



**Interreg**  
España - Portugal

Fondo Europeo de Desarrollo Regional  
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



UNIÓN EUROPEA  
UNIÃO EUROPEIA

**Innoace**

INVESTIGACIÓN · INNOVACIÓN · TECNOLOGÍA · EMPRENDIMIENTO  
INVESTIGAÇÃO · INOVAÇÃO · TECNOLOGIA · EMPREENDEDORISMO



# AGRICULTURA DE PRECISÃO COM IMAGENS DE SATÉLITE

MANUAL DE BOAS PRÁTICAS AGRÍCOLAS

# AGRICULTURA DE PRECISIÓN CON IMÁGENES DE SATÉLITE

MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

JUNTA DE EXTREMADURA

Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS  
DE EXTREMADURA



Institución Ferial  
de Extremadura



IPN  
INSTITUTO PEDRO NUNES



IPBeja  
INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE BEJA



UNIVERSIDADE  
DE ÉVORA

**EDITORES:**

José Rafael Marques Da Silva

José Maria Terrón López

Francisco José Domínguez Ordóñez

Luís Paixão

El proyecto INNOACE está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa INTERREG V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 de la Comisión Europea.

O projeto INNOACE é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa INTERREG V-A Espanha – Portugal (POCTEP) 2014-2020 da Comissão Europeia.

**DISEÑO Y MAQUETACIÓN:** Artes Gráficas Rejas. Mérida

**ISBN:** 78-989-33-0549-2

**DEP. LEGAL:**

BA-678-2020

# ÍNDICE

<b>I. PRESENTACIÓN E INTRODUCCIÓN AL PROYECTO INNOACE</b> .....	7
I.1. Presentación .....	9
I.2. O projeto INNOACE. Gestão agrônômica inteligente baseada em sistemas remotos de observação terrestre.....	11
<b>II. CONCEPTOS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN</b> .....	13
II.1. Introducción .....	14
II.2. Equipamiento Necesario .....	15
II.2.1. Sistemas de posicionamiento mediante satélites.....	15
II.2.2. Métodos de corrección de errores.....	15
II.2.3. Software de gestión de información .....	16
II.2.4. Herramientas Específicas de A.P.....	16
II.2.4.1. Sensores móviles de suelo.....	16
II.2.4.2. Sistemas de percepción remota .....	19
II.2.4.3. Sistemas de tratamiento variable.....	22
II.2.4.4. Mapas de rendimiento .....	23
II.3. Proceso de aplicación de la Agricultura de Precisión .....	24
II.3.1. Delimitación de zonas de manejo.....	25
II.3.2. Elaboración de mapas de disponibilidad de nutrientes .....	25
II.3.3. Diseño de siembra .....	26
II.3.4. Mapas predictivos de cosecha.....	26
II.3.5. Mapas de extracción de nutrientes .....	26
II.3.6. Diseño de estrategias de abonado .....	26
II.3.6.1. Abonado de fondo .....	27
II.3.6.2. Abonado de cobertera.....	27
II.3.7. Seguimiento del cultivo mediante imágenes satelitales .....	27
II.3.8. Control de riegos .....	27
II.3.9. Detección de plagas, enfermedades y malas hierbas.....	28
II.3.10. Recolección y elaboración de mapas de producción.....	28
II.4. Bibliografía .....	28
<b>III. CONCEPTOS BÁSICOS DE DETECCIÓN REMOTA (PROGRAMA COPERNICUS)</b> .....	29
III.1. Introducción .....	31
III.2. Fundamentos básicos de teledetección .....	31

