 41.74°, polarización cruzada (VH), adquirida sobre la zona de estudio el 20 de Abril 2014.

Lo que se hizo fue aplicar a la imagen original los mismos procesos realizados por la aplicación pero utilizando ENVI. Dichos procesos son: cargar la imagen original en

ENVI, transformarla en formato .Geotiff, recortarla en la misma área del recorte y escalarla según el factor de escala presente en los metadatos.

Luego, se utilizó la herramienta *Geographic Link* de ENVI (que permite conectar dos puntos correspondientes a la misma zona geográfica de dos imágenes georeferenciadas) al resultado obtenido con ENVI y la salida de la aplicación realizando una primera comparación visual. En las siguientes figuras se compara el resultado del proceso hecho en ENVI (figura 3.15 izquierda) con la salida de la aplicación (figura 3.15 derecha). Las coordenadas geográficas de las esquinas de las imágenes de figura 3.15 son: 48°15'40.88"N, 16°33'24.19"E (esquina superior izquierda); 48°15'36.75"N, 16°38'21.46"E (esquina superior derecha); 48°13'00.80"N, 16°38'16.48"E (esquina inferior derecha); 48°13'04.92"N, 16°33'19.46"E (esquina inferior izquierda).

Como se puede observar a simple vista, las dos imágenes coinciden exactamente. Para obtener una medida estadística de la validez del recorte, se aplicó una diferencia (píxel a píxel, donde cada píxel tiene un valor de coeficiente de retrodispersión) entre los dos resultados (obtenidos con ENVI y con la aplicación) y se graficó en Matlab® la densidad de probabilidad del error, como se muestra en la figura 3.16.

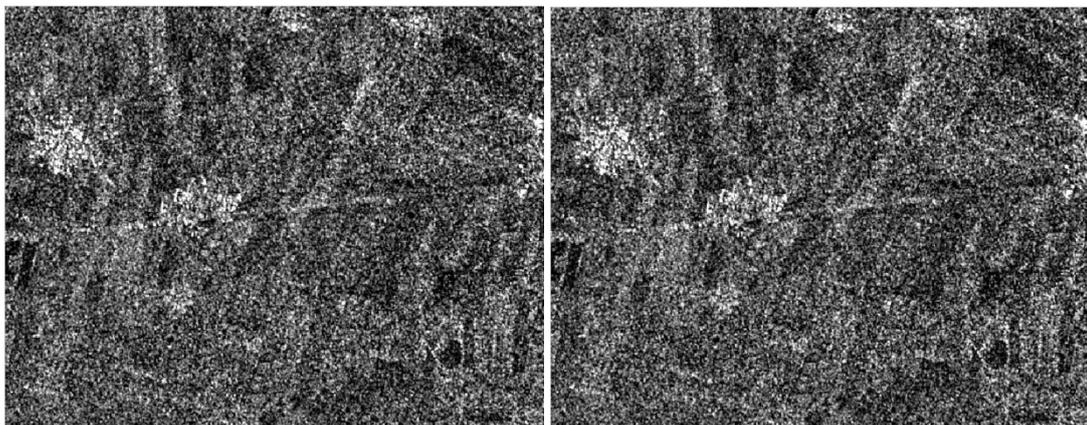


Figura 3.15: Extracto de la imagen COSMO-SkyMed® Ping Pong del 20 de Abril 2014 procesada en ENVI (izquierda) y por la aplicación (derecha).

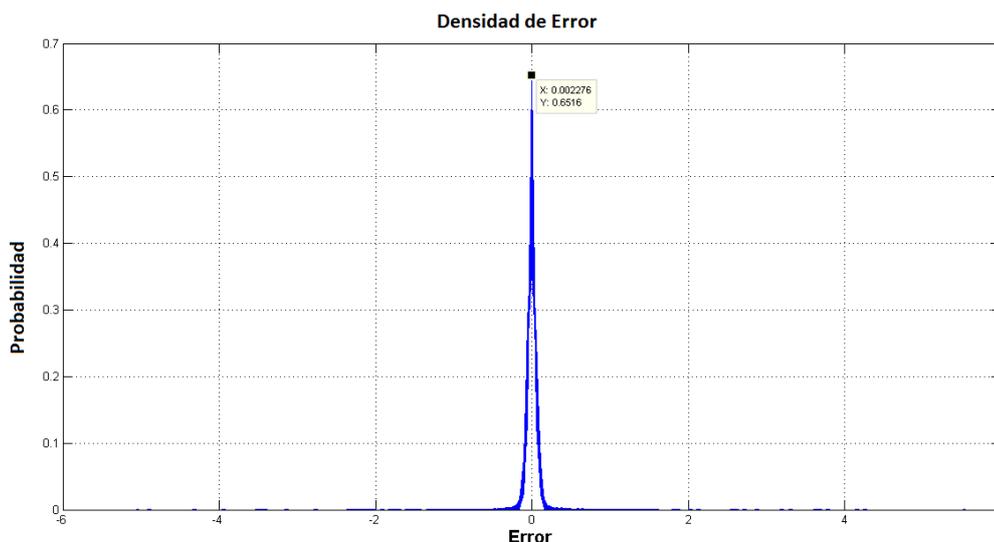
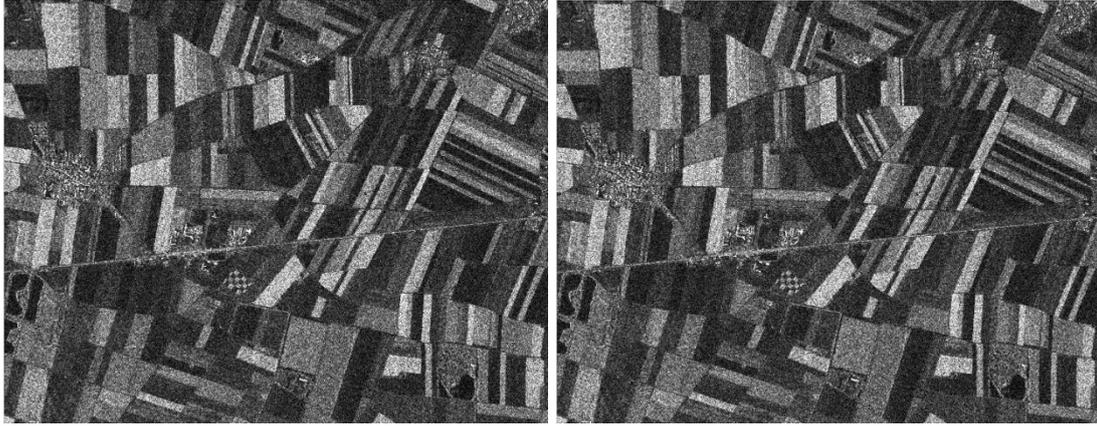


Figura 3.16: Densidad de probabilidad del error (caso Ping Pong).

El error tiene máxima probabilidad (65.16%) para el valor 0.002276, además, el 93.63% de los píxeles tiene un error menor a ± 0.1 . De esta manera, el proceso hecho por la aplicación se puede considerar óptimo.

Para verificar también el recorte de imágenes de tipo Himage, se hizo la misma prueba con una imagen COSMO-SkyMed® de tipo Himage (resolución de 2.5 metros), adquirida por el satélite COSMO-SkyMed® 1, con ángulo de mirada entre 34.6° y 37.2°, polarización cruzada (VH), adquirida sobre la zona de estudio el 07 de Agosto 2014. En las siguientes figuras se muestra el resultado del proceso realizado en ENVI (figura 3.17) y la salida de la aplicación (figura 3.18). Las coordenadas geográficas de las esquinas de las imágenes de figura 3.17 y 3.18 son: 48°15'55.10"N, 16°33'19.58"E (esquina superior izquierda); 48°15'50.97"N, 16°38'16.48"E (esquina superior derecha); 48°13'15.02"N, 16°38'11.50"E (esquina inferior derecha); 48°13'19.14"N, 16°33'14.85"E (esquina inferior izquierda).

En este caso también se realizó la diferencia píxel a píxel de los dos resultados y se graficó el error en función de su probabilidad. El error tiene probabilidad máxima (70.84%) en correspondencia del valor 0.02595 y el 99.87% de los píxeles tiene error menor a ± 0.175 . Se puede afirmar que el proceso realizado por la aplicación da un resultado confiable. El gráfico está representado en figura 3.19.



Figuras 3.17 y 3.18: Extracto de la imagen COSMO-SkyMed® Himage del 7 de Agosto 2014 procesada en ENVI (izquierda) y por la aplicación (derecha).

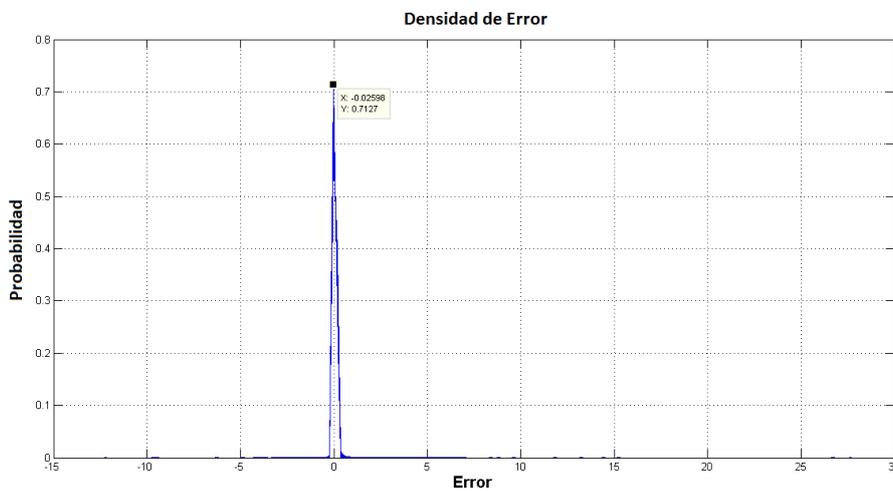
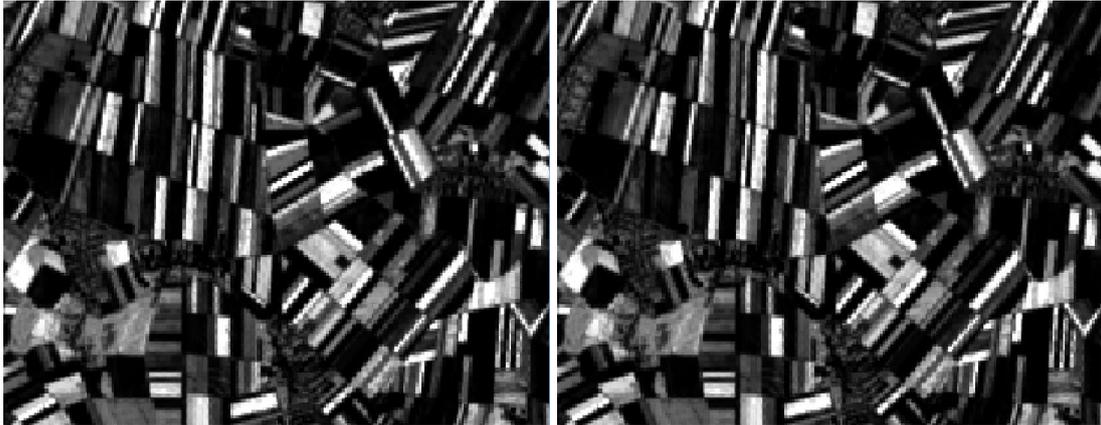


Figura 3.19: Densidad de probabilidad del error (caso Himage).

Para comprobar la validez de los recortes de los mapas de LAI/WDVI, se hizo la misma prueba con un mapa de LAI del 07 de julio 2014. En este caso, los mapas vienen ya en formato .tiff, lo que se hizo entonces fue simplemente recortar la imagen original en ENVI dentro de la misma área del recorte realizado por la aplicación. En las figuras que siguen se muestra un extracto del recorte realizado en ENVI (figura 3.20) y el mismo proceso realizado por la aplicación (figura 3.21). Las coordenadas geográficas de las esquinas de las imágenes de figura 3.20 y 3.21 son: 48°12'32.22"N, 16°34'23.01"E (esquina superior izquierda); 48°12'28.04"N, 16°39'20.37"E (esquina superior derecha); 48°09'52.09"N, 16°39'15.34"E (esquina inferior derecha); 48°09'56.26"N, 16°34'18.24"E (esquina inferior izquierda).



