



**Universidad de  
Málaga**

**INTEGRACIÓN DE SENSORES Y USO  
DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA  
EVALUAR LA PRODUCCIÓN EN  
PLANTACIONES DE CÍTRICOS EN  
MÁLAGA**

**Liria Boix**

**Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Expresión Gráfica Diseño y Proyectos**

**Directores:  
Dra. Elidia Beatriz Blázquez Parra  
Dr. Rafael María Navarro Cerillo**

Málaga, noviembre 2015



Publicaciones y  
Divulgación Científica

AUTOR: Liria Misaela Boix

 <http://orcid.org/0000-0001-7285-1400>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)



**Universidad de  
Málaga**

# **TESIS DOCTORAL**

---

**INTEGRACIÓN DE SENSORES Y USO DE ÍNDICES  
DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR LA PRODUCCIÓN  
EN PLANTACIONES DE CÍTRICOS EN MÁLAGA**

---

**Autor:**

**Dña: Liria Boix**

**Directores**

**Dra. E. Beatriz Blázquez Parra - UMA**

**Dr. Rafael M<sup>a</sup> Navarro Cerillo - UCO**

Memoria presentada en satisfacción de los requisitos necesarios  
para optar al grado de Doctor por la Universidad de Málaga

en

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos

---

**INTEGRACIÓN DE SENSORES Y USO DE ÍNDICES  
DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR LA PRODUCCIÓN  
EN PLANTACIONES DE CÍTRICOS EN MÁLAGA**

---





UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
REGISTRO GENERAL

Entrada

Nº. 201500100016903


16/11/2015 13:25:19

D. Rafael M<sup>a</sup> Navarro Cerrillo, Doctor y Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba y Dña. Elidia Beatriz Blázquez Parra, Doctora y Profesora Contratada Doctora del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Málaga

INFORMAN:

Que la tesis titulada INTEGRACIÓN DE SENSORES Y USO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR LA PRODUCCIÓN EN PLANTACIONES DE CÍTRICOS EN MÁLAGA, ha sido realizada por Dña. Liria Misaela Boix bajo nuestra dirección, y considerando que reúne todos los requisitos legales y de calidad suficientes, AUTORIZAMOS su presentación y defensa pública para optar al grado de DOCTOR de acuerdo con la normativa vigente.

Málaga, 12 de noviembre de 2015



Fdo: Director de tesis  
Dr. D.Rafael M<sup>a</sup> Navarro Cerrillo



Fdo: Directora de tesis  
Dra. Dña. Elidia Beatriz Blázquez Parra



*A mis padres ...*





# Agradecimientos

Todo tiene un final, este trabajo como muchos otros ha llegado a su fin. Por lo tanto, me gustaría expresar mi profunda gratitud a mis tutores de tesis. Comenzando por el Profesor Dr. Rafael María Navarro Cerillo, por aceptar supervisar esta tesis, por su motivación, su trato sencillo y apoyo en la investigación a través de ideas y aclaraciones.

A la profesora Dra. Beatriz Blázquez Parra que ha estado presente desde el comienzo, por su seguimiento y supervisión continua, ha sido puntual en el rumbo que ha tomado este trabajo.

Mi gratitud a dos familias Malagueñas. Primero a la familia Luque Luque que ha brindado su apoyo a la investigación estando presentes estos últimos años en momentos claves de su progreso, principalmente en la recolección de la información sobre el área de estudio, sus gestiones administrativas descongestionaron mi tiempo.

A la familia Fernández-Castellón que este último año ha vivido de cerca este trabajo y han brindado su amistad, apoyo y afecto.

Al centro de investigación NCG de la Universidad de Maynooth por su acogida en la estancia internacional realizada, por sus sugerencias y recomendaciones.

A tod@s aquellas personas que he cruzado a lo largo de este trabajo, entre ellos, Vicky y Jesús, cuyos consejos y ánimo contribuyeron al avance de la investigación.

A mis padres que siempre están presentes, no importa el paso del tiempo ni la distancia ....

A todos, MUCHAS GRACIAS.

# Índice

Agradecimientos .....	XI
Índice.....	XIII
Índice de Figuras.....	XVII
Índice de Tablas .....	XIX
Abstract.....	XXIII
Resumen.....	XXV
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. La producción de cítricos en Málaga en los últimos 10 años .....	3
1.2. Teledetección aplicada a la evaluación de la producción en cultivos leñosos .....	5
1.3. Uso de índices de vegetación en la evaluación de procesos de producción en plantaciones de cítricos .....	7
1.4. Hipótesis y objetivo de la tesis .....	9
1.5. Estructura de la tesis .....	10
Referencias .....	12
2. ÁREA DE ESTUDIO .....	17
2.1. Descripción del área de estudio .....	19
2.2. Adquisición de imágenes satelitales .....	20
2.2.1. Imágenes del Sensor Landsat .....	20
2.2.1.1. Pre-procesamiento imágenes Landsat .....	20
2.2.1.2. Procesamiento imágenes Landsat.....	21
2.2.2. Imágenes producto MODIS16A2.....	21
2.2.2.1. Pre-procesamiento producto imágenes MOD16A2.....	22
2.2.2.2. Procesamiento de datos imágenes MOD16A2.....	23
Referencias .....	24
3. DETECCIÓN DE CAMBIOS EN PAISAJES AGRÍCOLAS MEDIANTE TÉCNICAS DE SEGMENTACIÓN EN IMÁGENES LANDSAT .....	25
3.1. Introducción.....	27
3.2. Materiales y Métodos.....	30

3.2.1. Zona de estudio .....	30
3.2.2. Imágenes satelitales .....	31
3.2.3. Técnicas de segmentación .....	32
3.3. Resultados .....	35
3.3.1. Técnica de umbral fijo .....	35
3.3.2. Técnica diferenciación de imagen-NDVI.....	35
3.3.3. Técnica RGB-NDVI.....	36
3.4. Discusión .....	40
3.5. Conclusión .....	43
Referencias.....	44
4. ANÁLISIS COMPARADO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI y SAVI PARA LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN CULTIVOS DE CÍTRICOS .....	49
4.1. Introducción.....	51
4.2. Materiales y Métodos.....	55
4.2.1. Zona de estudio .....	55
4.2.2. Recolección de datos de producción .....	56
4.2.2. Imágenes satelitales .....	56
4.2.3. Análisis de Regresión .....	57
4.3. Resultados.....	58
4.4. Discusión .....	62
4.5. Conclusión .....	64
Referencias.....	65
5. RELACIÓN ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y PRODUCCIÓN .....	69
5.1. Introducción.....	71
5.2. Materiales y Métodos.....	75
5.2.1. Zona de estudio.....	75
5.2.2. Imágenes satelitales .....	76
5.2.3. Análisis de Evapotranspiración Potencial (ETP) .....	77
5.3. Resultados.....	78
5.3.1. Comportamiento de ETP .....	78
5.3.2. Valores promedios de ETP para la zona .....	79
5.3.3. Análisis de Regresión .....	79
5.4. Discusión .....	84
5.5. Conclusión .....	85
Referencias.....	86

6. SÍNTESIS .....	89
6.1. Discusión General .....	91
6.2. Conclusión .....	94
6.3. Recomendaciones para futuras investigaciones .....	96
Referencias.....	97
ANEXO 1 .....	99
Características de las imágenes satelitales adquiridas .....	101
ANEXO 2 .....	103
Análisis ANOVA y correlación de Pearson.....	105
limón fino.....	105
limón verna .....	107
mandarina clementina.....	109
ANEXO 3 .....	113
Diagrama de dispersión resultado estimación de los índices EVI, PVI y TSAVI relacionados con la variable producción. ....	115
Tabla valores de los parámetros para el cálculo del índice TSAVI.....	115
Perfil comparativo de los índices de vegetación EVI, PVI y TSAVI junto a NDVI y SAVI.....	116





# Índice de Figuras

Figura 2.1	Mapa del área de estudio .....	23
Figura 3.1	Mapa ubicación del área seleccionada .....	31
Figura 3.2	Imágenes con cálculo NDVI, del área seleccionada, para todos los años del periodo de estudio 1985-2011 .....	33
Figura 3.3	Imagen resultante, año 1985, con cálculo NDVI (izquierda) y aplicación de umbral (derecha) .....	37
Figura 3.4	Imagen resultante, año 2001, con cálculo NDVI (izquierda) y aplicación de umbral (derecha) .....	37
Figura 3.5	Imagen resultante, año 2011, con cálculo NDVI (izquierda) y aplicación de umbral (derecha) .....	37
Figura 3.6	Imagen resultante de la aplicación técnica diferenciación de imagen correspondiente a los pares de años (a) 1985-2001, (b) 2001-2006 y (c) 2006-2011. Los píxeles con cambio positivo color azul, las zonas más claras sin cambio y las zonas oscuras se refieren a valores negativos o de vegetación .....	38
Figura 3.7	Histograma de la imagen de diferencia .....	38
Figura 3.8	Imagen interpretación de la técnica NDVI-RGB mediante la técnica aditiva del color realizado con el año 1985 en azul, 2001 en verde y 2011 en rojo .....	39
Figura 3.9	Firmas espectrales correspondiente a las interpretaciones realizadas en la Fig. 3.8 .....	40
Figura 4.1	Mapa del área de estudio y ubicación geográfica de las parcelas de cítricos .....	57
Figura 4.2	Gráfica de dispersión de la correlación entre el rendimiento del cultivo limón fino y las variables NDVI y SAVI .....	60
Figura 4.3	Gráfica de dispersión de la correlación entre el rendimiento del cultivo limón verna y las variables NDVI y SAVI .....	60
Figura 4.4	Gráfica de dispersión de la correlación entre el rendimiento del cultivo mandarina clementina y las variables NDVI y SAVI .....	60
Figura 4.5	Perfil comparativo de los datos de producción para el periodo de estudio 2000-2011 .....	61
Figura 4.6	Perfil comparativo de las series temporales de los índices	

	de vegetación NDVI y SAVI para el periodo de estudio 2000-2011 .....	61
Figura 5.1	Mapa del área de estudio con la ubicación de las parcelas de cítricos de referencia.....	77
Figura 5.2	Respuesta de los niveles de ETP para el periodo 2000-2011 para las parcelas de limón fino, limón verna y mandarina clementina.....	80
Figura 5.3	Valores de ETP de la variedad limón fino para el periodo 2000-2011 .....	82
Figura 5.4	Valores de ETP de la variedad limón verna para el periodo 2000-2011 .....	82
Figura 5.5	Valores de ETP de la variedad mandarina clementina para el periodo 2000-2011 .....	82
Figura 5.6	Mapas del Valle de Guadalhorce con los valores ETP representativos .....	83
Figura 5.7	Gráfica de dispersión del análisis de regresión de Pearson para los tres puntos geográficos de referencia (a) $r= 0.0004$ , (b) $r= 0.0007$ y (c) $r = 0.001$ .....	84

# Índice de Tablas

Tabla 2.1	Resumen imágenes satelitales cedidas por REDIAM .....	21
Tabla 2.2	Resumen imagen año 1985 .....	21
Tabla 2.3	Resumen significado de los valores ET/ETP del producto MOD16A2 .....	22
Tabla 3.1	Resumen de las imágenes empleadas en el análisis de Detección de Cambios .....	32
Tabla 3.2	Media y desviación estándar de las imágenes de referencias .....	39
Tabla 4.1	Verificación de las correlaciones realizadas con los índices de vegetación NDVI y SAVI1 .....	59
Tabla 5.1	Resumen significado de los valores ET/ETP del producto MODIS16A2 para valor día/mes .....	77
Tabla 5.2	Ubicación geográfica de los píxeles de los que se extrae información .....	78
Tabla 5.3	Valores ETP de los píxeles de los que se extrae información para las tres parcelas .....	81



---

**INTEGRACIÓN DE SENSORES Y USO DE ÍNDICES  
DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR LA PRODUCCIÓN  
EN PLANTACIONES DE CÍTRICOS EN MÁLAGA**

---





# Abstract

The Guadalhorce Valley is an area of great agricultural importance, its climate and water resources availability allow the exploitation of a large number of crops. The irrigation water is used to cover the lack of water supply from the soil, since it is an area with irregular rainfall in the winter season. In this way, the basin of Guadalhorce river favours the installation of irrigation systems, promoting the adaptation of non-native varieties in the open air. For this reason, it is of particular interest to carry out surveys of information about agricultural production based on remote sensing data. Within this framework, with an emphasis on citrus crops, the most abundant in the region, this thesis applies different remote sensing techniques for the evaluation of the production of these crops in the region of the river Guadalhorce (area of Cártama, Álora and Pizarra. At the same time that evaluates the potential of satellite imagery to achieve the proposed objectives.

At first approach aims at an analysis of the use of soil through change detection techniques for the period 1985-2011. Prior calculation of vegetation index NDVI in order to enhance agricultural expansion produced in time, is obtain as a result the segmentation technique threshold-fixed, which shows the direction of the change and major occupation of soil without discrimination of the types of crops. The image differentiation technique defines plant vigor over time, making evident the stable areas and which have changed. The third and final applied technique, RGB-NDVI, added to the previous visual analysis showing the distribution and spatial occupation sectors, to reveal the landscape heterogeneity, differentiating, fallow land sector, old and new crops, bare soil and mountainous area.

A second approach, aims to assess the responses of vegetation indices on citrus plots, with different coverage levels and soil, with the purpose of estimating its production. In addition to NDVI joined the calculation of SAVI, EVI, PVI and TSAVI crop production-related indices to be analyzed in a time series in the period 2000-2011. As a result it is accomplished the relationship or association degree that exists, in this particular case, between the spectral indexes derived from satellite imagery and the production of citrus fruits. The results for NDVI  $r^2_{(a)}=0.09$ ,  $r^2_{(b)}=0.22$ ,  $r^2_{(c)}=0.32$  and SAVI  $r^2_{(a)}=0.33$ ,  $r^2_{(b)}=0.39$ ,  $r^2_{(c)}=0.19$  are those who have better reflected the cover crop in the area and its relationship with the crop productive activity. PVI rates PVI  $r^2_{(a)}=0.003$ ,  $r_{(b)}=0.08$ ,  $r^2_{(c)}=0.07$  and TSAVI  $r^2_{(a)}=0.0007$ ,  $r^2_{(b)}=0.09$ ,  $r^2_{(c)}=0.04$  show relationship, this is even weaker. However EVI index  $r_{(a)}=-0.68$ ,  $r_{(b)}=0.27$ ,  $r_{(c)}=0.17$  shows a high restrictiveness, with high negative correlation or no perfor-

mance. This chapter demonstrates, in this case the difficulty of obtaining highly significant relationship between the sensor and the estimated field production data. The temporal and spectral resolution seems not to conform to the spatial structure of the crop, which limits the interpretation of the information from the sensor. Another source of error, can arise from the conditions of crops that has a strong heterogeneity in their agronomic management, which prevents obtaining accurate production data.

Finally, the third approach, aims to meet the climatic variations during the period of study (2000-2011). The result has made it possible to visualize, on a regional basis, the behaviour and the variations of the potential evapotranspiration of the region, key process of the operation of the climate system and nexus between the water cycle, carbon and energy. This line of research is being widely used. The availability of remote sensors with spatial and spectral information allows several approaches to this type of study. This work is intended to be a base of knowledge about a region whose evolution of crop remains constant, with sectors ranging in species or variety, making evident the identification of Mulches, and comparison of vegetation indices with accurate discrimination of the capabilities of the IV on the crops, by the answers provided in the studied varieties and differences between applying one or the other, facilitating the interpretation of which best fits to this area.

**Key words:** change detection, vegetation indices, yield crop, potential evapotranspiration, remote sensing.

# Resumen

El Valle de Guadalhorce es una zona de gran importancia agrícola, y cuyo clima y disponibilidad de recursos hídricos permiten la explotación de un gran número de cultivos. Recurre al agua de riego para cubrir la falta de suministro de agua del suelo, puesto que se trata de una zona con precipitaciones irregulares en la estación de invierno. De esta manera, la cuenca del río Guadalhorce favorece la instalación de sistemas de riego, propiciando la adaptación de variedades no autóctonas al aire libre. Por esta razón resulta de particular interés realizar relevamientos de información sobre la producción agrícola a partir de datos de sensores remotos. En este marco, haciendo hincapié en los cultivos de cítricos, el más abundante en la zona, esta tesis aplica distintas técnicas de teledetección para la evaluación de la producción de éstos cultivos en la comarca del río Guadalhorce (zona de Cártama, Álora y Pizarra), al mismo tiempo que evalúa las potencialidades de las imágenes de satélite para lograr los objetivos propuestos.

Una primera aproximación tiene por objetivo realizar un análisis del uso del suelo a través de técnicas de detección de cambios para el periodo 1985-2011. Previo cálculo índice de vegetación NDVI con el propósito de realzar el avance agrícola producida en el tiempo, se obtiene como resultado la técnica de segmentación umbral-fijo, la cual muestra la dirección del cambio y la mayor ocupación del suelo sin discriminación de los tipos de cultivos. La técnica diferenciación de imagen delimita mayor vigor vegetal en el tiempo, haciendo notoria las zonas estables y las que han cambiado. La tercera y última técnica aplicada, RGB-NDVI, adiciona a las anteriores el análisis visual mostrando la distribución y ocupación espacial de los distintos sectores, al revelar la heterogeneidad del paisaje, diferenciándose los pueblos, zonas de barbechos, sectores de cultivos nuevos y antiguos, suelos desnudos y zona montañosa.

Una segunda aproximación, tiene por objetivo evaluar las respuestas de índices de vegetación en parcelas de cítricos, con distintos niveles de cobertura y suelo, con el propósito de estimar su producción. Además de NDVI se suman el cálculo de los índices SAVI, EVI, PVI y TSAVI relacionados con la producción de cultivos para ser analizados en una serie de tiempo en el periodo 2000-2011. Como resultado se logra definir la relación o el grado de asociación que existe, en este caso particular, entre los índices espectrales

derivados de imágenes de satélites y la producción de cítricos. Los resultados para NDVI  $r^2_{(a)}=0.09$ ,  $r^2_{(b)}=0.22$ ,  $r^2_{(c)}=0.32$  y SAVI  $r^2_{(a)}=0.33$ ,  $r^2_{(b)}=0.39$ ,  $r^2_{(c)}=0.19$  son los que mejor han reflejado la cubierta de cultivo en la zona y su relación con la actividad productiva del cultivo. Los índices PVI  $r^2_{(a)}=0.003$ ,  $r^2_{(b)}=0.08$ ,  $r^2_{(c)}=0.07$  y TSAVI  $r^2_{(a)}=0.0007$ ,  $r^2_{(b)}=0.09$ ,  $r^2_{(c)}=0.04$  muestran relación, esta resulta aún más débil. Sin embargo, el índice EVI  $r^2_{(a)}=0.46$ ,  $r^2_{(b)}=0.07$ ,  $r^2_{(c)}=0.02$  muestra una alta restrictividad, con una correlación negativa o ninguna con el rendimiento. Este capítulo evidencia, para este caso, la dificultad de obtener relaciones altamente significativas entre los datos del sensor y la producción estimada en campo. La resolución temporal y espectral parece no adecuarse a la estructura espacial del cultivo, lo que limita la interpretación de la información procedente del sensor. Otra fuente de error, puede derivarse de las condiciones de los cultivos que presenta una fuerte heterogeneidad en su manejo agronómico, lo que impide obtener datos precisos de la producción.

Finalmente, la tercera aproximación, tiene por objetivo conocer las variaciones agroclimáticas durante el periodo de estudio (2000-2011). El resultado ha permitido visualizar, de manera regional, el comportamiento y las variaciones de la evapotranspiración potencial representativo de la región, proceso clave del funcionamiento del sistema climático y nexos entre los ciclos de agua, carbono y energía.

Esta línea de investigación viene siendo ampliamente usada. La disponibilidad de sensores remotos con información espacial y espectral permite varias aproximaciones a este tipo de estudio. Este trabajo pretende ser una base de conocimiento sobre una región cuya evolución de cultivos se mantiene constante, con sectores que varían de especie y/o variedad, haciendo notoria la identificación de cubiertas vegetales, y la comparación de índices de vegetación con una discriminación precisa de las capacidades de los IV sobre los cultivos, por las respuestas que brindan en las variedades estudiadas y las diferencias entre aplicar uno u otro, facilitando la interpretación de cual se ajusta más a esta zona.

**Palabras claves:** detección de cambios, índices de vegetación, rendimiento de cultivo, evapotranspiración potencial, teledetección.

# 1. ANTECEDENTES

---



## 1.1. LA PRODUCCIÓN DE CÍTRICOS EN MÁLAGA EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS

Los cítricos son el fruto de mayor producción del planeta con 81 millones de Tm en el 2001, y es uno de los más importantes en España. El crecimiento de su producción ha sido considerable, ligada a la evolución de su comercialización y exportación, la cual creció enormemente cuando España se integrara a la Unión Europea. El mayor cambio se produce, según el informe del Observatorio de Sostenibilidad (2006), en el período 1987-2000 beneficiando a las producciones intensivas orientadas a una mayor rentabilidad de mercado. Andalucía en particular representa el 24% de la superficie total de cítricos a nivel nacional, y es además una de las áreas de producción con mayor regadío, junto con Murcia, Valencia y Castilla la Mancha.

Si bien Estados Unidos y Brasil son los primeros países productores de cítricos, con unos 16-18 millones de Tm (año 2001), España es el primer país productor de la Cuenca Mediterránea, con una superficie de 270.000 ha. La distribución española se distribuye entre, la Comunidad Valenciana, con aproximadamente unas 170.000 ha y una producción media anual de 3.000.000 Tm, Andalucía con 64.840 ha y una producción de 800.000 Tm, Castellón con 43.000 ha y producción de 930.000 ha; Alicante con 39.000 ha y producción de 670.000 Tm, y Murcia con 32.000 ha y producción de 345.000 Tm (Conserjería de Agricultura y Pesca, 2006). De esta producción nacional, más del 50% son exportados para su consumo fresco, debido a la demanda y al aumento del consumo anual por habitante y año, exigiendo buena capacidad productiva junto con calidad.

Desde su introducción, en la región del Mediterráneo, tratándose de una zona con precipitaciones irregulares que se producen en cortos periodos de tiempo, los cítricos han provocado continuas investigaciones por el complejo proceso asociado a su exigencia climática, al corresponder a una zona árida o semiárida este cultivo ha sido considerado un componente importante porque ha involucrado la creación de sistemas de agricultura para lograr grandes rendimientos (FAO, 2003). Los cítricos vegetan mejor en terrenos profundos, dado su gran sistema radicular, tiene más del 50% de sus raíces en los primeros



50 cm del suelo (responsables de la absorción del agua, fósforo y nutrientes), la calidad de su fruto incluye tanto sus características internas (cualidades organolépticas) como externas (aspectos, apariencia). Su rendimiento entre muchos otros factores está determinado por el número de flores y el potencial de cosecha de un año, puesto que le afecta el estrés fisiológico de años anteriores, para el cual el clima sería uno de los factores determinantes en el desarrollo de la planta y difícil de controlar junto con exceso de lluvias, lluvias extemporáneas, sequías, temperatura, humedad del suelo, etc. (Arpaia et al., 1994; Agustí, 1994) que pueden modificar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo (a raíz de la explotación, ubicación, práctica cultural, etc.). Todos estos factores representan desórdenes fisiológicos siempre latentes que exigen su aclimatación cuando es cultivado en zonas distintas a su origen.

En España que cuenta con una media de 2500 horas de sol al año, incluso en invierno, la adaptación de los cultivos de cítricos depende principalmente de sistemas de riego. En particular, en Andalucía, las carencias de agua han sido suplidas por la explotación de los acuíferos, o construcción de embalses en los principales ríos de la zona, los cuales son el Río Guadalquivir, Río Guadalteba y Río Verde. Esto ha permitido cubrir los requerimientos nutricionales y las necesidades de agua en las diferentes etapas fenológicas, además de adquirir mejores herramientas de control (Martínez, 2011). En Málaga, según indica el informe de la Consejería de Medio Ambiente (2011), la producción de cítricos ha sido vertiginosa en los últimos años, paralela al avance que se produce en el resto de las provincias. El último inventario citrícola realizado (SIG Citrícola, 2010) delimitó una superficie de cítricos de 8.456,7 ha. Atendiendo a una clasificación por especies, el limón figura como el más abundante, con unas 2.561,9 ha cultivadas (variedades Verna y Fina principalmente). A continuación se encuentra el naranjo, con una superficie de 1.292,9 ha, que incluye una amplia gama de variedades: Navelina, Washington Navel, Lane Late, Navelate, la variedad del Citrus síntesis Oro, la blanca Calabacilla, blanca Valencia Late, etc. Por último, el mandarino con 578 ha, con variedades como Castellana, Fortune, clementina Clemenules y el híbrido Clemenvilla o Nova. En la zona también existen 113,6 ha de otros cítricos como el pomelo. Este informe registra los años 2005 y 2011 como años de heladas y bajadas en la producción. Mientras que el Informe Aforo de Cítricos de Andalucía, campaña 2010-2011, de la Consejería de Agricultura y Pesca establece para Málaga un crecimiento en la producción de más del doble en comparación a la campaña del año 2000. Este crecimiento se manifiesta a partir de la superficie de riego establecida. De hecho, el informe del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de octubre 2013, cita a Andalucía como la Comunidad Autónoma con mayor superficie regada (29,26%), de este porcentaje, en el caso de los cítricos el 100% es en riego (8,12% de la superficie total). Le sigue Castilla - La Mancha (13,93%), Castilla y León (11,82%) y Aragón (10,94%); a continuación se

sitúan la Comunidad Valenciana, Extremadura, Cataluña y Murcia, que representan en el total estatal el 27,3 por ciento del total.

Crecimientos de carácter agrícola como éste han sido constantes alrededor del mundo, tanto en lo que se refiere a la extensión destinada a la agricultura como a las variaciones que se producen en el tiempo. La adaptación de los cítricos a diversas regiones ha impuesto creación de sistemas agrícolas intensivos que a lo largo del tiempo se han convertido de secano a regadío, (Minacapilli et al., 2009), y que en la mayoría de los casos, en la práctica se desarrollan en condiciones de humedad muy lejanas a las óptimas (Loussert et al. 1992). Aun así, su rendimiento en la zona ha sido importante, provoca estudios de monitoreo constantes tanto para la gestión del cultivo como referentes a la interconexión entre la producción agraria y las condiciones ambientales, con especial interés en la variabilidad climática porque es un factor difícil de modificar, y que afecta a la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas agrícolas y en su impacto en la producción (Churkina et al., 1999; Gowda et al., 2009; Ruhoff et al., 2013; Zhao et al., 2011).

## 1.2. TELEDETECCIÓN APLICADA A LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN CULTIVOS LEÑOSOS

El estudio de cultivos leñosos a través de la percepción remota, así como otros tipos de vegetación, implica una serie de consideraciones, procesos y técnicas, que tiene por objetivo la clasificación, caracterización, y estudio del comportamiento de la vegetación en su medio (Asner et al., 1998b). Esta es una de las tareas más interesantes de la teledetección, la posibilidad de relacionar variables físicas que se obtienen del suelo como pueden ser las propiedades fisiológicas y estructurales de un cultivo, y equiparadas con los sistemas de reflectividad, temperatura, etc. de un sensor.

Básicamente en todos los cultivos, la actividad agrícola depende principalmente de la asimilación y acumulación del carbono. Su rendimiento depende además del tamaño y eficiencia de su sistema de fotosíntesis (PAR, Radiación fotosintéticamente activa), que forma parte de la asimilación del carbono y es considerado punto inicial en la evaluación de cultivos (Allen et al., 1974). Por otro lado, la respuesta de las plantas se estudia en función de diferentes longitudes de onda, siendo las regiones del 400 nm-500 nm y 600 nm-700 nm las más eficaces en su medición (Chuvieco, 2006). Estas mediciones en el suelo se reproducen en el espectro electromagnético de un Sensor. Las plantas reflejan su luz en el espectro, principalmente en las bandas que van desde el Visible al Infrarrojo Cercano; cuanto más luz reflejan, mayor vigor tienen y mejor es la respuesta que se recibe en comparación por ejemplo a la vegetación seca. Lo mismo sucede con los cultivos, cuyo

objetivo será analizar las características de la radiación que inciden sobre la superficie terrestre, y que es captada posteriormente por un Sensor. Este análisis en cultivos leñosos, a diferencia de los anuales, está dada por su característica perenne, situación que hace que el árbol cuente con una estructura permanente que sirva de reserva de carbono y nutrientes, conservando los efectos de un año a otro.

Varios son los autores que han comprobado la relación entre las variables relacionadas directamente con la producción de planta con datos de sensores remotos. Principalmente el índice de área foliar (LAI), verdor de la hoja, altura, nitrógeno en la hoja, contenido de clorofila, o contenido de agua entre otros (Serrano et al., 2000; Thenkabail et al., 2000b; Osborne et al., 2002, Goel et al., 2003; Lee et al., 2004, Wright et al., 2013). Es el constante avance de la tecnología junto con el aumento en la disponibilidad de imágenes lo que proporciona datos multiespectrales y multitemporales de series de tiempo relacionados con la productividad de la vegetación y su distribución en la superficie. Estas observaciones en estudios agronómicos es lo que permite su evaluación, conocer su comportamiento y evolución en el tiempo (Ustin et al., 2010).

El éxito en la aplicación de técnicas de teledetección al seguimiento de recursos agrícolas, tanto en cultivos leñosos como en otros cultivos, depende de la capacidad que se tenga para relacionar esas medidas de reflectividad con las propiedades de la vegetación. Esto puede lograrse con un buen manejo de las alteraciones de la radiación solar con las características que definen esa vegetación, teniendo en cuenta los factores medioambientales presentes, los cuales ayudarán a establecer una correspondencia biunívoca entre las características biofísicas del cultivo, la geometría de la interacción radiométrica y la alteración que sufre la radiación reflejada (Goel et al., 1988).

De esta forma, las mediciones realizadas mediante sensores pueden usarse para inferir en las características del cultivo. Partiendo de una serie de premisas se podrá interpretar los datos experimentales, clasificar y estudiar el comportamiento de las plantas (Asner et al., 1998b; Ustin et al., 2010). Este análisis tiene estrecha relación con la productividad y pueden usarse para estudios regionales y locales. En dicho caso, dada la situación de que la resolución espacial sea limitante por tratarse de estudios a escala pequeña, o por tener perturbaciones a causa de las sombras, influencias directas del suelo, características del dosel, etc., deberá tenerse en cuenta el tiempo (Berni et al., 2009), es decir estudiar la vegetación en varias fechas. Específicamente para cultivos, podrá tenerse en cuenta el ciclo fenológico o las distintas estaciones de crecimiento. Esto es posible gracias a la posibilidad de adquirir imágenes repetitivas de toda la Tierra, en condiciones comparables de observación, para abordar estudios multitemporales, de observación periódica, en procesos de cambio continuo (Tucker et al., 1994). Las series de tiempo permiten realizar

observaciones cuantitativas espaciadas uniformes en el tiempo y medidas sucesivamente, monitoreando, en este caso, la estacionalidad y la producción, para comprender y modelizar los datos, y predecir tendencias en la producción. De esta manera, cualquier desviación de los patrones estacionales esperados son señales de un posible problema, por ejemplo causas de estrés hídrico y biológicos (Conway et al., 1997). Ante lo mencionado, se consideran las técnicas de teledetección, de gran utilidad en la predicción del rendimiento y la producción de la vegetación (Prasad et al., 2007).