III.2.1. Tipos de sensores.....	32
III.2.2. Resoluciones.....	32
III.2.3. Limitaciones atmosféricas.....	34
III.3. Bandas espectrales e índices de vegetación.....	35
III.3.1. Rangos del espectro electromagnético.....	35
III.3.2. Signaturas espectrales.....	40
III.3.3. Índices espectrales.....	42
III.4. Programa Copernicus.....	44
III.4.1. Sentinel 1.....	45
III.4.2. Sentinel 2.....	46
III.4.3. Otros satélites.....	48
III.5. Bibliografía.....	48
<b>IV. CASOS DE ESTUDIO.....</b>	<b>49</b>
IV.1. Solos.....	51
IV.1.1. Estudo da qualidade do solo – amostragens inteligentes.....	51
IV.1.2. Estudio de la calidad del suelo a partir del Satélite Sentinel-2.....	56
IV.1.2.1. Introducción.....	56
IV.1.2.2. Metodología.....	57
IV.1.2.3. Análisis de los datos.....	57
IV.1.2.4. Conclusiones.....	64
IV.1.2.5. Bibliografía.....	64
IV.2. Cereais e Forragens.....	65
IV.2.1. Estudio de la variabilidad espacial y la estimación de cosecha de <i>Triticum</i> spp. (Trigo) a partir del índice NDVI.....	65
IV.2.1.1. Introducción.....	65
IV.2.1.2. Metodología.....	66
IV.2.1.3. Análisis de los datos.....	67
IV.2.1.4. Conclusiones.....	71
IV.2.2. Estudio de la variabilidad espacial y la estimación de cosecha del <i>Zea mays</i> (Maíz) a partir del índice NDVI.....	72
IV.2.2.1. Introducción.....	72
IV.2.2.2. Metodología.....	73
IV.2.2.3. Análisis de los datos.....	75
IV.2.2.4. Conclusiones.....	80
IV.2.3. Estudo da aplicação de imagens de satélite NDVI como ferramenta para a gestão do cultivo da cevada dística.....	81

IV.2.3.1. Introdução .....	81
IV.2.3.2. A cultura da cevada dística .....	81
IV.2.3.3. Aplicação das Imagens NDVI para a monitorização e gestão da cultura da cevada dística: casos práticos.....	83
IV.2.3.4. Conclusões.....	85
IV.2.4. Modelação da produtividade do arroz a partir das imagens Sentinel 1 e 2.....	86
IV.2.4.1. Introdução .....	86
IV.2.4.2. A cultura do arroz .....	87
IV.2.4.3. Caso prático .....	87
IV.2.4.4. Conclusões.....	93
IV.2.5. Modelação de produtividade de uma cultura forrageira com utilização de imagens de satélite .....	94
IV.2.5.1. Introdução .....	94
IV.2.5.2. Materiais e métodos .....	94
IV.2.5.3. Resultados e discussão .....	95
IV.2.5.4. Conclusões.....	99
IV.3. Horticultura e Leguminosas.....	100
IV.3.1. Utilidade das imagens dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2 na gestão da cultura de brócolo.....	100
IV.3.1.1. Introdução à cultura .....	100
IV.3.1.2. Metodologia .....	100
IV.3.1.3. Análise e discussão de resultados .....	101
IV.3.1.4. Conclusões.....	104
IV.3.2. Modelação da produtividade do tomate a partir de imagens de satélite Sentinel 1 e 2.....	105
IV.3.2.1. Introdução à cultura .....	105
IV.3.2.2. Metodologia .....	105
IV.3.2.3. Análise e discussão de resultados .....	108
IV.3.2.4. Conclusões.....	117
IV.3.3. Modelação de produtividade de ervilha com utilização de mapas NDVI do satélite Sentinel-2 .....	118
IV.3.3.1. Introdução à cultura .....	118
IV.3.3.2. Metodologia .....	118
IV.3.3.3. Análise e discussão de casos de estudo .....	118
IV.3.3.4. Conclusões.....	121
IV.4. Floresta e Pastagens.....	122
IV.4.1. Variabilidade espacial de povoamentos agroflorestais em função dos índices NDVI e NDWI.....	122
IV.4.1.1. Introdução.....	122
IV.4.1.2. Dados e Metodologia .....	122