Figuras 3.20 y 3.21: Extracto del recorte del mapa de LAI del 7 de Julio 2014 realizado en ENVI (izquierda) y por la aplicación (derecha).

Graficando también en este caso el error en función de su probabilidad, se ve que las imágenes en este caso son perfectamente iguales, como se ve en la figura 3.22.

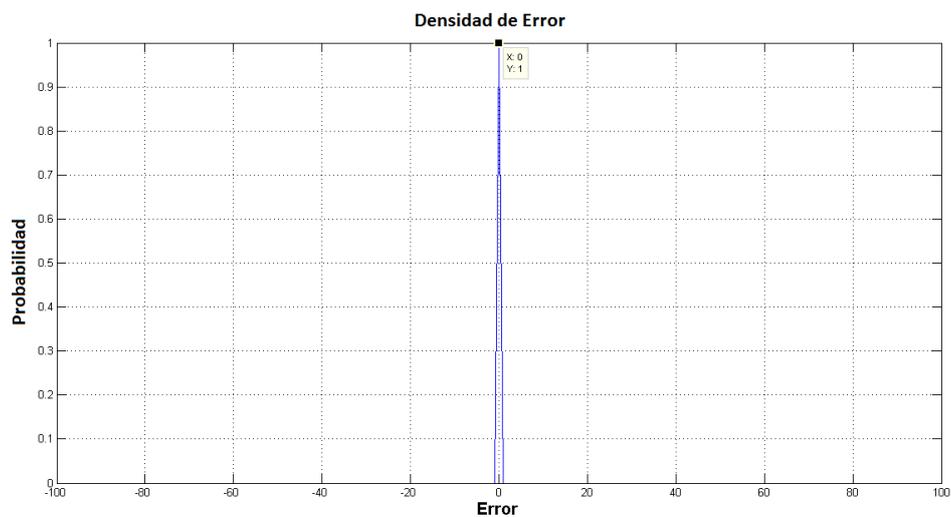


Figura 3.22: Densidad de probabilidad del error (caso LAI).

El error residuo de la diferencia entre los procesos realizados en ENVI y en Matlab® con respecto al recorte de las imágenes COSMO-SkyMed® es debido, probablemente, a la diferencia de precisión con la cual ambos software representan los números.

3.3.2 SEGUNDO TEST DE VALIDACIÓN: GRÁFICOS

En la sección 5 de la GUI (*Generación de gráficos y modelos*) el usuario puede visualizar los gráficos de correlación entre los datos previamente procesados. Por ejemplo, a continuación se muestra el resultado del procesamiento de un set de datos de imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Ping Pong (resolución de 10 metros) y un set de mapas de WdVI (resoluciones de 20, 22 y 30 metros) con umbral máximo de diferencia temporal de 3 días. En particular, la lista de imágenes COSMO-SkyMed® procesadas en este caso fueron adquiridas por los satélite COSMO-SkyMed® 1 y 2, con ángulo de mirada entre 39.63° y 41.74°, polarizaciones VV y VH, adquiridas sobre la zona de estudio entre el 20 de Abril y el 27 de Septiembre 2014. Los mapas de WdVI fueron adquiridas entre el 18 de Abril y el 24 de Septiembre 2014. La figura 3.23 muestra la salida de la interfaz gráfica.

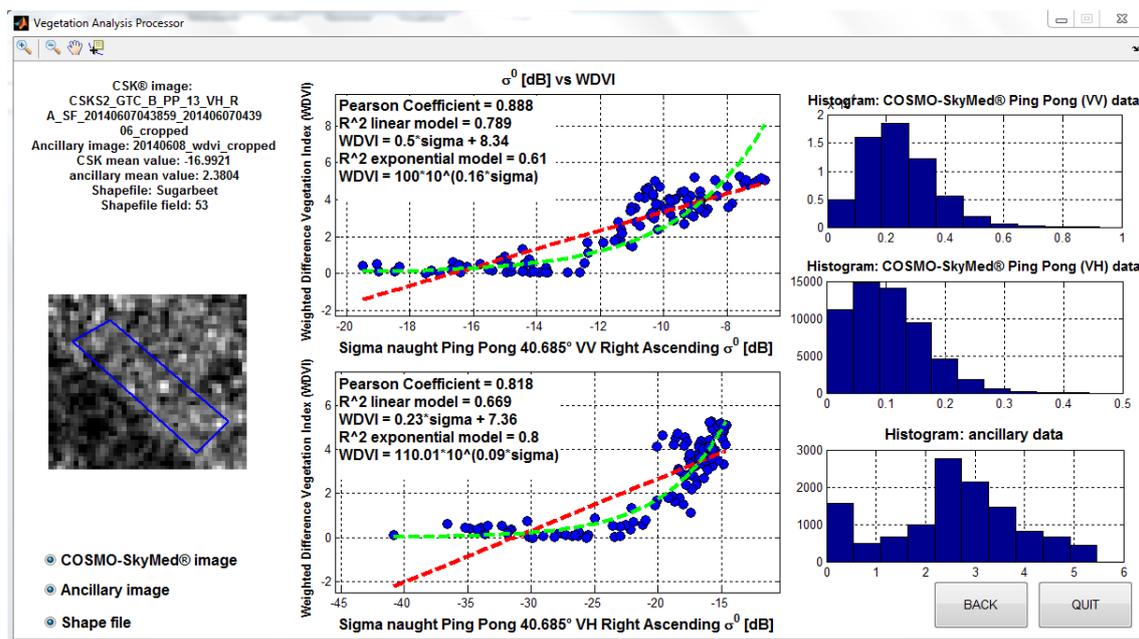


Figura 3.23: Ejemplo de comparación entre COSMO-SkyMed® Ping Pong y mapas de WdVI para remolacha azucarera utilizando la GUI.

Para comprobar la validez del algoritmo, se realizó entonces, como segundo test de validación, el mismo proceso realizado por la GUI utilizando un software de procesamiento de imágenes muy reconocido: el *Quantum GIS* (QGIS) [42].

Lo que se hizo entonces fue abrir todas las imágenes y el shapefile (en este caso el shapefile de la remolacha azucarera) y, utilizando la herramienta que pone a disposición el programa para sacar estadísticas de zona, se sacaron los valores de WdVI promedio (para los mapas de WdVI) y de coeficiente de retrodispersión promedio (para las imágenes COSMO-Skymed® Ping Pong con polarización VH). Luego se llevaron todos estos datos a Matlab® y se graficaron, calculando también los parámetros estadísticos de interés, o sea el coeficiente de Pearson, el coeficiente de determinación del modelo y los coeficientes del modelo.

La figura 3.24 muestra el resultado del test. Como se ve, el gráfico es exactamente el mismo (comparándolo con el gráfico de abajo de figura 3.23) y los parámetros calculados, a menos de diferencias poco significativas debidas a errores de aproximación de los datos, dan el mismo resultado.

En particular, el error en el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson es 0.001 (por un error porcentual del 0.12%) y el error en el cálculo del coeficiente de determinación lineal es de 0.001 (por un error porcentual del 0.15%). No hay error ni en el cálculo del coeficiente de determinación exponencial ni en el cálculo de los parámetros del modelo exponencial [Formula 3.3]. El error del parámetro C1 del modelo lineal [3.5] tiene un error de 0.04 (por un error porcentual del 0.03%) mientras el parámetro D1 no tiene error.

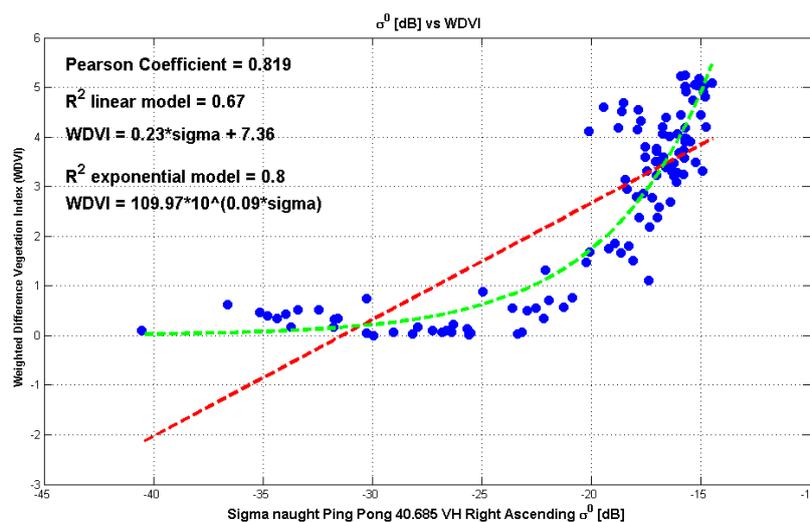


Figura 3.24: Ejemplo de comparación entre COSMO-Skymed® Ping Pong VH y mapas de WdVI para remolacha azucarera utilizando QGIS y Matlab®.

Como complemento al código que se desarrolló para la aplicación, se utilizaron también funciones accessorias libremente disponibles desde el portal de la comunidad de desarrolladores Matlab® [<https://it.mathworks.com/matlabcentral/>]. En particular, las funciones que fueron utilizadas y que se necesitan para ejecutar la aplicación son:

- ***utm2deg.m***: convierte vectores de coordenadas UTM en vectores LAT/LON (WGS84). Autor: **Rafael Palacios**
[<https://it.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10914-utm2deg>]
- ***rdir.m***: devuelve la lista de archivos presentes en una carpeta y en sus subcarpetas. Autor: **Gus Brown**
[<https://it.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19550-recursive-directory-listing>]
- ***yyyymmdd2doy.m***: convierte una fecha en formato yyyymmdd en el día del año (DOY por sus siglas en inglés). Autor: **Quan Zhang**
- ***Vegetation_Analysis_Processor.m***: el código de la aplicación.
Autor: **Giovanni Mastronardi**
- ***Vegetation_Analysis_Processor.fig***: archivo que contiene la estructura de la aplicación. Autor: **Giovanni Mastronardi**

El enlace para descargar el conjunto de las funciones es este:

[<https://drive.google.com/open?id=0B1GSe-n9e6lWWdnVHYORHRhQIk>]

Para más información es posible comunicarse con el autor de la aplicación a través del correo electrónico: **gm03@hotmail.it**.

CAPÍTULO 4

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO: EJEMPLO DE USO DE LA INTERFAZ

En este Capítulo, se presentarán los resultados obtenidos de la correlación entre las imágenes COSMO-SkyMed® a disposición (Cap. 2 Par. 2) y los mapas de LAI/WDVI (Cap.2 Par. 3) sobre las parcelas de los cultivos representados por los archivos vectoriales (Cap. 2 Par. 4) utilizando la interfaz gráfica desarrollada en Matlab® (Cap. 3).

4.1 GRÁFICOS Y MODELOS

A continuación, se realizan los gráficos de correlación para todos los cultivos a disposición. En particular, a modo ejemplificador, las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se refieren a las parcelas de zanahoria y representan respectivamente:

- La correlación entre el sigma naught (coeficiente de retrodispersión) obtenido desde las imágenes COSMO-SkyMed® Himage y el Índice de Área Foliar (LAI).
- La correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde las imágenes COSMO-SkyMed® Ping Pong y el LAI.

- La correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde las imágenes COSMO-SkyMed® Himage y el Índice de Vegetación Diferencial Ponderado (WDVI)
- La correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde las imágenes COSMO-SkyMed® Ping Pong y el WDVI

Las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 representan respectivamente las mismas correlaciones listadas antes y se refieren a las parcelas de maíz, y así para las parcelas de papas (figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12), las parcelas de soja (figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16) y las parcelas de remolacha azucarera (figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20).