### 1.3. USO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN EN PLANTACIONES DE CÍTRICOS

Tanto para la evaluación de la producción en plantaciones de cítricos como para otros cultivos, el uso de índices de vegetación (IV) es la aproximación más adecuada para conocer el estado de la planta. Su aplicación en plantaciones de cultivos leñosos como los cítricos no difiere de los que se aplican al resto de cultivos. Sin embargo, es importante entender que los árboles frutales pueden resultar diferente a la mayoría de los cultivos anuales, en cuanto a que su rendimiento está limitado (en mayor o menor medida) a la producción de materia seca (generalmente determinada por la composición genética del cultivar) (Agustí, 2003). Además, en los árboles frutales de hoja caduca, por ejemplo, el número de flores, está determinada por la temporada anterior y puede reflejar patrones de estrés de años anteriores, que pueden persistir durante varios años. Por otro lado son cultivos que presentan una fuerte intervención cultural, como por ejemplo la poda, lo que puede modificar su estructura, que además presenta una gran complejidad natural, porque además de su tronco, ramas y raíces, tiene un gran número de órganos vegetativos y reproductivos; en caso de sufrir estrés resulta difícil evaluar que factor de crecimiento se ve afectado (Goldschmidt et al., 2005).

Los IV se han usado ampliamente en la evaluación de procesos de producción, y son muchos los estudios disponibles (Bolton et al., 2007). Un índice de vegetación es un indicador que describe el valor verde de la vegetación en el espectro electromagnético lo cual a su vez puede estar relacionado con las condiciones patológicas de la planta, ya que estas pueden influir en las características espectrales del tejido de las hojas en las regiones del espectro. Los cultivos en buenas condiciones fisiológicas absorben la radiación en la zona azul (400-500 nm) y roja (600-700 nm) del espectro visible, debido a los pigmentos fotosintéticos que contiene, mientras que en el verde (500-600 nm) y especialmente en el NIR (700-1300 nm) refleja gran parte de la luz debido a la estructura celular de la hoja (Lehrer et al., 2007), provocando una firma espectral única en relación a la de otras cubiertas (suelos desnudos, zonas urbanas), y diferente respecto a la firma espectral de la

vegetación con estrés hídrico, marchitamiento o senescencia. En este caso, la reflectividad en las bandas del espectro visible aumenta, mientras que en la región del infrarrojo cercano disminuye (Asrar et al., 1984; Galio et al., 1985). Este rango de bandas (V-NIR) son las que proporcionan la máxima información sobre los niveles de estrés fisiológicos, y el fuerte contraste de absorción y dispersión de las bandas R-NIR se combinan formando diferentes índices de vegetación cuantitativos (Xu et al., 2007).

Los IV pueden clasificarse en dos clases. Los índices de vegetación basados en cocientes (RVI), que pueden ser la simple relación de dos bandas espectrales, o la relación de sumas, diferencias y productos de cualquier número de bandas y combinaciones lineales. Los índices por combinaciones lineales son conjuntos ortogonales de un número de ecuaciones lineales calculadas utilizando  $n$  datos de bandas espectrales. Ambos índices tienen en cuenta los efectos de la superficie y/o las características de longitud de onda. Su función en la evaluación de cultivos, es la de realzar la contribución de la vegetación en la señal radiométrica (Colwell et al., 1974; Tucker et al., 1979). De esta manera, los índices de vegetación multispectral derivados de sensores de satélites son usados para monitorear la respuesta de crecimiento, y en consecuencia el rendimiento del cultivo, en relación a la medición de variables (producción, humedad, evapotranspiración, etc.) permitiendo detectar su estado y variabilidad en el tiempo.

A lo largo de las últimas décadas se han propuesto diversos índices espectrales, que según la característica que se busca evaluar ha generado a un gran número de expresiones aplicadas a distintos estudios en la vegetación. Entre los más usados está Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), aplicado por primera vez por Rouse et al. (1973), desarrollado para resaltar las firmas espectrales de la vegetación entre el Rojo y el NIR (Jensen et al. 2000). Su aplicación es extensa, con numerosos estudios previos que demuestran la viabilidad en la estimación de un gran número de propiedades de la vegetación. Ejemplos típicos incluyen la estimación del índice área foliar, la biomasa, la concentración de clorofila en hojas, la productividad de las plantas, la cubierta vegetal fraccionada, la precipitación acumulada, etc. (Ye et al., 2012). Estas propiedades están, de alguna manera, relacionadas el rendimiento final en la producción. Por lo tanto, la aplicación de NDVI ofrece la posibilidad de estimar el rendimiento final de un cultivo. En la evaluación de puede citarse a Sindhuja et al. (2013), cuyo estudio se basó en la detección del estrés en plantas de citrus antes de que éste sea severo y determinó los factores de rendimiento, encontrando diferencias significativas entre los valores de NDVI para árboles sanos e infectados. Jackson et al. (1991) y Wiegand et al. (1991) relacionaron NDVI con LAI a través de las distintas estaciones para detectar patrones de crecimiento irregular dentro de un mismo campo. Ye et al. (2012) estimaron el rendimiento en huertos de cítricos mediante la comparación de NDVI con datos recolectados en terreno en la estación de

cosecha. Mann et al. (2011) relacionaron y caracterizaron el rendimiento de cítricos con el crecimiento de los árboles.

Otros índices que aportan información relativa a la biomasa/verdor de la vegetación y/o humedad y que se han aplicado a la evaluación de cultivos son el Índice de Vegetación de Suelo Ajustado (SAVI) que tiende a minimizar el brillo del suelo, introduciendo una variable L (Huete, 1988); el Índice de Vegetación Perpendicular (PVI) que tiende a corregir la reflectancia del suelo; o el Índice de Vegetación Verde (GVI) junto a NDVI que se aplica para evaluar los efectos en cubiertas de vegetación situadas en zonas con distintos tipos de suelo, con el objetivo de lograr con el primero disminuir el efecto del suelo (Panda et al., 2010). Otros índices están relacionados con el comportamiento térmico de las cubiertas, como el Índice de Temperatura de Sequía de la Vegetación (TVDI Temperatura Vegetation Dryness Index) aplicado para estimar la temperatura de la materia seca y relacionar este valor con la productividad, el Índice de Temperatura del suelo (LST) que depende principalmente de la humedad del suelo y la cubierta vegetal fraccionada, y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), aplicado por su información en la banda azul del espectro, y que puede ayudar a corregir señales de fondo e influencias atmosféricas (Holzman et al. 2013). El índice de vegetación Atmosférico Resistente (ARVI), que es una mejora de NDVI relativamente más resistente a los factores atmosféricos como los aerosoles (Gitelson et al., 2003; JiWan et al., 2011).

Los datos obtenidos por satélites se ha convertido en un importante instrumento para estudiar la fenología del cultivo y su estudio en combinación con índices de vegetación permite diagnosticar distintas características de los árboles (Pinter et al., 1994). Con la aplicación de IV se discrimina y diferenciar las curvas de respuesta espectral, identificando los factores perturbadores en la evaluación del estado de la vegetación, como ser IAF, biomasa, etc. Puesto que influyen en las condiciones atmosféricas y de fondo (Bouman et al., 1995), y con su reconocimiento se podrá establecer el rendimiento y la productividad.

## 1.4. HIPÓTESIS Y OBJETIVO DE LA TESIS

La hipótesis de esta Tesis es estudiar si es posible predecir la producción de cultivos de cítricos (Tn/Ha) mediante la aplicación de técnicas de teledetección usando imágenes de sensores de satélite. Para ello, se han usado diferentes índices de vegetación a lo largo de una serie temporal de 11 años (2000-2011).

El desafío principal de este trabajo es utilizar técnicas de teledetección para evaluar la producción de un cultivo abundante y cambiante en el área de interés, con distintos ciclos de crecimiento y sin estándares de control homogéneos, lograr así un reconocimiento espectral del desarrollo del mismo desde el año 2000 al 2011 en la provincia de Málaga. Al mismo tiempo, se han aplicado análisis de regresión para establecer correlaciones multitemporales entre los datos del satélite y los índices de vegetación con sus parámetros agronómicos para evaluar su dinámica, e identificar la información que aportan, reconociendo la capacidad de cada índice en el área.

## 1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Para alcanzar estos objetivos se desarrollan los siguientes capítulos:

**Capítulo 2:** Este capítulo presenta el área seleccionada para el desarrollo del estudio, su ubicación y características de la región, además del detalle de la adquisición de las imágenes satelitales adquiridas, pre-procesamiento y procesamiento de las mismas.

**Capítulo 3:** Este capítulo presenta un análisis de detección de cambio sobre la producción de cultivos en la región. Primero se calcula del índice de vegetación NDVI, haciendo uso de la banda 3 en el rango visible que permite detectar suelos desnudos, las bandas 4 en el Nir respectivamente por ofrecer buena información espectral de los diferentes cultivos, cobertura y el estado fitosanitario en general. Luego se aplica técnicas de segmentación en imágenes Landsat TM/ETM para el periodo antes mencionado (2000-2011). Se seleccionaron aquellas imágenes que mejor revelan los cambios, a posteriori se realiza una comparación con la imagen de la zona del año 1985 para visualizar los cambios en la cobertura de usos del suelo, y como ésta que difiere en el tiempo y espacio.

**Capítulo 4:** En este capítulo se incorporó el cálculo del índice SAVI, a partir de las mismas imágenes. Se relacionan los datos obtenidos de los dos índices con datos históricos de producción de cítricos, aplicando análisis de regresión, con el fin de evaluar y analizar la producción en este período. Se presta atención a cambios de comportamiento debido a posibles factores contaminantes o elementos dañinos (sustancias químicas, prácticas laborales, etc.) que afecten el rendimiento dentro del periodo antes citado y si esto se refleja en los datos extraídos del satélite.



**Capítulo 5:** La metodología presentada en este capítulo, estima la variable Evapotranspiración Potencial (ETP) para el mismo periodo. Mediante el producto MOD16A2 de MODIS se analiza esta variable climática y su comportamiento para la misma zona, tomando como referencia las mismas parcelas de cítricos del capítulo anterior. Además, se relaciona este parámetro con la producción aplicando análisis de regresión.

**Capítulo 6:** En este capítulo se discuten los objetivos obtenidos, y se analizan los resultados detallados en los capítulos anteriores, realzando los logros, las limitaciones y futuras líneas de investigación.



## REFERENCIAS

Agustí, M., Juan, M., Martínez-Fuentes, A. (1994). Application of 2,4-dichlorophenoxypropionic acid and acid 2-ethylhexyl ester reduces mature fruit abscission in citrus navel; cultivars. *J Hort Sci Biotechnol*, 81(3):532–536.

Agustí, M. (2003). *Citricultura*, 2ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Allen, L., Stewart, D., Lemon, R. (1974). Photosynthesis in plant canopies: effect of light response curves and radiation source geometry. *Photosynthetica*, 8:184–207.

Arapia, L. M. (1994). Preharvest factors influencing postharvest quality of tropical and subtropical fruit. *HortScience*, 29(9):982.

Asner, G., Wessman, C., Schimel, D., Archer, S. (1998b). Variability in leaf and litter optical properties: implications for brdf model inversions using avhrr, modis, and misr. *Remote Sensing Environment*, 63(3):243–257.

Asrar, G., Fuch, M., Kanemasu, E. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76(2):300–306.

Berni, J., Zarco-Tejada, P., Suárez, L., González-Dugo, V., Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from uav platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. in: *The international archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1):4–7.

Bolton, D., Friedl, M. (2007). Forecasting crop yield using remote sensed vegetation and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology* 173:74–84.

Bouman, A. M. (1995). Crop modelling and remote sensing for yield prediction. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 43(2):143–161.

Churkina, G., Running, S., Schloss, A. (1999). Comparing global models of terrestrial net primary productivity (npp): the importance of water availability. *Global Change Biology*, 5(S1):46–55.

Chuvieco, E. (2006). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*, Barcelona, Ariel Ciencia.

Colwell, J. (1974). Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing Environment*, 3(3):175–183.

Conway Eric, D., and the Maryland Space Grant Consortium (1997). *An Introduction to Satellite Image Interpretation*. The John Hopkins Uni. Press, 1st ed. edition.

Galio, K., Daughtry, C., Bauer, M. (1985). Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agronom*, 17(3):221– 232.

Gitelson, A. (2003). Wide dynamic range of vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *J Plant Physiology*, 161(2):165–173.

Goel, N. (1988). Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Review*, 4(1):1–212.

Goel, P., Prasher, S., Landry, J., Patel, R., Viau, A. (2003). Estimation of crop biophysical parameters through airborne and field hyperspectral remote sensing. *Transactions of the ASAE*, 46(4):1235–1246.

Goldschmidt, E., Lakso, A. (2005). Fruit tree models: scope and limitations. *Information and Comm Tech (ICT) Develop and Adoption: Perspective of*, 8.

Gowda, H., Chavez, J., Colaizzi, P., Evett, S., Tolk, H. (2009). Et mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*, 26(3):295–309.

Holzman, M., Rivas, R., Piccolo, M. (2013). Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *Intern Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28:181–192.

Huete, A. R. (1988). A soil vegetation adjusted index (savi). *Remote Sensing of Environment*, 25(3):295–309.

Jackson, R., Huete, A. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive veterinary medicine* 11:185–200.

Jensen, J. (2000). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. UK:Prentice Hall in Geographic Info. Science, 2nd ed (chapter 10-13) edition.

Ji-Wan, L., Geun-Ae, P., Hyung-Kyung, J., Kyo-Ho, L., Jong-Hwa, P., Seong-Joon, K. (2011). Analysis of relationship between vegetation indices and crop yield using kompsat (korean multipurpose satellite)-2 imagery and field investigation data. *Korean Society of Agricultural Eng.*, 53(3):75–82.

Lee, K., Cohen, W., Kennedy, R., Maiersperger, T., Gower, S. (2004). Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sens. Environ.*, 91:508–520.

Lehrer, A., Moore, P., Komor, E. (2007). Impact of sugarcane yellow leaf virus (scylv) on the carbohydrate status of sugarcane: comparison of virus-free plants with symptomatic and asymptomatic virus-infected plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 70:180–188.

Loussert, R. (1992). *Los agrios*. Number 319 in A. Mundiprensa, Spanish ed. edition.

Mann, K., Schumann, A., Obreza, T. (2011). Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. *Precision Agriculture*, 12:457–472.

Minacapilli, M., Agnese, C., Blanda, F., Cammalleri, C., Ciraolo, G., D'Urso, G., Lovino, M., Pumo, D., Provenzano, G., Rallo, G. (2009). Estimation of actual evapotranspiration of mediterranean perennial crops by means of remote sensing based surface energy balance models. *hydrology earth syst. Hydrol Earth Syst Science*, 13:1601–1074.

Martínez, E., Cancela, J. (2011). Condiciones de contorno en las determinaciones del punto de marchitamiento permanente con water activity meters. *Spanish J of Rural Dev.*, 2(1):1–14.

Osborne, S., Schepers, J., Francis, D. Schlemmer, M. (2002). Detection of phosphorous and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy Journal*, 94(6):1215–1221.

Panda, S., Ames, D., Panigrahi, S. (2010). Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*, 2(3):673–696.

Prasad, A., Singh, R., Tare, V., Kafatos, M. (2007). Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. *International Journal of Remote Sensing* 28:5207–5235.

Pinter, P., Idso, S., Hendrix, D., Rokey, R., Rauschkolb, R., Mauney, J., Kimball, B., Hendrey, G., Lewin, K., Nagy, G. (1994). Effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment on the chlorophyll content of cotton leaves. *Agricultural and Forest Meteorology* 70:163–169.

Ruhoff, L., Paz, A., Aragao, C., Mu, Q., Malhí, Y., Collischonn, W., Rocha, H., Running, S. (2013). Assessment of the modis global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurement and hydrological modelling in the rio grande basin. *Hydrological Science Journal*, 58(8):1658–1676.

Sindhuja, S., Maja, M., Buchanon, S., Hsani, R. (2013). Huanglongbing (Citrus Greening) Detection Using Visible, Near Infrared and Thermal Imaging Techniques. *Sensor*, 13:2117–2130.

Thenkabail P., Smith R., De-Pauw E. (2000b). Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71:158–182.

Tuker, C., Newcomb, W. Dregne, H. (1994). AVHRR data sets for determination of desert spatial extent, *Int. J. of Remote sensing*, 15:3547.

Tucker, C., Elgin, J., McMurtrey, J. (1979). Temporal spectral measurements of corn and soybean crops, *Photo Eng & Remote Sensing*, 45:643–653.

Ustin, S., Gamon, J. (2010). Remote sensing of plant functional plant types. *New Phytologist*, 186:795–816.

Serrano, L., Filella, I., Peñuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40(3):723–731.

Wiegand, C. and Richardson A. and Escobar D. and Gerbermann A. (1991). Vegetation indices in crop assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35:105–119.

Wright, D., Rasmussen, P., Ramsey, D., Baker, D. (2013). Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIScience and Remote Sensing*, 41(4):643–653.

Xu, B. Gong, P. (2007). Land use land cover classification with multispectral and hyperspectral eo-1 data. *American Society for Photo. Eng and Remote Sensing*, 73(8):955–965.

Ye, X., Sakai, K. (2012). Fruit yield estimation through multispectral imaging. *Advance in citrus nutrition* 2012:453–473.

Zhao, M., Running, S. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of the Environment*, 115:1781–1800.

Conserjería de Agricultura y Pesca [en línea]. España. Sistema integrado 2006/2007 [20 Octubre 2013]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/servicios/ayudas/ayudas-pac/solicitud-unica/sistema-integrado/ayudas-pac-20062007/index.html>

Conserjería de Agricultura, Pesca y Medioambiente [en línea]. España. Aforo de cítricos (2011) [20 octubre 2013]. Disponible en: [http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/servicio-estadisticas/estadisticas agrarias/Aforo\\_citricos\\_10\\_11.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/servicio-estadisticas/estadisticas agrarias/Aforo_citricos_10_11.pdf)

Conserjería de Agricultura, Pesca y Medioambiente [en línea]. España: campaña 2010-2011 (2012) [20 Octubre, 2013]. Disponible en: [http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/novedades/Regadios2013fA\\_tcm7-311944.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/novedades/Regadios2013fA_tcm7-311944.pdf)

Conserjería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural [en línea]. España. Visor Sigpac Andalucía [10 octubre 2013]. Disponible en : <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/servicios/sig/agricultura/sigpac/index.html>

Food and Agricultura Organization [en línea]. United Nation. Agricultura Food and Water (2003) [20 octubre 2013]. Disponible en: [http:// apps.fao.org/default.htm](http://apps.fao.org/default.htm)

Instituto Nacional de Estadísticas [en línea]. España: Informe del observatorio de sostenibilidad (2006) [15 Octubre 2013]. Disponible en: [http://www.ine.es/prodyser/pubweb/anuarios\\_mnu.htm](http://www.ine.es/prodyser/pubweb/anuarios_mnu.htm)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente [en línea]. España. Riego localizado alcanza el 48,23% de la superficie regada en España [10 enero, 2014]. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/prensa/noticias/el-riego-localizado-alcanza-el-4823--de-la-superficie-regada-en-espana-/tcm7-312671-16>



## 2. ÁREA DE ESTUDIO

---



## 2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área seleccionada, es el Valle de Guadalhorce, Figura 2.1, situada al suroeste de la Provincia de Málaga, debido a que es una zona tradicionalmente agrícola, con una diversidad de cultivos anuales y perennes, en su mayoría con sistema de riego por goteo. Esta zona es considerada de alto potencial productivo por las condiciones climáticas naturales que posee y por la estructura de irrigación con la que cuenta permite la siembra de diversos cultivos. Su riego se abastece principalmente por el Río Guadalhorce. Cuenta con un tipo de clima mediterráneo subtropical, según clasificación climática Papadakis, con un tipo de invierno Citrus (Ci), régimen térmico subtropical semi-cálido (Su) y régimen hídrico mediterráneo seco (Me). La pluviometría media anual es de 472 mm. La evapotranspiración potencial media anual (calculada por el método de Penman-Monteith) es de 1.272 mm (Publicaciones Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2004).

Según informe de Medioambiente y Sostenibilidad, estos suelos se han formado sobre materiales aluviales cuaternarios y se caracterizan por presentar una pendiente suave (7%) a moderada (15%), de profundidad útil 50 cm - 75 cm, drenaje bueno-moderado con salinidad 4-8 mmhos/cm, textura generalmente es equilibrada (franco-arcillo-arenosa en los horizontes A y Ac del perfil 1054-1), aunque en ciertos casos puede llegar a ser ligera (franco-arenosa en el horizonte A y arenosa-franca en el horizonte C1 del perfil 1052-52), lo que provoca en dichas circunstancias que exista un drenaje algo excesivo, no llegan a representar ningún impedimento para la agricultura porque esos suelos se dedican principalmente a la producción de cítricos (perfil 1052-52), además de cultivos subtropicales, tales como aguacate, chirimoyo y mango (Artero, 2002).

El Valle tiene una altitud media de 220 m s. n. m. y se localiza sólo a 3 km de la costa Mediterránea. La temperatura oscila entre los 35°C en verano y los -5°C en invierno. Como el resto del área delimitada por el valle, esta zona se encuentra dentro del Plan Nacional de Regadíos (PNR) que mejora y consolida el regadío durante los años 2002-2003. Particularmente desde al año 2000 el aumento de cultivos crece vertiginosamente con la consolidación de los sistemas de riego. El cultivo de cítrico es el predominante en la zona, con mayor concentración al sur del Valle, cerca de la costa por sus requerimientos



específicos, ya que necesita un invierno moderadamente frío (mínimas en torno a los 10°C), primavera cálida (mínimas superiores a 15°C), verano y otoño calurosos (27-36°C) y ligeras variaciones de temperatura entre el día y la noche (Galan et al., 2009a).

## 2.2. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

### 2.2.1. *Imágenes del Sensor Landsat*

Las imágenes de satélite fueron cedidas por la Red de Información Medioambiental (REDIAM Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía). El resumen de las mismas puede verse en la tabla 2.1, corresponden al satélite Landsat, y a los sensores Thematic Mapper (TM) y Thematic Mapper Plus (ETM), de 30 m de resolución espacial, con distintas fechas que se distribuyen de manera bastante uniforme entre los meses que van desde diciembre-abril, para el periodo comprendido entre el año 2000-2011. La imagen del año 1985 Landsat 5 TM, detallado en la tabla 2.2, fue descargada del sitio Web US Geological Survey disponible en su sitio web (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), de 30 m de resolución y Datum WGS84 UTM.

#### 2.2.1.1. *Pre-procesamiento imágenes Landsat*

**Corrección Geométrica:** Las imágenes cedidas por la REDIAM (tabla 2.1) fueron procesadas por esa oficina, y distribuidas en formato Bil, Pil y GeoTIFF. Luego, usando la aplicación ArcMap v10.1, se convirtieron todas al mismo formato (GEO Tiff) y se verificaron individualmente. Las imágenes con proyección registran precisión geométrica y radiométrica. Para las imágenes sin proyección, tomando como referencia una imagen anterior, se corrigieron mediante puntos de control (Ground Control Points) proyección UTM, Datum WGS84 (EPSG32630), seleccionando modelo polinomial de primer orden y remuestreo de convolución cúbica.

**Corrección Radiométrica:** usando la aplicación ArcMap v10.1, se aseguró que las imágenes correspondientes a las mismas fechas coincidan geométricamente y los pixel correspondiente a la misma área estén equiparados para trabajar en la misma escala convirtiendo éstos valores de píxeles a las mismas unidades físicas.

**Corrección Atmosférica:** se realizó usando la aplicación Grass-Gis v6.4.3 dentro del paquete OSGeo4W. Se convirtieron los valores originales a reflectancia de la superficie (SR) y brillo temperatura (BT) (ToA-satellite reflectance) mediante el

modelo de corrección atmosférica DOS1 (Dark Object Substraction) que utiliza esta técnica basada en la conversión de imágenes, lo que permite la comparación y el mosaicado de diferentes imágenes de satélite y mejorar los resultados en el análisis (Vermote et al., 1997; Masek et al., 2006).

**TABLA 2.1. RESUMEN DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITES CEDIDAS POR REDIAM**

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Sens	ETM	TM	TM	ETM	TM	TM	TM	TM	/	TM	ETM	TM
Proy	UTM	/	/	/	/	/	UTM	UTM	/	UTM	UTM	UTM
Día J	9	69	34	125	130	157	102	7	343	41	70	36

**TABLA 2.2. RESUMEN IMÁGENES LANDSAT AÑO 1985**

Año	Sensor	Proyección	Día juliano
1985	TM	UTM	349

### 2.2.1.2. Procesamiento imágenes Landsat

La mayoría de las imágenes están libres de nubes y sombras, a excepción de las correspondiente a los años 2000, 2004, 2009 y 2011, que sin embargo, no tenían cobertura de nubes en la zona a analizar. El año 2008 fue descartado por contener muchos errores de procesamiento. El siguiente paso consistió en seleccionar una imagen de cada año que correspondiera al mismo día y mes, para luego recortar las mismas en la zona de interés (UTM 4081385N, 4063570S, 344685O, 364839E - Huso 30). A continuación, previo realizar cálculo de NDVI, se continuó con la aplicación de las técnicas de detección.

### 2.2.2. Imágenes producto MODIS16A2

El producto seleccionado es el NASA MOD16A2/A3 (Monthly Evapotranspiration Product) collection 5, un proyecto EOS de la NASA para estimar la evapotranspiración terrestre global de la superficie mediante uso de datos obtenidos por satélite, disponible

en el siguiente sitio Web <http://www.ntsug.umt.edu/project/mod16>, provisto cada 8 días y mensual con 1000 metros de resolución espacial. Las observaciones están filtradas según la calidad, y disponibles con y sin nubes, nadier view pixel sin contaminación atmosférica.

El área seleccionada corresponde a las coordenadas de la cuadrícula h17v5 de MODIS, valores mensuales. La Fig. 2.1 muestra la zona de estudio. Según se registra en el sitio Web del producto, el algoritmo para el cálculo de ET corresponde a Mu et al. (2011), y está basado en la ecuación de Penman-Monteith (1965). El valor de ET es la suma de 8 días (0,1 mm/8 días o 0,1 mm/5 días), teniendo en cuenta que los años bisiestos tienen 366 días (2000, 2004, 2008). De la misma manera el valor ET mensual (0.1mm/mes) es la suma diaria de su valor para ese mes. En caso de valores ET anuales (0.1mm/año), es la suma de este valor para ese año. Se debe tener en cuenta los años bisiestos con 366 días y los normales con 365 días. Los valores LE/PLE (1.0e4 J/m2/día) diarios, mensuales y anuales es el promedio diario LE/PLE en ese período de tiempo correspondiente.

### 2.2.2.1. Pre-procesamiento producto imágenes MOD16A2

Siguiendo los pasos de procesamiento detallados en el sitio Web oficial para trabajar con este producto, se multiplicó el valor 0.1 para obtener el valor real ET/ETP en mm/8día o mm/mes, o mm/año y 1,0 e4 para los valores LE/PLE en J/m2/día. El rango válido de los valores diarios y mensuales de ET/LE/ETP/PLE, y los valores anuales LE/PLE es de -32767 hasta 32767. La tabla 2.3 muestra el significado de estos rangos.

<b>TABLA 2.3. RESUMEN SIGNIFICADO DE LOS VALORES ET/ETP DEL PRODUCTO MOD16A2</b>			
Valor ET/PET día/ mes	Corresponde a	Valor ET/PET Año	Corresponde a
32767	valor de llenado/ corriente que fluye hacia fuera de la tierra	65535	valor de llenado/ corriente que fluye hacia fuera de la tierra
32766	cuerpo de agua	65534	cuerpo de agua
32765	estéril o poca vegetación	65533	estéril o poca vegetación
32764	hielo o nieve permanente	65532	hielo o nieve permanente
32763	tierra húmeda permanente	65531	tierra húmeda permanente
32762	urbanización o construcción	65530	urbanización o construcción
32761	no clasificado	65529	no clasificado

### 2.2.2.2. Procesamiento de datos imágenes MOD16A2

Las aplicaciones usadas para manipular el formato específico de las imágenes MODIS HDF-EOS fue ArcGIS Map v10.1 del paquete ArcGIS Desktop. Se importaron las imágenes seleccionadas aplicando proyección UTM y método vecino más próximo, se generaron las imágenes en formato Geo-TIFF, cada una con su respectivo archivo de metadatos MET. Se utilizó la aplicación Land Data Operational Program Evaluation (LDOPE) de evaluación operacional de productos MODIS para comprobar estado de la nube y calidad de los datos en todas las imágenes (fueron excluidas aquellas imágenes con nubes en el área de estudio). Luego fueron importadas a la aplicación GRASS-Gis v.6.4 que se incluye con el paquete OSGEO, y recortadas en el área de interés (UTM 4081385N, 4063570S, 3446850, 364839E). El siguiente paso fue extraer la variable ETP, y exportarla a una planilla de cálculo para obtener el valor real ETP.