IV.4.1.3. Análise e discussão de estudos de caso .....	124
IV.4.1.4. Conclusões.....	126
IV.4.1.5. Bibliografia.....	127
IV.4.2. Uso de Sentinel 2 en el ámbito forestal: Determinación de anomalías en índices espectrales para la estimación de la humedad de los combustibles forestales.....	128
IV.4.2.1. Introducción.....	128
IV.4.2.2. Metodología .....	129
IV.4.2.3. Análisis de resultados.....	132
IV.4.2.4. Conclusiones.....	135
IV.4.2.5. Perspectivas futuras .....	136
IV.4.2.6. Bibliografía.....	136
IV.4.3. As imagens de satélite na monitorização das pastagens e no apoio à gestão do ecossistema montado.....	137
IV.4.3.1. Enquadramento e objetivos.....	137
IV.4.3.2. Metodologia .....	138
IV.4.3.3. Análise e discussão dos resultados no caso de estudo.....	139
IV.4.3.4. Conclusões e perspetivas .....	142
IV.5. Olival.....	143
IV.5.1. Modelação da produtividade do olival com utilização de imagens de satélite.....	143
IV.5.1.1. Introdução à cultura.....	143
IV.5.1.2. Metodologia .....	144
IV.5.1.3. Análise e discussão de casos de estudo.....	144
IV.5.1.4. Conclusões.....	146
IV.6. Sensores e redes de comunicação em agricultura.....	147
IV.6.1. Diseño y despliegue de una infraestructura para sensorización y monitorización de parámetros agronómicos.....	147
IV.6.1.1. Antecedentes .....	147
IV.6.1.2. Objetivos.....	147
IV.6.1.3. Necesidades del proyecto.....	147
IV.6.1.4. Acciones .....	148
IV.6.2. Tecnologia IWSense .....	158
IV.6.2.1. Objetivos.....	158
IV.6.2.2. Descrição da tecnologia IWSense.....	158
IV.6.2.3. Instalações Piloto .....	160
<b>V. CONCLUSÕES PRINCIPAIS .....</b>	<b>161</b>
<b>VI. ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES.....</b>	<b>165</b>



**Presentación e  
Introducción al  
Proyecto INNOACE**







## I.1. Presentación

**E**l Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura tiene como misión contribuir al desarrollo económico, a la mejora de la competitividad del tejido empresarial y al bienestar de la sociedad mediante la generación, aplicación y difusión de conocimiento científico-tecnológico, la innovación y la formación de recursos humanos, priorizando esfuerzos en sectores productivos en los cuales existe un alto potencial de crecimiento.

En línea con la misión del Centro, allá por diciembre de 2015, cuando el proyecto INNOACE se gestaba, éste planteaba como su objetivo principal fortalecer el tejido empresarial a través del incremento de sus competencias, creando sinergias entre Empresas y Centros de I+D+i, que permitieran llevar a cabo acciones de transferencia y validación precoz de productos y servicios mediante procesos de innovación abierta en la EUROACE.

Pasados 5 años y con el proyecto a punto de finalizar, gracias a la financiación FEDER del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Portugal 2014-2020, más allá de los resultados logrados, es necesario resaltar una vez más la colaboración entre instituciones de España y Portugal, lo cual ha permitido unir fuerzas para alcanzar objetivos comunes, de una manera multidisciplinar e integradora y, por otro lado, la realización de actuaciones de alta aplicabilidad en los sectores productivos y con un alto impacto económico.

Colaboración, que en el caso de la Universidad de Evora y el CICYTEX viene dándose desde hace más de una década y que se ha reflejado en la consolidación y fortalecimiento de distintos grupos comunes de investigación colaborando en la realización de ya varios proyectos de Cooperación Transfronteriza.

Pero para alcanzar el objetivo que pretendía el proyecto INNOACE, era preciso un paso más, resultaba necesario el establecimiento de una estrecha relación entre las empresas destinatarias de las actividades a desarrollar y los investigadores y tecnólogos encargados de la ejecución del proyecto en las distintas Entidades, a fin de captar correctamente las necesidades de aquellas, exponer experiencias y responder a aquellas cuestiones que paulatinamente puedan surgir en el proceso de adaptación tecnológica, tales como necesidades de formación, costes de implantación e identificación de los aspectos que dificulten la implantación de las innovaciones en las propias empresas.