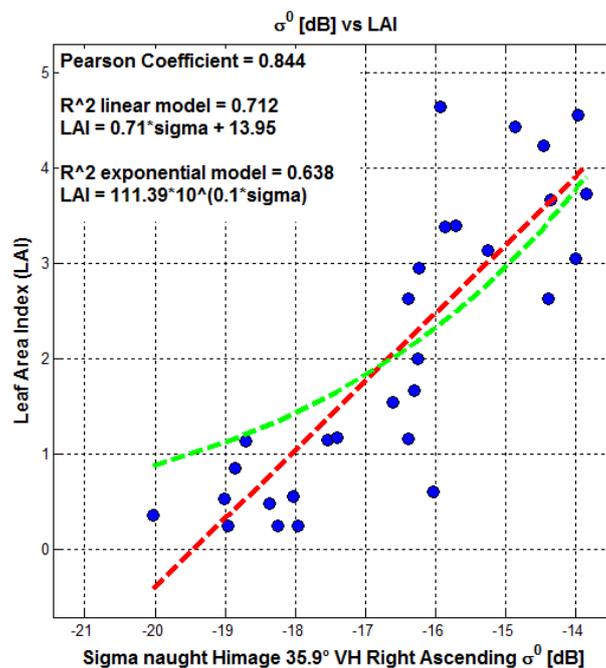


Figura 4.1: *Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el LAI (para el cultivo de la zanahoria).*

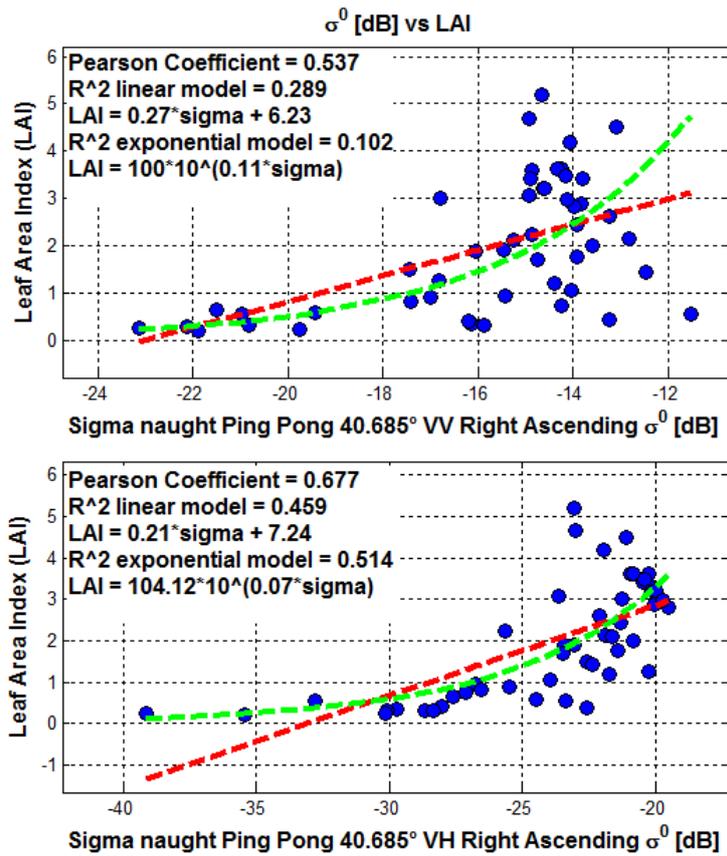


Figura 4.2: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el LAI (para el cultivo de la zanahoria).

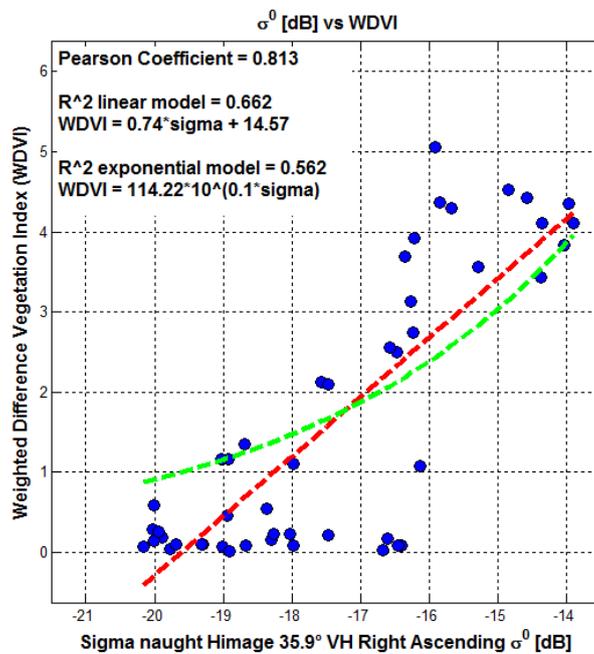


Figura 4.3: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el WDVI (para el cultivo de la zanahoria).

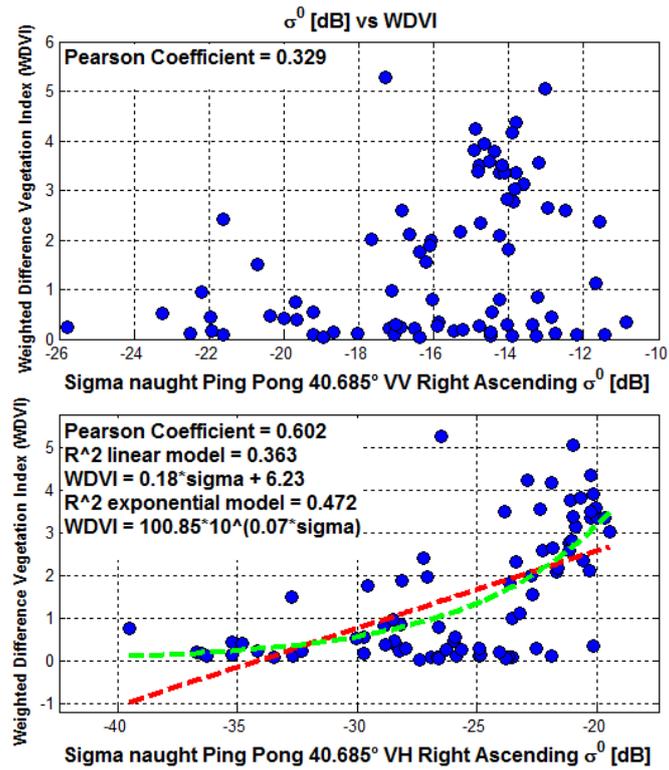


Figura 4.4: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el WDVl (para el cultivo de la zanahoria).

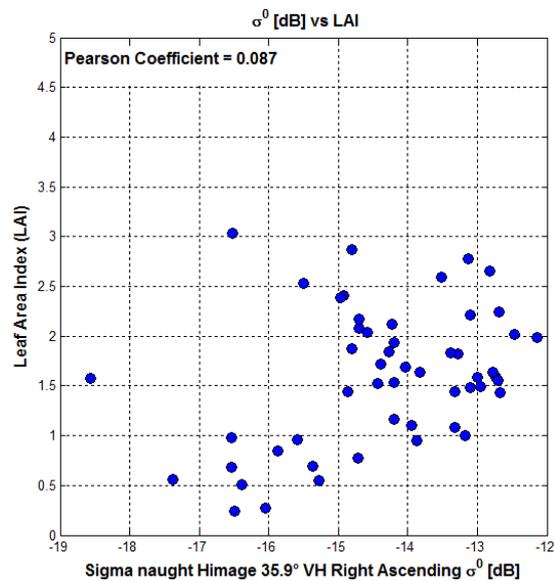


Figura 4.5: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el LAI (para el cultivo del maíz).

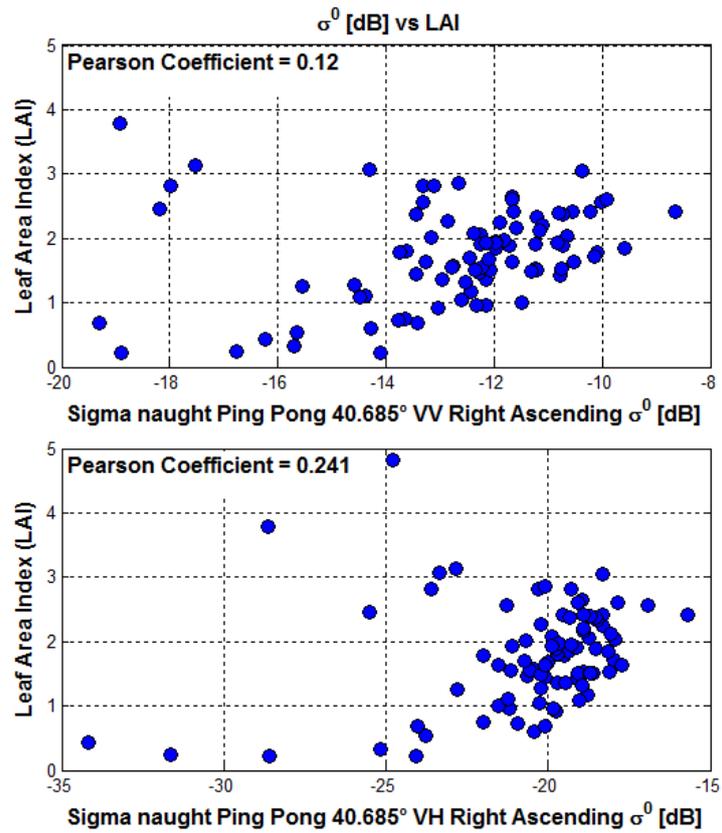


Figura 4.6: *Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el LAI (para el cultivo del maíz).*

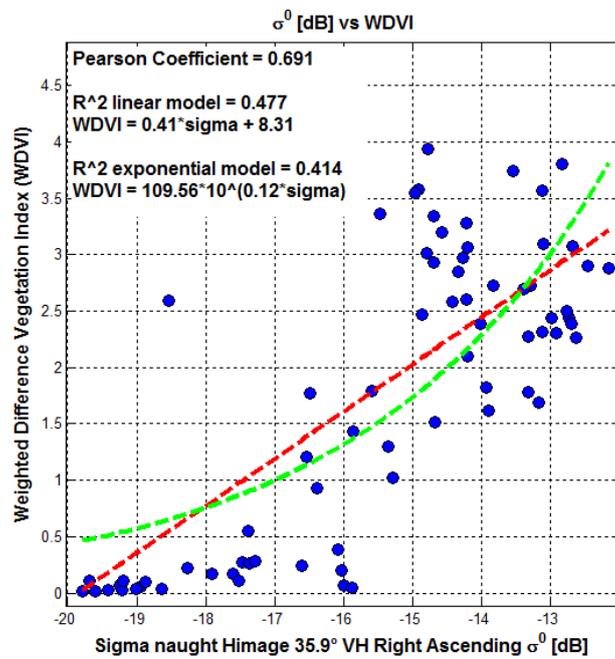


Figura 4.7: *Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el WDVl (para el cultivo del maíz).*

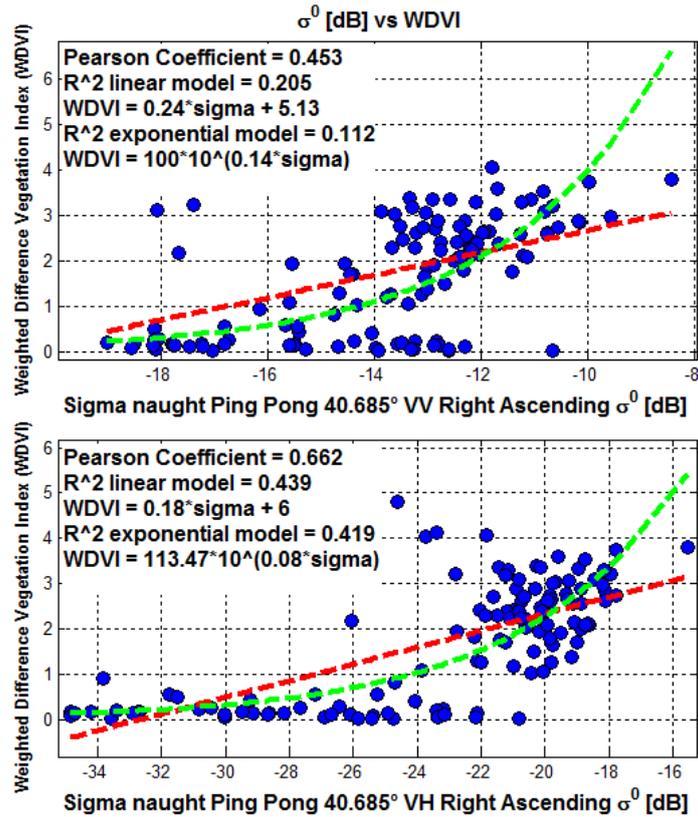


Figura 4.8: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el WDVl (para el cultivo del maíz).