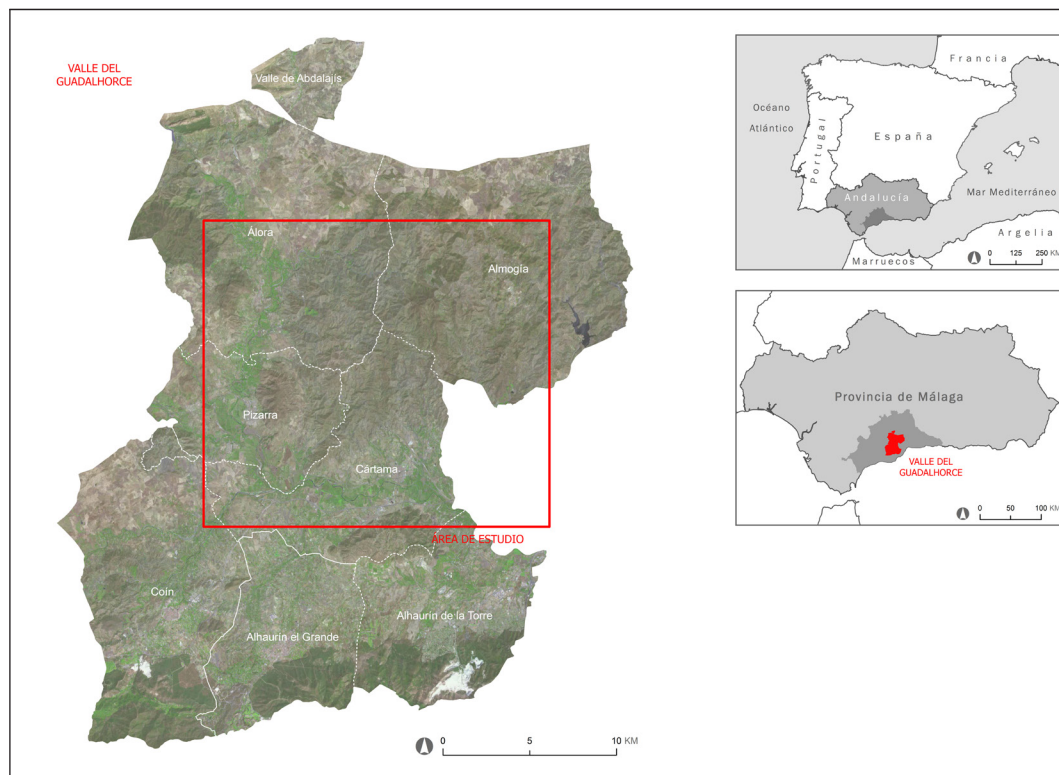


Fig. 2.1. Mapa del área de estudio

## REFERENCIAS

Artero, B., Sepúlveda, R., and Latorre, A. (2002). Biodiversidad y recursos naturales.

Masek, J., Vermote, E., Saleous, N., Wolfe, R., Hall, F., Huemmrich, K., and Lim, T. (2006). A landsat surface reflectance dataset for north america, 1990- 2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 3(1):68–72.

Sauco, V. G. (2009a). *Physiological disorders: The mando, botany, production and uses*. CABI International, 2nd edition edition.

Vermote, E., Tanre, D., Deuze, L., Hernan, M., and Morcrete, J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sens.*, 70(4).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [en linea]. España. Datos estadísticos (2004) [20 octubre 2013]. Disponible en: <http://www.aemet.es/en/eltiempo/prediccion/municipios/cartama-id29038>.

# 3. DETECCIÓN DE CAMBIOS EN PAISAJES AGRÍCOLAS MEDIANTE TÉCNICAS DE SEGMENTACIÓN EN IMÁGENES LANDSAT

---



### 3.1. INTRODUCCIÓN

La detección de cambios se define como el proceso de identificación de diferencias de un objeto o fenómeno, como puede ser la vegetación (Singh, 1989; Sader et al., 2003). La vegetación tiene un desarrollo constante que varía tanto en el espacio como en el tiempo, y depende además de las características del suelo. Conocer cuál es y cómo se desarrolla su dinámica es un análisis que ayuda a entender y evaluar las respuestas que se producen a consecuencias de acciones inherentes a procesos de retroalimentación entre la distribución del bosque, las actividades humanas, los recursos naturales, la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Mancino et al., 2014).

Las imágenes multiespectrales provenientes de sensores remotos resultan óptimas para abordar este tipo de trabajo, porque facilitan la aplicación de técnicas de monitoreo que realzan características y proporcionan una visión integral de la cobertura vegetal y de los patrones del uso del suelo (Treitz et al., 2004; Lu et al., 2004). El Sensor Landsat TM/ETM, entre otros, cuenta con datos que permiten establecer una cartografía temática a nivel regional, de tal manera que es posible clasificar el campo y analizar los diferentes tipos de vegetación y su desarrollo en la diferentes bandas de reflectancia espectral; particularmente debido a la reflectancia foliar, la absorción de pigmento y humedad foliar que se refleja en el espectro electromagnético (Sobrino et al., 2009).

Por tratarse de vegetación, se da énfasis al uso de técnicas basadas en datos multi-temporales y multi-espectrales porque de esta manera se podrá detectar e identificar en el tiempo los diferentes ecosistemas, independientemente de los factores presentes en el medio (Chuvieco, 1998; Coppin et al., 2004). Específicamente en la agricultura, al cambiar de forma frecuente, tanto si se trata de cultivos de secano como de regadío, perennes o estacionales, en los que a su vez también están presentes los accidentes naturales (inundaciones) o los aplicados por la actividad humana (uso de fertilizantes, uso de semillas, etc.) se subraya la importancia del factor tiempo, puesto que es clave para detectar, prevenir y evaluar una amplia variedad de fenómenos (Chuvieco, 1998; Onyango et al., 2003).



En consecuencia, la detección de cambios aplicados a la agricultura debe estar dirigida en función de un análisis temporal. Tal estudio puede agruparse primero en función del desarrollo fenológica de un cultivo, con énfasis en el contraste estacional de un determinado periodo, en cuyo caso el análisis será a lo largo del ciclo del cultivo (inicio, crecimiento, máximo vigor y senescencia), y podrá o no corresponder al mismo año, con distintas condiciones de iluminación, humedad y densidad vegetal. Segundo, a través de cambios producidos entre dos fechas de cara a evaluar la dinámica de crecimiento a largo plazo, deforestación o expansión agrícola. Este último análisis deberá ser entre dos fechas, continuo o no, pero en la misma época del año, para minimizar factores externos al cambio (Singh, 1989). Cualquiera sea la técnica a emplear, su aplicación, debe ser capaz de capturar los detalles específicos del área de tal manera de identificar las texturas de las plantas y del suelo (Guijarro et al., 2011).

Además del factor temporal, dependiendo de la escala a la que se trabaja, la resolución espacial (15-60 m) pueden resultar limitante en la diferenciación de sectores (Ozdogan et al., 2010). Esto se debe a que la variación de la temperatura relacionada con la luz incidente, hace que los colores de los objetos en la imagen puedan cambiar, y estos cambios pueden dar lugar a imágenes de baja calidad, provocando la detección de objetos incompletos o degradación en los procesos de reconocimiento de patrones (Tian et al., 1998). Cuanto mayor es la escala, se requiere más trabajo para identificar los cambios mediante una técnica, principalmente debido a los entornos climatológicos y culturales propios de cada lugar (Loveland et al., 2000; Friedl et al., 2002; Ozdogan et al., 2010).

Estas limitaciones pueden afrontarse en gran medida conociendo previamente el área que se analiza. Por ejemplo, la detección de cultivos maduros suele resultar fácil e inmediata a través de la señal del NIR, las firmas espectrales de los cereales, el maíz y las malezas son muy similares (Guijarro et al., 2011). En dichos casos, resulta ventajoso conocer el manejo de la tierra y/o el conocimiento de la región (los tipos de cultivos, su siembra, madurez y cosecha) en conjunción con la información espectral, espacial y temporal de los mismos (Thenkabail et al., 2005; Ozdogan et al., 2010). Por otro lado, el uso de datos auxiliares de precipitación y evapotranspiración pueden resultar muy útiles en la detección e interpretación de perfiles temporales (Ozdogan et al., 2008), que podrá integrarse con datos radiométricos, e información agroclimática, lo cual, a su vez, podrá ser usada para mejorar los procedimientos de evaluación y evolución de cultivos.

Un factor importante a tener en cuenta en la clasificación de un determinado cultivo es acudir a imágenes de momentos claves a su ciclo fenológico, de tal manera que permitan separarlo con nitidez de otros cultivos similares. Con la clasificación entre dos fechas simultáneas podrá ser posible caracterizar una categoría a partir de curvas espectro-

temporales. En este caso, la dimensión temporal servirá como discriminación de categorías, que pueden no ser separables espectralmente, pero si atendiendo a su variedad fenológica (Lo et al., 1986; Chuvieco, 2006).

Una aproximación clásica al análisis de detección, es la aplicación de técnicas de segmentación, referida al proceso de unir regiones que tienen las mismas propiedades, dividiendo la imagen en áreas homogéneas espectrales (Woodcock et al., 1994; Khodja et al., 1995). Su aplicación es clásica en el procesamiento de imágenes de satélites, porque logra el objetivo de discriminar áreas y forma un excelente punto de partida para el estudio geoespacial posterior (Sharma et al., 2012). Un trabajo detallado de las distintas técnicas de segmentación puede verse en el análisis realizado por Saini et al. (2014). Básicamente existen dos categorías: Edge-Based y Region-Based basados en la discontinuidad o similitud de una intensidad. En el primer caso puede ser un cambio brusco en el valor de la intensidad que puede incluir el algoritmo de segmentación de detección de bordes. El segundo caso corresponde a regiones que son similares de acuerdo a un conjunto de criterios predefinidos, que puede incluir el algoritmo de región de crecimiento y umbral. En un espacio agrícola con diferentes ciclos de crecimiento y calendarios de siembra no homogéneos, el objetivo de la segmentación será delimitar la superficie cultivada, identificar parcelas y lotes de producción asociándolas a una firma espectral característica, facilitando la interpretación de los cultivos.

Los cultivos pueden identificarse mejor con la aplicación de IVs, por lo cual se aplican a la detección de paisajes agrícolas, que pueden resaltar características propias de cada uno. El más usado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), debido a su estrecha relación con la biomasa foliar y su simplicidad de cálculo e interpretación (Michener et al., 1997, Hayes et al., 2002; Sader et al., 2003; Volcani et al., 2005). Con la aplicación del cálculo de NDVI podrá detectarse los cambios que se producen tanto si se analizan visualmente en series de tiempo mostrando la vegetación que aumenta o decrece, como si se compara cuantitativamente un determinado mes o año respecto a su valor histórico (Virginia et al., 2001). Para realizar una buena detección, es fundamental que las imágenes estén adecuadamente corregidas (radiométricamente y geométricamente) de tal manera que los cambios detectados sólo sean atribuibles a verdaderas modificaciones del paisaje, teniendo en cuenta no sólo las características espaciales (segmentación), sino también las espectrales (clasificación) (Haralick et al., 1985; Cross et al., 1988), además de la correcta conversión de números digitales a radiación o reflectividad (Conghe et al., 2001; Lu et al., 2004). Otros factores a tener presentes son los ambientales, tales como las condiciones atmosféricas, la humedad del suelo y las características fenológicas (Jensen et al., 1996; Weber et al., 2001), porque son factores que forman parte de ese medioambiente e influyen en la detección.

Otros estudios han combinado varios índices de vegetación, tales como el índice de vegetación de suelo ajustado (SAVI), el índice de materia seca normalizado (NDMI) y el índice de diferencia de agua normalizado (NDWI), con el fin de mejorar la capacidad de detección (Coppin et al., 2004). Se han desarrollado varios IV más, pero específicamente no hay un índice de vegetación que se considere mejor que otro (Sader et al., 1992; Lyon et al., 1998). Por las características antes mencionadas, la aplicación del índice NDVI filtrará la información relevante, facilitará la identificación de cambios sobre la superficie y la evolución de los cultivos al enfatizar las diferencias en las curvas de respuesta espectral (Coppin et al., 2004; Jin et al., 2005a), cuyo resultado será una imagen con valores de reflectancia que aumentaron y disminuyeron; pudiendo esto ser interpretado como cambio de clases (Steve et al., 2013). De esta manera, el cálculo de NDVI en la segmentación asigna una transición de clases a cada región para mejorar el análisis multi-temporal (Pavlidis et al., 1986). El propósito en este caso, será identificar regiones que son homogéneas en relación a la dinámica, agrupando píxeles adyacentes sujetos a una transición similar en el tiempo dentro de objetos espacio-temporales (Fu et al., 1981), visualizando su evolución mediante la comparación de imágenes en distintas fechas. Por ejemplo, áreas forestales, superficies quemadas, desastres naturales, recursos naturales, etc. Y también debido a sus características fenológicas (Carrao et al., 2008; Zhu et al., 2012).

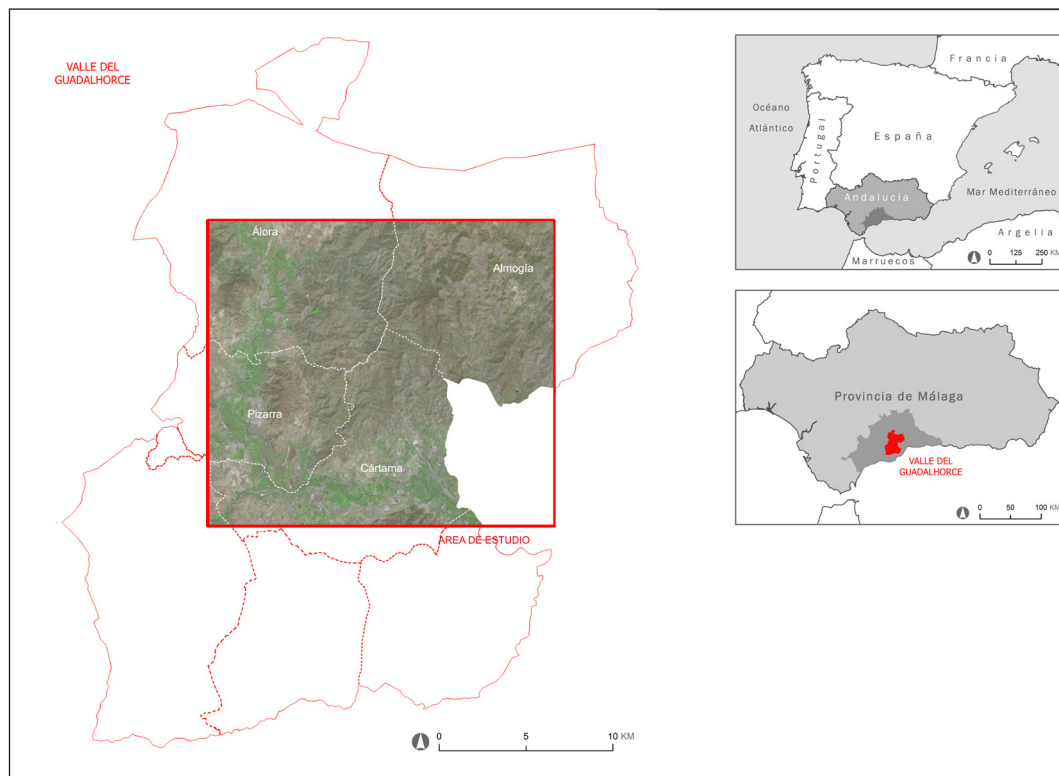
Este trabajo tiene como objetivo determinar la tendencia de cambio en el uso de la tierra en el Valle de Guadalhorce. Mediante el procesamiento de imágenes Landsat ET/ETM ilustrar el crecimiento intensivo de cultivos que se ha producido en una zona particularmente dedicada al cultivo de cítricos. Para ello, previo aplicar cálculo del índice de vegetación NDVI para enfatizar la información correspondiente a los cultivos, se selecciona las imágenes más idóneas y se aplican las siguientes técnicas de segmentación: i) comparación aplicando técnica de umbral fijo en las imágenes NDVI de los años 1985, 2001, 2011. ii) técnica de diferenciación de imagen NDVI para los pares de años (1985-2001), (2001-2006) y (2006-2011), iii) composición de imagen NDVI-RGB para los años 1985, 2001 y 2011.

## 3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.2.1 Zona de estudio

La zona elegida para la detección de cambios es la región situada entre los paralelos  $36^{\circ} 42' 30.04''$  N y  $4^{\circ} 34' 36.14''$  S (Fig. 3.1). Se selecciona esta región por considerarse la

zona que concentra mayor cantidad de cultivos de cítricos en relación al resto del Valle de Guadalhorce. Todas las plantaciones se caracterizan por el uso similar de sistemas de riego. En la misma zona también se encuentran cultivos hortícolas y estacionales.



**FIG. 3.1** Mapa ubicación del área seleccionada

### 3.2.2. Imágenes satelitales

Las imágenes que se emplean son Landsat TM y ETM cedidas por REDIAM, periodo 2000-2011 en formato Bil, Pil y Geotiff, la imagen del año 1985 se descargó del sitio Web <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Mediante uso de la aplicación ArcMap v.10.1 se verificó y realizó la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica en forma individual, además de la conversión de todas a un mismo formato Geotiff. Para mayor información sobre el pre-procesamiento y procesamiento de las mismas ver capítulo 2 (2.2.1). A priori al análisis de detección se realizó el cálculo del índice de vegetación NDVI.

El cálculo de NDVI se realizó en la aplicación Grass-Gis v6.4.3, para cada imagen, utilizando las bandas Roja e Infrarroja (NIR). Si bien la fórmula propuesta por Huete

(1998) es la más utilizada y óptima para monitorear la vegetación a escalas continentales globales usando datos del Sensor Advance Very High Resolution Radiometer (AVHRR) (Townshend et al., 1986; Tucker et al., 1986), no resulta la más adecuada cuando la cobertura del suelo es baja, siendo un indicador pobre para el cálculo de la biomasa en regiones áridas y semiáridas. También se tiende a saturar y perder sensibilidad para cubiertas vegetales densas (Huete et al., 1995). Para estos casos, el modelo teórico de Guyot y Gu (1994) indica que el cálculo de este índice para imágenes Landsat y Spot calculados a partir de DN (Digital Number) subestiman entre 0,20% el valor calculado con las reflectividades, siendo este error mayor con valores de NDVI inferiores a 0,5 (Chuvienco, 2006). Para el sensor Landsat NDVI se define por la siguiente ecuación:

$$NDVI = P_{NIR} - 0.801P_{RED} - P_{NIR} + 0.801P_{RED} \quad [1]$$

Donde  $P_{NIR}$  y  $P_{RED}$  corresponde a los valores de reflectancia de la vegetación en la porción infrarroja cercana y roja del espectro (las bandas 5 y 4 respectivamente).

La Fig. 3.2 muestra el total de imágenes con cálculo NDVI para el área de estudio seleccionada, el año 2008 no se incluye por contener muchos errores de procesamiento. En este capítulo, la detección de cambios se realiza empleando las imágenes de los años 1985, 2001, 2006 y 2011. La tabla 3.1 resume las mismas. Para mayor información sobre sus características ver Anexo 1.

<b>TABLA 3.1. RESUMEN DE LAS IMÁGENES UTILIADAS EN EL ANÁLISIS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS</b>			
Año	Sensor	Proyección	Día juliano
1985	TM	UTM	349
2001	TM	UTM	69
2006	TM	UTM	102
2011	TM	UTM	36

### 3.2.3. Técnicas de segmentación

La aplicación de técnicas de segmentación es clásica en la detección de cambios, y es muy utilizada en paisajes agrícolas en función del tiempo para identificar la dinámica de la vegetación creando áreas homogéneas espectrales (Sharma, 2012). Este estudio utiliza imágenes multitemporales con el objetivo de conseguir contrastar los cambios en el tiempo, tal y como se aconseja (Fu et al., 1981). Para ello, se aplican tres técnicas de segmentación, resaltando el factor temporal, que son aplicadas a imágenes obtenidas en diferentes años,



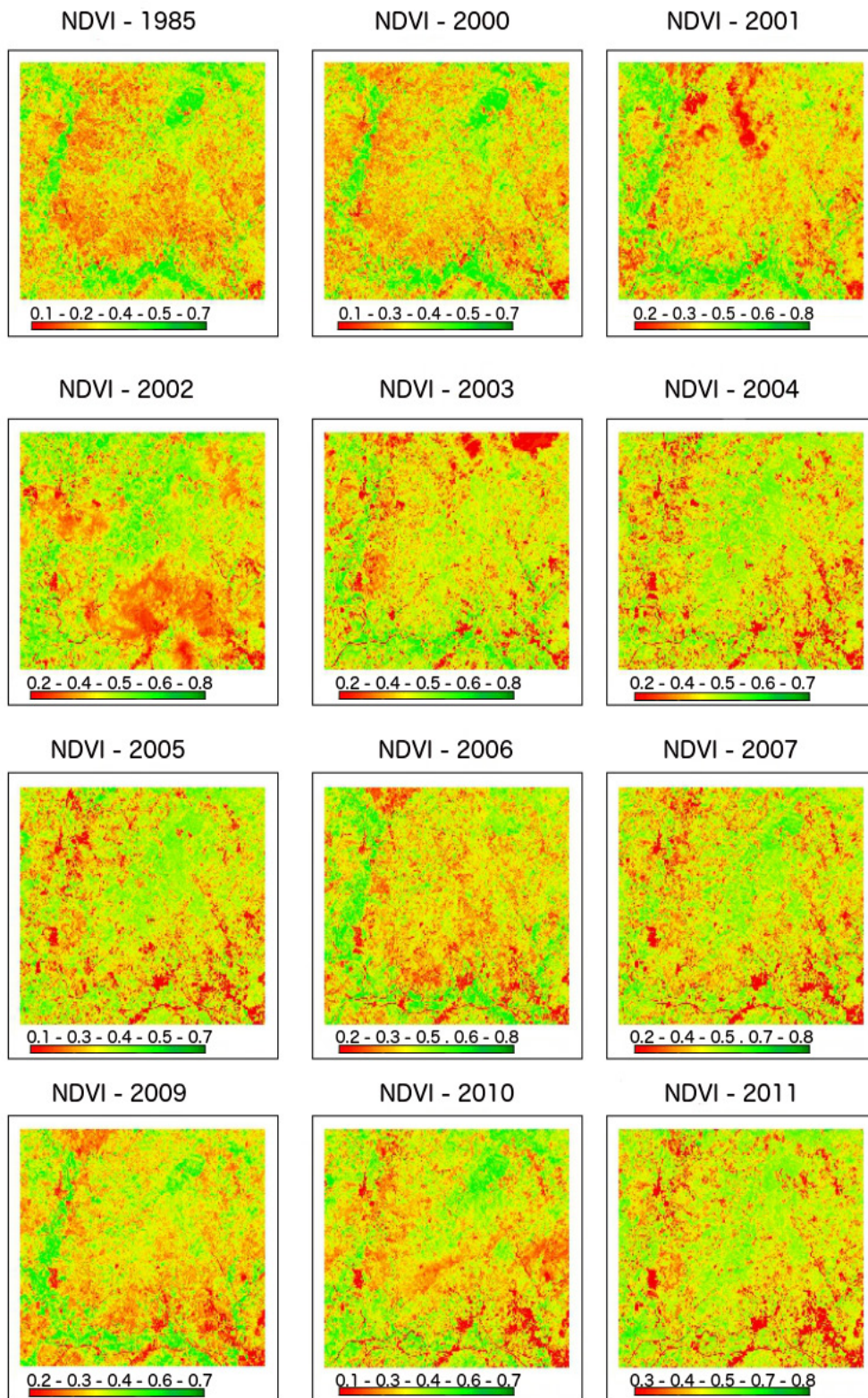


FIG. 3.2. Imágenes con cálculo NDVI, del área seleccionada, para todos los años del periodo de estudio 1985-2011

se identifica el crecimiento agrícola en la región y su dinámica fenológica. Este trabajo se realiza previo cálculo del índice NDVI, para realzar la vegetación y mejorar el análisis multitemporal (Virginia et al., 2001), que permite definir cambios en la cubierta vegetal sobre la superficie y caracterizar su distribución espacial así como la evaluación de su estado en el periodo 1985-2011. Se identifican visualmente los cambios que se producen, mediante estas series de tiempo, mostrando la vegetación que aumenta y decrece, y se compara cuantitativamente un determinado año respecto a su valor histórico.

La aplicación de umbral-fijo se aplica para lograr una alta distinción entre la tierra cultivada y no cultivada de tal manera de discriminar el suelo desnudo-vegetación, respecto a la vegetación moderada-alta vigorosa. De esta manera, el mismo valor de umbral visualizará en el tiempo, mediante la elección de distintos años, el aumento de área vegetada o de áreas de cultivos en este caso.

La aplicación técnicas de diferenciación, se aplica para identificar la dirección del cambios, implica la resta celda a celda, o en este estudio el valor de NDVI a NDVI, para lograr una nueva imagen de los valores de reflectancia que aumentaron y disminuyeron, pudiendo interpretarse como cambio de clases (Steve et al., 2009). Para ello se aplica la siguiente ecuación identificada como diferencia entre imágenes multitemporales:

$$NDVIc = NDVIc = NDVI_{t_2} - NDVI_{t_1} + C \quad [2]$$

En la cual, NDVIc es la imagen resultado, NDVI<sub>t<sub>2</sub></sub> y NDVI<sub>t<sub>1</sub></sub> corresponde a las imágenes del segundo y primer periodo respectivamente. C es una constante para evitar valores negativos, de valor igual a 1 para este caso.

De esta manera comparar aritméticamente bandas procedentes de dos fechas, equiparables radiométricamente y geométricamente. La nueva imagen, resultado de la diferencia, discriminará aquellas zonas que hayan experimentado cambios.

Con la aplicación de la técnica de RGB-NDVI se busca generar una composición color formada por imágenes correspondientes a tres años distintos, y realizar un análisis visual que complemente las técnicas anteriores. Esta técnica creará una composición de color mediante la teoría aditiva de color. Las tres imágenes NDVI se combinan en rojo, verde y azul. Este método resulta muy usado en la detección de cambios en paisajes agrícolas puesto que los cultivos toman diferentes apariencias (estado de cobertura de la tierra) a raíz del laboreo, cosecha, tipos de cultivos que giran en el mismo sitio (Sader et al., 2003).

## 3.3. RESULTADOS

### 3.3.1 Técnica de umbral fijo

Con la aplicación de esta técnica se busca separar la imagen de forma binaria para facilitar la identificación de la zona cultivada de la no cultivada. Las Figuras 4, 5 y 6 muestran las imágenes NDVI y el resultado de aplicar el umbral-fijo, cuyo valor que mejor ha resaltado los cambios es el  $IV \geq + 0.5$ . En la Fig. 3.3 (año 1985), puede observarse que ha sido posible filtrar las características que no son de interés, con valores de NDVI elevados, resultado del estatus fenológico de la vegetación sin discriminación de los tipos de cultivo. La zona fluvial y su alrededor inmediato están bien delineados, y el cuadro inferior izquierdo de la imagen se muestra sin desarrollo agrícola. La Fig. 3.4 (año 2001) contiene mayor cantidad de píxeles de color azul correspondiendo a una mayor actividad agrícola, resalta este crecimiento y su dirección, que se produce a ambos lados del río Guadalhorce, mostrando mayor densidad de vegetación-cultivos en el tiempo. Se selecciona esta imagen que difiere en 16 años en relación a la anterior por que logra, a partir del valor de umbral fijado, mostrar el cambio. El cuadro inferior izquierdo refleja mayor ocupación en el suelo, corresponde a zonas nuevas de cultivos de cítricos y otros cultivos heterogéneos. Con la imagen del año 2011 (Fig. 3.5) no se consigue resaltar con la misma nitidez la vegetación del suelo, la respuesta espectral es baja en relación a las anteriores, sin embargo la línea del río y su entorno pueden diferenciarse. Para los tres años seleccionados, los píxeles con valores NDVI que han superado el valor de umbral corresponde a la vegetación, y muestran el cambio, separando la imagen en color azul correspondiendo a valores positivos  $\geq 0.5$ , mientras que los restantes son menores a este valor.

### 3.3.2. Técnica diferenciación de imagen-NDVI

Con esta técnica además de las zonas cultivadas visualiza las zonas de cambios y sin cambios. La Fig. 3.6 presenta el resultado del análisis, sobre dos fechas con cálculo NDVI y aplicación de la ecuación [2]. La primera imagen corresponde a la diferencia entre los años 1985-2001, la segunda 2001-2006 y la tercera 2006-2011. La dirección del cambio puede identificarse comparando la primera imagen con la tercera, con valores que manifiestan la intensificación agrícola delimitando mayor vigor vegetal en el tiempo, sin discriminación de cultivos. La continua expansión de la actividad agrícola en el área de estudio, da como resultado en la resta de imágenes mayor ocupación del suelo a consecuencia de la modificación de los rasgos espaciales y en consecuencia también mayor cubierta espectral, que al restarse los valores de NDVI se crea una imagen cuantitativa, presentando las zonas estables con valores cercanos a cero, mientras las que han experimentado cambio ofrecen valores distintos a cero (positivos o negativos). La ecuación aplicada ha logrado valores nulos para las zonas



sin cambios, valores mayores a cero cuando el cambio ha provocado un aumento en el coeficiente de retrodispersión y valores menores a cero cuando el cambio se refiere a un descenso en el coeficiente de retrodispersión. La Fig. 3.7 corresponde al histograma de las imágenes resultantes, se trata de un perfil gaussiano donde las máximas frecuencias corresponden a zonas estables, mientras que las áreas dinámicas (zonas que han cambiado) se encuentran en los extremos, el ancho está relacionado con el contraste-diferencias entre los años empleados y los picos de las frecuencias se identifican con las cubiertas vegetales de cítricos, fotosintéticamente activo, puesto que es el cultivo dominante de la zona y de mayor ocupación. El eje x corresponde al rango de valores del índice NDVI. La tabla N. 3.2 muestra la media y la desviación estándar de cada una de las diferencias sobre los valores de IV de la imagen. Se desprende del valor bajo de la desviación estándar, buena homogeneidad, determina los valores más alejados respecto de su promedio, se obtiene como resultado calidad visual en las imágenes resultantes.

### 3.3.3. Técnica RGB-NDVI

La asignación de color realizada sobre las imágenes con cálculo índice NDVI para mantener el realce de la vegetación, previo contraste máximo lineal para el rango de datos 0-255, ha permitido interpretar el tipo de cambio que se ha producido en el paisaje, además de detectar otros cultivos en la zona para el área seleccionada. El resultado se muestra en la Fig. 3.8 con una vegetación dinámica de manera constante, los tonos más claros son en respuesta a zonas densamente vegetadas todo el tiempo, mientras que el rojo son decrementos de NDVI (poca vegetación) que en este caso puede ser debido a cosechas o variaciones estacionales de algunos cultivos, y a las zonas de los pueblos (Álora, Pizarra, Nueva Aljaima y Cártama). El cian es un aumento de NDVI que en este caso se relaciona con la puesta de cultivos nuevos en zonas antes descubiertas, y los tonos verdes claros descubre un factor importante por que corresponde a nuevas plantaciones en zonas que antes no eran de cultivos.