Resultado de todo lo anterior y de las numerosas actividades que para ello se han realizado desde el subproyecto Gestión Agronómica Inteligente basada en sistemas remotos de observación de la tierra, liderado por la Universidad de Evora y con el Instituto Pedro Nunes, FEVAL y el Instituto Politécnico de Beja como colaboradores además de CICYTEX, es el Manual de Buenas Prácticas que a continuación se presenta,

**Carmen González Ramos**  
*Directora del CICYTEX*



Consciente dos desafios que se colocam hoje na sociedade portuguesa, e no mundo em geral, a Universidade de Évora tem vindo a desenvolver de forma sustentada uma estratégia de investigação e transferência que lhe permite posicionar-se a nível regional e nacional como uma referência em diferentes domínios do conhecimento incluindo os ecossistemas mediterrânicos e seus sistemas produtivos, entre muitos outros. Para potenciar a sua ação, definiu como uma das suas áreas âncora o Mediterrâneo, que, mais do que um domínio fechado, pretende ser um eixo aglutinador e transdisciplinar das diferentes áreas científicas, explorando as interfaces, criando conhecimento, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico e para a sua transferência para a sociedade e o tecido socioeconómico.

A coordenação pela Universidade de Évora da atividade “gestão agronómica inteligente baseada em sistemas remotos de observação da terra” no projeto INNOACE, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa INTERREG V-A Espanha – Portugal (POCTEP) 2014-2020, é disso exemplo, e representou uma aposta clara desta instituição no sentido de introduzir nos sistemas produtivos agrícolas da EUROACE fatores de inovação e competitividade, com aplicação de tecnologias atuais e emergentes capazes de novas abordagens na gestão da atividade agrícola.

A integração dos sistemas de observação remota no processo de gestão da produção agrícola por utilização e processamento de imagens de satélites, como o Sentinel 1 e Sentinel 2 da ESA, representa por si só o reconhecimento da importância que estes sistemas podem acrescer na monitorização espacial e temporal dos cultivos mediterrânicos em setores estratégicos como a vinha, o olival, os cereais, a fruta, as hortícolas, a floresta, entre outros.

Nesta perspetiva, a experiência do projeto INNOACE veio demonstrar que a incorporação destas tecnologias permite de facto um conhecimento mais profundo dos sistemas produtivos e uma melhor planificação e gestão dos ativos produtivos.

Este manual de boas práticas agrícolas pretende acima de tudo concretizar um segundo objetivo deste projeto que é a transferência do conhecimento para a sociedade e o tecido empresarial, através da partilha de conceitos e fundamentos e da apresentação de diferentes casos de estudo e da sua análise crítica baseada em evidência científica.

Em nome da Universidade de Évora, felicito todos os parceiros deste projeto e acima de tudo as empresas que, de forma generosa, participaram neste projeto e integraram novos processos demonstrando que a sustentabilidade da agricultura da nossa região faz-se no presente, integrando o passado, e o profundo conhecimento da realidade do território, e o futuro, com a incorporação de soluções tecnológicas emergentes. É o balanço deste sistema dual que temos que preservar e valorizar.

**António José Estevão Grande Candeias**  
*Vice-Reitor Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora*



## I.2. O projeto INNOACE. Gestão agrônômica inteligente baseada em sistemas remotos de observação terrestre

O projeto INNOACE é um projeto cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Interreg V-A Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020, destinado a reforçar o tecido empresarial, criando sinergias entre empresas e centros de I&D, levando a cabo ações de transferência e validação precoce de produtos e serviços através de processos abertos de inovação. Para além disso, o INNOACE tenta promover o processo da descoberta empreendedora em áreas de especialização inteligente nos campos da EUROACE (um grupo que inclui as regiões do Alentejo e do Centro de Portugal e a Comunidade Autónoma da Extremadura em Espanha).

O projeto INNOACE é um projeto transfronteiriço muito amplo, dividido em muitas tarefas, e tem como mote de fundo as seguintes ideias-chave: i) Cooperar para inovar; e ii) Inovar para crescer. Realmente, a inovação pode retrair-se caso não existam diferentes pontos de vista sobre um mesmo problema e, nesse sentido, os projetos transfronteiriços encontram-se muito bem posicionados para promover essa mesma inovação.

As ideias à volta da Tarefa 2.1.3 surgiram em 2015, o ano em que começavam a ser lançados alguns dos satélites do programa Copernicus da Comissão Europeia, geridos pela agência Espacial Europeia (ESA). Parecia ser uma boa oportunidade perceber como é que os satélites do programa Copernicus poderiam ser úteis na gestão da atividade agrícola e assim foi constituída a tarefa 2.1.3 do projeto INNOACE.