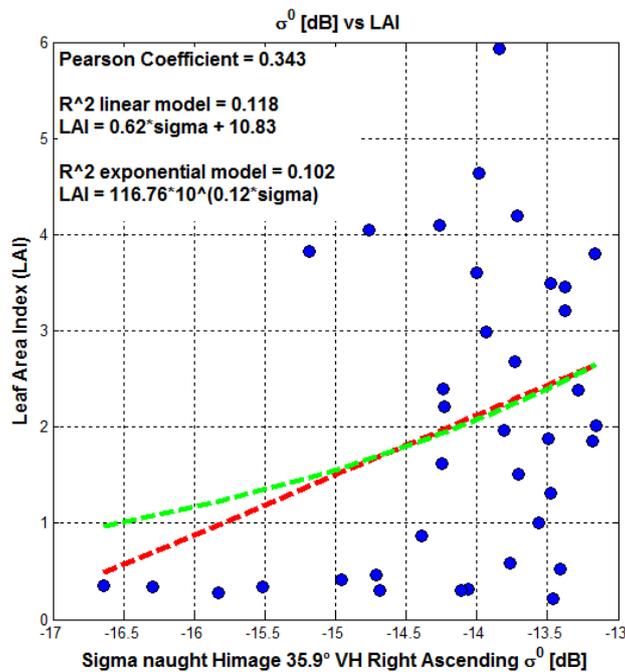


Figura 4.9: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el LAI (para el cultivo de la papa).

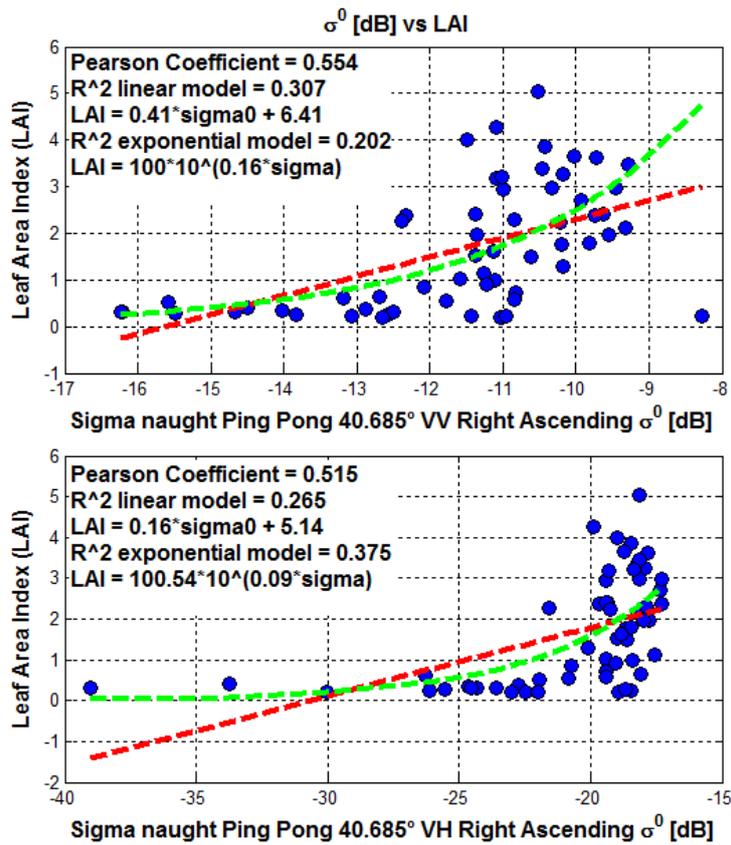


Figura 4.10: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el LAI (para el cultivo de la papa).

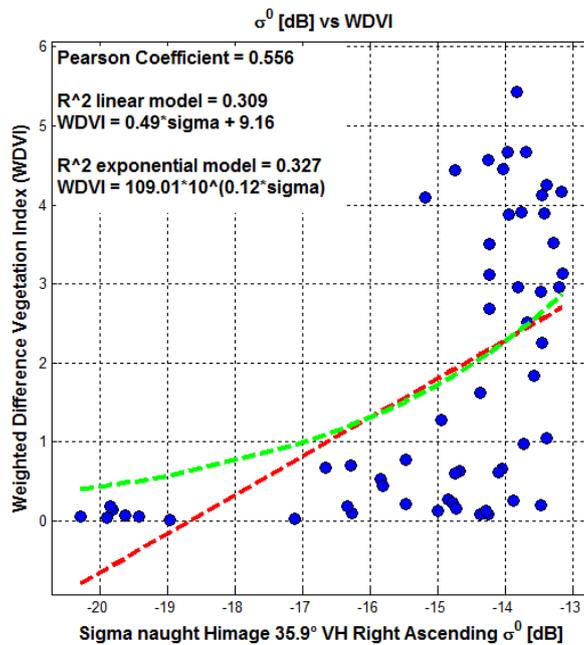


Figura 4.11: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el WDVI (para el cultivo de la papa).

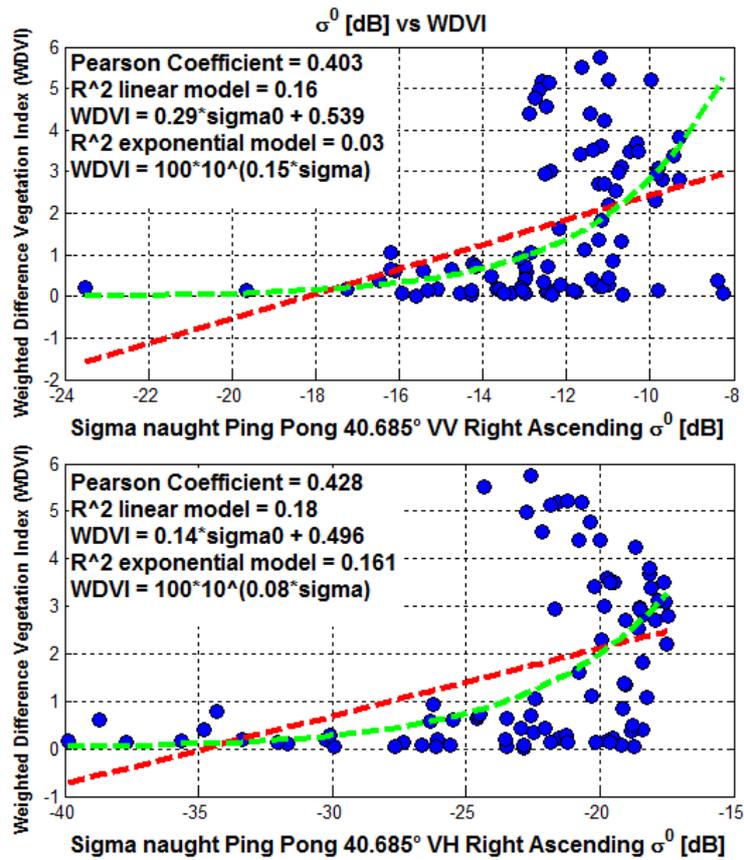


Figura 4.12: *Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el WDVl (para el cultivo de la papa).*

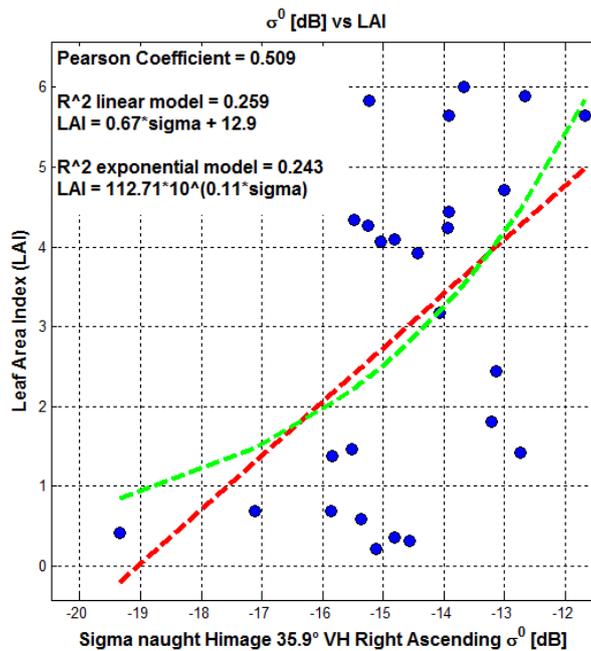


Figura 4.13: *Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el LAI (para el cultivo de la soja).*

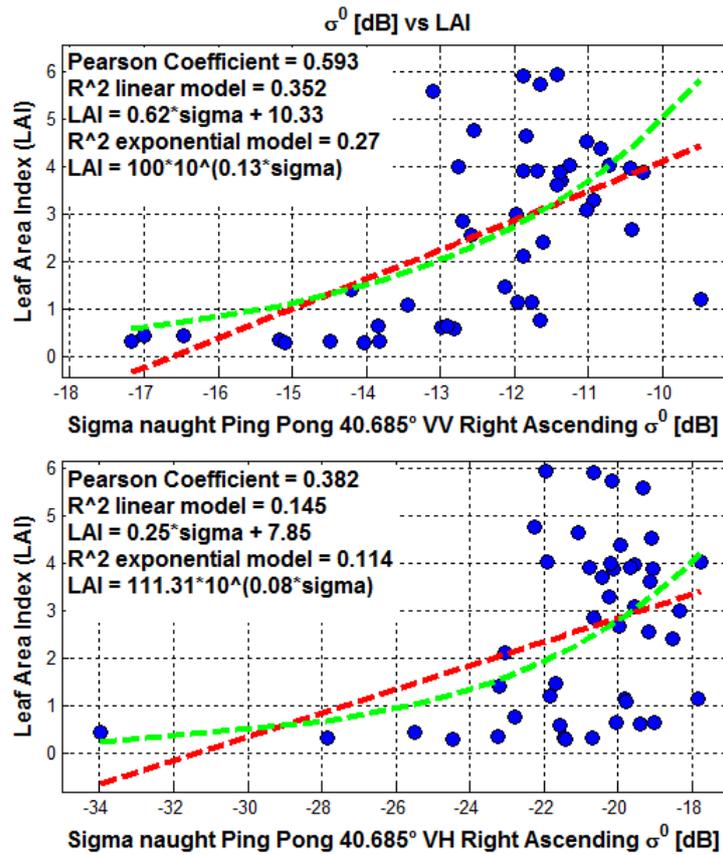


Figura 4.14: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el LAI (para el cultivo de la soja).