Los cultivos de cítricos, se corresponde con las zonas más claras, densamente vegetadas, y presentan categorías similares espectrales, mostrando solo contraste espacial entre parcelas con aquellos cultivos más jóvenes en su crecimiento, y sólo se diferencian de los cultivos estacionales que ofrecen respuesta espectral diferente. Esto también se desprende al analizar las firmas espectrales, Fig. 3.9, en todas las bandas de cada imagen para el periodo 2000-2011, ésta figura muestra los valores promedios en este periodo de los diferentes cultivos de cítricos, barbechos, cuerpo de agua, y montaña, alrededores al río que son las coberturas interpretadas con esta técnica (Fig. 3.8). En esta región, las bandas R y NIR ofrecen mayor contraste en el rango espectral por la absorción fotosintética de los cultivos de cítricos, que son permanentes en el periodo de estudio. La proyección de colores por superposición en esta técnica teoría aditiva de color revela no solo formas y

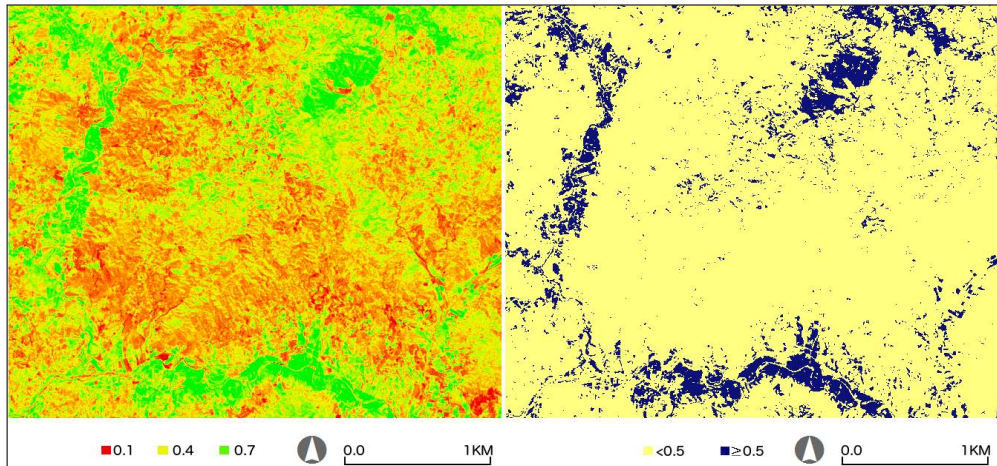


Fig. 3.3. Imagen resultante, año 1985, con cálculo NDVI (izquierda) y aplicación de umbral (derecha)

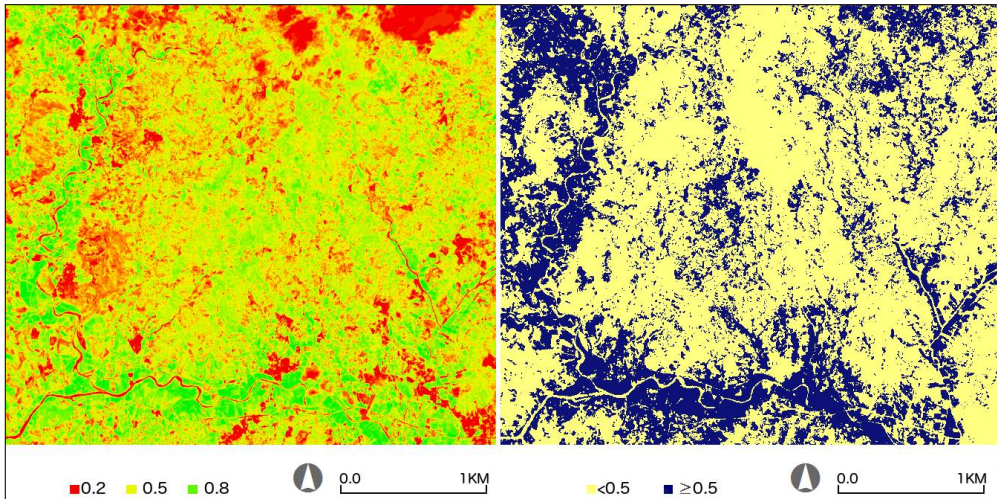


Fig. 3.4. Imagen resultante, año 2001, con cálculo NDVI (izquierda) y aplicación de umbral (derecha)

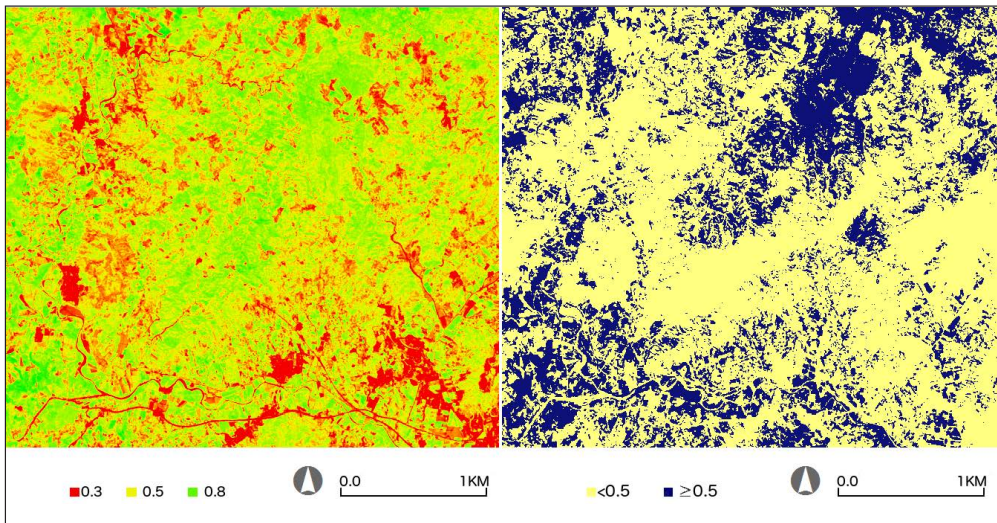
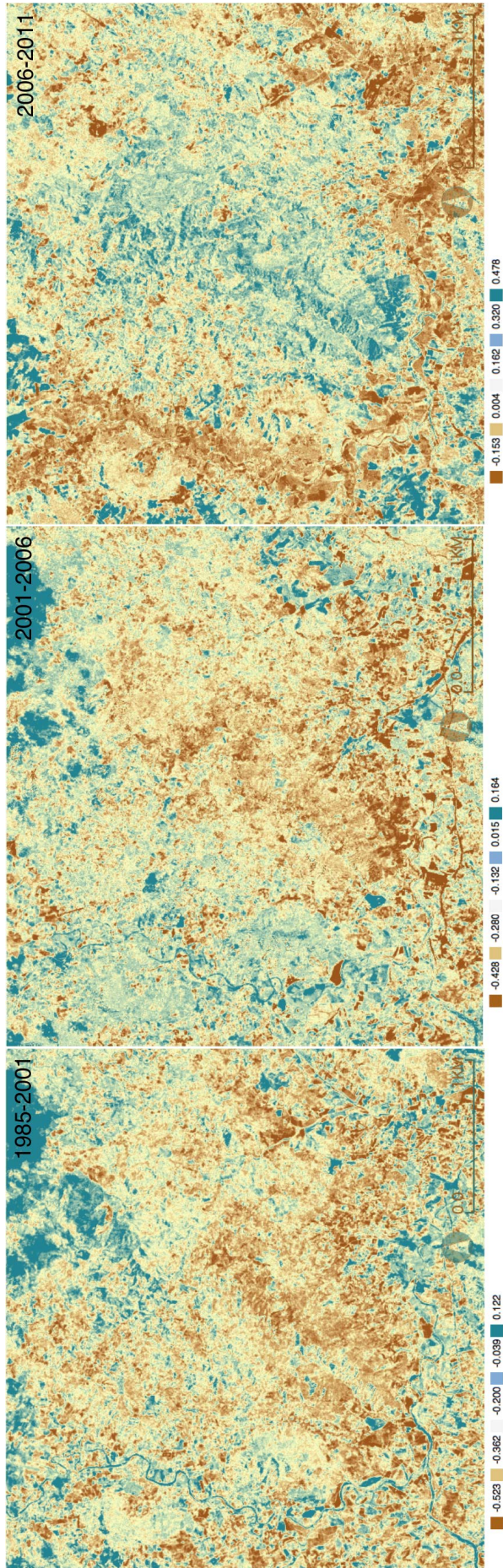
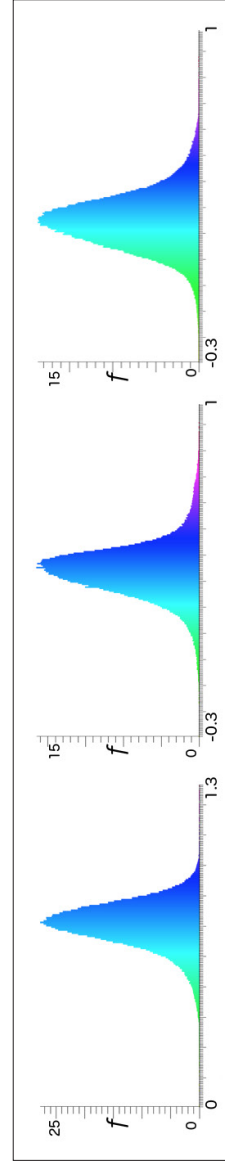


Fig. 3.5. Imagen resultante, año 2011, con cálculo NDVI (izquierda) y aplicación de umbral (derecha)





**Fig. 3.6.** Imagen resultante de la aplicación técnica diferenciación de imagen correspondiente a los pares de años (a) 1985-2001, (b) 2001-2006 y (c) 2006-2011. Los píxeles con cambio positivo en color azul, las zonas más claras sin cambio y las zonas más oscuras se refieren a valores negativos o de vegetación



**Fig. 3.7.** Histogramas de las imágenes de diferenciación.



TABLA 3.2. MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS IMÁGENES DE DIFERENCIA			
Diferencia	1985-2001	2001-2006	2006-2011
Media	0.19	-0.09	0.13
Desviación estandar	0.16	0.13	0.14

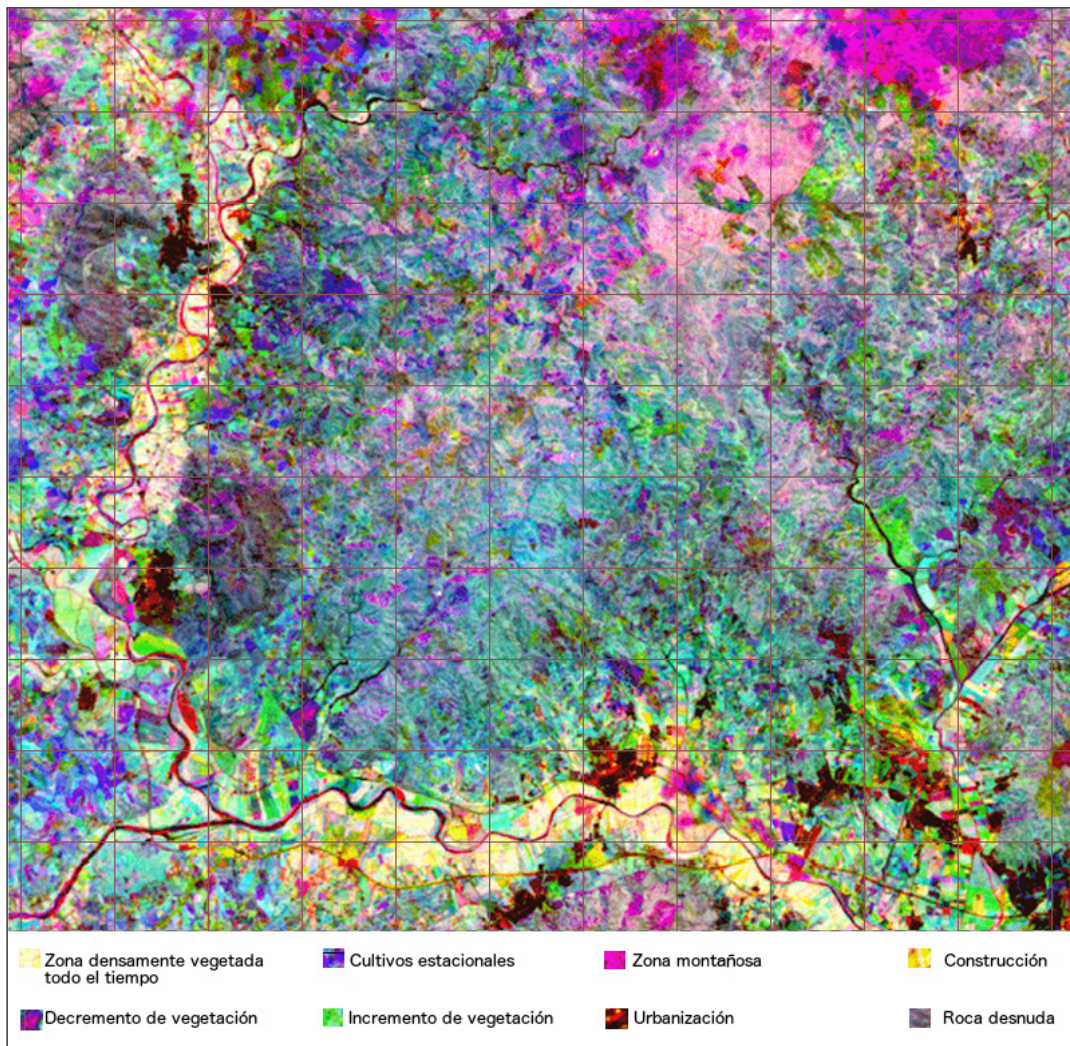


Fig. 3.8. Imagen interpretación de la aplicación de la técnica NDVI-RGB mediante la teoría aditiva de color realizada con el año 1985 en azul, 2001 en verde y 2011 en rojo.

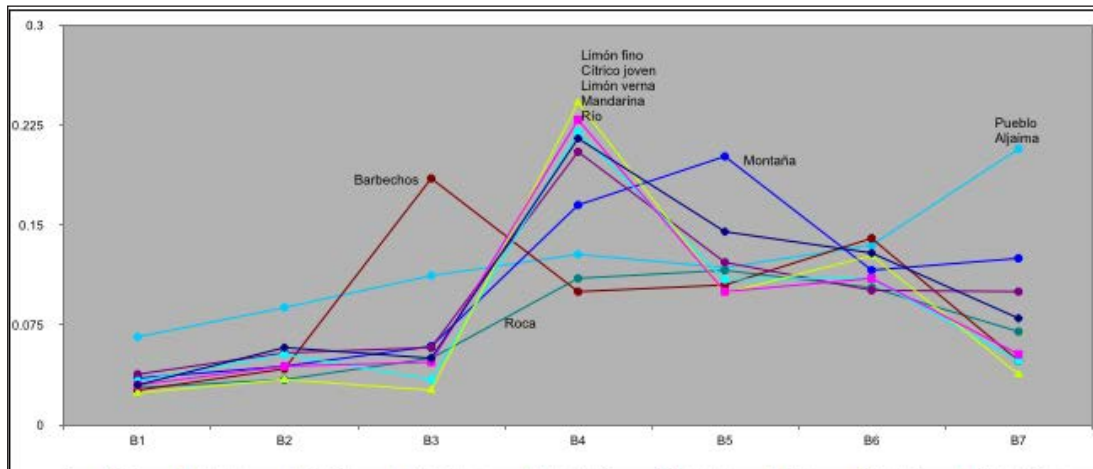


Fig. 3.9. Firmas espectrales correspondiente a las coberturas interpretadas en la Fig. 3.8.

texturas, sino también otras apariencias tal vez a raíz del laboreo, por corresponder a zonas de barbechos, cosecha o rotación de especies.

### 3.4. DISCUSIÓN

Analizando los datos obtenidos, en las tres técnicas empleadas, el cálculo del índice NDVI ayuda en la identificación del área vegetada y revela cultivos en la zona de estudio. Resultados similares puede verse en el trabajo de Asmala (2012), que con objetivos similares, demostró que los índices de vegetación tiene una fuerte correlación con el crecimiento verde de la vegetación y su aplicación mejora su identificación. De la misma manera en este trabajo, NDVI, consigue distinguir entre cultivos de regadíos y secano, y aumento de área-espacio ocupada. Otro trabajo similar puede verse en Ozdogan, (2010) que aplica índices de vegetación para mejorar la distinción de vegetación, acotándose a la disposición de un rango fijo (-1,1) para diferenciar los tipos de coberturas. El rango fijo de valores que se logra con la aplicación de índices de vegetación, como el NDVI, permite el establecimiento de umbrales y divide la imagen, haciendo más fácil su análisis visual.

Los valores NDVI son más elevados en la zona de interés que en el resto de las imágenes debido a la actividad agrícola, estatus fenológico de la vegetación y la presencia de agua en el suelo. Como se registra en la literatura (Chuvieco, 2006; Schowengerdt, 2006), la radiancia de zonas no vegetadas, montañosas o suelo desnudo resultan de valores negativos, por lo tanto es de esperar que para este estudio, el índice NDVI logre realzar las firmas espectrales de la vegetación en la zona, debido a la actividad fotosintética presente de los cultivos de cítricos en los meses de estudio (diciembre-abril). Otros estudios con cítricos, aplicando el

índice NDVI, coinciden con estos resultados, basados en el monitoreo y evaluación de vigor de la planta (Fletcher et al., 2004). El trabajo de Oztekin et al. (2011), similar al de este estudio, se realizó a comienzo de la estación de invierno, para evitar aquellos cultivos con comportamiento espectral similar.

La técnica basada en Umbral-fijo, es muy usada en la detección de cambios puesto que los píxeles que cumplen con el criterio establecido separan la región vegetada de la no vegetada, además su aplicación en los trabajos de teledetección resulta de mucho utilidad por que se identifica rápidamente los píxeles en un rango establecido (Roy et al., 2005), comúnmente aplicada a la identificación de áreas quemadas. En este estudio los píxeles 0.5 detectan la vegetación moderada-alta, categoría en la que se encuentra distribuida los cultivos de cítricos en esta zona. Se hace constar, que el Valle de Guadalhorce ha sido considerada una zona rica para la actividad agrícola, sobre el cual, el Río de Guadalhorce garantiza el recurso hídrico que abastece el cultivo de cítrico, el más abundante de la región junto con una gran tradición hortícola. Es en el año 2000 cuando se produce la consolidación de sistemas de riego, y es a partir de entonces que nuevos sistemas de regadío se instalan, promoviendo el aumento de cultivos y su mejora fitosanitaria. Las imágenes responden a este suceso mostrando aumento de superficie de cultivo al compararse los años 1985 y 2001 con una diferencia de 16 años. La imagen del año 2011 no resulta tan clara como las anteriores posiblemente porque este año registró mayor pluviometría en la provincia de acuerdo a la Información Climatológica Mensual de REDIAM y esto se refleja en la respuesta espectral. Aun así, el valor de umbral delimita con bastante nitidez los píxeles de vegetación aledaños al Río.

La técnica diferenciación de imagen, es una de las más usadas entre las técnicas de segmentación (Khan, 2012), debido a que la aplicación de la ecuación de diferencia facilita la identificación de la dirección del cambio. En este estudio, los pares de años seleccionados se combinan claramente mostrando el aumento área de cultivos a ambos lados del río. En esta técnica, a diferencia de la anterior, el año 2011 en par con el 2006, crea una nueva imagen, resultado de la diferencia, que discrimina las zonas que han experimentado cambios, posiblemente por que la diferencia entre valores NDVI logra minimizar los factores externos y resalta los cultivos.

Mediante la aplicación de la técnica RGB-NDVI, la imagen resultante aparece en tonos de color debido a que las tres fechas combinadas presentan comportamiento espectral diferente. El cálculo de NDVI cumple el objetivo de realzar la vegetación y esto se visualiza en el resultado creando un mapa delimitando las zonas de cultivos, y evidencia algunas acciones agronómicas en la zona (zonas de barbechos, cultivos nuevos). Esta técnica sirve para una interpretación visual puesto que no indica la

dirección del cambio. Los cultivos de cítricos, se corresponde con las zonas más claras, densamente vegetadas. Las firmas espectrales entre las variedades estudiadas resultan similares en el espectro, lo que hace difícil su diferenciación, pero con la ayuda del análisis visual puede identificarse y separarse aquellas zonas de cultivos jóvenes en áreas antes no cultivadas (color verde claro) o por recambio de otras distinta a su variedad. Similares resultados obtuvo el estudio de Gordon et al. (1986), que pudo diferenciar los píxeles entre árboles de cítricos de hoja caduca y huertos, previa aplicación de la técnica de clasificación supervisada para realzar la textura de los árboles, usando las bandas 3,4 y 5 del sensor Landsat. El trabajo de Panda (2010) pudo diferenciar las firmas espectrales entre cultivos de naranjas y pomelos en el monitoreo de estrés. El trabajo de Shrivastava et al. (2007) sobre la estimación de áreas de cítricos, concluyó en errores de estimación debido a valores similares en las firmas espectrales con otros tipos de cultivos.

Las imágenes seleccionadas corresponden a imágenes con buena calidad visual haciendo más evidente los rasgos de las zonas cultivadas, sin nubes, y cuya reflectancia espectral incluye la reflectancia del suelo, condición de la vegetación, condiciones atmosféricas y meses del año empleados. Los resultados muestran que existe una relación consistente entre los datos obtenidos de la imagen y la actividad agrícola de los cultivos de cítricos. La mayoría de las fincas datan desde 1985 y en caso de que haya existido un recambio de cultivo ha sido por otro distinto en su variedad. La razón por la que estas zonas se muestran claras (como densamente vegetadas) puede asociarse al ciclo de vida de estas plantas. Si tenemos en cuenta que una vez injertado, el periodo de plena producción de la planta, se inicia aproximadamente a partir del sexto año de vida, alcanzando su máxima eficiencia productiva alrededor de los 8 a 10 años de edad, a partir de este momento estaríamos durante el período que establece una relación estrecha entre el incremento del follaje de la planta y el número de frutos producidos, luego tiende a mantener los niveles alcanzados de producción durante el período anterior o a incrementarlos en forma directa, dependiendo de factores como el laboreo, poda, nutrición, etc. Luego, el periodo de producción se iniciará a partir de los 12 a 14 años de edad de la planta y puede prolongarse hasta los 18 a 20 años. Esto coincide bastante bien con el periodo de este estudio, y por lo tanto se refleja como vegetada todo el tiempo. De acuerdo con el mantenimiento de la plantación, luego comenzará la etapa final o período de senilidad, con la disminución de rendimiento, que dependiendo del estado fitosanitario de la planta y el cuidado de la plantación en períodos previos, comenzaría alrededor de los 20 años de edad o posterior.



### 3.5. CONCLUSIÓN

La zona analizada se muestra como una cubierta fotosintéticamente activa, como es de esperar puesto que corresponde a una zona cuya explotación agrícola data desde antes del comienzo del periodo de estudio (1985), en su gran mayoría con cultivos perennes como los cítricos, cuya estructura permanente, se manifiesta en el análisis multiespectral y multitemporal. La radiancia emitida por la vegetación es fuerte con alta reflectividad en la zona.

La actividad agrícola en aumento espacial, con alta respuesta espectral, delinea una vegetación de pendiente creciente y convergente en origen, es decir la luz roja (absorbida por la cubierta vegetal) supera al del infrarrojo y crece con respecto a él, generando la pendiente de las isolíneas de vegetación, que se incrementa con respecto a la de la línea de suelos (Chuvienco, 2006).

La distinción de los cultivos de cítricos se realiza en función de su categoría fenológicas con zonas sin vegetación, zona montañosa, zonas urbanas y zonas de barbechos. Con las técnicas umbral y diferenciación de imagen se deduce el aumento de vegetación/área de cultivo y con RGB-NDVI se capturan algunas diferencias en la actividad agrícola y estrategias empleadas por los agricultores.

La cartografía lograda mediante la delimitación de sectores se debe a la transformación de los rasgos espectrales y espaciales. Los espectrales a consecuencia de alteraciones en la densidad o estado fonológico de los cultivos de cítricos, ya sea por renovación-reemplazo por cultivos nuevos en la misma explotación agrícola, que mantiene la estructura espacial, pero altera la respuesta espectral. Los espaciales responden a nuevos cultivos dispuestos en las zonas aledañas al Río Guadalhorce (color verde claro, zona inferior izquierda de las figuras de detección).



## REFERENCIAS

Asmala, A., Shaun, Q. (2012). Cloud masking for remotely sensed data using spectral and principal components analysis. *Technology & Applied Science Research*, 2(3):221-225.

Carrao, H., Gonzales, P., Cayetano, M. (2008). Contribution of multispectral and multi-temporal information from modis images to land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 112:986-997.

Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10:1-9.

Chuvieco, E. (2006). *Teledetección Ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona:Ariel ciencia.

Conghe, S., Woodcock, C., Seto, K., Lenney, M., Macomber, S. (2001). Classification and change detection using landsat tm data: When and how correct atmospheric effect. *Remote Sensing of Environment*, 75:230-244.

Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E. (2004). Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. Journal of Remote Sensing*, 25:1565-1596.

Cross, A., Mason, D., Dury, S. (1988). Segmentation of remotely-sensed images by a split-an-merge process. *Int. Journal of Remote Sensing*, 9:1329-1345.

Fletcher, R.S., Escobar, D.E., Skaria, M. (2004). Evaluating airborne normalized difference vegetation index imagery for citrus orchard surveys. *Hort. Technology* 14 (1):91-94.

Fu, K. S. Mui, J. K. (1981). A survey of image segmentation. *Pattern Recognition*, 13:3-16.

Friedl, M., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. (2002). Modis collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1):168-182.

Gordon, D.K., Philipson, W.R. (1986). A texture-enhancement procedure for separating orchard from forest in Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 7(2):301-304.

Gordon, D.K., Philipson, W.R., Philpot, W.D. (1986). Fruit tree inventory with Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52(12):1871-1876.

Haralick, T., Shapiro, S. (1985). Image segmentation techniques. *Computer vision, graphic and image processing*, 29:100-132.

Hayes, D., Sader, S. (2002). Analyzing a forest conversion history database to explore the spatial and temporal characteristics of forest change. *Landscape Ecology* 17:299-314.

Guyot G., Gu X. (1994). Effect of radiometric corrections on NDVI determines from SPOT-HRV and LANDSAT-TM data. *Remote Sensing of Environment*, 49:169–180.

Huete, A., Liu, H. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Remote Sensing*, 33:457–465.

Lyon, J., Yuan, D., Lunetta, R., Elvidge, D. (1998). A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 64:143–150.

Jensen, J. R. (1996). Introductory digital image processing: classification of satellite data-simulation and correction. a remote sensing perspective. *Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 51:73–83.

Jin, S., Sader, S. A. (2005a). Comparison of time-series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94:364–372.

Khan, W. 2013. Image Segmentación Techniques: A survey. *Journal, image and graphics*, 1(4).

Khodja A., Hotyat, M., Chatelaina, A., Gilg, J. (1995). Partition d'une image satellitaire et caractérisation de son contenu par une méthode de segmentation images: Application à la forêt de bouconne (france) et à la ville d'oran (algérie). In *Photo-interpretation*, volume 1, pages 25–30.

Loveland, T., Reed, B., Brown, J., Ohlen, O., Zhu, Z., Yang, L., Merchant, J. (2000). Development of a glc characteristics database and igbp discover from 1km avhrr data. *Int. Journal of Remote Sensing*, 21(6-7):1303–1330.

Lu D., Masuel, P., Brondizio, E., Moran, E. (2004). Change detection techniques, *Int. Journal of Remote Sensing*, 25:2365–2407.

Mancino, G., Nolé, A., Ripullone, F., Ferrara, A. (2014). Landsat tm imagery and ndvi differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in basilicata, southern italy. *Iforest Biogeoscience and Forestry J.*, 7:75–84.

Michener, L., William, K., Paula, F. (1997). Detection of vegetation changes associated with extensive flooding in a forested ecosystem. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 63:1363–137.

Onyango, C., Marchant, J. (2003). Segmentation of row crop plants from weeds using colour and morphology. *Computer and Electronic in Agriculture*, 39:141–155.

Ozdogan, M. Gutman, G. (2008). A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal modis and ancillary data: An application example in the continental us. *Remote Sensing of Environment*, 11:3520–3537.

Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., Cervantes, C. (2010). Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 2:2274–2304.

Oztekin, M. E., Senol, S., Atatanir, L., Dingil, M., Dinc, O. (2011). Determination and monitoring of citrus plantation by using Landsat 7 ETM data in a selected area from the Çukurova region. *J of Food, Agriculture & Environment*, 9(2):498-503.

Panda, S., Ames, A., Panigrahi, S. (2010). Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*, 2:673–696.

Pavlidis, T., Wolberg, G. (1986). An algorithm for the segmentation of bilevel images, proc. In *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, volume 22-26: 570–575.

Roy, D., Jin, Y., Lewis, P., Justice, C. (2005a). Phototyping a global algoritmo for sistematice fire-affected área mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing Environment*, 97:137-162.

Schowengerdt, R. (2006). *Models and Methods for Image Procesing and clasificaron in Remote Sensing*. Third Ed. University Press. London.

Sader, S. Winne, J. (1992). Rgb-ndvi colour composites for visualizing forest change dynamics. *Int. Journal of Remote Sensing*, 13:3055–3067.

Sader, S., Bertran, M., Wilson, E. (2003). Satellite change detection of forest harvest patterns on an industrialforest landscape. *Forest Science*, 49:341–353.

Saini, S., Arora, K. (2014). A study analysis on the different image segmentation techniques. *Int. J of Info & Comp Tech*. 14(4)1445–1452.

Sharma, N., Mishra, M., Shrivastava, M. (2012). Colour image segmentation techniques and issues: an approach. *Int J of Scientific and Tech Research*, 1:9–12.

Shrivastava, R. Gebelein, J. (2007). Land cover classification and economic assessment of citrus groves using remote sensing. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61:341–353.

Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely- sensed data. *int. Journal of Remote Sensing*, pages 989–1003.

Sobrinho, J., Jiménez-Muñoz, J., Plaza, A., Guanter, L., J., M., Martínez, P. (2009). Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of proba/chris data over an agricultural area. *Sensors*, 9:768–793.

Steve, F., Milliman, T., Seto, K., Friedls, M. (2013). A global fingerprint of macro-scale changes in urban structure from 1999 to 2009. *Environm Research Letters*, 2(8):024004.

Thenkabail, P., Schull, M., Turrall, H. (2005). Ganges and indus river basin land use/land cover (lulc) and irrigated area mapping using conti- nuous streams of modis data. *Remote Sensing of Environment*, 95:317–341.

Tian, L., Slaughter, D. (1998). Environmentally adaptive segmentation algorithm for aout-door image segmentation. *Computer and Electronic in Agriculture*, 21:153–168.

Townshend, J., Justice, C., Kalb, V. (1986). Analysis of the dynamics of african vegetation using normalized difference vegetation index. *Int. Journal of Remote Sensing*, 8:1189–1207.

Treitz, P. Rogan, J. (2004). Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction. *Progress in Planning*, 61:269–279.

Tucker, C. Sellers, P. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *Int. Journal of Remote Sensing*, 7:1385–1416.

Virginia, R., Wall, D. (2001). Principles of Ecosystem function. *Encyclopedia of Biodiversity* 2:345–352.

Volcani, A., Karnieli, A., Svoray, T. (2005). The use of remote sensing and gis for spatio-temporal analysis of the physiological state of a semi-arid forest with respect to drought years. *Forest Ecology and Managment*, 215:239–250.