Este manual não é mais do que o compilar de muitas experiências realizadas ao longo destes anos, mostrando claramente que os satélites Sentinel 1 e 2 da ESA podem ser realmente uma mais-valia na gestão da atividade agrícola.

O manual está organizado em diferentes partes, uma mais introdutória, dedicada aos conceitos gerais e teóricos, e outra mais prática, apresentando os casos de estudo efetuados ao longo do projeto. Por isso, se estiverem confortáveis com as matérias de natureza teórica podem saltar imediatamente para os casos de estudo (Capítulo IV).

Como nota quase final, dizer-vos que não foi difícil decidir quais os idiomas a considerar neste manual pois, sendo este um projeto transfronteiriço, não irão seguramente estranhar que algumas partes do mesmo sejam apresentadas em Português e outras em Espanhol. Julgamos que esta mistura de idiomas é fundamental neste manual, pois como foi dito anteriormente, a inovação só pode nascer da diferença, da diferença que interroga, que incomoda e que estimula a fazer diferente.

Face ao exposto, e para finalizar, desejamos vivamente que este possa ser um dos primeiros passos que vos estimule a agricultar com satélites.

**José Rafael Marques da Silva**  
*Coordenador da Tarefa. Universidade de Évora*





# Conceptos de Agricultura de precisión

Terrón, José María<sup>1</sup>; Domínguez, Francisco José<sup>1</sup>

## II.1. Introducción

La Agricultura de Precisión (A.P.) es una técnica cuyo objetivo es gestionar los cultivos teniendo en cuenta la variabilidad espacial de los suelos y del estado de las plantas; sus orígenes se remontan a los inicios de la propia actividad agrícola. El agricultor primitivo ya destinaba cada parcela de cultivo al uso que más le convenía.