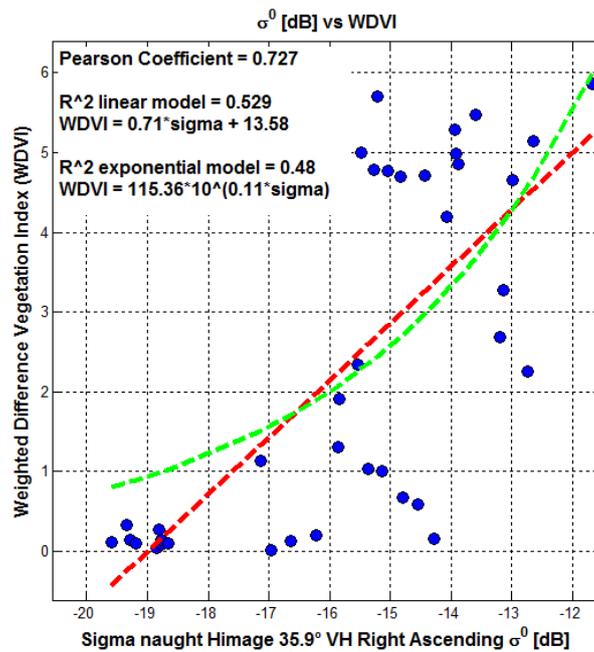


Figura 4.15: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el WdVI (para el cultivo de la soja).

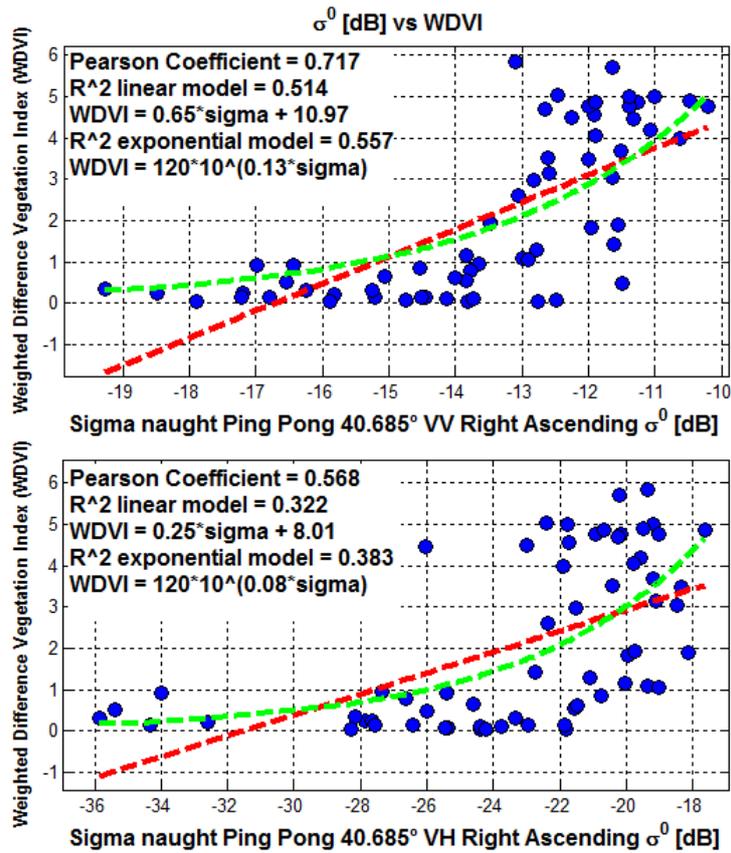


Figura 4.16: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el WDVl (para el cultivo de la soja).

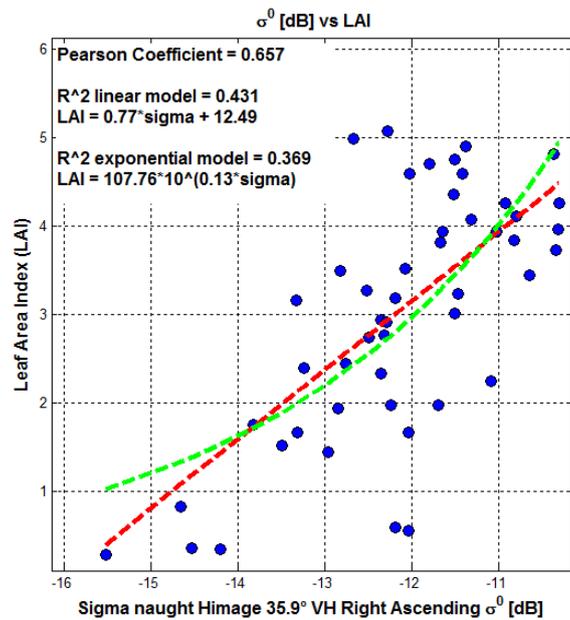


Figura 4.17: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el LAI (para el cultivo de la remolacha azucarera).

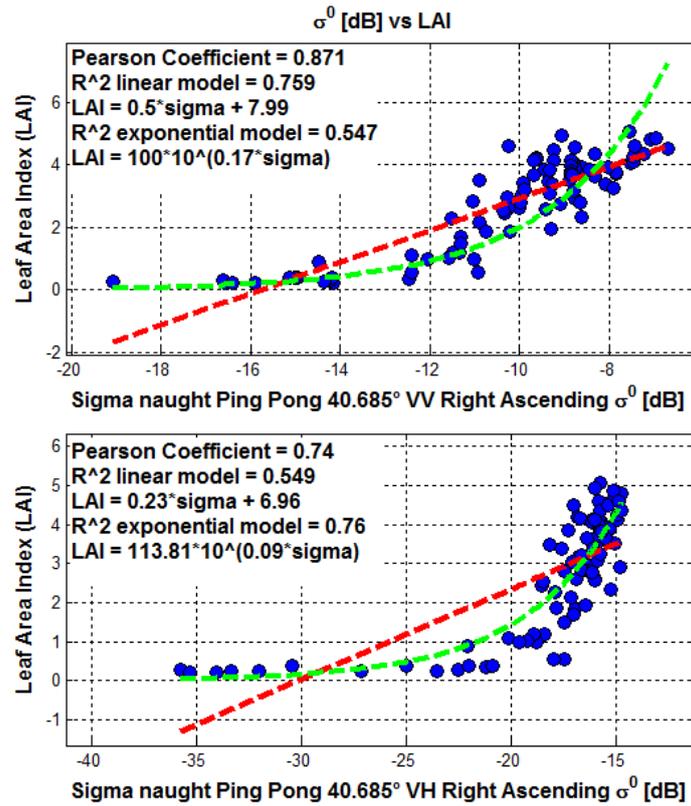


Figura 4.18: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el LAI (para el cultivo de la remolacha azucarera).

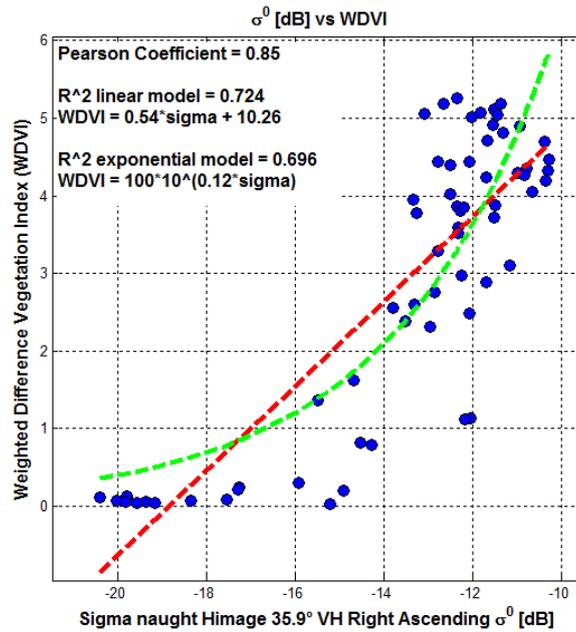


Figura 4.19: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Himage y el WDMI (para el cultivo de la remolacha azucarera).

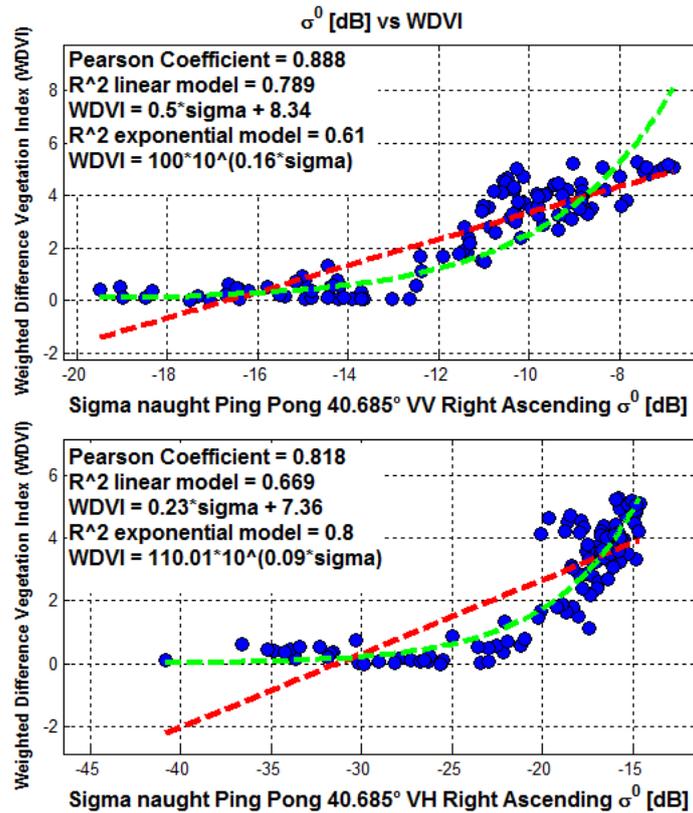


Figura 4.20: Correlación entre el coeficiente de retrodispersión de las imágenes Ping Pong (polarización VV arriba y VH abajo) y el el WDVl (para el cultivo de la remolacha azucarera).

4.2 CONSIDERACIONES ESTADÍSTICAS

Como se puede observar, el cultivo que presenta la correlación más significativa entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Himage (con polarización VH) y el LAI es la zanahoria (figura 4.1), en donde se observa un valor del coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.844. El coeficiente de determinación R² para el modelo lineal es 0.712 mientras que para el exponencial es igual a 0.638. Como el coeficiente de correlación (o de Pearson) mide la correlación (o dependencia) lineal entre las dos variables y es bastante mayor respecto al coeficiente de determinación del modelo exponencial (0.818 contra 0.638), podría ser mas apropiado implementar, para este caso, un modelo entre las dos

variables de tipo lineal, que de hecho presenta un coeficiente de determinación igual a 0.712. El otro cultivo que tiene una correlación significativa ($\rho \geq 0.65$) entre imágenes COSMO-SkyMed® Himage y LAI es la remolacha azucarera, que tiene un $\rho = 0.657$, como se observa de la figura 4.17. En este caso también, la correlación entre las variables parece ser directamente proporcional y lineal, como de hecho demuestran los valores de los coeficientes de determinación de los modelos, en donde se observa que el modelo lineal presenta un coeficiente de determinación mayor a lo del modelo exponencial.

Con respecto a la correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Ping Pong y el LAI, se observa que los cultivos que presentan un coeficiente de correlación significativo son nuevamente la zanahoria y la remolacha azucarera. En particular, la zanahoria presenta una correlación significativa ($\rho = 0.677$, $R_{lin}^2 = 0.459$, $R_{exp}^2 = 0.514$) solo con imágenes COSMO-SkyMed® Ping Pong con polarización VH (figura 4.2). Por su parte, la remolacha azucarera presenta una correlación significativa sea con imágenes COSMO-SkyMed® Ping Pong con polarización VH ($\rho = 0.74$, $R_{lin}^2 = 0.549$, $R_{exp}^2 = 0.76$) como con polarización VV ($\rho = 0.871$, $R_{lin}^2 = 0.759$, $R_{exp}^2 = 0.547$), como se puede observar en la figura 4.18. Para este cultivo se puede asumir una dependencia lineal para el caso VH, mientras que para el VV se puede asumir una dependencia exponencial entre las variables.