Weber, T., Keith, T. (2001). A method to incorporate phenology into land cover change analysis. *Journal of Range Management*, 54:A1–A7.

Woodcock, C., Collins, J., Gopal, S., Jakabhazy, V., Li, X., Macomber, S., Ryherd, S., Harware, J., Levitan, J., Warbington, R. (1994). Mapping forest vegetation using landsat tm imagery and a canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 50(240-254).

Zhu, Z., Woodcock, C. (2012). Object based and colad shadow detección in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118: 83-94.

Consejería de Medio Ambiente, Ordenación y Territorio [en linea]. España. Información climatológica mensual (2011) [20 septiembre 2013]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem>.



# 4. ANÁLISIS COMPARADO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI y SAVI PARA LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN CULTIVOS DE CÍTRICOS

---



## 4.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes aportes de la teledetección a la agricultura es la evaluación de rendimientos de cultivos. Cuando los sensores detectan la radiación procedente de la superficie, una transmisión de energía que es absorbida o reflejada, lo hacen en función de la forma y la textura de los objetos que son medidos, generando una imagen de píxeles individuales en función de sus propiedades de reflectancia (Gilabert et al., 2009). Estos valores de píxeles están relacionados con la actividad fotosintética de la planta, haciendo posible relacionar y analizar las variables de cultivo medidas sobre el terreno con valores espectrales de una imagen de satélite (Bouvet et al., 2009). Estas variables pueden representarse a través de los índices de vegetación, con los cuales se podrá establecer una relación biunívoca con los parámetros biofísicos que caracterizan una cubierta vegetal, pudiendo además identificar firmas espectrales de cultivos (Tucker et al., 1980; Richardson et al., 1982). Todos estos IV se dirigen a realzar las cubiertas vegetales frente a otras superficies, a través del contraste que presenta la reflectividad de las plantas entre el IRC y el R, siendo la banda roja fuertemente correlacionada con el contenido de clorofila, y la infrarroja controlada por el LAI (índice de área foliar) y densidad de vegetación verde.

Los estudios con sensores de satélites en la estimación de cultivos se intensifican de tal manera que son varios los sensores que brindan información sobre el rendimiento de la vegetación. El Sensor NOAA-AVHRR ha sido usado en trabajos a gran escala, demostrando correlación entre valores de precipitación y vegetación y por lo tanto empleado en modelos de previsión de producción (Townshend et al., 1986). El Sensor MODIS aporta productos estándares en relación al crecimiento de la planta y cuenta con numerosos estudios que han demostrado excelentes resultados (Zhao et al., 2005). El sensor Landsat cuenta con una resolución espacial y espectral suficiente para delimitar superficies de cultivos iguales o mayores a 1Ha (Lobell et al., 204). Por otro lado, el acceso a la información histórica de estos sensores de forma sencilla y económica ha propiciado nuevos enfoques, en que las técnicas convencionales de recogida de datos, las visitas y los informes de campo son combinados con datos de sensores remotos para la estimación de rendimiento y cosecha.



Esta información histórica puede ser usada como una previsión de futuro, y sus datos tanto si se analizan solos o en modelos, han demostrado mediciones fiables (Rivas et al., 2011).

Entre las técnicas para la evaluación de cultivos, están los modelos de simulación de rendimientos, que pueden clasificarse en simples y complejos (Gallego et al., 2009). Los primeros se relacionan con el clima, la biomasa y el índice de área foliar, los cuales son considerados descripciones directas de los datos observados, y son expresados generalmente como ecuaciones de regresión entre uno o varios factores (Gómez et al., 1998; Tinoco et al., 2008). Los segundos, involucran las variables anteriores, pero incluyen aspectos genéticos y del suelo; a través de lo cual se intenta explicar procesos físicos, químicos o biológicos más importantes, para describir un comportamiento específico (Anderson et al., 2009). Un listado amplio de estos modelos puede verse en el trabajo de Gallego et al. (2009) y Moulin et al. (1998).

Entre los más usados que hacen uso de datos de satélites, cabe destacar tres que se han utilizado de forma frecuente. En primer lugar, el método Absorbed photosynthetically Active Radiation (APAR), aplicado a una amplia gama de sensores, cultivos y regiones (Lobell et al., 2004; Reeves et al., 2005). Se basa en la función ecofisiológica del rendimiento por parte de la vegetación de Monteith (1977), en el que se establece que la producción total de biomasa es directamente proporcional a la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en la temporada de crecimiento. En este modelo, la biomasa se relaciona con la eficiencia en el uso de radiación inherente al cultivo (RUE) para obtener un índice de cosecha constante (HI). Este enfoque tiene dos pasos claves, primero estimar la fracción de radiación fotosintéticamente activa (PAR), absorbida por el dosel (fPAR) en un día determinado tomando el valor de reflectividad o IVs. Segundo obtener suficientes estimaciones fPAR durante la temporada de crecimiento para estimar rendimiento teórico potencial APAR, para una fecha de siembra específica. Este enfoque delinea los productos estándares de MODIS debido a que tiene en cuenta observaciones frecuentes en relación al crecimiento de la planta, tales como la producción primaria bruta (Zhao et al. 2005). Un segundo método es el denominado Crop Model Curve Selection (CM-CS) (Bouman, 1995; Maas et al., 1988), consiste en utilizar modelos de simulación de cultivos para predecir rendimientos de cultivos. Su procedimiento consiste en considerar los factores en el campo (fecha de siembra, la tasa de crecimiento relativo, o la capacidad de retención de agua del suelo, y los valores simulados de índice de área foliar (IAF) o fPAR), a partir de los cuales se realiza la simulación del crecimiento y del rendimiento de cultivos con los valores de satélite. Posteriormente, se comparan los datos simulados y los observados en campo para ajustar el modelo. Dicha comparación, se realiza, por ejemplo, mediante error cuadrático medio (RMSE). Los datos con mayor coincidencia en relación a los simulados y observados durante la estación de crecimiento serán los seleccionados, y el rendimiento asociado a esa simulación se asigna al valor de pixel como datos de entrada

(Clevers et al., 1997; Launay et al., 2005). Por último está el método denominado Crop Model Regression (CM-Reg) Clevers (1997), que a diferencia del anterior, utiliza los datos estimados por sensores remotos se utilizan en un modelo de regresión simple que relaciona el rendimiento a una sola variable, como por ejemplo un IV o fPAR calculados en una fecha específica. A pesar de su simpleza, y de no requerir imágenes procedentes de varias fechas de imágenes, éste método, ha dado mejores resultados. Un aspecto clave de este enfoque es que el modelo integra múltiples procesos a lo largo de la temporada, como el efecto de la temperatura sobre el desarrollo del cultivo, o el efecto de los niveles de radiación en rendimiento total, y aun así, sólo usa una estimación simple de IV para cada caso. Es aconsejable realizar una regresión diferente para cada temporada debido a que la relación entre los IV y su rendimiento final depende de su estado en el tiempo. Una extensión de este enfoque, si se dispone de varias fechas, sería utilizar múltiples predictores.

Cuando se aplica a cultivos leñosos como los cítricos, debe entenderse que su rendimiento está condicionado por la temporada anterior, son muy susceptibles y están sujetos a distintos estreses provenientes del medioambiente (tales como altas temperaturas, sequías, heladas, etc.) y actividades culturales como la poda, que modifica su estructura, resultando difícil su evaluación en caso de estrés, debido al gran número de órganos vegetativos y reproductivos que tiene (Goldschmidt et al., 2005).

Las variables de cultivos que espectralmente pueden calcularse para ser usadas en los modelos de estimación son aquellas relacionadas con las condiciones de cultivos (Nuarsa et al. 2007), siendo la aproximación más sencilla aquellas variables a través de cálculo de IV. El índice NDVI ha sido (y en parte sigue siendo) el índice que más frecuentemente se ha usado en la predicción de rendimiento de cultivos (Huang et al., 2013), ya que crea perfiles temporales y estacionales de la actividad fotosintética por estar relacionado con LAI, porcentaje de cobertura vegetal y humedad del suelo, entre otros parámetros (Jensen, 2005). Esto hace posible un seguimiento de la vegetación en el tiempo. Su aplicación en la predicción de rendimiento data desde 1980 (Huang et al. 2013). Trabajos que han demostrado correlación con parámetros agronómicos de cultivos para cítricos puede verse en Gilabert (1990), Cantó (2008), Man et al. (2010), Ye et al. (2012) y Sindhuja et al. (2013). Su ecuación es la provista en [1].

El índice de vegetación perpendicular (PVI), propuesto por Richardson y Wiegand (1977), tiene por objetivo aislar la información de la vegetación de la del suelo. Su cálculo se toma como una medida de la cantidad de vegetación, cuya distancia a la línea del suelo es perpendicular y convergente. La línea del suelo se calcula a partir de la reflectividad en el rojo e infrarrojo cercano sobre una serie de valores de pixel correspondiente a suelo desnudo en la imagen. A partir de este índice se adopta el concepto de línea del suelo para

analizar datos multiespectrales. El factor  $P_{NIR}$  y  $P_{RED}$  corresponde a valores de reflectividad de la banda infrarroja cercana y banda roja del espectro:

$$PVI = (a P_{NIR} - P_{RED} + b)(a^2 + 1)^{1/2} \quad [3]$$

El índice de vegetación de suelo ajustado (SAVI) propuesto por Huete (1988), es un índice ambiental, que se diseñó para minimizar la influencia del suelo en los espectros del dosel mediante la incorporación de un factor de ajuste L, que varía inversamente con la cantidad de vegetación presente. El valor L, varía desde 0 (cubierta de vegetación alta que sería equivalente a NDVI) a 1 (vegetación baja). SAVI es un índice híbrido entre el ratio de NDVI y PVI. Gráficamente implica un desplazamiento del origen de los espectros de reflectancia trazado en la longitud de onda NIR-Rojo para reflejar las interacciones suelo-vegetación, y la variación del flujo R y NIR a través de doseles de vegetación.

$$SAVI = (P_{NIR} - P_{RED})(L + P_{NIR} + P_{RED})^{1/2} (1 + L) \quad [4]$$

El índice de vegetación de suelo ajustado transformado (TSAVI) fue propuesto por Guyot & Baret (1990), es una modificación del anterior, su fórmula contiene un parámetro cuyo valor estará determinado por el tipo de cultivo. TSAVI fue diseñado para minimizar, todavía más, la influencia del suelo. Los valores a y b en la fórmula son parámetros a línea del suelo, cuyos valores pueden ser a=1, b=0; la variable X se aplica para minimizar los efectos del suelo, similar a la variable L de SAVI con el propósito de optimizar los resultados y darle una aplicabilidad más general (Gilabert et al., 2009).

$$TSAVI = a(P_{NIR} - aP_{RED}) / (P_{RED} + aP_{NIR} - ab + X(1 + a^2)) \quad [5]$$

El índice de vegetación mejorado (EVI) es un índice similar al SAVI, también diseñado para el seguimiento de la vegetación. Está directamente relacionado con el índice de área foliar (IAF) porque se basa en la propiedad espectral de la vegetación verde al absorber diferencialmente la radiación fotosintéticamente activa. El EVI calcula la diferencia normalizada de la reflexión entre las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano, e incorpora una tercera longitud de onda (azul) que minimiza la influencia del suelo y la atmósfera (Rocha et al., 2009). Sus valores deben estar entre -1 y 1:

$$EVI = 2.5(P_{NIR} - P_{RED}) / (P_{NIR} + 6P_{RED} - 7.5P_{BLUE} + 1) \quad [6]$$

Donde:  $P_{BLUE}$ : corresponde a la banda azul.

Los índices listados anteriormente han sido usados en varios modelos con buenos resultados en la medición de la producción de rendimiento (Zhang et al., 2012; Panda et al., 2010), y se han logrado avances significativos en la aplicación de diferentes índices de vegetación para entender su comportamiento, con diferentes respuestas según la zona de estudio (Bocco et al. 2007; Sobrino et al. 2009. En la elección del modelo a aplicar deberá tenerse en cuenta aquél que mejor se ajuste y estime los rendimientos de acuerdo a los diferentes parámetros ambientales presentes (Ortiz et al., 2007).

Aun así, algunos de estos modelos requieren mucha información para cubrir los requerimientos y poder explicar los fenómenos que influyen en el rendimiento. En este trabajo se evalúa la producción de los cultivos de cítricos en el Valle de Guadalhorce, en el periodo 2000-2011. El cultivo de cítricos en esta zona se hace en condiciones de riego, y dado que en el periodo considerado existen variaciones climáticas, cambios en la base genética de los cultivos, variaciones fisiológicas y de manejo agronómico, todos ellos factores que afectan la producción, se considera necesario establecer sistemas de evaluación de producción en grandes superficies. El uso de un modelo que regresión simple, que contemple los datos históricos extraídos de imágenes de satélite, y los datos de producción permitiría generar cartografía (y evaluar) de los cambios de producción ocurridos a distintas escalas espaciales y temporales. Para ello i) se han calculado los valores de dos índices de vegetación (NDVI y SAVI), ii) se han elaborado modelos de regresión lineal entre los IV y los valores de producción obtenidos a partir de datos de campo, iii) se ha elaborado una cartografía de cambios en el patrón productivo en el Valle del Guadalhorce para el periodo 2000-2011.

## 4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.2.1. Zona de estudio

El area seleccionada es el Valle de Guadalhorce, Fig. 4.1, por corresponder a una zona rica en cultivos agrícolas, principalmente cítricos. Esta situada entre los paralelos 36° 42' 30.04" N y 4° 34' 36.14" S, Fig. 4.1. La cruza el Río Guadalhorce que abastece el riego dada la demanda de cultivos y debido a que las lluvias, irregulares en el año, no suplen el total de agua requerida. El Valle tiene una altitud media de 220m s.n.m. y está situado a sólo 3km de a costa mediterránea. La temperatura oscila entre los 35°C en verano y los 5°C en invierno. Las fincas en esta región son en su mayoría privadas, con manejo agronómico y sistemas de riegos similares. Para mayor información ver pto 2.1 Descripción del área de Estudio, en el capítulo 2.

## 4.2.2. Recolección de datos de producción

Los datos de producción fueron suministrados por la Conserjería de Medioambiente y Ordenación de Territorio (Delegación de Málaga). Por otro lado, con el fin de complementar estos datos, y previo contacto con cooperativas situadas en el Valle de Guadalhorce (Figura 4.1), se realizaron entrevistas a propietarios de fincas de cítricos, con injertos realizados en 1985 y sistema de riego por goteo.

La Fig. 4.1 (a) corresponde a una parcela con suelo arcilloso, tiene una media de 278 árboles por ha, su variedad es limón fino injertado sobre naranjo amargo distribuidos en distancias de 6x6 m en 9.3 ha, con una producción media de 35.000Kg por hectárea. Coordenadas UTM 347544E, 4067831N (Huso 30).

La Fig. 4.1 (b) corresponde a una parcela con suelo arenoso, tiene una media de 285 árboles por ha, variedad limón verna sobre naranjo amargo distribuidos en distancias de 6x7 m, en 10.4 ha, con una producción media de 50.000Kg por hectárea. Coordenadas UTM 346678E, 4069886N (Huso 30).

La Fig. 4.1 (c) corresponde a una parcela con suelo arenoso, variedad mandarina clementina, 280 árboles por ha distribuidos en distancias de 6x7 m, en 9 h., con una producción media de 25.000kg por hectárea. Coordenadas UTM 345803E, 4069931N (Huso 30).

## 4.2.3. Imágenes de satélites

Las imágenes procesadas Landsat TM, ETM son las correspondientes al periodo 2000-2011, cedidas por REDIAM. Luego de realizar la verificación de cada una individualmente, con su correspondiente corrección geométrica, radiométrica y atmosférica (ver procedimiento realizado en 2.2.1 del capítulo 2) se realizó el cálculo del índice NDVI en Grass Gis v6.4.4, utilizando las bandas roja e infrarroja según ecuación [1] definida específicamente para sensores Landsat según modelo teórico de Guyot y Gu (1974). A continuación se procedió con el cálculo del índice SAVI, aplicando la ecuación propuesta por Huete [4], con un valor de ajuste de  $L=0.5$ . Este factor de corrección depende de la densidad de la vegetación que para este estudio, en función del porcentaje de cobertura vegetal, su distribución y ocupación espacial en huertos de cítricos, se considera intermedia.

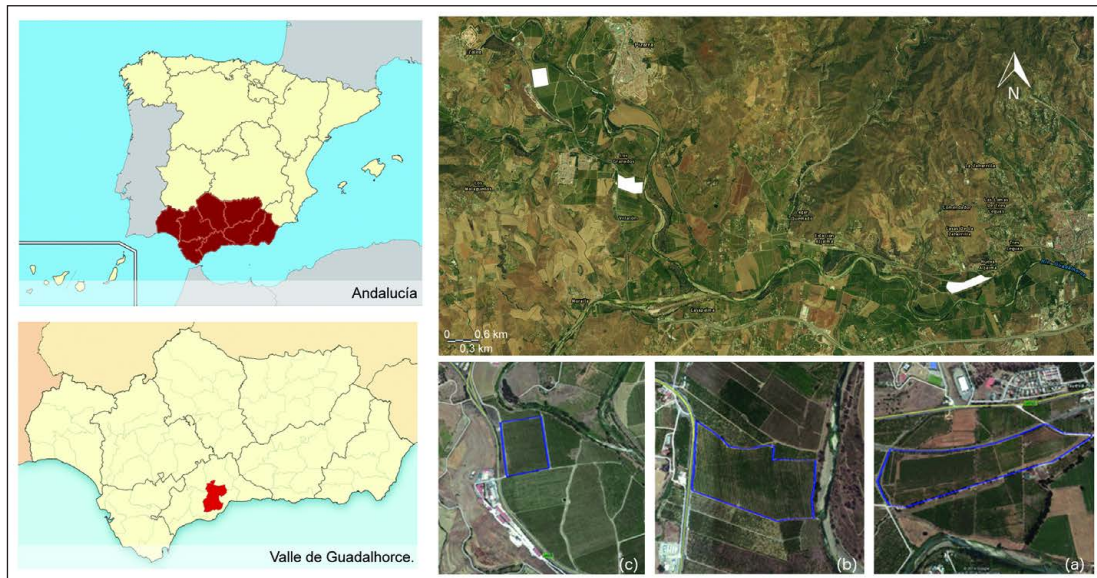


Fig. 4.1. Mapa del área de estudio y ubicación geográfica de las parcelas de cítricos.

#### 4.2.4. Análisis de Regresión

La estimación de rendimiento mediante análisis estadístico es una aproximación que ha dado buenos resultados para relacionar variables estimadas por sensores remotos con las propiedades y características de la planta a nivel parcela (Bouman, 1995). Esto ha sido posible gracias a que se ha comprobado la relación que existe entre variables directamente relacionadas con la producción de la vegetación y su distribución en el espacio con mediciones de radiancia espectral (Osborn et al., 2002) y datos multiespectrales (Serrano et al., 2000; Wright et al., 2013). Este trabajo realiza un análisis de regresión empleando el coeficiente de correlación de Pearson, representada por  $cor$ , el cual mide la fuerza de la relación lineal entre variables distribuidas normalmente. Se considera la aplicación de la correlación de Pearson la más óptima por cuanto se trabaja con cultivos cuyos parámetros de monitoreo pueden variar en el tiempo. La aplicación de este modelo es eminentemente descriptivo, en primer término del grado de asociación entre la variable dependiente, en este caso producción y cada una de las variables independientes, los índices NDVI y SAVI derivados de las imágenes del Sensor Landsat. Se realiza el cálculo del coeficiente de correlación ( $cor$ ) y coeficiente de determinación ( $r^2$ ) usando la aplicación R v3.0, para determinar que índice de vegetación (NDVI, SAVI) contribuye mejor a la relación con la variable producción, describir el sentido (positivo o negativo) de la asociación, e identificar la influencia significativa ( $p$ ) tanto en la magnitud (coeficiente de correlación) como en el



sentido de la asociación. Se identifican las variables que contribuyen en forma mayoritaria a explicar la variabilidad espacial y relación con la producción, para relacionar y realizar una estimación. Luego se aplicó el método de bootstrap sobre cada IV para los tres casos, con remuestreo con reposición de 1000 iteraciones; para cada una de las muestras resultantes se calcula el coeficiente de correlación de pearson y se informa los percentiles 2.5 y 97.5 de la distribución, que se utilizan como una aproximación de los límites superior e inferior del intervalo de confianza (IC) al 95%. Este último procedimiento para establecer si el análisis estadístico original es válido.

### 4.3. RESULTADOS

Para la parcela de variedad limón fino, el modelo de regresión presenta una correlación positiva en el conjunto de datos ( $r=0.64$ ,  $p<0.05$ ). La Fig. 4.2 ilustra el resultado de la correlación para cada variable, con el índice NDVI  $r^2=0.09$ ,  $p<0.05$  y SAVI  $r^2=0.33$ ,  $p<0.05$  de mayor contribución. Para ambos índices el coeficiente de determinación es positivo. Sin embargo el análisis arroja como resultado para NDVI un valor de  $p=0.33$ , reflejando una relación no significativa. Por el contrario, el resultado para SAVI es  $p=0.04$  considerándose una relación significativa.

Para la parcela de variedad limón verna, la aplicación del modelo de regresión presenta una asociación positiva mayor que el caso anterior en el conjunto de datos ( $r=0.84$ ,  $p<0.05$ ). La Fig. 4.3 ilustra el resultado de la correlación para cada variable, con el índice NDVI  $r^2=0.22$ ,  $p<0.05$  y SAVI  $r^2=0.39$ ,  $p<0.05$  de mayor contribución. Como en el caso anterior, para ambos índices el coeficiente de determinación es positivo. Sin embargo el análisis arroja como resultado para NDVI un valor de  $p=0.12$  reflejando una relación no significativa. Por el contrario, el resultado para SAVI es  $p=0.03$  considerándose una relación significativa.

Para la parcela de variedad mandarina clementina, el modelo de regresión presenta una correlación positiva en el conjunto de datos ( $r=0.78$ ,  $p<0.05$ ). La Fig. 4.4 ilustra el resultado de la correlación para cada variable, en este caso, con el índice NDVI  $r^2=0.32$ ,  $p<0.05$  con mayor contribución que SAVI  $r^2=0.19$ ,  $p<0.05$ . A diferencia de los casos anteriores, para ambos índices el coeficiente de determinación es positivo, pero el análisis arroja como resultado para NDVI un valor de  $p=0.05$  considerándose una relación significativa. Por el contrario, el resultado para SAVI es  $p=0.18$  reflejando una relación no significativa.

La Tabla 4.1 resume la asociación entre las variables dependientes e independientes para las tres parcelas de estudio, con el cálculo correspondiente de  $p$  y Bootstrap. De los

resultados se desprende que los distintos grados de fuerza y la asociación paramétrica entre los IVs y la producción es distinta y mayor a cero para cada cultivo, no se cumple para todos los casos (un valor de  $p < 0.05$ ) una asociación significativa. Las gráficas de dispersión muestran los datos extraídos de las imágenes de satélite, con valores de NDVI dispersos, positivos y negativos en algunos casos, y para SAVI con valores positivos cercanos a cero.

En la Fig. 4.5 puede observarse los datos de producción para el periodo de estudio (2000-2011). El cultivo limón fino (a) muestra un descenso muy grande en el rendimiento (año 2004-2005), que puede deberse a muchos factores, por ejemplo la falta de riego (estrés hídrico), las prácticas agrícolas deficientes o una mala nutrición, entre los más comunes que tienen impacto en la producción.

La Fig. 4.6 tienen por objetivo mostrar los valores de los índices NDVI y SAVI para cada parcela en forma independiente. Puede observarse que ambos índices se mueven continuos. Se destaca el año 2001 con valores altos de NDVI sobre SAVI para los tres cultivos. El año 2003, 2006 y 2011 también resultan con valores superiores a 0.5 correspondiendo a los años que mejor refleja la vegetación de las parcelas. Los años 2001, 2006 y 2011 son los años usados en el capítulo anterior para el análisis visual en la detección de cambios. Se observa que el índice SAVI tiene un comportamiento más homogéneo, sin valores negativos ni fluctuaciones drásticas con respecto a NDVI. Esto puede deberse a que SAVI es un índice que minimiza la respuesta del suelo.

TABLA 4.1. VERIFICACIÓN DE LAS CORRELACIONES REALIZADAS CON LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI Y SAVI						
VI	cor	r2	p-value	Bootstrapping		
				Bias	Mean	SD
NDVI	0.30	0.09	0.33	0.30	-0.03	0.41
SAVI	0.57	0.33	0.04	0.40	-0.02	0.30
NDVI	0.47	0.22	0.12	0.47	0.05	0.30
SAVI	0.42	0.39	0.33	0.62	-0.04	0.25
NDVI	0.57	0.32	0.05	0.56	0.07	0.19
SAVI	0.41	0.19	0.18	0.41	0.01	0.21



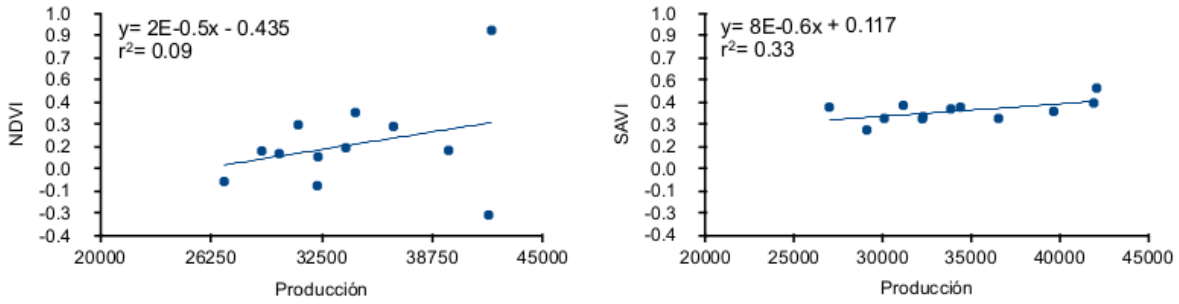


Fig.4.2. Gráfica de dispersión de la correlación entre el rendimiento del cultivo limón fino y las variables NDVI y SAVI.

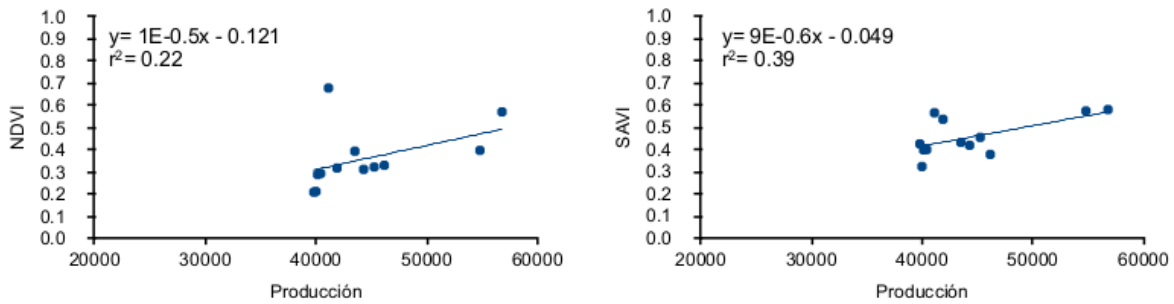


Fig.4.3. Gráfica de dispersión de la correlación entre el rendimiento del cultivo limón verna y las variables NDVI y SAVI.

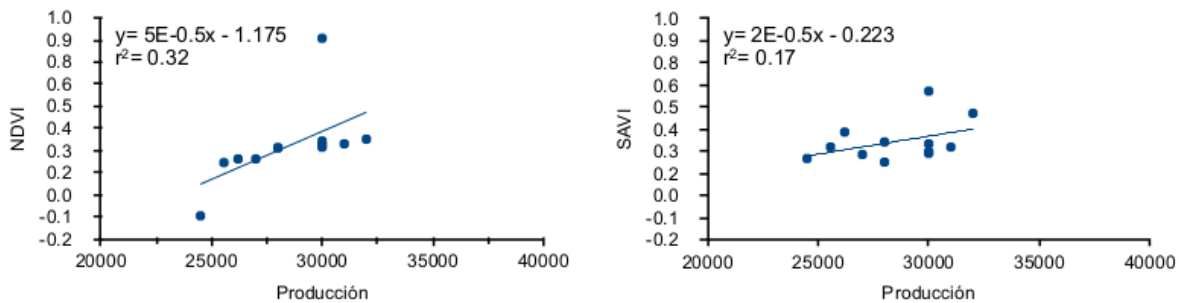


Fig.4.4. Gráfica de dispersión de la correlación entre el rendimiento del cultivo mandarina clementina y las variables NDVI y SAVI.

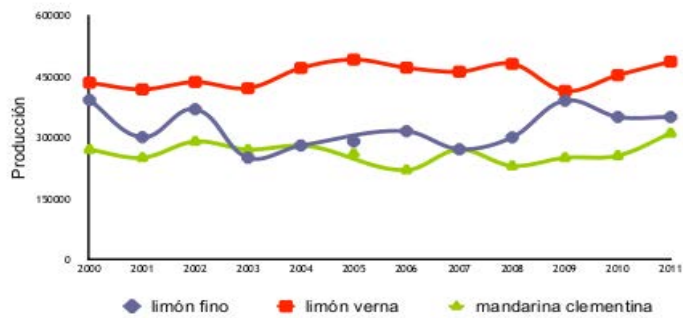


Fig. 4.5. Perfil comparativo de los datos de producción para el periodo de estudio 2000-2011.