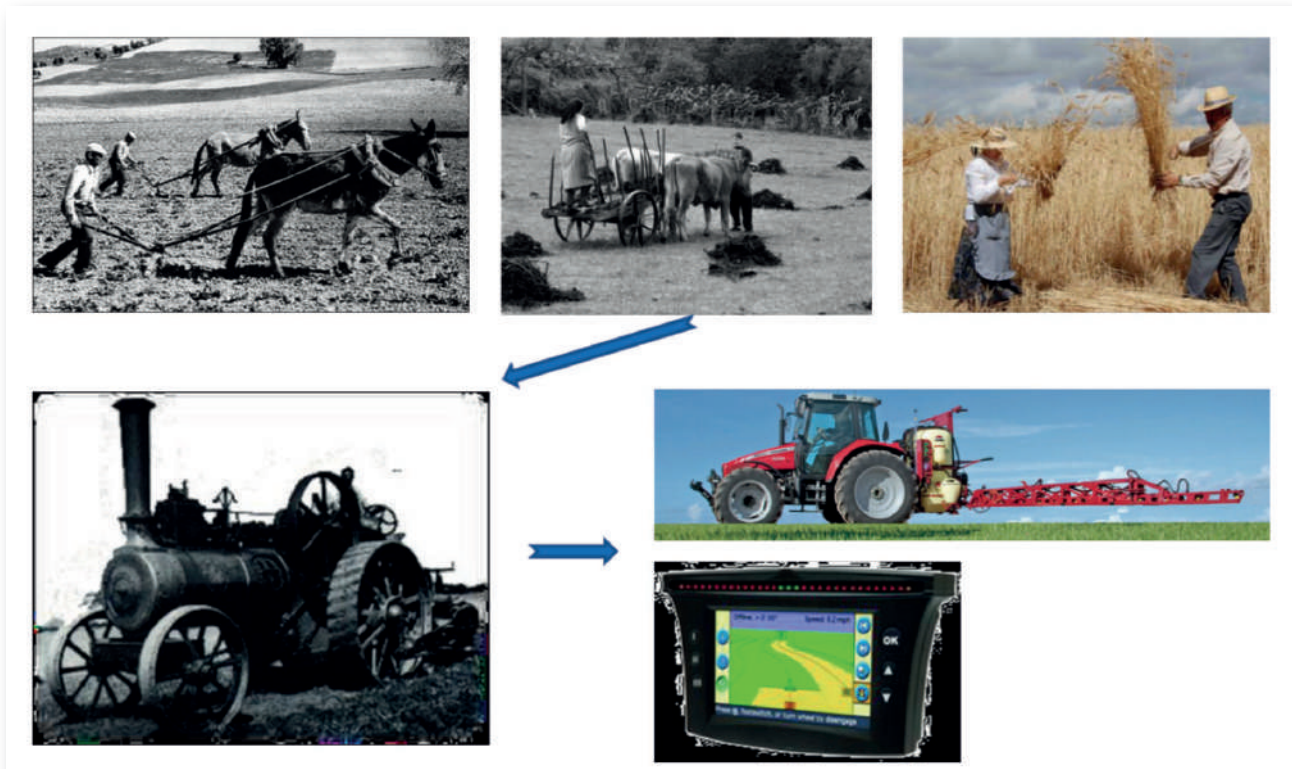


Figura 1 - Imágenes de la evolución de la Mecanización Agrícola. Fuente: Terrón, JM

El salto más importante en la agricultura se produjo con el inicio de la revolución industrial y con la aparición del tractor, en el siglo XIX. La evolución de la tracción animal a la tracción mecánica implicó un enorme aumento de la productividad, permitiendo una mayor rapidez en la realización de las tareas de labranza, lo cual requirió que las parcelas agrícolas aumentaran su dimensión al objeto de reducir las maniobras durante el trabajo.

Esta circunstancia conllevó una pérdida en la “precisión” de las tareas agrícolas, ampliamente compensada por el aumento tan enorme de rentabilidad que supuso la implantación de la mecanización agraria.

No es hasta la década de los 90 del pasado siglo XX, cuando, gracias a la aparición de los sistemas de navegación global mediante satélite (sistemas G.N.S.S., acrónimo de “Global Navigation Satelital System”), de la informática a nivel de usuario y de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.), cuando aparece la A.P., la cual permite gestionar la variabilidad espacial que, de forma natural o inducida por el hombre, existe en la mayor parte de las parcelas agrícolas de cultivo.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura



El principal efecto que se persigue mediante el empleo de estas técnicas es el de la optimización en el uso de los recursos empleados en las actividades productivas realizadas en el entorno agrario.

Las ventajas obtenidas son de tipo económico y medioambiental. El aumento de la eficiencia en el uso de los recursos conlleva dos efectos, por un lado, el aumento de la rentabilidad y por otro, un mejor aprovechamiento de las materias primas utilizadas, lo cual redundará en una reducción del impacto medioambiental, por un mejor aprovechamiento de los productos fertilizantes y fitosanitarios aplicados a los cultivos.

Lo que se pretende con el uso de la A.P. es dar en cada lugar lo que el cultivo necesita, en función de la potencialidad productiva del lugar donde se encuentra.

## II.2. Equipamiento Necesario

### II.2.1. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO MEDIANTE SATÉLITES

Un aspecto fundamental en este campo es el manejo de los equipos G.N.S.S. ya mencionados.

Las constelaciones de satélites existentes a nivel mundial son:

- NAVSTAR GPS (U.S.A.)
- Galileo (Unión Europea)
- GLONASS (Rusia)
- BeiDou/COMPASS (China)
- QZSS (Japón)
- RNSS (India)

la más popular es la desarrollada por Estados Unidos (EE.UU), el sistema conocido popularmente como G.P.S. (Global Navigation System), por dicha razón, por facilidad de comprensión, se suele hablar del mismo de forma genérica, en vez de usar el término correcto que sería G.N.S.S.

La importancia en el uso de los sistemas G.N.S.S. radica en que permite conocer, con toda exactitud, la posición geográfica del equipo.

En A.P. dichos equipamientos se han incorporado a los vehículos de tracción utilizados para el guiado de los mismos.

### II.2.2. MÉTODOS DE CORRECCIÓN DE ERRORES

Existe una amplia gama de sistemas G.N.S.S. cuya exactitud en la medida es proporcional al precio de los mismos. De este modo, para labores que no requieren gran precisión, a un precio bastante asequible, se suelen usar equipos mono-frecuencia que pueden alcanzar una precisión sub-métrica.

Para trabajos de alta precisión se utilizan equipos de bi-frecuencia, de coste mucho más alto, que pueden llegar a dar precisión centimétrica (< 3 cm).