Observando la correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes COSMO-SkyMed en modalidad Himage y el índice de vegetación diferencial ponderado (WDVI), se puede constatar que todos los cultivos, excepto la papa, presentan una correlación significativa entre los dos conjuntos de datos. En particular, la zanahoria tiene un coeficiente de correlación igual a 0.813 y el modelo que mas se ajusta a los datos es el modelo lineal, que presenta un coeficiente de determinación igual a 0.662 (figura 4.3). Para el maíz se observa un coeficiente de correlación de 0.691 y el modelo que mas se ajusta a los datos es el modelo lineal, con un coeficiente de determinación igual a 0.477 (figura 4.7). La soja presenta un coeficiente de correlación de 0.727 y un coeficiente de determinación del modelo lineal igual a 0.529

(figura 4.15). Finalmente, para la remolacha azucarera se observa un coeficiente de correlación de 0.85 y un coeficiente de determinación del modelo lineal igual a 0.724 (figura 4.19).

En cuanto a la correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad Ping Pong y el WDV, los cultivos que presentan una correlación significativa entre las variables son el maíz, la soja y la remolacha azucarera. En particular, el maíz presenta correlación significativa contra el WDV solo para imágenes Ping Pong con polarización VH (figura 4.8), con un coeficiente de correlación de 0.662 y un coeficiente de determinación del modelo lineal igual a 0.439. Con respecto a la soja (figura 4.16), se observa un coeficiente de Pearson de 0.717 y un coeficiente de determinación del modelo exponencial igual a 0.557 con imágenes Ping Pong y polarización VV. La remolacha azucarera (figura 4.20) presenta una correlación significativa entre el coeficiente de retrodispersión y el WDV con imágenes Ping Pong sea con polarización VV como con polarización cruzada VH: en particular, con imágenes Ping Pong y polarización VV presenta un coeficiente de correlación de 0.888 y el modelo que mas se ajusta a los datos es el modelo lineal, que presenta un coeficiente de determinación igual a 0.789. Analizando las imágenes Ping Pong con polarización VH, la remolacha azucarera presenta un coeficiente de correlación de 0.818 y el modelo que mas se ajusta a los datos es el modelo exponencial, que presenta un coeficiente de determinación igual a 0.8, que constituye el valor mas significativo entre todos los cultivos analizados en este trabajo. [1][11][13][15]

La Tabla representada en figura 4.21 resume todos los resultados. Se evidencian con recuadros verdes las correlaciones más significativas. Como se puede observar, la **remolacha azucarera** es la especie agrícola que presenta correlaciones más altas con respecto al LAI y al WDV con ambas imágenes, en modalidad Himage y Ping Pong tanto con polarización VV como con polarización VH. En particular, observando los índices de determinación entre las imágenes en modalidad Ping Pong y los dos índices de vegetación considerados, los modelos que más se ajustan a los datos son: el modelo exponencial si se utilizan imágenes SAR con polarización VH, y el modelo lineal con polarización VV. En cambio, con imágenes en modalidad Himage (que tienen

resolución más alta) el modelo que más se ajusta es el lineal, que todavía aunque no difiere mucho del modelo exponencial en cuanto a los valores del coeficiente de determinación.

	Himage (VH) vs LAI	Himage (VH) vs WDMI	Ping Pong (VV) vs LAI	Ping Pong (VH) vs LAI	Ping Pong (VV) vs WDMI	Ping Pong (VH) vs WDMI
Zanahoria	$\rho = 0.844$ $R^2_{lin} = 0.712$ $R^2_{exp} = 0.638$	$\rho = 0.813$ $R^2_{lin} = 0.662$ $R^2_{exp} = 0.562$	$\rho = 0.537$ $R^2_{lin} = 0.289$ $R^2_{exp} = 0.102$	$\rho = 0.677$ $R^2_{lin} = 0.459$ $R^2_{exp} = 0.514$	$\rho = 0.329$	$\rho = 0.602$ $R^2_{lin} = 0.363$ $R^2_{exp} = 0.472$
Maíz	$\rho = 0.087$	$\rho = 0.691$ $R^2_{lin} = 0.477$ $R^2_{exp} = 0.414$	$\rho = 0.12$	$\rho = 0.241$	$\rho = 0.453$ $R^2_{lin} = 0.205$ $R^2_{exp} = 0.112$	$\rho = 0.662$ $R^2_{lin} = 0.439$ $R^2_{exp} = 0.419$
Papa	$\rho = 0.343$ $R^2_{lin} = 0.118$ $R^2_{exp} = 0.102$	$\rho = 0.556$ $R^2_{lin} = 0.309$ $R^2_{exp} = 0.327$	$\rho = 0.554$ $R^2_{lin} = 0.307$ $R^2_{exp} = 0.202$	$\rho = 0.515$ $R^2_{lin} = 0.265$ $R^2_{exp} = 0.375$	$\rho = 0.403$ $R^2_{lin} = 0.16$ $R^2_{exp} = 0.03$	$\rho = 0.428$ $R^2_{lin} = 0.18$ $R^2_{exp} = 0.161$
Soja	$\rho = 0.509$ $R^2_{lin} = 0.259$ $R^2_{exp} = 0.243$	$\rho = 0.727$ $R^2_{lin} = 0.529$ $R^2_{exp} = 0.48$	$\rho = 0.593$ $R^2_{lin} = 0.352$ $R^2_{exp} = 0.27$	$\rho = 0.382$ $R^2_{lin} = 0.145$ $R^2_{exp} = 0.114$	$\rho = 0.717$ $R^2_{lin} = 0.514$ $R^2_{exp} = 0.557$	$\rho = 0.568$ $R^2_{lin} = 0.322$ $R^2_{exp} = 0.383$
Remolacha azucarera	$\rho = 0.657$ $R^2_{lin} = 0.431$ $R^2_{exp} = 0.369$	$\rho = 0.85$ $R^2_{lin} = 0.724$ $R^2_{exp} = 0.696$	$\rho = 0.871$ $R^2_{lin} = 0.759$ $R^2_{exp} = 0.547$	$\rho = 0.74$ $R^2_{lin} = 0.549$ $R^2_{exp} = 0.76$	$\rho = 0.888$ $R^2_{lin} = 0.789$ $R^2_{exp} = 0.61$	$\rho = 0.818$ $R^2_{lin} = 0.669$ $R^2_{exp} = 0.8$

Tabla 4.21: Resumen de los resultados.

La **soja** presenta una correlación significativa solo entre el coeficiente de retrodispersión y el WDMI: en particular se observa que con imágenes de más alta resolución (Himage) la correlación es más alta con polarización VH y un modelo de tipo lineal (en manera similar a la **remolacha**), mientras con imágenes Ping Pong la correlación es mas alta con polarización VV y un modelo de tipo exponencial.

El **maíz** también presenta una correlación significativa solo entre el coeficiente de retrodispersión y el WDMI: en este caso tanto para imágenes Himage como para imágenes Ping Pong la polarización VH. El modelo lineal es el que ofrece las correlaciones más altas.

La **zanahoria** presenta correlaciones significativas con respecto al LAI con imágenes Himage y un modelo lineal, mientras con imágenes Ping Pong se ajusta mejor un

modelo exponencial, siempre con polarización VH. Con respecto al WdVI presenta buena correlación solo con imágenes Himage siempre con polarización VH y modelo lineal.

La **papa**, por su parte, no presenta correlaciones significativas para este conjunto de datos analizados.

Otra funcionalidad implementada en la aplicación es un gráfico que muestra el historial de una parcela seleccionada, como fue explicado en el Párrafo 2 del Capítulo 3. En las siguientes figuras se visualizará, por cada cultivo que presenta una correlación significativa entre los datos, un ejemplo de este gráfico. Como se dijo anteriormente, el historial multitemporal y multisensor se produce solo en el caso en que fue superado el valor de umbral para el coeficiente de Pearson (0.33) y fueron calculados los ajuste de los modelos.

En particular, la figura 4.22 muestra el historial de la parcela con ID = 194 de la especie agrícola de la zanahoria, seleccionada apretando el correspondiente punto del gráfico que se muestra en figura 4.3 (correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes en modalidad Himage con polarización VH y el WdVI).

De manera análoga, la figura 4.23 muestra el historial de la parcela con ID = 116 de la especie agrícola del maíz, seleccionada apretando el correspondiente punto del gráfico que se muestra en figura 4.8 (correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes en modalidad Ping Pong con polarización VH y el WdVI).

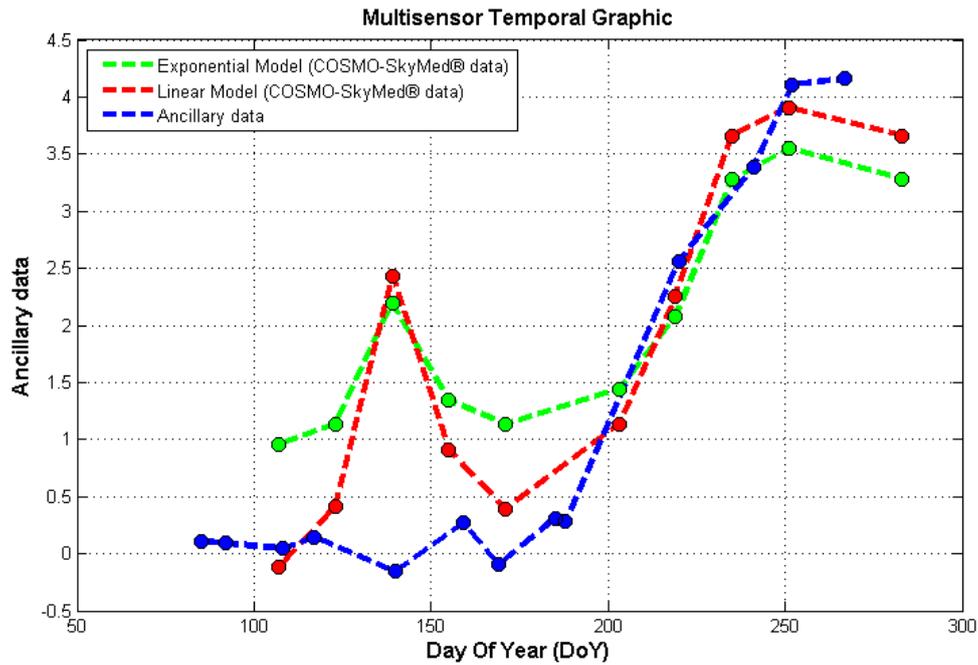


Figura 4.22: *Historial de la parcela de zanahoria con ID = 194 (Himage VH vs WDVI).*

La figura 4.24 muestra el historial de la parcela con ID = 66 de la especie agrícola de la soja, seleccionada apretando el correspondiente punto del gráfico que se muestra en figura 4.16, que muestra la correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes en modalidad Ping Pong con polarización VV y el WDVI.

La figura 4.25 muestra el historial de la parcela con ID = 30 de la especie agrícola de la remolacha azucarera, seleccionada apretando el correspondiente punto del gráfico que se muestra en figura 4.18, que muestra la correlación entre el coeficiente de retrodispersión obtenido desde imágenes en modalidad Ping Pong con polarización VH y el LAI.