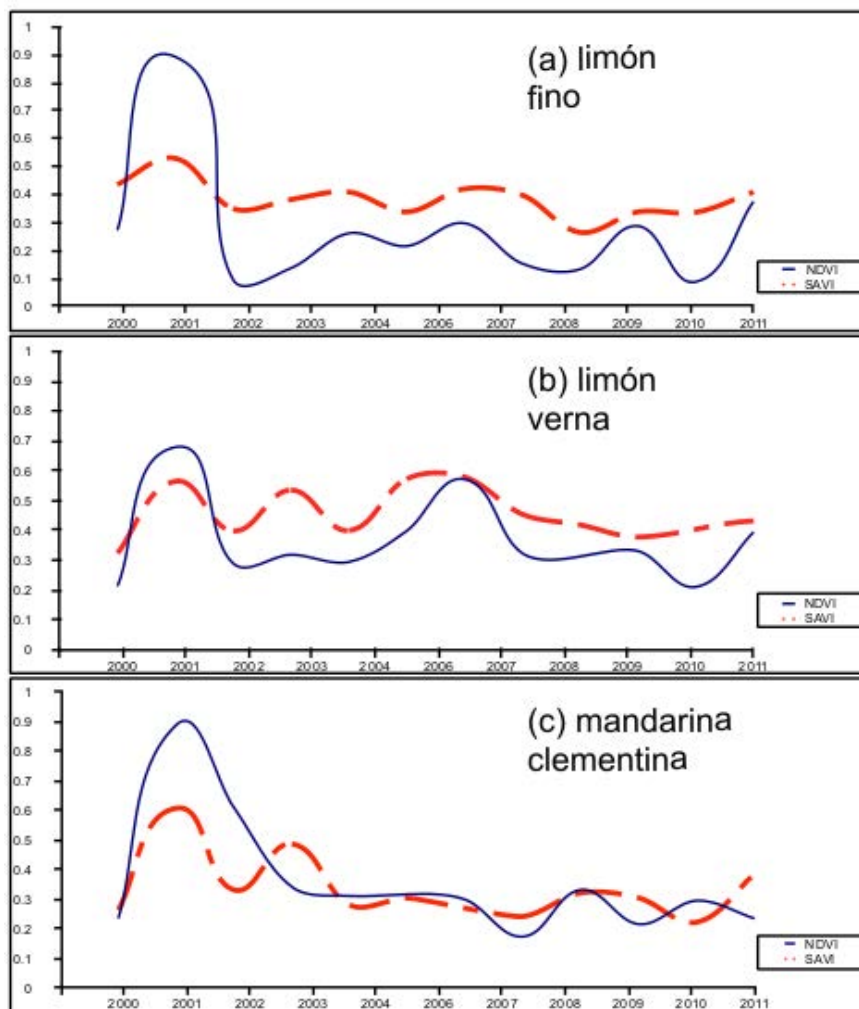


Fig. 4.6. Perfil comparativo de las series temporales de los índices de vegetación NDVI y SAVI para el periodo de estudio 2000-2011.

## 4.4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos por el análisis de correlación son positivos, cada parcela refleja según su composición suelo-agua-plantas un rango distinto de valores para NDVI y SAVI. Los valores de ambos índices son homogéneos entre sí, lo que es de esperar puesto que estas variables se mueven juntas en el tiempo. El índice NDVI ha resultado mejor en aquellos años con altas en la producción, años que pueden asociarse con mayor vigor y densidad vegetal, y con valores bajos en aquellos años con bajas en la producción. SAVI por otro lado, se comporta más homogéneo, sin variaciones drásticas frente a los cambios en la producción de cada año consecutivo. Esto puede deberse a que es un índice diseñado a tener en cuenta el efecto del suelo.

También se observan valores bajos de NDVI asociados a una cobertura baja o poco vigorosa. Los autores Holben (1986) y Chuvieco (2006), entre otros, señalan los valores 0.1 como valores críticos para cubiertas vegetales y los valores 0.5 y 0.7 correspondientes a una vegetación densa. El empleo del sensor Landsat en cultivos de cítricos data desde 1977 por Richardson et al., cuyo trabajo se basó en la identificación de la reflectancia espectral de huertos de cítricos para estimar su cobertura espacial. En este estudio, el sensor Landsat cumple con el requisito del tamaño de pixel para trabajos a escala parcela. Aún así, la heterogeneidad del suelo, efectos del clima, y la naturaleza perenne de este cultivo están presentes al momento de la captura de la imagen, son interferencias que alteran las mediciones realizadas por los sensores, provocando degradación en la calidad del dato que pueden modificar el comportamiento de un índice. El árbol de cítrico cuenta con una estructura permanente que sirve de reserva de carbono y nutrientes, conservando los efectos de año en año. En caso de alteraciones en su desarrollo, afectará el ciclo de la planta y su productividad. Estas alteraciones forman parte del ecosistema de la planta, que sumado a los detalles físicos del sensor puede producirse mediciones de cubiertas vigorosas y poco densas, o cubiertas densas con poca vitalidad. Este conjunto de causas-efectos hace más difícil relacionar las medidas de productividad con los valores de los índices. Resultados similares se obtuvieron en el trabajo de Shrivastava (2007), cuyo estudio correlaciona imágenes del sensor Landsat (bandas 3,4 y 5) con datos de producción de huertos de cítricos para estimar la cosecha por regiones.

Otro punto a tener en cuenta en este estudio, son resultados obtenidos que muestran una correlación débil tanto para NDVI como SAVI, aplicándose a éste último una corrección de 0.5 para el efecto del suelo, valor considerado a una cubierta vegetal intermedia por la distribución y ocupación espacial de los cultivos de cítricos de la zona. Se observara que SAVI no responde mejor que el índice NDVI para todos los casos, o sea la corrección no tiene la misma fuerza-efecto en las tres parcelas. Resultados similares pueden verse en el

trabajo de Mulianga et al. (2013), basado en la estimación de la producción del cultivo caña de azúcar con el índice NDVI del Sensor MODIS; dicho trabajo ajusta los valores obtenidos del sensor mediante el cálculo de mínimos cuadrados para lograr una correlación significativamente más fuerte.

Cabe destacar, que este estudio se realiza en entornos de agricultura no controlados, con fluctuaciones en los valores de producción. Gonzáles-Sicilia (1968) resalta el cuidado de los cultivos de cítricos, éstos requieren un adecuado sistema de gestión hídrico y un programa de nutrición equilibrado para cubrir necesidades específicas con el fin de lograr buenos resultados en cuanto a calidad y cantidad; árboles con riego adecuado crecen más, tienen una mayor tolerancia al estrés y a las plagas, con una mayor consistencia en la producción de sus frutos. Por otra parte, el suministro excesivo o niveles deficientes de agua o abono pueden ser también la causa de un descenso en el rendimiento total, así como en el tamaño de la fruta y diluido de contenido de sólidos solubles (Agustí, 2003). Teniendo en cuenta estas consideraciones, de las entrevistas realizadas a los productores, se detallan a continuación algunos factores que podrían haber afectado la producción:

- La parcela limón fino, tuvo poda tardía en el año 2006, lo que perjudica la producción para el siguiente año consecutivo.
- La parcela limón verna, presenta una variedad con hojas más pequeñas que lo regular, según entrevista, es por carencia de zinc, lo que puede producir a menor producción; además está situada en suelo arenoso, lo que significa que drena mejor pero posee menor capacidad de retención de la alimentación externa.
- La parcela mandarina clementina, se registra recolección de producción tardía (año 2006-2007) lo que desplaza todo ciclo de producción de la planta para el siguiente año.

Las interrupciones en el ciclo de producción de la planta conduce a una recuperación gradual y con varios años de recuperación para que vuelva a su máximo potencial (Agustí, 2003). Estas alteraciones pueden haber modificado el comportamiento de los índices, y en consecuencia dificulta el objetivo de estimación de rendimiento.

## 4.5. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran estar relacionados con la actividad productiva de la planta.

El modelo de regresión aplicado, se considera, refleja simplificadaamente la situación real de las parcelas, puesto que resulta difícil en retrospectiva, teniendo en cuenta la heterogeneidad de las variedades estudiadas, obtener mejores resultados.

A pesar de no poder asociar altos valores de IV para todos los años, los valores de correlación obtenidos se consideran significativos, en los cuales las variaciones de los valores de producción pueden influir en el resultado del análisis. Su aplicación será más exacta cuando mayor sea el control sobre el desarrollo del cultivo en cada año consecutivo, o si éstos se mantuvieran constantes. La habilidad de obtener mejores resultados por parte de este análisis se puede atribuir al medioambiente (condiciones medioambientales de las cubiertas), al rendimiento porque es inherentemente más difícil de modelar debido a los procesos adicionales en las prácticas de cultivo, hidrología del suelo, estrés hídrico en las plantas, importantes en su rendimiento (Grassini et al., 2009), y la capacidad del Sensor de capturar imágenes sin interferencias.

El empleo de los IV para minimizar problemas atmosféricos como alternativa podrían necesitar mayor ajustes a las condiciones atmosféricas específicas a cada caso en particular. Por ejemplo modificar la variable L de SAVI para cada parcela, y ver cuáles son las variaciones espectrales que se produce con éste ajuste alternativo. Esta última consideración teniendo en cuenta que el Sensor Landsat brinda acceso gratuito a su información histórica, y por lo tanto es accesible al público en general. Otra alternativa para mejorar los resultados podría ser emplear sensores de mayor resolución espacial y espectral como pueden ser el SPOT y AVHRR.

## REFERENCIAS

- Agustí, M. (2003). *Citricultura*, 2ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Anderson, L. Malhi, Y., Ladle, R., Aragaño, L., Shimabukuro, Y., Phillips, L. Baker, A., Costa, L., Espejo, J., Higuchi, N., Laurance, W., López-González, G., Monteagudo, G., Nuñez-Vargas, P., Peacock, J., Quesada, A., Almeida, S. (2009). Influence of landscape heterogeneity on spatial patterns of wood productivity, wood specific density and above ground biomass in Amazonia. *Biogeoscience*, 6: 1883–1902.
- Bocco, M., Sayago, G., Willington, E. (2007). Neural network model for land cover classification from satellite images. *Agric Technol*, 67:414–421.
- Bouman, A. M. (1995). Linking physical remote sensing models with crop growth simulation model applied for sugar beet. *Int. Journal of Remote Sensing*, 13:2565–2581.
- Bouvet, A., Le-Toam, T., Lam-Dao, N. (2009). Monitoring of the rice crop system in the mekong delta using envisat/asar dual polarization data. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 47:517–526.
- Cantó, G. (2008). Detección de estrés hídrico en árboles frutales mediante teledetección térmica de alta resolución espacial AHS e imágenes Aster. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba.
- Chuvieco, E. (2006). *Teledetección Ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona:Ariel ciencia.
- Clevers, J. (1997). A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 61:221–228.
- Gallego, J., Carfagna, E., Baruth, B. (2009). Accuracy, objectivity and efficiency of remote sensing for agricultural statistics. *Agric survey methods*,193–211.
- Gilbert, M. (1990). Caracterización radiométrica en el intervalo espectral solar de cultivo de cítricos. Modelo geométrico de reflectividad de aplicación en teledetección. Tesis Doctoral, Facultad de Física. Universidad de Valencia.
- Gilbert, M., Martínez, B. (2009). Vegetation dynamics from ndvi time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 113:1823–1842.
- Gómez, C. (1998). La Gestión Económica de los Recursos Naturales y sus Críticos. *Revista Asturiana de Economía*, 13:7–25.
- González-Sicilia, E. (1968). *El cultivo de los agrios*. 1ª Edición. De Bello: Valencia, España.
- Grassini, P., Yang, H., Cassman, K. 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: a simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agr Forest Methods* 8(149):1254-1265.

Guyot, G., Gu X. (1994). Effect of radiometric corrections on NDVI determines from SPOT-HRV and LANDSAT-TM data. *Rem. Sens. Of Environm.*, 49:169–180.

Holben, B. (1986). Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR Data. *Int. Journal of Remote Sensing*, 7(11):1395-1416.

Huete, A. R. (1988). A soil vegetation adjusted index (savi). *Remote Sensing of Environment*, 25(3):295–309.

Huang, J., Wang, X., Li, X., Tian, H., Pan, Z. (2013). Remotely sensed rice yield prediction using multi-temporal ndvi data derived from noaa's-avhrr. *PLoS ONE*, 8(8):e10816.

Jensen, J. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective 3rd Edition*. Upper Saddle River, NY, Prentice Hall.

Launay, M. Guerif, M. (2005). Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agric. Ecosyst. Environment*, 111:321–339.

Lobell, D., Asner, G. (2004). Cropland distributions from temporal unmixing of modis data. *Remote Sensing of Environment*, 93:412–422.

Mann, K., Schumann, A., Obreza, T. 2010. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. *Precision Agric.* 12:457–472.

Mass, S. (1988a). Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agron J.*, 80:662–665.

Mulianga, B. Bégue, A. Simons, M. Todoroff, P. (2013). Forecasting regional sugarcane hielos based on time integral and espacial agregaron of MODIS NDVI. *Remote Sensing*, 5:2184–2199.

Nuarza, I., Nishio, F. (2007). Relationship between rice growth parameters and remote sensing data. *J of Remote Sensing and Earth Science*, 4:102-112.

Ortíz-Montaserio, I., Lobell, D. (2007). Impacts of day and nights temperaturas increpases on spring wheat hielos: a compramos of empírica and CERES model predicciones in three locaciones. *Agrónomo Journal* 99:469-477.

Panda, S., Ames, D., Panigrahi, S. (2010). Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*, 2(3):673–696.

Richardson, A., Wiegand, C., Arkin, G., Nixon, P., Gerbermann, A. (1982). Remotely-sensed spectral indicators of sorghum development and their use in growth. *Agr Meteorology*, 26:11–23.

Rivas, R., Ocampo, D., Carmona, F. (2011). Modelo de predicción de rendimiento de trigo a



partir de ndvi: aplicación en el contexto de agricultura de precisión. In Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR- INPE , Curitiba, PR, Brasil, page 0584.

Rocha, A., Shaver, G. (2009). Advantages of a two band evi calculated from solar and photosynthetically active radiation fluxes. *Agr and Forest Metereology*, 149:1560–1563.

Shrivastava, R., Gebelein, J. (2007). Land cover classification and economic assessment of citrus groves using remote sensing. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61:341–353.

Sindhuja, S., Maja, M., Buchanon, S., Hsani, R. (2013). Huanglongbing (Citrus Greening) Detection Using Visible, Near Infrared and Thermal Imaging Techniques. *Sensor*, 13:2117–2130.

Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J., Martínez, P. (2009). Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of proba/chris data over an agricultural area. *Sensors*, 9:768–793.

Tinoco, A., Fonseca, A., Farías, V., Corral, A. (2008). Arreglo espacial de híbridos de maíz, índice de área foliar y rendimiento. *Agrio. Te.*, 34(3).

Townsend, J., Justice, C. (1986). Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index, *International Journal of Remote Sensing*, 7:1435–1446.

Tucker, C., Holben, B., Elginand, J., Mc-Murtrey, J. (1980). Remote sensing of dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11:171–189.

Ye, X., Sakai, K. (2012). Fruit yield estimation through multispectral imaging. *C. Biosystem Eng.*, 30:453–473.

Zhang, H., Chen, H., Zhou, G. (2012). To model of wheat yield forecast base on modis-ndvi a case study of Xinxiang. *Remote Sensing & Spatial Information Science* V:I–7.

Zhao, M., Heinsch, F., Nermani, R., Running, S. (2005). Improvements of the modis terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95:164–176.

Consejería de Medio Ambiente, Ordenación y Territorio [en línea]. Málaga. Información Sistema Productivo [20 septiembre 2011]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/>

Monteith J. 1965. Evaporation and environment. Disponible en <http://www.unc.edu/courses/2010spring/geog/595/001/www/Monteith65.pdf>.



# 5. RELACIÓN ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y PRODUCCIÓN

---



## 5.1. INTRODUCCIÓN

Las plantas obedecen a distintas características en su desarrollo a lo largo de su vida, particularmente los cultivos agrícolas, desde la etapa vegetativa que comienza en el momento de la siembra o injerto, hasta la cosecha involucrando el crecimiento de la semilla, el desarrollo del tallo y el desarrollo final con la reproducción o floración, cuando el fruto llega a su maduración y se produce la senescencia (Agusti, 2003). Este proceso es parte del estudio de la fisiología, la cual explica los mecanismos de crecimiento y desarrollo de las plantas y su respuesta a los agentes externos (desde sus funciones más simples como la absorción de agua, transporte de nutrientes, transpiración, nutrición, hasta las complejas como ser la fotosíntesis y respiración) (González-Sicilia, 1968).

A su vez, los cultivos agrícolas se practican en una amplia gama de agro-sistemas con variaciones en la temperatura (T). Existen plantaciones en zonas con climas que van desde muy secos a húmedos y/o muy fríos a muy calientes, y cada especie de cultivo tiene un umbral de temperatura que definen los límites superior e inferior para el crecimiento y la reproducción, junto con las temperaturas óptimas para cada etapa de desarrollo (Luo, 2011). También varían las propiedades del suelo, por su formación e historia de manejo, donde a su vez cada tipo de cultivo varía sus raíces, requerimiento de luz, humedad y materia orgánica, interaccionando con el entorno en el que se presentan y reaccionando a ese ambiente de distintas maneras (Ernst et al., 2011). Por lo tanto, las plantas están en constante interacción con el medio que las rodea, destacándose el clima puesto que influye en su crecimiento, desarrollo y producción y cuyos factores no se comportan por igual durante todo el ciclo de vida. El clima es un recurso renovable, variable en el tiempo y en el espacio, debiendo éste ser el apropiado puesto que cada especie tiene su exigencia climática (Verstraeten et al., 2008).

Entre las variables climáticas que influyen en el crecimiento y producción están la temperatura, que juega un papel importante en el desarrollo de la planta puesto que influye en el proceso de la fotosíntesis y respiración, y por consiguiente en los principios activos como ser las tasas de desarrollo vegetal, definiendo la aparición de las diferentes fases fenológicas y la duración de las mismas (Pérez-Azuke et al., 2003; Slafer et al., 2011). La luz tiene una estrecha relación con la temperatura y varía con la estación del año y la hora del día, siendo menor en otoño-invierno a causa de la inclinación de los rayos solares y mayor grado de nubosidad; la precipitación es importante por cuanto modifica los efectos ecológicos de otros factores, como ser regulador de temperaturas; y, además, influye en la distribución geográfica de la plantas; la radiación solar define la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. Por lo que se deduce, el cultivo, se ve afectado no sólo por las características en que se desarrolla sino también por el clima al que está expuesto (Craufurd et al., 2009).

Sobre todo en los procesos agroclimáticos, la inter-relación clima cultivo debe conjugarse adecuadamente para que las fases fenológicas, definida como las etapas biológicas de un cultivo, se establezcan y se propicie el correcto desarrollo de la planta (McCloy, 2010). Por lo tanto la inter-relación entre ecosistema-atmósfera se espera sea homogénea dentro de una misma región, de otra manera un cultivo no puede desarrollar todas sus fases fenológicas si crece en condiciones climatológicas diferentes a su región de origen. Los ciclos fenológicos son indicadores importantes de la producción, gestión y planificación de riego, dichas fases están controladas principalmente por la temperatura, el fotoperiodo y el estrés hídrico (Lu et al., 2011); ante una situación de cultivo y manejo homogéneos, las variaciones de crecimiento y rendimiento espaciales y temporales se presentan con mayor evidencia en respuestas a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y del terreno (Ernst, 2011; Corsi et al., 1982).

El estudio de la evapotranspiración (ET) en el tiempo y en el espacio es un parámetro básico y fundamental para el estudio del clima, las previsiones y modelización meteorológicas, monitoreo ecológico y la gestión de los recursos hídricos (Hoedjes et al. 2007). Además, su evaluación es empleada para el monitoreo de la superficie terrestre, procesos de vegetación y dinámica del carbono, detección de contaminación, flujo de nutrientes, detección de incendios, balance de carbono (Verstraeten et al., 2008). Para regiones agrícolas, permite detectar estrés en cultivos, deficiencia de agua, falencias potenciales para obtener los mejores rendimientos, etc., y cuantificación de la variabilidad espacial en las variables hidrológicas de superficie y terrestre (McCabe et al., 2006). El cálculo de ETP responderá mejor para aquellas zonas de mucho brillo solar, con una buena relación entre la duración del día y radiación (Corsi et al., 1982).

El cálculo de ET en cultivos se refiere a la cantidad de agua usada por un cultivo en todas sus etapas de crecimiento, desde la siembra o injerto hasta la cosecha. Tanto el rendimiento del mismo como la ET de temporada están influenciados por una variedad de factores, como ser el tipo de cultivo, medio ambiente atmosférico, prácticas de cultivo y las condiciones del suelo, que incluyen el suministro de agua y nutrientes, etc. (Liu et al., 2002). Los tres principales factores de control de ET son la disponibilidad de agua, la cantidad de energía radiante y el mecanismo de transporte para eliminar el vapor de agua de la superficie. Los dos factores antes mencionados a su vez dependen de otras variables como la humedad del suelo, temperatura de la superficie terrestre, la temperatura del aire, la cubierta vegetal, la presión de vapor, velocidad del viento, etc., que, varían según la región, la temporada, y el momento del día (Batra et al., 2006), determinante en muchos casos porque su acción incrementa la evapotranspiración (ET) lo que tiene un efecto importante en el desarrollo de la planta.

Para una región geográfica específica, la ET representativa puede ser expresada como evapotranspiración potencial (ETP), o como evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), que es la forma utilizada en la actualidad (ASCE, 1990). Se define como la tasa de evapotranspiración que ocurre a partir del conjunto de suelo húmedo y plantas cuando no existen limitaciones de agua, y representa la evapotranspiración máxima que podría ocurrir a partir de una superficie cubierta con vegetación. La necesidad de los cultivos generalmente se estima a partir de los datos de coeficiente de cultivo y de la ETP, el primero es un valor morfológico propio de cada cultivo y el segundo una variable que depende del clima de una zona (Doorenbos, 1976).

El concepto clásico de ETP cambia a consecuencia de estudios realizados en zonas semiáridas y áridas. Perrier (1984) propone como alternativa el concepto de evaporación potencial EP, definida como la evaporación que sucede cuando toda la superficie está saturada de agua, de manera que no haya ninguna restricción de humedad. El concepto de evapotranspiración potencial fue definido por Thornthwaite en 1948 como el máximo de evapotranspiración que depende únicamente del clima. Según Thornthwaite no hay ninguna restricción de agua en el suelo y su magnitud depende exclusivamente del clima, para su evaluación no se definió la superficie evaporante. En 1956, Penman, define la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua transpirada por un cultivo corto de césped que cubre el suelo en su totalidad y sin ninguna falta de agua. Se define a la evapotranspiración potencial por Papadakis en 1980 como la cantidad de agua que se necesita para obtener una vegetación o un rendimiento cercano al óptimo.

Su medición directa resulta difícil y costosa económicamente, además su cálculo depende de variables de energía y flujo latente, que para años ya pasados sólo es posible extraerlos a través de datos derivados de sensores de satélite (Spiliotopoulos, 2012), por lo que este parámetro viene siendo estudiado aplicando valores de reflectancia obtenidos por sensores de satélite en combinación con otro parámetro. De esta manera, su cálculo mediante sensores



de satélites resulta útil logrando obtener gran cantidad de información, en comparación a los métodos convencionales (Diofantos et al., 2013). Los algoritmos para este cálculo se han desarrollado en los últimos años variando su complejidad; un listado de los mismos se encuentra en el trabajo realizado por Verstraeten et al. (2008), el cual, con sus ventajas y desventajas, los clasifica de la siguiente manera: algoritmos basados en (i) Parametrización del balance de energía, (ii) Fórmula Penman-Monteith, (iii) Balance hídrico y (iv) relación entre índices de vegetación (VI) con la temperatura de la superficie. Dichos algoritmos han resultado adecuados para la estimación del consumo de agua en cultivos o ET, y la tendencia espacial del mismo en el tiempo (Allen et al., 2007), así como ha sido el empleo de técnicas de teledetección en las estimación de ETP y gestión de recursos hídricos, monitoreo ambiental, eficiencia de prácticas agrícolas, análisis global de vegetación, dinámica del clima y ecología ha sido ampliamente reconocido (Papadavid et al., 2010).

Si bien para muchas regiones esta predicción no está generalmente disponible con una resolución espacial adecuada a la heterogeneidad superficie (diversidad agrícola) representa un reto la comprensión del papel de la heterogeneidad del paisaje y su influencia en el comportamiento de la escala de flujos de superficie como observados por sensores satelitales con diferentes resoluciones espaciales (Gibson et al., 2013). Los satélites de observación son el único método viable para medir variaciones a escalas pequeñas y regionales y examinar la misma región con características espaciales, espectrales y temporales diferentes, además que permiten caracterizar el comportamiento hidrológico de la superficie terrestre en forma continua (Mu et al., 2007; McCabe et al., 2006).

Los datos de las plataformas de satélites Landsat-ETM (60 m), ASTER (90 m), y MODIS (1.020 m) pueden emplearse para estimar la evapotranspiración. Dichos sensores poseen un rango de resolución que permite análisis que abarcan escalas in situ (referente a las mediciones realizadas por torres) hasta escala altura de un kilómetro como el caso del Sensor MODIS (McCabe et al., 2006). Estos sensores han demostrado su capacidad para obtener datos de flujo de la superficie, principalmente lo referente al estado de los cultivos, su etapa de crecimiento y humedad del suelo, pudiendo inferirse a la evapotranspiración que se produce en cada uno de estos factores, y mostrando buena concordancia aun en escalas grandes como es el caso del Sensor MODIS; siendo en este caso importante mantener la consistencia de los factores antes mencionados, ya que la capacidad de identificar las distribuciones específicas de los cultivos es limitada cuando la escala de longitud de la heterogeneidad de la superficie es menor que la resolución de detección (McCabe et al., 2006).

Los sensores remotos pueden auxiliar a los estudios fenológicos de la vegetación (Justice et al. 1985) y a la inversa, la interpretación de los datos provenientes de sensores remotos puede explicarse considerablemente al aplicar los conocimientos sobre los cambios fenológicos locales en los estudios de imágenes que han sido obtenidas en diferentes fechas del año (Barret et al. 1992). El nuevo producto en evaluación MOD16A2 de MODIS cuenta

con cálculos de ET y ETP a nivel global sin necesidad de recurrir a interpolación de datos (Puelo, 2008), su cálculo se basa en el método propuesto por Mu et al (2011), y ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Distintos trabajos han demostrado la fiabilidad de este producto en la estimación de ET y ETP en relación a otros cálculos realizados usando datos de sensores remotos (Ruhoff et al., 2013; García et al., 2012), coincidiendo además con valores cercanos a los calculados en terreno según los resultados encontrados por Mu et al. (2007).

Se considera importante el cálculo o estimación de ETP para el monitoreo del balance hídrico a escalas locales y regionales para conservar y gestionar los recursos hídricos (Melesse et al., 2006), particularmente a la luz de los efectos del clima (Gibson et al., 2013) y sobre todo importante en las zonas del Mediterráneo donde los recursos hídricos tienden a ser limitados (Minicapilli et al., 2009).

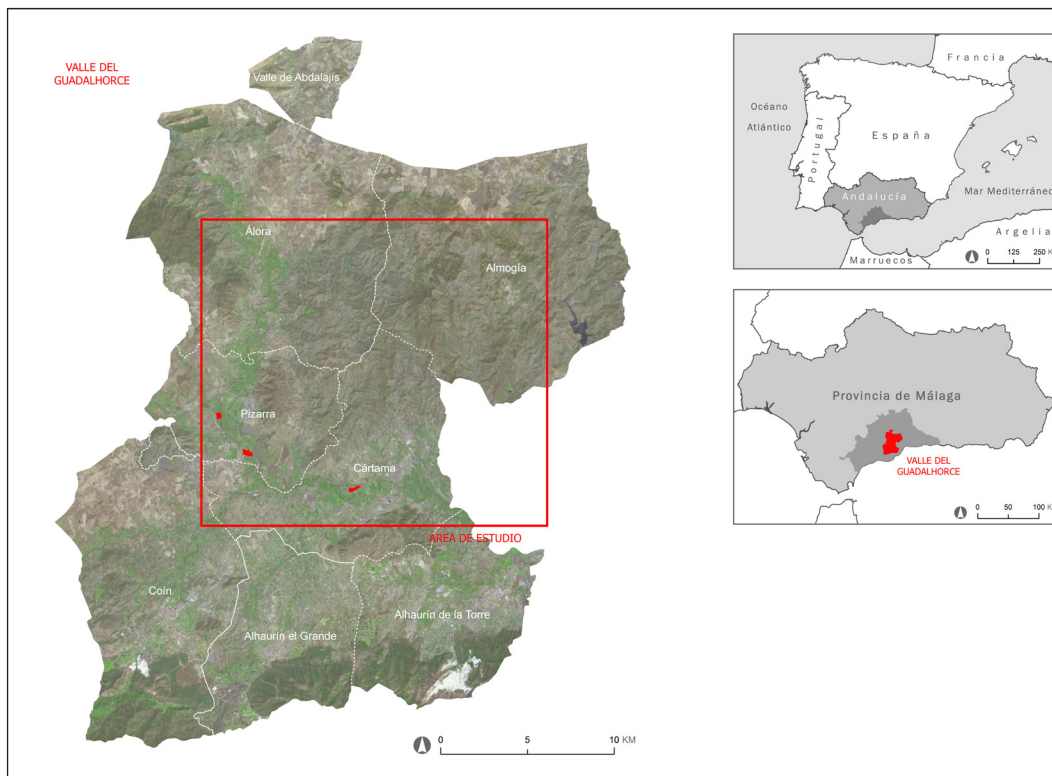
El objetivo general de este trabajo es conocer la respuesta de las plantas a las variables climáticas en la zona del valle de Guadalhorce para el periodo 2000-2011. Para ello se extraen los valores de ETP mensuales correspondiente a las tres fincas de cítricos situadas en el valle, se compara y explica el comportamiento entre estos tres puntos, su respuesta al clima, variación en el tiempo y relación con el rendimiento de producción. Además identificar y estudiar la variación espacial de la productividad de los cultivos e identificar su asociación con los valores de ETP obtenidos por sensores de satélite. Identificar cambios que pudieran producirse en la estimación de ETP de cultivos y la producción afectados por la variabilidad temporal y espacial climática. Caracterizar el comportamiento hidrológico ETP de la región mediante la creación de mapas.

## 5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.2.1. Zona de estudio

Se analiza el Valle de Guadalhorce, región que se encuentra situada entre los paralelos 36° 42' 30.04" N y 4° 34' 36.14" S, Fig. 5.1. Resumiendo la información presentada en el capítulo 2 (pto 2.2.2), ésta zona corresponde al área con mayor concentración de cultivos de cítricos. Se encuentra a 220 m de altitud sobre el nivel del mar y a 3 km de la costa mediterránea. La temperatura oscila 35°C en verano y los -5°C en invierno. Según informe Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2004), la pluviometría media anual es de 472 mm, y la evapotranspiración media potencial anual es de 1.272 mm. Corresponde

a una zona cuya mayor precipitación se da solo en los meses de invierno, por lo tanto en general carece de suministro de agua del suelo y se recurre al agua de riego.



**FIG. 5.1** Mapa ubicación del area de estudio con la ubicación de las parcelas de cítricos de referencias

### 5.2.2. Imágenes satelitales

El producto seleccionado es el NASA MOD16A2/A3 (Monthly Evapotranspiration Product) collection 5, un proyecto EOS de la NASA para estimar la evapotranspiración terrestre global de la superficie mediante uso de datos obtenidos por satélite, disponible en el siguiente sitio Web <http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod16>, provisto cada 8 días y mensual con 1000 metros de resolución espacial. Las observaciones están filtradas según la calidad, y disponibles con y sin nubes, nadir view pixel sin contaminación atmosférica. El área seleccionada, para este estudio, corresponde a las coordenadas de la cuadrícula h17v5 de MODIS, valores mensuales. Para mayor información, ver la descripción realizada en el capítulo 2.

Las aplicaciones usadas para manipular el formato específico de las imágenes MODIS HDF-EOS fue ArcGIS Map v10.1 del paquete ArcGIS Desktop. Se importaron las imágenes seleccionadas aplicando proyección UTM y método vecino más próximo, se generaron las imágenes en formato Geo-TIFF, cada una con su respectivo archivo de metadatos MET. Se utilizó la aplicación Land Data Operational Program Evaluation (LDOPE) de evaluación operacional de productos MODIS para comprobar el estado de las nubes y calidad de los datos en todas las imágenes (fueron excluidas aquellas imágenes con nubes en el área de estudio). Luego fueron importadas a la aplicación GRASS-Gis v.6.4 que se incluye con el paquete OSGEO, y se recorta el Valle de Guadalhorce con un vector que delinea su figura.

Se procede como se explica en el sitio Web oficial, el producto MOD16A2 emplea el algoritmo para el cálculo de ET corresponde a Mu et al. (2011), basado en la ecuación de Penman-Monteith (1965). El valor ETP mensual (0.1mm/mes) es la suma diaria de su valor para ese mes, teniendo en cuenta que en este periodo de estudio, los años bisiestos (2000, 2004, 2008) tienen 366 días. Se realizó el cálculo multiplicativo por el valor 0.1 para obtener el valor real ETP en mm/mes. El rango válido de los valores diarios y mensuales de ET es de -32767 hasta 32767. La tabla 5.1 siguiente describe el significado de este rango para el valor ET/ETP día/mes.

<b>TABLA 5.1. RESUMEN SIGNIFICADO DE LOS VALORES ET/ETP DEL PRODUCTO MOD16A2 PARA VALOR DÍA/MES</b>	
Valor ET/PET día/mes	Corresponde a
32767	valor de llenado/corriente que fluye hacia fuera de la tierra
32766	cuerpo de agua
32765	estéril o poca vegetación
32764	hielo o nieve permanente
32763	tierra húmeda permanente
32762	urbanización o construcción
32761	no clasificado

### 5.2.3. Análisis de evapotranspiración potencial (ETP)

El producto MOD16A2, se compone de información derivada de los sensores MODIS, y viene siendo muy usado para analizar y conocer la variables ETP. Se elige este producto por su facilidad de uso, ya que además existen trabajos que confirman tiene un

alto potencial para la descripción de la dinámica temporal del consumo de agua de los ecosistemas terrestres (Alfredo et al., 2011), y la relación que existe entre la variable ET/ETP y los valores medidos en terreno (García et al., 2008). Este análisis utilizó la variable ETP, cuyos valores fueron extraídos del píxel correspondiente a la ubicación geográfica de las parcelas de cítricos. Se procedió como se explica en el sitio Web, se multiplicó el valor de píxel extraído por 0.1 para obtener el valor real, a continuación se exportaron dichos valores a una planilla de cálculo para ser comparados en una serie de tiempo, identificando el comportamiento para la zona. La Tabla 5.2 muestra las correspondientes coordenadas geográficas de las fincas de cítricos.

Además se realiza un análisis de regresión empleando el coeficiente de correlación de Pearson, representada por  $r$ , que mide la fuerza de la relación entre la variable ETP (variable independiente) de cada parcela y la producción (variable dependiente) de las mismas. Esto permitió analizar el grado de asociación entre estas variables, usando la aplicación R v3.0 para determinar la relación y sentido de la asociación.

TABLA 5.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PÍXELES DE LOS QUE SE EXTRAEN INFORMACIÓN			
Finca	Coordenada UTM (Huso 30)		Altitud
	X	Y	
(a)	4067831N	347544E	84.0
(b)	4069886N	346678E	95.0
(c)	4069931N	345803E	97.0

## 5.3. RESULTADOS

### 5.3.1. Comportamiento de ETP

Los valores ETP estimados se realiza sin ningún conocimiento de valores de ET físico para la zona en su conjunto, la Fig. 5.2 presenta las estimaciones para cada año para las tres parcelas de referencia. Como es de esperar las respuestas son muy similares entre sí, a excepción de los años 2008 y 2010, meses de mayo y junio respectivamente. Las gráficas, en general, coinciden con finales de primavera y comienzo de verano; en todas ellas se observa una tendencia hacia arriba comenzando en marzo hasta octubre, correspondiendo a los meses más cálidos y menor pluviometría en la zona, lo que explica que ETP sea

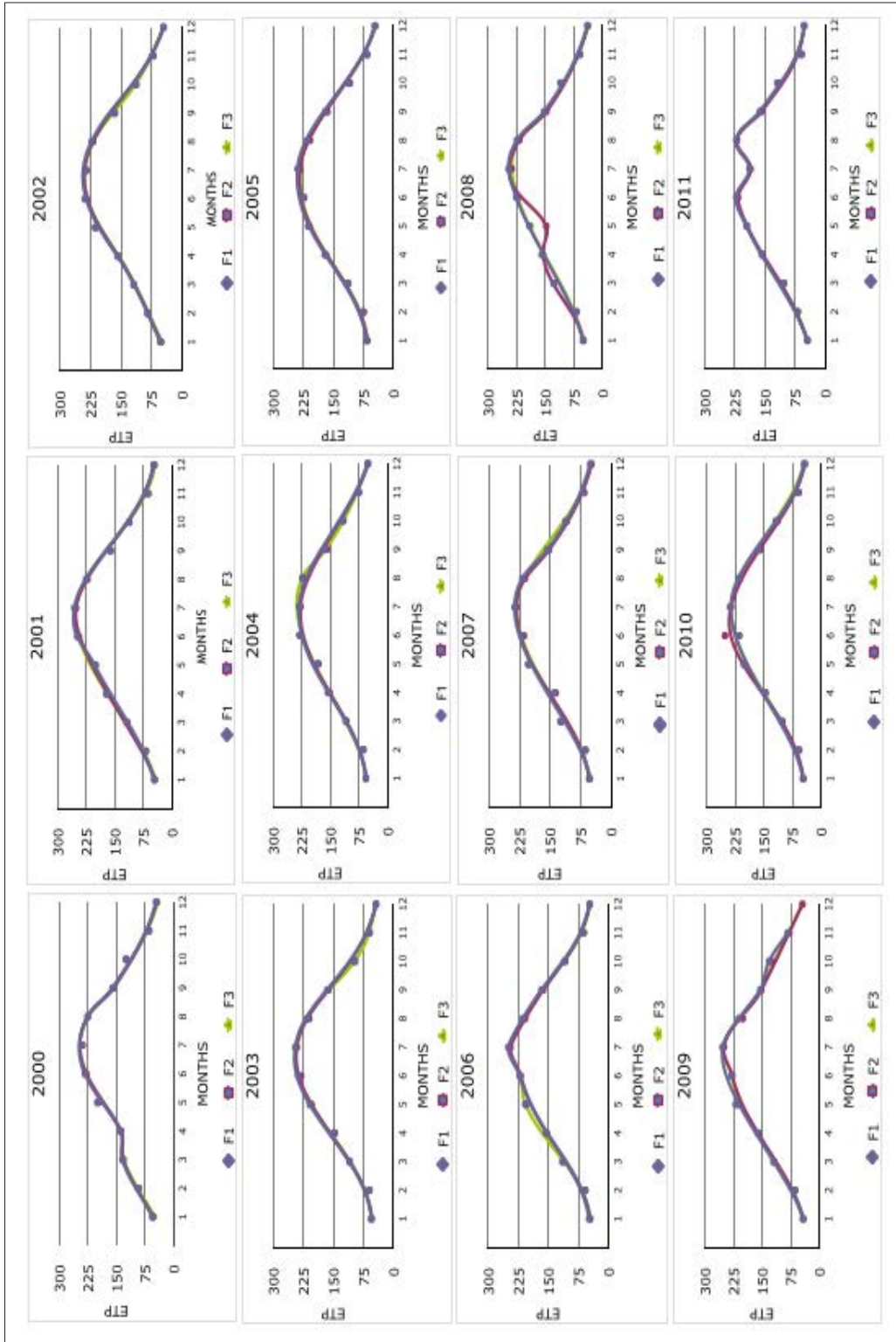
mayor en este periodo. La tabla 5.3 muestra el mismo comportamiento con los valores individuales de cada parcela. La Fig. 5.6 muestra los valores ETP representativos para el Valle de Guadalhorce para el periodo 2000-2010.

### *5.3.2. Valores promedios de ETP para la zona*

Para los años analizados aquí, los valores de ETP más altos corresponden a 2008, 2009 y 2010. Las siguientes figuras, Fig.5.3 (a) correspondiente a limón fino, Fig. 5.4 (b) limón verna y Fig. 5.5 (c) mandarina clementina muestran el patrón estacional de ETP, tiene tendencias similares a las medidas por las estaciones de Cártama y Pizarra, según información provista por el servicio online por parte del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente (2015), agencia estatal de meteorología, especialmente para la temporada de verano. Para el caso de (a), el año de mayor rendimiento de producción (2011) no corresponde al máximo valor de ETP, que para esta parcela sería el año 2001. En el caso de (b), el año de mayor producción fue el 2008, con también máximo valor ETP. Para este caso es posible asociar la producción en relación a mayor evapotranspiración potencial obtenida en el mismo año. Para el caso (c). El año de mayor producción fue el 2010, con máximo valor obtenido de ETP pudiéndose asociar también ambos valores.

### *5.3.3. Análisis de Regresión*

La aplicación del análisis de regresión ha permitido conocer el grado de asociación que presenta para este caso las variables producción y ETP, se cargan los datos a un archivo de texto y usando el la aplicación R. v3.3 se realiza el análisis. La Fig. 5.7 muestra el resultado de la relación de las variables rendimiento de producción y ETP tomando como referencias las mismas fincas estudiadas hasta el momento. El resultado para todos los casos se muestra débil, con valores cercanos a cero.



**FIG. 5.2. Respuesta de los niveles de ETP para el periodo 2000-2011 para las tres parcelas limón fino, limón verna y mandarina clementina**



**TABLA 5.3. VALORES ETP DE LOS PÍXELES DE LOS QUE SE EXTRAEN INFORMACIÓN PARA LAS TRES PARCELAS**

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
2000	(a)	55.3	91.3	134.2	139.5	200.2	232.6	240.3	225.1	160.1	123.9	64.9	45.7
	(b)	54.1	92.6	131.8	137.6	197.3	228.7	238.9	225	157.7	124.7	63.9	44.7
	(c)	49.6	88.7	130.4	138.6	197.6	228.9	240.1	225.5	158	124.3	63	41.1
2001	(a)	45.9	69	119	172	203	248	256	225	162	112	62.7	46.1
	(b)	46	69.3	117	171	200	244	252	222	161	112	64	47.9
	(c)	42.8	65	115	168.5	202.2	246.2	252.4	223.7	161.8	111.6	58.6	43.7
2002	(a)	52.3	83.4	118.5	158.5	213.6	239.1	236.4	222.5	167	113.1	70.1	45.8
	(b)	52.4	84.5	118.7	52.4	118.7	157.1	55	211.3	234.9	234.9	218.7	164.6
	(c)	48.8	82.5	118	155.7	210	235.8	234.9	218.3	165.4	114.6	75.2	44.7
2003	(a)	54.8	60.2	109.2	149.3	208.7	237.6	244.9	215.2	164.9	97.5	60.2	43.4
	(b)	55	60	109	146.4	204.4	230.3	240.9	210.3	162.1	95.4	59.4	43.2
	(c)	53.4	59.1	108.5	145	204.3	231	244.1	214.3	164.2	97	60.8	43
2004	(a)	56.4	64	109.8	156.7	185.2	231.4	232.2	223.8	164.2	118.3	76	52.5
	(b)	57	63.5	107.8	152.3	181.2	228.9	228.2	220	159.2	115.7	75	50.7
	(c)	55.3	63.1	107.4	152.5	182.2	229.5	229.3	224	162.3	117.6	77	51.2
2005	(a)	67	76.1	115	171.6	212.6	225.9	239.3	214.9	15.8	112.2	65.3	46.7
	(b)	65.1	74	112.8	168.1	210.3	222.8	233.1	208.2	17.7	108.5	65.8	45.5
	(c)	64.2	74.3	113.3	167.7	209	223.4	232.6	211.7	17.6	109.8	66	44.5
2006	(a)	232.6	59.2	114.9	153.9	207.3	221.8	250	213.9	167.3	109.8	62.7	47.1
	(b)	228.7	57.8	112.8	155.7	206.4	219	244.4	207.8	162.9	107.9	61.9	46.5
	(c)	228.9	56.5	110.7	155.3	207.3	219.5	246.8	210.2	166	108.5	59.1	45.6
2007	(a)	51.9	63.2	124.1	140.4	202.7	219.6	237.3	218.1	156.8	112.2	69.9	51.2
	(b)	53.7	62.7	122.4	135.8	202.6	214	232.6	211.5	152.5	108.7	65.8	47.7
	(c)	51.6	61.6	120.5	136.7	203.8	214	232	212.6	154.9	109.2	66	48.2
2008	(a)	51.5	69.6	128.9	159.8	191.7	226.2	246.5	224.6	153.4	110.8	60.3	39.8
	(b)	49.8	68.2	127.4	156.4	147.8	223	238.2	218.6	147.5	106.8	58.9	38.8
	(c)	49.5	68.3	125	157.1	187	223	237.9	220.1	149.3	108.6	57.5	37.6
2009	(a)	42.7	64.3	120	161.2	219	254	211	211	155	118	82.7	45.3
	(b)	41.2	63.2	119	158.9	213	250	201	201	152	114	78.3	43.7
	(c)	40.5	62.8	118	158.4	217	251	201	201	154	118	80.2	44.8
2010	(a)	47	58.9	103	147	202	214	239	217	164	118	61.1	43.4
	(b)	45.7	56.7	101	145	200	252	235	212	159	114	58.1	42
	(c)	46.6	58.3	101	145	198	212	236	212	161	118	61.2	44.8
2011	(a)	44.6	69.2	103	158	196	222	189	222	163	120	61.1	51.9
	(b)	43.8	68.1	103	156	195	217	186	220	159	115	58.1	52.7
	(c)	44.3	67.9	103	155	195	219	187	222	162	118	61.2	52.5

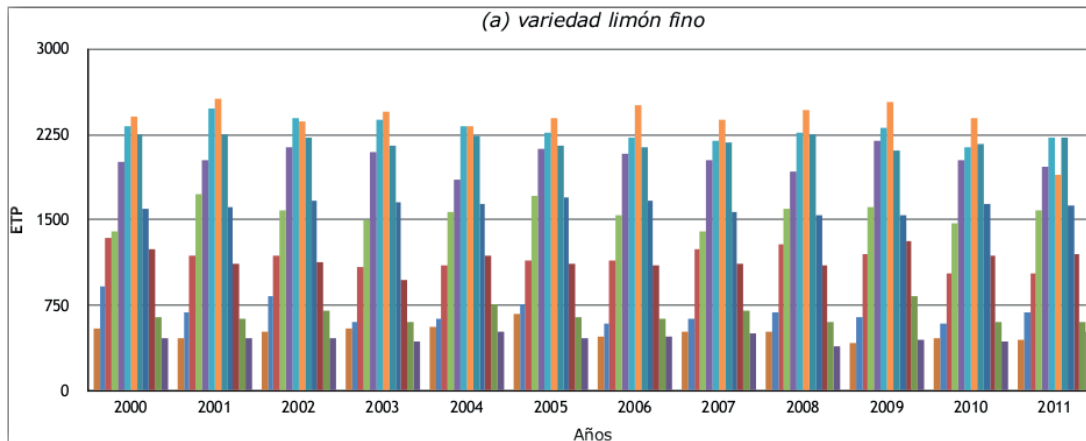


Fig. 5.3. Valores de ETP de la variedad limón fino para el período 2000-2011.

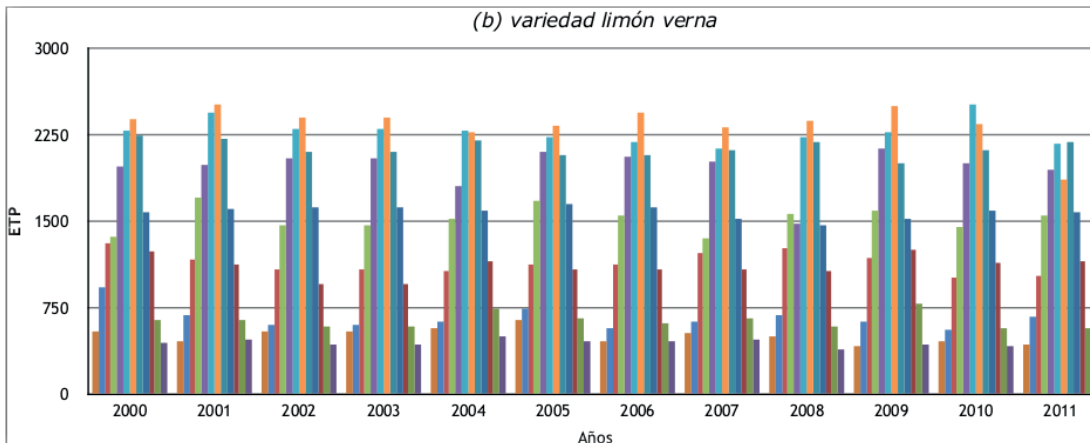


Fig. 5.4. Valores de ETP de la variedad limón verna para el período 2000-2011.

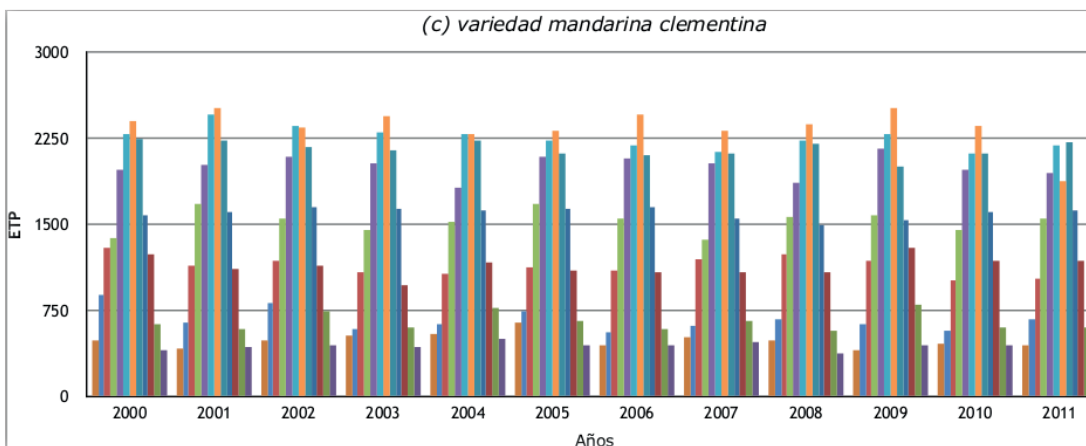
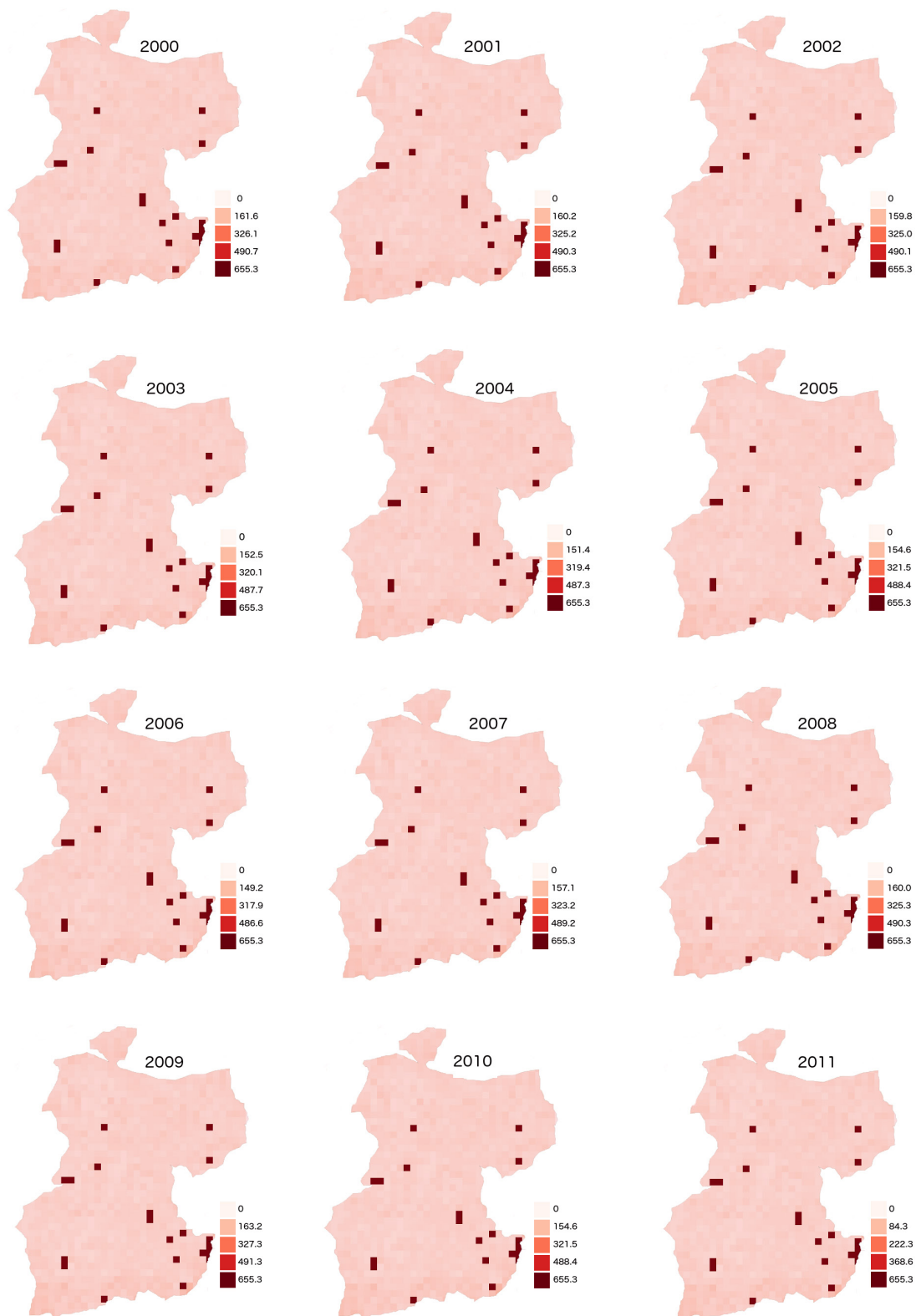
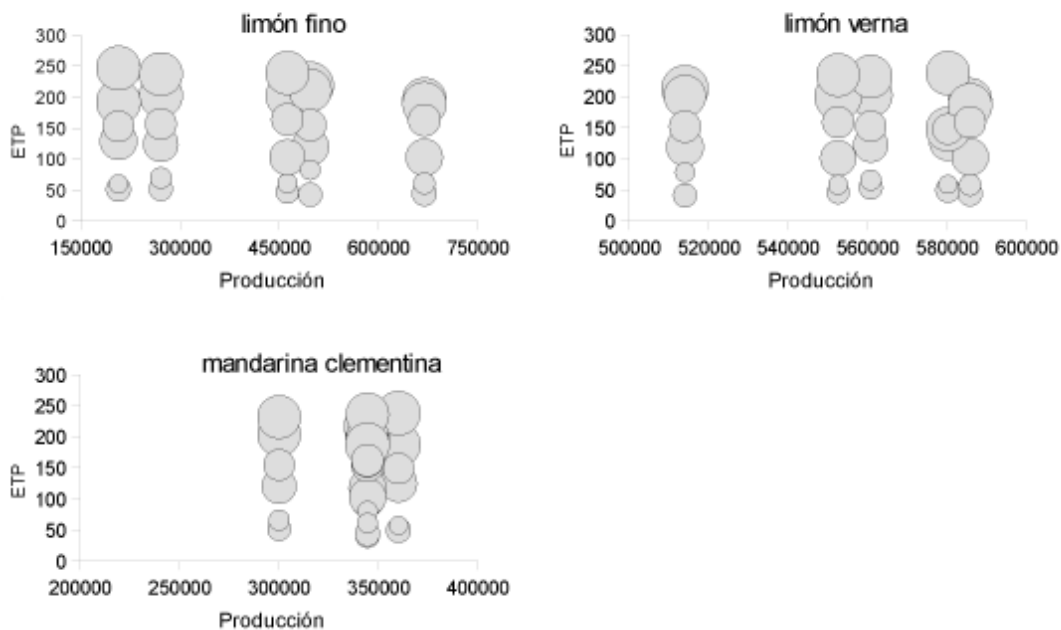


Fig. 5.5. Valores de ETP de la variedad mandarina clementina para el período 2000-2011.



**Fig. 5.6. Mapas del Valle de Guadalhorce con los valores ETP representativos**



**Fig. 5.7. Gráfica de dispersión del análisis de regresión de Pearson para los tres puntos geográficos de referencia (a)  $r = 0.0004$ , (b)  $r = 0.0007$ , (c)  $r = 0.001$  para el periodo 2000-2011**

## 5.4. DISCUSIÓN

En la actualidad, la agricultura de regadío es el principal consumidor de los recursos de agua dulce; que representa más del 70 por ciento del agua que se extrae de los lagos, ríos y acuíferos subterráneos (Wisser et al., 2008). El uso del suelo es una variable categórica a nivel regional, afecta el volumen de escurrimiento superficial y la velocidad del flujo que a su vez influencia la infiltración y la erosión del suelo. El uso de la tierra afecta en gran medida la evapotranspiración y, en consecuencia, teniendo en cuenta también el efecto ya mencionado de la infiltración, recarga difusa, y la escorrentía del agua en superficie, que puede producir erosión (Castilla et al., 2007).

Para los doce años de estudio, ETP tiene una tendencia estable, correspondiendo con la variabilidad climática regional. Por otro lado, para esta zona geográfica, en otoño hay aumento de precipitaciones y disminución de ETP; el suelo comienza a recargar agua alcanzando su mayor nivel en invierno. Esto se refleja en los valores obtenidos a finales del invierno, que disminuye con la llegada de la primavera, disminuyendo el agua almacenada por aumento de evapotranspiración.

El aumento del rendimiento de un cultivo por hectárea atrae un aumento en la demanda de nutrientes (Prieto et al., 2009), y con ello la ETP. La variación de 2008 y 2010 correspondiente al cultivo limón verna puede deberse a que a algún cambio en el manejo de la producción produciendo efectos de erosión en el suelo; la intensidad de labranza, el cultivo y fecha de cosecha (así como la de siembra) puede afectar significativamente la pérdida de escorrentía y el suelo, produciendo variaciones en los valores obtenidos.

La correlación de estos dos parámetros y los grados de afectación se muestra difícil debido a que la resolución espacial del producto usado limita su nivel de detalle. La complejidad de cultivos arbóreos bajo este estudio y la pequeña dimensión de las parcelas imponen severas limitaciones a la aplicación de técnicas micrometeorológicas. Se deduce que para este caso particular, los valores obtenidos por sensores de satélite, no muestran correlación significativa entre estos dos parámetros.

## 5.5. CONCLUSIÓN

Si bien la práctica agrícola es de aumento en la región, con cambios en la estructura del suelo por prácticas culturales, el laboreo de la tierra, nuevos acuíferos, cambios de cultivos, instalación de sistemas de regadíos, etc. realizados en este periodo de estudio, ha provocado seguramente cambios en el ecosistema de la región. La información aquí procesada manifiesta que el crecimiento es lineal, sin cambios drásticos.

En relación al análisis de regresión, se realiza sobre los años 2000-2011, su fin es conocer si existe relación entre el rendimiento de producción y el parámetro ETP estimado empleando el producto MOD16A2 del Sensor MODIS, cuya escala es de 1km. La heterogeneidad de la superficie que se estudia es menor que la resolución de detección, por lo que se valores aquí indicados son referentes a toda la zona en general.

## REFERENCIAS

- Agustí, M. 2003. Citricultura, 2ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) model. *ASCE J Irrig Drain Eng.*, 133(4):380–394.
- Barrett, E., Curtis, L. (1992). *Introduction to Environmental Remote Sensing*, 3rd ed (p 426) Chapman & Hall: London.
- Batra, N., Islam, S., Venturini, V., Bisht, G., Jiang, L. (2006). Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sens. of Environm.*, 103:1–15.
- Castilla, G., Hay, G. (2007). Uncertainties in land use data. *Hydrology System Sciences*, 11:1857–1868.
- Corsi, W. (1982). Regionalización agroclimática para cultivos. Ministerio de Agricultura y Pesca. Centro de Investigaciones Agrícolas Dr. Alberto Böerger, (p 29) Estación Experimental Agropecuaria La Estanzuela. Miscelanea. Uruguay.
- Craufurd, P., Wheeler, T. (2009). Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of experimental Botany*, 60(9):2529-2539.
- Diofantos, G., Papadavid, G. (2013). Remote Sensing for determining evapotranspiration and irrigation demand for anual crops. (Chaper 2) Cyprus University. Cyprus.
- Doorenbos, J. (1976). Agro-metereological field station (FAO irrigación and drainage paper 27). Food and Agricultura Oranization of United Nation (FAO). Rome.
- Ernst, O. (2011). Limitaciones para la productividad de trigo y cebada. CYTED Eds. Castro, Hoffman, Viega (p 202): Ciencia y tecnología para el desarrollo. Universidad Rep. Uruguay. Uruguay.
- García, A., Campos, A. Di-Bella, C., Posse, G. (2012). Evolución de la evapotranspiración en diferentes coberturas vegetales de la argentina utilizando productos derivados del sensor MODIS. Congreso Argentino de teledetección.
- Gibson, L., Jarmain, C., Eckardt, F. (2013). Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System – A South African perspective. *African Journal Online*, 39:4.
- González-Sicilia, E. (1968). El cultivo de los agrios. 1ª Edición. De Bello: Valencia, España.
- Hoedjes, J., Chehbouni, A., Ezzahar, J., Escadafal, R., De-Bruin, H. (2007). Comparison of large aperture scintillometer and eddy covariance measurements: can thermal infrared data

be used to capture footprint-induced differences. *J. Hydrometeorol.* 8, 144–152.

Justice, C., Townshend, J., Holben, B., Tucker, C. (1985). Phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Intern. J. Remote Sensing* 8(6):1271–1318.

Kustas, W., Norman, J., Schmugge, T., and Anderson, M. (2004). Mapping surface energy fluxes with radiometric temperature. *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes*, 205–253.

Liu, W., Hunsaker, D., Xie, X., Wall, G. (2002). Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency from marginal analysis of water production functions. *Agricultural Water Management* 56:143–151.

Lu, N., Chen, S., Wilske, B., Sun, G., Chen, J. (2011). Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology* 4:49–60.

Luo, Q. (2011). Temperature threshold and crop production: a review. *Climate Change*, 109:583–598.