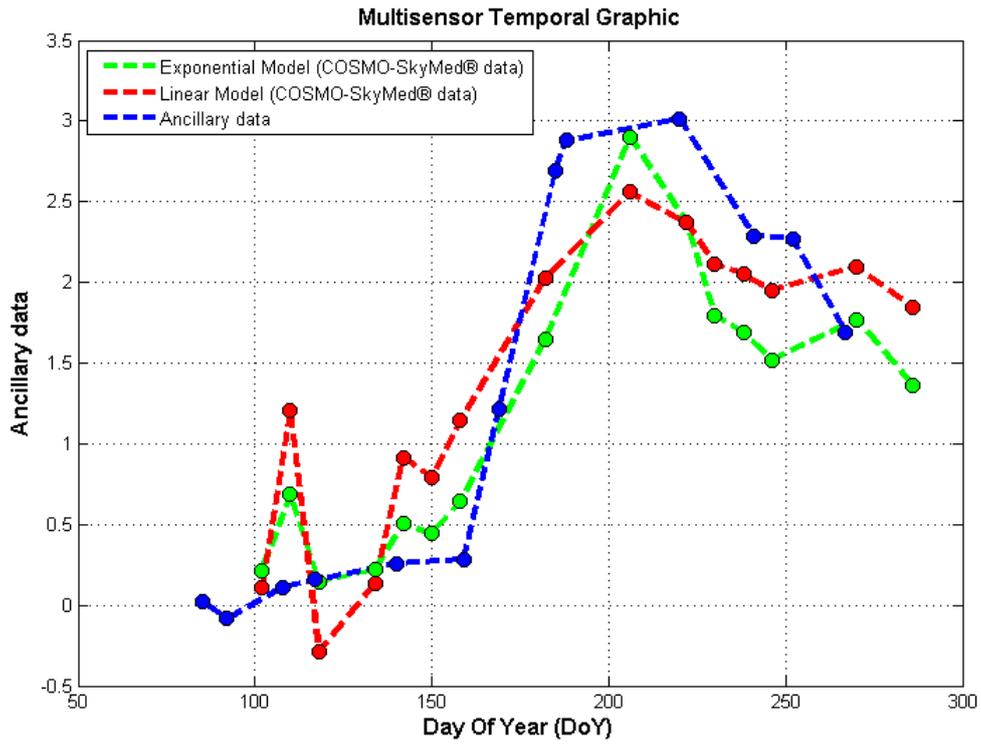


Figura 4.23: Historial de la parcela de maíz con ID = 116 (Ping Pong VH vs WDI).

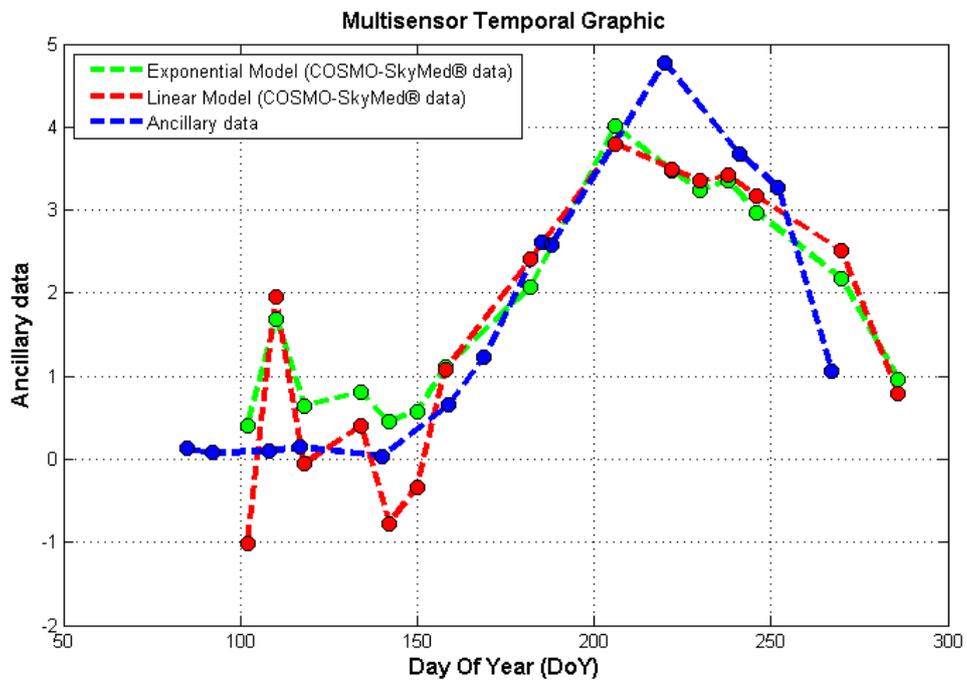


Figura 4.24: Historial de la parcela de soja con ID = 66 (Ping Pong VV vs WDI).

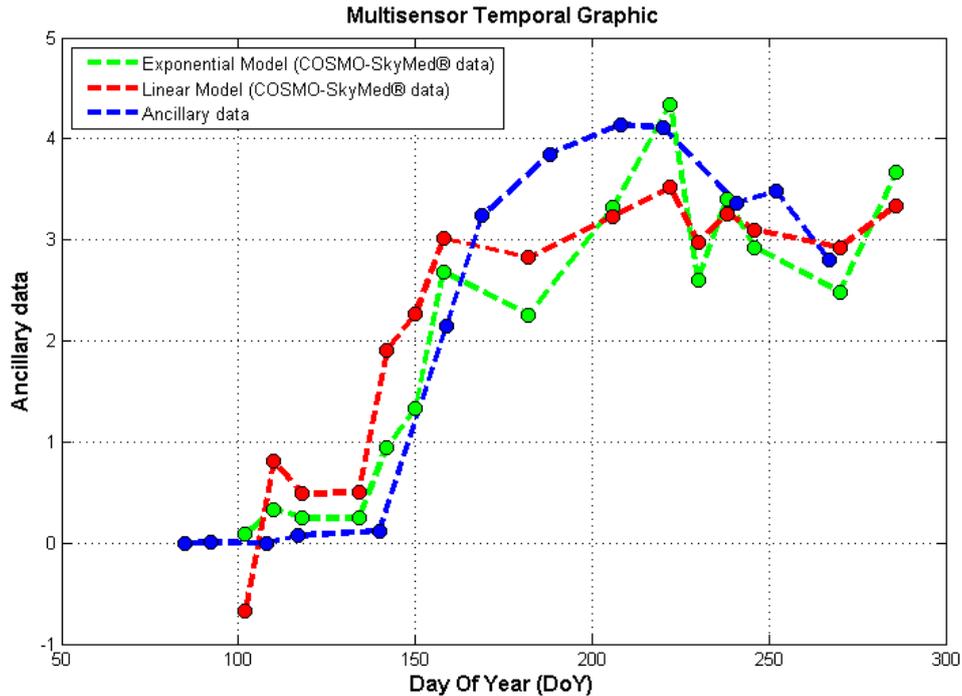


Figura 4.25: *Historial de la parcela de remolacha azucarera con ID = 30 (Ping Pong VH vs LAI).*

Las figuras 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25 que representan el día del año en función del índice de vegetación (LAI o WDV) de una dada parcela, es decir el historial de la parcela. En particular, la línea azul representa el índice obtenido desde mapas de LAI/WDVI derivados por imágenes ópticas, mientras las líneas verde y roja representan el índice de vegetación “artificial”, es decir el índice de vegetación obtenido a partir del coeficiente de retrodispersión pasado a través de los modelos. Como se puede observar, en todos los casos los historiales del coeficiente de retrodispersión pasado a través de los modelos (líneas roja y verde), siguen el mismo patrón del índice de vegetación (línea azul) obtenido desde imágenes ópticas (LAI/WDVI): esto comprueba la validéz de los modelos y valida la hipótesis inicial de integrar el uso de imágenes COSMO-SkyMed® para el monitoreo del crecimiento de los cultivos. Dependiendo de las fechas de las imágenes y por lo tanto del estadio fenológico de las plantas, las curvas del coeficiente de retrodispersión se comportan de la siguiente forma:

- En la primera fase del estado fenológico (fase de Emergencia, es decir el periodo que transcurre entre la siembra y la aparición de los brotes en el surco), cuando $100 < \text{DOY} < 150$, al haber mas superficie de suelo desnudo ($\text{LAI} < 1$), las curvas del coeficiente de retrodispersión se alejan por encima de la curva del índice de vegetación, lo que indica que se genera una respuesta mas intensa para el radar.
- En fase de crecimiento del cultivo, cuando $150 < \text{DOY} < 220$, es decir cuando las plantas están en un estado de desarrollo foliar medio ($1 < \text{LAI} < 3$), entonces, el haz del radar alcanza a penetrar las plantas, ocurre que tanto el coeficiente de retrodispersión como el índice de vegetación óptico se aproximan de una mejor manera.
- Al aproximarse a la cosecha, cuando $\text{DOY} > 220$, es decir cuando el desarrollo foliar está en su punto máximo ($\text{LAI} > 3$), el haz del radar no alcanza a penetrar la capa superficial de la vegetación y las curvas del coeficiente de retrodispersión se alejan por debajo de la curva del índice de vegetación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una herramienta software útil para evaluar la posibilidad de monitoreo de las especies agrícolas mediante la integración de datos satelitales adquiridos por sensores ópticos (mapas de LAI y WDV) y datos de radar, en particular imágenes SAR COSMO-SkyMed®. Para la implementación, se utilizó el ambiente de programación Matlab®, ya que ofrece muchas funciones para manejar datos satelitales, para construir una interfaz gráfica y para graficar los resultados.

A fin de corroborar la validez de los algoritmos codificados en la herramienta, se compararon los resultados obtenidos a través de la aplicación con aquellos análogos (utilizando los mismos datos de entrada) utilizando otros software comerciales. Los detalles de cómo utilizar la interfaz gráfica y de los test de validación están explicados en el Capítulo 3 (Desarrollo de la herramienta).

Una vez desarrollada y comprobada la validez de la aplicación, se analizaron los resultados que arroja la herramienta para un caso de estudio particular. Como datos de entrada se utilizó un conjunto heterogéneo (de varias resoluciones, ángulos de incidencia y polarizaciones) de imágenes COSMO-SkyMed® proporcionado por la Agencia Espacial Italiana. Además, se usó un conjunto de mapas de LAI/WDVI proporcionado por el Dr. Francesco Vuolo de la Universidad de Viena y 5 archivos vectoriales para 5 diferentes especies agrícolas obtenidos durante un trabajo de adquisición in situ. Los resultados del procesamiento se detallan en el Capítulo 4. Se observa que, para este conjunto de datos, la especie agrícola que presenta mayor correlación entre el coeficiente de retrodispersión σ y el LAI utilizando imágenes COSMO-SkyMed® en modalidad **Himage** y polarización **VH** es la **zanahoria**, que presenta un coeficiente de correlación ρ entre las dos variables igual a **0.844** y un coeficiente de determinación R_{lin}^2 del modelo lineal igual a **0.712**. Utilizando imágenes

COSMO-SkyMed® en modalidad **Ping Pong**, la especie agrícola que presenta la más alta correlación entre σ y **LAI** es la **remolacha azucarera** tanto para imágenes con polarización **VV** como con polarización **VH**: en el primer caso resulta un $\rho = 0.871$ y un $R_{lin}^2 = 0.759$, mientras en el segundo caso resulta $\rho = 0.74$ y un coeficiente de determinación del modelo de regresión exponencial $R_{exp}^2 = 0.76$. Se observa también que la especie agrícola que presenta la correlación más alta entre σ y el **WDVI** utilizando imágenes en modalidad Himage y polarización VH es una vez más la remolacha azucarera, con un $\rho = 0.85$ y un $R_{lin}^2 = 0.724$, pero en este caso también la zanahoria, el maíz y la soja presentan correlaciones significativas. Finalmente, la especie agrícola que presenta la correlación más alta entre σ y el **WDVI** utilizando imágenes en modalidad Ping Pong es la remolacha azucarera sea con polarización VV, con $\rho = 0.888$ y un $R_{lin}^2 = 0.789$, como con polarización VH, con $\rho = 0.818$ y un $R_{exp}^2 = 0.8$.

Un análisis más puntual de los resultados obtenidos queda a cargo y criterio del usuario especializado.

Para concluir, la herramienta desarrollada resulta fiable y útil para realizar estudios que impliquen la integración de datos ópticos y de radar para el monitoreo de las especies agrícolas. Si bien fueron implementadas varias funcionalidades, esta herramienta es factible de ser ampliada y mejorada a futuro agregando la posibilidad de:

- integrar más modelos de regresión, a parte del lineal y el exponencial.
- calcular la correlación entre el coeficiente de retrodispersión y otros índices de vegetación, además del LAI y el WDVI (por ejemplo NDVI, EVI, PVI).
- permitir a los usuarios de elegir interactivamente la propia zona geográfica de estudio, que actualmente está restringida al área de estudio particular de esta tesis.
- permitir a los usuarios utilizar imágenes de otros satélites con tecnología SAR (por ejemplo la actual misión satelital argentina SAOCOM-1A, del sistema italo-argentino SIASGE)

- agregar el calculo del valor p para conocer el grado de significancia de la relación lineal y exponencial
- agregar la posibilidad de procesar un conjunto de imágenes que estén entre el final de un año y el comienzo del año siguiente: esto resultaría de mucha utilidad para poder utilizar el software con cultivos de verano en el hemisferio sur.
- agregar a la salida de la GUI (en los gráficos) el número de pares de imágenes utilizadas y el umbral de días empleado para aparear las imágenes
- agregar más funcionalidades de acuerdo con las necesidades de los usuarios.

La posibilidad de poder integrar a las imágenes ópticas el uso de imágenes SAR COSMO-SkyMed® a fin de monitorear el crecimiento de los cultivos resulta importante, ya que permite incrementar la frecuencia temporal de las adquisiciones y mejorar la confiabilidad estadística de los resultados. La aplicación desarrollada y su código están disponibles para cualquier usuario quiera utilizarla para sus estudios.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a la Agencia Espacial Italiana (ASI) por darme la posibilidad de vivir esta experiencia de estudio y de vida única.

Agradezco también sea a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), como a la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y al Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” por la especial acogida y por su profesionalidad demostrada en estos dos años de estadia en la maravillosa Argentina.

Agradezco en particular sea al Director de esta Tesis, el Ing. Luigi Dini de la ASI por todos los consejos y por su profesionalidad y amistad, como a la Co-Directora Carolina Tauro de la CONAE que con mucha capacidad, paciencia y tenacidad me guió en esta importante etapa final de la carrera.

Un agradecimiento especial va a toda la gente que trabaja en el Instituto Gulich y a mis compañeros de la Maestría, por todas las risas, los asados, los viajes, toda la buena onda y las bellas amistades que nacieron y que van a seguir a pesar de la distancia!!! Gracias de corazón

Gianni

REFERENCIAS

- [1] – S. C. Steele-Dunne, H. McNairn, A. Monsivais-Huertero, J. Judge, P. W. Liu, K. Papathanassiou, *Radar Remote Sensing of Agricultural Canopies: A Review*, IEEE Journal of selected topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 10, No. 5, May 2017
- [2] - F. Ulaby, R. More, and A. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol. I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry.*, Boston, MA, USA: Artech House, 1986.
- [3] - F. Ulaby, P. Dubois, and J. van Zyl, *Radar mapping of surface soil moisture*, J. Hydrol., vol. 184, no. 1-2, pp. 57–84, Oct. 1996.
- [4] - S.-B. Kim et al., *SMAP L2 & L3 Radar Soil Moisture (Active) Data Products*, 2012.
- [5] - F. Ulaby, *Radar response to vegetation*, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 23, no. 1, pp. 36–45, Jan. 1975.
- [6] - F. Ulaby, T. Bush, and P. Batlivala, *Radar response to vegetation II: 8-18 GHz band*, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 23, no. 5, pp. 608–618, Sep. 1975.
- [7] - A. Joseph, R. van der Velde, P. O’Neill, R. Lang, and T. Gish, *Effects of corn on C- and L-band radar backscatter: A correction method for soil moisture retrieval*, Remote Sens. Environ., vol. 114, no. 11, pp. 2417–2430, Nov. 2010.
- [8] - A. Balenzano, F. Mattia, G. Satalino, and M. W. J. Davidson, *Dense temporal series of C- and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops*, IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol. 4, no. 2, pp. 439–450, Jun. 2011.
- [9] - M. A. Karam and A. K. Fung, *Leaf-shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 27, no. 6, pp. 687–697, Nov. 1989.

- [10] - K. Sarabandi, T. B. Senior, and F. Ulaby, *Effect of curvature on the backscattering from a leaf*, J. Electromagn. Waves Appl., vol. 2, no. 7, pp. 653–670, 1988.
- [11] - A. McDonald, J. Bennett, G. Cookmartin, S. Crossley, K. Morrison, and S. Quegan, *The effect of leaf geometry on the microwave backscatter from leaves*, Int. J. Remote Sens., vol. 21, no. 2, pp. 395–400, 2000.
- [12] - D. H. Hoekman and B. A. M. Bouman, *Interpretation of C- and Xband radar images over an agricultural area, the Flevoland test site in the Agriscatt-87 campaign*, Int. J. Remote Sens., vol. 14, no. 8, pp. 1577–1594, May 1993.
- [13] - M. A. Karam, A. K. Fung, R. H. Lang, and N. S. Chauhan, *A microwave scattering model for layered vegetation*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 30, no. 4, pp. 767–784, Jul. 1992.
- [14] - F. T. Ulaby and M. A. El-rayes, *Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part II: Dual-dispersion model*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. GE-25, no. 5, pp. 550–557, Sep. 1987.
- [15] - C. Matzler, *Microwave (1–100 GHz) dielectric model of leaves*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 32, no. 4, pp. 947–949, Jul. 1994.
- [16] - G. Picard, T. L. Toan, and F. Mattia, *Understanding C-band radar backscatter from wheat canopy using a multiple-scattering coherent model*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 41, no. 7, pp. 1583–1591, Jul. 2003.
- [17] - F. Mattia et al., *Multitemporal C-band radar measurements on wheat fields*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 41, no. 7, pp. 1551–1560, Jul. 2003.
- [18] - T. L. Toan et al., *Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 35, no. 1, pp. 41–56, Jan. 1997.
- [19] - X. Blaes, P. Defourny, U. Wegmuller, A. D. Vecchia, L. Guerriero, and P. Ferrazzoli, *C-band polarimetric indexes for maize monitoring based on a validated radiative transfer model*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 44, no. 4, pp. 791–800, Apr. 2006.

- [20] - J. Casanova, J. Judge, and M. Jang, *Modeling transmission of microwaves through dynamic vegetation*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, no. 10, pp. 3145–3149, Oct. 2007.
- [21] - M. S. Moran, P. J. Pinter, B. E. Clothier, and S. G. Allen, *Effect of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfalfa*, Remote Sens. Environ., vol. 29, no. 3, pp. 251–261, 1989.
- [22] - D. S. Kimes and J. A. Kirchner, *Diurnal variations of vegetation canopy structure*, Int. J. Remote Sens., vol. 4, no. 2, pp. 257–271, Jan. 1983.
- [23] - T. van Emmerik, S. Steele-Dunne, J. Judge, and N. van de Giesen, *A comparison between leaf dielectric properties of stressed and unstressed tomato plants*, in Proc. 2015 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., Jul. 2015, pp. 275–278.
- [24] - T. van Emmerik, S. C. Steele-Dunne, J. Judge, and N. van deGiesen, *Impact of diurnal variation in vegetation water content on radar backscatter from maize during water stress*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 53, no. 7, pp. 3855–3869, Jul. 2015.
- [25] - T. J. Schmugge, *Remote sensing of soil moisture: Recent advances*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. GE-21, no. 3, pp. 336–344, Jul. 1983.
- [26] - J. R. Wang, E. T. Engman, T. Mo, T. J. Schmugge, and J. Shiue, *The effects of soil moisture, surface roughness, and vegetation on l-band emission and backscatter*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. GE- 25, no. 6, pp. 825–833, Nov. 1987.
- [27] - V. Mironov, M. Dobson, V. Kaupp, S. Komarov, and V. Kleshchenko, *Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 42, no. 4, pp. 773–785, Apr. 2004.
- [28] - M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-rayes, *Microwave dielectric behavior of wet soil—Part II: Dielectric mixing models*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. GE-23, no. 1, pp. 35–46, Jan. 1985.
- [29] - T. F. Bush and F. T. Ulaby, *An evaluation of radar as a crop classifier*, Remote Sens. Environ., vol. 7, no. 1, pp. 15–36, Jan. 1978.

- [30] - A. Chipanshi et al., *Evaluation of the integrated Canadian crop yield forecaster (ICCYF) model for in-season prediction of crop yield across the Canadian agricultural landscape*, *Agricultural Forest Meteorol.*, vol. 206, pp. 137–150, 2015.
- [31] - J. Liu, E. Pattey, J. Miller, H. McNairn, and A. Smith, *Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multitemporal optical data combined with a radiation use efficiency model*, *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 6, pp. 1167–1177, 2010.
- [32] - F. Ulaby, C. Allen, G. Eger III, and E. Kanemasu, *Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index*, *Remote Sens. Environ.*, vol. 14, pp. 113–133, 1984.
- [33] - J. F. Paris, *Probing thick vegetation canopies with a field microwave scatterometer*, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-24, no. 6, pp. 886–893, Nov. 1986.
- [34] - K. Richter, P. Rischbeck, J. Eitzinger, W. Schneider, F. Suppan, P. Weihs, *Plant growth monitoring and potential drought risk assessment by means of Earth observation data*. *Int. J. Remote Sens.* 2008, 29, 4943–4960.
- [35] - F. Vuolo, N. Neugebauer, S. Falanga Bolognesi, C. Atzberger and G. D’Urso, *Estimation of Leaf Area Index Using DEIMOS-1 Data: Application and Transferability of a Semi-Empirical Relationship between two Agricultural Areas*, *Remote Sens.* 2013, 5, 1274-1291.
- [36] - *COSMO-SkyMed® SAR Products Handbook (Agenzia Spaziale Italiana, ASI)*
- [37] - *COSMO-SkyMed® FAQ*, e-Geos (ASI/Telespazio Company)
- [38] - The HDF Group [<http://www.hdfgroup.org/>]
- [39] - Clevers, J.G.P.W. *Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf Area Index by Correcting for Soil Moisture*. *Remote Sens. Environ.* 1989, 29, 25–37.
- [40] - *COSMO-SkyMed® Image Calibration*, e-Geos (ASI/Telespazio Company)

[41] - Harris® Geospatial Solutions

[<http://exelisvis.it/ProdottieServizi/ProdottiENVI/ENVI.aspx>]

[42] - QGIS [<http://www.qgis.org/it/site>]

[43] – MatLab [<http://www.mathworks.com>]

[44] - COSMO-SkyMed® - Agenzia Spaziale Italiana (ASI)

[<http://www.asi.it/it/attivita/osservare-la-terra/osservazione-della-terra/cosmo-skymed>]

[45] - Tesis: *Development of a Matlab® GUI to evaluate crop monitoring ability of COSMO-SkyMed® constellation*, Mastronardi Giovanni, Politecnico di Bari, April 2014.

[46] - R. Guarini, F. Segalini, G. Mastronardi, C. Notarnicola, F. Vuolo, L. Dini, *COSMO-SkyMed® potentiality to identify crop-specific behavior and monitor phenological parameters*, SPIE Remote Sensing 2014, Amsterdam (Netherlands), 22-25 September 2014.

[47] - F. Segalini, R. Guarini, G. Mastronardi, C. Notarnicola, F. Vuolo, L. Dini, *COSMO-SkyMed® Imagery for Microwave Crops Characterization*, 20th Ka Conference, Salerno/Vietri (Italy), 1-3 October 2014

[48] - R. Guarini, F. Segalini, G. Mastronardi, C. Notarnicola, F. Vuolo, L. Dini, *Potenzialità di COSMO-SkyMed® per il monitoraggio di colture agricole*, 8° Workshop Tematico: Telerilevamento Per l'Osservazione Della Terra, Associazione Italiana Telerilevamento (AIT), Pescara (Italy), 5 June 2014

[49] - Tesis: *Uso de suelo agrícola en la zona central de Córdoba: análisis de datos espaciales multisensor para su estudio y gestión*, Soraya Violini, Universidad Nacional de Cordoba (Instituto Gulich), June 2016.

[50] - Tesis: *Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación.*, Mirko Panozzo Zénere, Universidad Nacional de Cordoba (Instituto Gulich), April 2013.

[51] - Tesis: *Mapeo remoto multisensor de coberturas agrícolas extensivas en la zona central de Córdoba*, Miguel Martín Nolasco, Universidad Nacional de Córdoba (Instituto Gulich), 2018.

[52] - G. Franceschetti and R. Lanari, *Synthetic Aperture Radar Processing*. Electronicengineering systems series, CRC Press, 1999.