McCloy, K. (2010). Development and Evaluation of Phenological Change Indices Derived from Time Series of Image Data, *Remote Sensing*, 2:2442–2473.

Mu, Q., Heinsch, F., Zhao, M., Running, S. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* 111:519–536.

Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. Disponible en <http://www.unc.edu/courses/2010spring/geog/595/001/www/Monteith65.pdf>

McCabe, M., Wood, E. (2006). Scale influence on the remote sensing of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Science direct*, 105:271–285.

Pérez-Azkue, M., Puche, M. (2003). La temperatura como herramienta de predicción agroclimática aplicada a la producción de frutales. *Revista Digital del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela*.

Melesse, M., Oberg, J. (2006). Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: An energy balance and remote sensing approach, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 42(3), 565–582.

Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4–22.

Papadavid, G., Hadjimitsis D. (2010). An integrated approach of Remote Sensing techniques and micro-sensor technology for estimating Evapotranspiration in Cyprus. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal, Manuscript* 3(12)1528.



Prieto, S., Ernst, O. (2009). Manejo del suelo con pastures sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. En: Primer Simposio Nacional de Agricultura de Secano. Universidad de la República (125-140) Facultad de Agronomía. Uruguay.

Ruhoff, L., Paz, A., Aragao, C., Mu, Q., Malhí, Y., Collischonn, H. (2013). Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurement and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Science Journal*, 8(58):1658–1676.

Spiliotopoulos, M., Loukas, A. Michalopoulou, H. (2012). Contribution to the study of regional actual evapotranspiration with the use of surface energy balance and Remote Sensing for central Greece. *Climat & atmpsp physics* 309–311.

Verstraeten, W., Veroustraete, F., Feyen, J. (2008). Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. *Sensors*, 8(1):70–117.

Slafer, G., Savin, R. (2011). Limitantes a la expresión de potencial asociadas al estrés térmico. ICREA: Departamento de Producción Vegetal y Ciencias Forestales, Universidad de Lleida, España.

Wisser, D., Frohking, S., Douglas, E., Fekete, B. (2008). Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets. *Geophysical Research Letters*, 35.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente (2015). Agencia estatal de meteorología. Acceso en: <http://www.aemet.es/en/eltiempo/prediccion/municipios/carta-ma-id29038>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente (2015). [13 marzo 2013]. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es>





## 6. SÍNTESIS

---



## 6.1. DISCUSIÓN GENERAL

Esta tesis está compuesta por objetivos específicos y una hipótesis general, la cual fue asumir que es posible predecir la producción de cultivos de cítricos mediante imágenes de satélite Landsat. Para ello se tuvo en cuenta datos de producción de fincas situadas a lo largo del Río Guadalhorce con distintas coberturas de suelo (periodo 2000-2011), las mismas corresponden a fincas privadas, su selección fue aleatoria correspondiendo con la información que pudo recogerse en la zona de interés.

Los resultados obtenidos muestran tres casos muy distintos unos a otros en términos de fuerza y dirección. La medida paramétrica de la asociación entre los IVs y la producción es positiva y existe relación entre ésta variable y los índices NDVI y SAVI, pero resulta débil. En consecuencia, a la pregunta de si se puede o no estimar la producción de cultivos de cítricos en el Valle de Guadalhorce con suficiente precisión mediante el uso de imágenes Landsat; los resultados obtenidos demuestran que no puede aceptarse dicha afirmación.

El uso operativo de las imágenes Landsat ha resultado diferente para los casos de estudio. Los IV reflejan un rango distinto de valores según su composición suelo-agua-planta, con una respuesta diferente a las cubiertas de cítricos medidas. La capacidad de cada índice cambia de una variedad a otra, los valores extraídos están alejados de la línea de ajuste, sin distribución simétrica, resultando en un pronóstico alejado de la realidad. En el anexo 2 se describe en detalle el análisis de ANOVA realizado para aceptar o rechazar esta hipótesis mediante el cálculo F de Fisher.

A la altura de ese capítulo se han realizado cálculos con otros IV tales como EVI, PVI y TSAVI, cuyos resultados obtenidos se encuentran detallados en el Anexo 2 con el análisis de correlación de Pearson y sus correspondientes diagramas de dispersión pueden verse en el Anexo 3, para conocer su respuesta y buscando mejorar los resultados mediante índices que hacen uso de otra banda espectral y teniendo en cuenta otros factores: el índice EVI incorpora la longitud de onda azul en su cálculo, el PVI tiene en cuenta la línea del suelo

perpendicular y convergente para analizar los datos multiespectrales, y TSAVI incorpora en su fórmula dos parámetros de la línea del suelo y una variable X (similar a SAVI) para minimizar los efectos del suelo. Sin embargo, los resultados obtenidos arrojan estimaciones aún más débiles. A pesar de la ambición de estimar la producción mediante uso de datos históricos, no ha sido posible conseguir este objetivo.

La estimación de rendimiento mediante uso del sensor Landsat, previa aplicación de índices de vegetación, ha probado tener buenos resultados en cultivos de trigo y maíz, con valores significativos, indicando el 80% del rendimiento observado dentro de campos individuales (Shanahan et al., 2001). Una estrategia empleada por algunos autores, con resultados similares a los de este trabajo, es la de aplicar técnicas de ajuste para obtener valores altos de correlación, por ejemplo, el trabajo de Mulianga et al., (2013) sobre cultivos de cañas de azúcar, ajusta los valores de los índices mediante el cálculo de mínimos cuadrados, al re-escalar los valores obtiene una correlación más alta y significativa. Otra aproximación puede verse en el trabajo de Xujun-Ye et al., (2008) en cítricos, sus resultados fueron positivos, su estudio aplica análisis de correlación de Pearson para correlacionar características del dosel del cultivo mandarina Satsuma, autóctona de Japón, con el índice NDVI en árboles individuales; su trabajo se realizó con imágenes aéreas multiespectrales. Otros métodos de fusión de datos se han llevado a cabo para la interpretación de las variaciones de rendimiento en campos individuales, tales como los de Yang et al., (2001) y Zarco-Tejada et al., (2009), realizados mediante imágenes hiperespectrales, pero no se encuentra en la literatura estimación de rendimiento de cítricos usando imágenes multiespectrales del sensor Landsat como en este estudio.

Los valores de NDVI pueden variar -1,0 a 1,0, pero los valores menores de cero, en este estudio, no tienen ningún significado ecológico puesto que no representan la vegetación de las parcelas de cítricos, por lo tanto el rango de valores para nuestro propósito de estimación de rendimiento se trunca a 0,0-1,0. Los valores más altos significan una mayor diferencia entre la radiación en el NIR-Rojo, lo que está asociado con la vegetación alta, fotosintéticamente activa. Los valores bajos de NDVI significan que hay poca diferencia entre las señales rojas y NIR, esto sucede cuando hay poca actividad fotosintética, o cuando sólo hay muy poca reflexión de la luz en el NIR. Los valores de NDVI y SAVI en este estudio están dispersos, cada parcela tiene una dinámica de crecimiento diferente y los valores de producción son fluctuantes, sumados a posibles enfermedades y/o deficiencias en nutrición resultan en factores de estrés, que difícilmente sean capturadas por el sensor con la misma magnitud que se produce en el campo, resultando en una relación que se aleja de la línea de mejor ajuste. Debe entenderse que la aplicación del modelo de regresión en este estudio, por su naturaleza, simplifica la realidad y no contempla la complejidad de las condiciones agrícolas en estas parcelas.

Se considera, a los efectos de estimar la producción en esta región, emplear sensores con mayor resolución espacial y temporal, AVHRR, SPOT, IRIS. De tal manera de poder relacionar directamente los parámetros de los cultivos en el campo, con valores espectrales del satélite, sin recurrir a estrategias de ajustes y re-escalado de valores. Esto, teniendo en cuenta la situación real del Valle de Guadalhorce, una zona agrícola compuesta por fincas privadas, cuyos agricultores no mantienen un registro de todas las acciones que se producen en el campo, y donde existe heterogeneidad en el manejo agronómico, con fluctuaciones en el rendimiento, que provocan interferencias que resultan difíciles de medir por sensores ópticos al momento de la captura de las imágenes, esto se acentúa aún más, en cultivos como los cítricos, cuya producción de un año esta condicionada por el rendimiento del año anterior.

A pesar de las limitaciones que aquí se presentan para la estimación, la cobertura cíclica del sensor Landsat ha permitido el seguimiento dinámico de la actividad agrícola de la región. La cantidad de radiancia emitida por los cultivos de cítricos es fuerte, con alta reflectividad en la zona. Las fechas seleccionadas han respondido visualmente a las modificaciones espectrales, las técnicas de segmentación logran definir la dirección del cambio y las actividades de la zona. Trabajos similares pueden verse en Gordon et al. (1986) que aplica técnicas de clasificación supervisada para mejorar la respuesta espectral para separar los cultivos uno de otros; Coppin et al., (2004) con la aplicación del índice NDWI que responde mejor a las características de la región de estudio. Los años seleccionados para la detección de cambio (1985, 2001, 2006, 2011) son los que mejor responden visualmente, cuyo valor NDVI están entre los más altos.

Por otro lado, el presente trabajo ha logrado definir la relación o el grado de asociación que existe entre los IV calculados y la producción de cítricos. Los resultados obtenidos facilitan una primera interpretación, permite identificar aquellos índices que mejor reflejan la cubierta del cultivo de estudio en esta zona, y la capacidad de las imágenes Landsat para la delimitación de áreas, determinación de rendimiento a escala de parcela. Como se explica más arriba la heterogeneidad en el manejo de los mismos contribuye a un rendimiento fluctuante que es difícil de controlar e influye en los resultados de estimación que se realizan con este Sensor.

La aplicación del producto satelital generado por la EOS/NASA MODIS 16A2, muestra un ajuste similar para las tres parcelas, y ha permitido obtener una visión general de la variable ETP en la región.



## 6.2. CONCLUSIÓN

El principal objetivo de esta investigación fue encontrar las herramientas que mejor se ajusten a la región con el fin de poder analizar los cambios que se producen en el tiempo, evaluar la producción de cítricos, considerado uno de los más importantes y abundante en la región y conocer el perfil de la evapotranspiración potencial en la zona empleando el producto MOD16A2 de MODIS específico para éste análisis. A continuación se listan las contribuciones realizadas en cada capítulo:

Contribuciones específicas correspondientes al capítulo Detección de cambios en paisajes agrícolas mediante técnicas de segmentación en imágenes Landsat:

- Cada una de las técnicas de cambio aplicadas obtuvieron resultados esperados en coincidencia a las alteraciones reales del área, alcanzando distintos niveles de detalle.
- El índice NDVI en el tratamiento digital ha sido efectivo para detectar las variaciones espacio-temporales que han ocurrido en esta zona.
- Las tres técnicas muestran áreas de cambio. Prueba de ello es el cuadro inferior izquierdo que en el año 1985 no muestra una delimitación de vegetación densa, pero si lo hace con la técnica del umbral-fijo para el año 2006 y con la técnica diferenciación de imagen para el par de años 2006-2011. Finalmente la técnica RGB-NDVI muestra en color la actividad en esa área.
- El aumento de vegetación en las zonas aledañas al río se percibe en las tres técnicas cuando se comparan las imágenes de los distintos años.
- La técnica RGB-NDVI, depende del orden cronológico en la asignación de color, como así también si se trabaja sobre las imágenes sin IV.
- La técnica diferenciación de imagen, la zona de cultivos coincide con los tonos oscuros, que corresponde a decrementos de NDVI.
- Las técnicas empleadas no son las únicas existentes para la detección de cambios, además que pueden ser usados otros IVs.
- Las imágenes seleccionadas tienen una resolución espacial óptima y no contienen nubosidad en la zona de interés. Las mismas corresponden a un mismo Sensor.

Contribuciones específicas correspondientes al capítulo Análisis comparado de índices de vegetación NDVI y SAVI para la evaluación de la producción de cítricos:

- La aplicación del índice NDVI, como en otros casos ha permitido establecer relaciones empíricas o teóricas con la variable producción.
- Los IV se mueven continuos en el tiempo, siendo SAVI más homogéneo que NDVI, sin valores drásticos y positivos.
- El modelo aplicado para evaluar la producción tiene como resultado valores bajos de correlación. Pero aun así significativos para el cultivo de estudio.
- Los índices empleados, son los que mejor responden en cuanto al grado de asociación con producción en relación a otros índices.
- Los índices calculados se han realizado en imágenes sin nubes, ni sombras para el área de interés, aun así se observan resultados correspondientes a cubiertas poco densas pudiéndose esto deberse a factores tales como la absorción atmosférica que puede reducir el valor de un índice.

Contribuciones específicas correspondientes al capítulo Relación entre evapotranspiración potencial y producción:

- El resultado de ETP es un análisis realizado con el producto MOD16A2 que cuenta con una resolución de 1km<sup>2</sup>, considerándose representativo de la región, no de las parcelas en particular.
- Los valores de ETP se muestran más altos durante el verano, correspondiendo a la estación más calurosa y con menos precipitaciones, etapa en la que el suelo hace uso de los recursos como el almacenamiento de agua, probablemente a raíz de las precipitaciones del invierno.
- La frecuencia espacial de los valores ETP proporcionan, según resultados obtenidos, datos que no presentan variaciones drásticas en lo referente a su interrelación con la atmósfera a nivel local y regional.
- Los datos de correlación obtenidos demuestran que este producto no es óptimo para relacionar variables biofísicas de cultivo a nivel parcela (por ej. producción) dada su gran resolución espacial.
- Los resultados son representativos de la región.

### 6.3. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Basado en los resultados obtenidos, este trabajo ha podido establecer las diferencias en el comportamiento de distintos índices de vegetación relacionados con la producción, cálculos realizados con el Sensor Landsat. Esto ha llevado a identificar que para mejorar la estimación a escala parcela, para cultivos en el Valle de Guadalhorce, se recomienda:

- Emplear otros sensores ópticos de mayor resolución espacial y espectral, tales como los del satélite SPOT con sensores HRV (High Resolution Visible). De tal manera de minimizar los efectos de heterogeneidad del manejo agronómico que se presentan en el área, medir y comparar la respuestas de cada uno.
- Aplicar la metodología presentada a un mayor número de cultivos de cítricos y/o frutales, con el fin de obtener mayor discriminación de cada uno en el espectro electromagnético y su correlación con la producción.

## REFERENCIAS

- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 25:1565-1596.
- Gordon, D.K., Philipson, W.R. (1986). A texture-enhancement procedure for separating orchard from forest in Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(2):301–304.
- Mulianga, B. Bégue, A. Simons, M. Todoroff, P. (2013). Forecasting regional sugarcane hielo based on time integral and espacial agregaron of MODIS NDVI. *Remote Sensing*, 5:2184-2199.
- Panda, S., Ames, D., Panigrahi, S. (2010). Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques. *Remote sensing*, 2:673-696.
- Shrivastava, R., Gebelein, J. (2007). Land cover classification and economic assessment of citrus groves using remote sensing. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61:341–353.
- Xu-Jun, Ye., Kenshi, S., Asada, S., Sasao, A. (2008). Inter-Relationships Between Canopy Features and Fruit Yield in Citrus as Detected by Airborne Multispectral Imagery. *Transaction of the Asabe J.*, 51(2):739-751.
- Zarco-Tejada, P., Berni J., Suárez, L., Gonzáles-Dugo, V., Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. In: *The International Archives of the Photogrammetry*, 38(1):4-7.



# ANEXO 1

---



## CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES SATELITALES ADQUIRIDAS

LANDSAT 5 TM - AÑO 2001				
Bandas	Rango espectral (um)	IFOV(m)	ND mínimo	Características
1	0.45-0.52	30x30	49	Sun elevaron 56
2	0.52-0.60	30x30	20	Sun Azimut 107
3	0.63-0.69	30x30	18	Ang Cenital 34
4	0.76-0.90	30x30	21	Día Juliano: 69
5	1.55-1.75	30x30	10	Factor distancia (k): 0,993144
6	10.4-12.5	120x120	37	
7	2.08-2.35	30x30	4	

LANDSAT 7 ETM+ - AÑO 2006				
Bandas	Rango espectral (um)	IFOV(m)	ND mínimo	Características
1	0.45-0.52	30x30	42	Sun elevaron 59,5616
2	0.52-0.60	30x30	26	Sun Azimuth 75,0566
3	0.63-0.69	30x30	19	Ang Cenital 30,4384387
4	0.76-0.90	30x30	11	Factor distancia (k): 1,004667
5	1.55-1.75	30x30	10	Día juliano: 102
6	10.4-12.5	120x120	45	
7	2.08-2.35	30x30	8	
Panorámica	0.55-0.70	15x15	3	



**LANDSAT 7 ETM+ - AÑO 2011**

<b>Bandas</b>	<b>Rango espectral (um)</b>	<b>IFOV(m)</b>	<b>ND mínimo</b>	<b>Características</b>
1	0.45-0.52	30x30	37	Sun elevation 59,76095
2	0.52-0.60	30x30	18	Sun Azimuth 125,0325
3	0.63-0.69	30x30	23	Ang Cenital 30,23905
4	0.76-0.90	30x30	12	Factor distancia (k): 1,004667
5	1.55-1.75	30x30	14	Día juliano: 36
6	10.4-12.5	120X120	12	
7	2.08-2.35	30x30	11	
Pancromatica	0.55-0.70	15x15	10	

**LANDSAT 5 TM 1985**

<b>Bandas</b>	<b>Rango espectral (um)</b>	<b>IFOV(m)</b>	<b>Características</b>
1	0.45-0.52	30x30	Sun Elevation 56
2	0.52-0.60	30x30	Sun Azimuth 107
3	0.63-0.69	30x30	Ang Cenital 34
4	0.76-0.90	30x30	Día Juliano 349
5	1.55-1.75	30x30	Factor Distan 0,993144
6	10.4-12.5	120x120	
7	2.08-2.35	30x30	

## ANEXO 2

---



## ANÁLISIS ANOVA Y CORRELACIÓN DE PEARSON

### *limón fino*

PEARSON	DF	T	COR	P-VALUE	INT. DE CONFIANZA
Prod+ndvi	10	1.01	0.30	0.338	-0.3609725 0.7299587
Prod+savi	10	2.24	0.57	0.048	-0.07375599 0.84337586
Prod+evi	10	-2.99	-0.68	0.013	-0.9043898 -0.1869512
Prod+pvi	10	0.22	0.068	0.832	-0.5259952 0.6181777
Prod+Tsavi	10	0.09	0.027	0.933	-0.5555198 0.5917227

ANOVA NDVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE	RMSE
Entre	1	24711062	24715370	1.013	0.338	
Intra	10	244085602	24408560			
Total	11					4990

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Se concluye que se tiene una muy baja probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de NDVI no son estadísticamente significativas.

ANOVA SAVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE	RMSE
Entre	1	90151691	90151691	5.046	0.049*	
Intra	10	178644973	17864497			
Total	11	268796664				4226

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es mayor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza de un 95% y para los grados de libertad correspondiente.

Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de SAVI son estadísticamente significativas. A un nivel de 0.05, la relación lineal entre las variables es positiva y existe buena predictibilidad entre las mismas.

ANOVA EVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	126911555	126911555	8.945	0.014*
Intra	10	141885109	14188511		
Total	11	268796664			3766

Signif. codes: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es mayor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza de un 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de EVI son estadísticamente significativas. Sin embargo, a un nivel de 0.05, la relación lineal entre las variables es negativa y no existe buena predictibilidad entre las mismas.

ANOVA PVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	1265722	1265722	0.047	0.832
Intra	10	267530942	26753094		
Total	11				5172

Signif. codes:

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores de  $F_c$  y  $F_e$  existe una muy baja probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de PVI no son estadísticamente significativas.

ANOVA TSAVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	195734	195734	0.007	0.934
Intra	10	268600930	26860093		
Total	11				5182

Signif. codes:

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , no existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de TSAVI no son estadísticamente significativos.

### *limón verna*

PEARSON	COR.	T	DF	P-VALUE	INT. DE CONFIANZA
Prod+ndvi	0.47	2.41	10	0.12	0.04821488 / 0.87520372
Prod+savi	0.62	1.67	10	0.03	-0.1450286 / 0.8212302
Prod+evi	0.27	0.88	10	0.4	-0.3620305 / 0.7293897
Prod+pvi	-0.04	-0.12	10	0.9	-0.5992982 / 0.5473510
Prod+Tsavi	0.03	0.09	10	0.93	-0.5550359 / 0.5921772

ANOVA NDVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	78918827	78918827	5.86	0.121
Intra	10	275331588	27533159		
Total	11	354250415			5247
Signif. codes:					

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es mayor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de NDVI son estadísticamente significativos. A un nivel de 0.05, la relación lineal entre las variables es positiva y existe buena predictibilidad entre las mismas.

ANOVA SAVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	138870670	138870670	6.448	0.0294 *
Intra	10	215379744	21537974		
Total	11	354250414			4640

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es mayor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de SAVI son estadísticamente significativos. A un nivel de 0.05, la relación lineal entre las variables es positiva y existe buena predictibilidad entre las mismas.

ANOVA EVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	25336773	25336773	0.770	0.4
Intra	10	328913641	32891364		
Total	11	354250414			5735

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe una baja probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de EVI no son estadísticamente significativos.

ANOVA PVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	530848	530848	0.015	0.905
Intra	10	353719566	35371957		
Total	11	354250414			5947

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe una baja probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de PVI no son estadísticamente significativos.

ANOVA TSAVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	271500	271500	0.008	0.932
Intra	10	353978915	35397891		
Total	11	354250415			5949

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe una baja probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de TSAVI no son estadísticamente significativos.

### *Mandarina clementina*

PEARSON	COR.	T	DF	P-VALUE	INT. DE CONFIANZA
Prod+ndvi	0.57	2.18	10	0.05	-0.0419596 0.8726105
Prod+savi	0.41	1.42	10	0.19	-0.2308873 0.8180114
Prod+evi	0.16	0.52	10	0.61	-0.4538105 0.6735179
Prod+pvi	0.28	0.94	10	0.37	-0.3456535 0.7380322
Prod+Tsavi	-0.07	-0.23	10	0.82	-0.6214833 0.5221015

ANOVA NDVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	19389228	19389228	5.754	0.054*
Intra	10	40785783	4078578		
Total	11	60175011			2019

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es mayor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente.



Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de NDVI son estadísticamente significativos. A un nivel de 0.05 la relación lineal entre las dos variables es positiva con media-alta predictibilidad entre las mismas.

ANOVA SAVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	10206943	10206943	2.043	0.18
Intra	10	49968068	4996807		
Total	11	60175011			2235

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de  $F$  es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de SAVI no son estadísticamente significativos. La relación lineal entre las dos variables es positiva con baja predictibilidad entre las mismas.

ANOVA EVI	DF	SUM SQ.	MEAN SQ.	F VALUE	P-VALUE
Entre	1	1586697	1586697	0.271	0.61
Intra	10	58588314	5858831		
Total	11	60175011			2420

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de  $F$  es menor al valor  $F_{CRITICO} = 4.97$  para los grados de libertad correspondiente. Se concluye que se tiene una muy baja probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de SAVI no son estadísticamente significativos.

<b>ANOVA PVI</b>	<b>DF</b>	<b>SUM SQ.</b>	<b>MEAN SQ.</b>	<b>F VALUE</b>	<b>P-VALUE</b>
Entre	1	4878474	4878474	0.882	0.370
Intra	10	55296537	5529654		
Total	11	60175011			2351

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es mayor al valor  $F_{\text{CRITICO}} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se acepta la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de PVI son estadísticamente significativos.

<b>ANOVA TSAVI</b>	<b>DF</b>	<b>SUM SQ.</b>	<b>MEAN SQ.</b>	<b>F VALUE</b>	<b>P-VALUE</b>
Entre	1	329177	329177	0.055	0.819
Intra	10	59845834	5984583		
Total	11	60175011			2446

El resultado del análisis de varianza indica que el valor de F es menor al valor  $F_{\text{CRITICO}} = 4.97$  para un nivel de confianza del 95% y para los grados de libertad correspondiente. Teniendo en cuenta los valores  $F_c$  y  $F_e$ , no existe la probabilidad que se cumpla la  $H_0$  y en consecuencia se rechaza la hipótesis. Se concluye que las diferencias que se observan entre los valores medios de TSAVI son estadísticamente significativos.

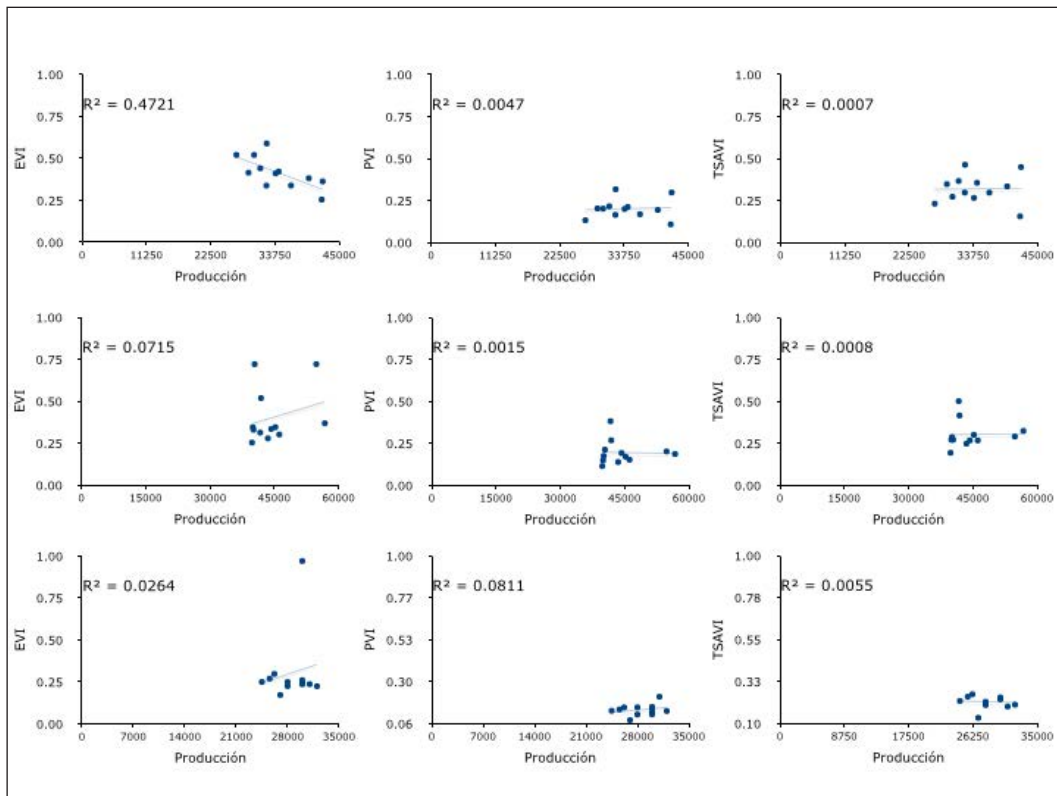


## ANEXO 3

---

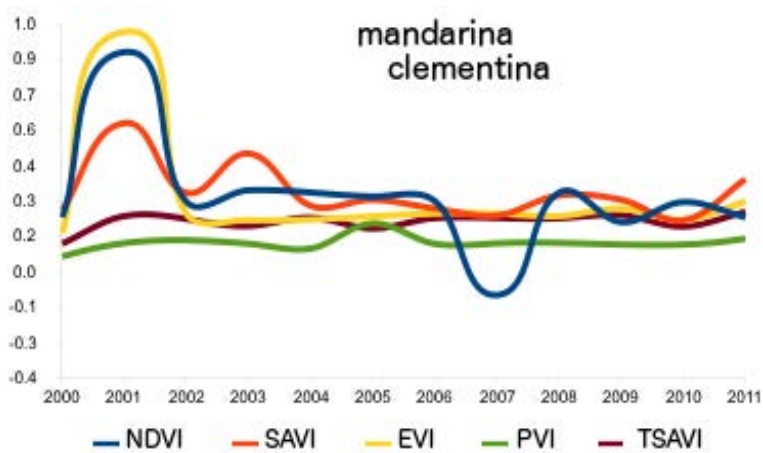
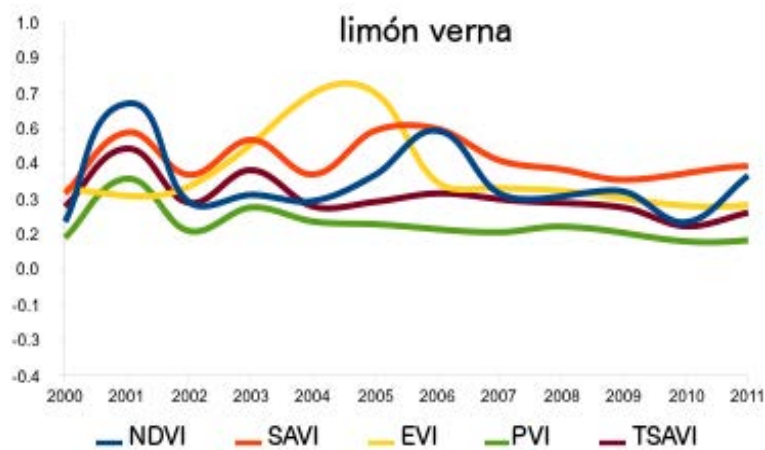
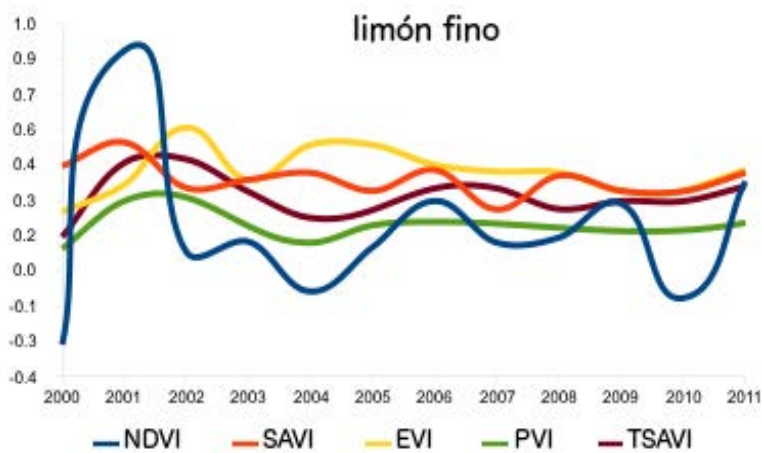


DIAGRAMA DE DISPERSIÓN RESULTADO ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES EVI, PVI Y TSAVI RELACIONADOS CON LA VARIABLE PRODUCCIÓN.



**TABLA 9 VALORES DE LOS PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE TSAVI**

(a)	(b)
0.29	0.08
0.56	0.18
0.49	0.72



Perfil comparativo de los índices de vegetación EVI, PVI y TSAVI junto a NDVI y SAVI