Aunque en los inicios de la A.P., para alcanzar estas precisiones, era necesario utilizar costosos sistemas de correcciones diferenciales, en la actualidad existen sistemas gratuitos que han permitido mejorar

sustancialmente la precisión a un coste mínimo, los denominados Sistemas de Aumento Basados en Satélites (en inglés, SBAS), que permiten obtener precisiones sub-métricas con equipos mono-frecuencia. A nivel mundial, dan cobertura a determinadas zonas y son:

- WAAS (U.S.A.)
- EGNOS (Unión Europea)
- GAGAN (India)
- MSAS (Japón)
- SDCM (Rusia)
- SNAS (China)
- SACCSA (ICAD)

También están las redes de estaciones de referencia (autonómicas y estatales), que proporcionan correcciones diferenciales para sistemas G.P.S. bi-frecuencia, accesibles a través de INTERNET mediante telefonía móvil, usando el protocolo N.T.R.I.P. (Network Transport R.T.C.M vía Internet Protocol), obteniéndose precisiones centimétricas.

Así mismo es importante señalar que existe una amplia gama de sistemas de guiado de maquinaria que va desde asistentes al guiado con barras de luces a sofisticados sistemas de auto-guiado en correcciones diferenciales en tiempo real (Real Time Kinematic (R.T.K.)).

### **II.2.3. SOFTWARE DE GESTIÓN DE INFORMACIÓN**

Las herramientas fundamentales para poder almacenar y procesar toda la información obtenida en campo al objeto de aplicar los tratamientos necesarios para cada tipo de cultivo son los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.), los cuales son complejos programas informáticos que permiten gestionar Bases de Datos Geográficos y, finalmente, indicar el tratamiento adecuado a cada lugar del cultivo. Esto es lo que, en terminología angloparlante, se denomina Site-specific Crop Management (S.S.C.M) lo que vendría a equivaler a Agricultura en Sitio-Específico o, lo que es lo mismo, Agricultura de Precisión.

S.I.G. hay muchos, los hay caros, utilizados normalmente en investigación, también están lo de *software* libre, y, por último, los desarrollados por los propios fabricantes de maquinaria de A.P., ofreciendo estas soluciones utilizables directamente por los agricultores.

### **II.2.4. HERRAMIENTAS ESPECÍFICAS DE A.P.**

#### **II.2.4.1. SENSORES MÓVILES DE SUELO**

##### **Sensores eléctricos.**

Se emplean para medir la Conductividad Eléctrica Aparente del suelo (CEa). Suelen montarse combinados con otros tipos de sensores móviles como los de pH del suelo y los de Materia Orgánica (M.O.) y permiten muestrear grandes superficies a un mínimo coste.

El funcionamiento de este tipo de equipos consiste en aplicar en el suelo una corriente eléctrica mediante un par de electrodos circulares rodantes denominado “coulter”, los cuales se introducen en la matriz del mismo unos 3 cm. De forma coaxial el equipo lleva instalado uno o dos pares de electrodos similares que reciben la corriente proporcionada por los discos emisores, atenuada en función del estado del suelo. En realidad, lo que se mide es la resistividad eléctrica del suelo, que es una medida inversa a la conductividad eléctrica.



Multitud de estudios han demostrado que existe una proporcionalidad muy importante entre el valor de la CEa y la fertilidad natural del suelo en condiciones de secano y, al ser más intuitivo, constituye el motivo de que sea el que se use y no el de la resistividad, que es inverso y es el que realmente mide este equipo. En regadío, su utilidad viene determinada porque puede ser usado para hacer una diferenciación entre zonas con diferentes tipos de suelo.

Según la posición de los electrodos receptores la profundidad de la medida varía. De este modo, el par de electrodos situados entre los emisores miden la CEa de la capa de suelo hasta una profundidad aproximada de 30 cm, y los que se sitúan en la parte exterior miden una profundidad que depende de la distancia a los que se los coloque de los emisores, pero que suele oscilar entre 80 y 90 cm.

El sensor va conectado a un equipo GPS que le permite geo-posicionar todas las medidas efectuadas lo que permitirá hacer una representación gráfica de las mismas.



Figura 2 - Plataforma de Sensores de CEa y pH VERIS-3150.  
Fuente: Veris Technologies, Inc.

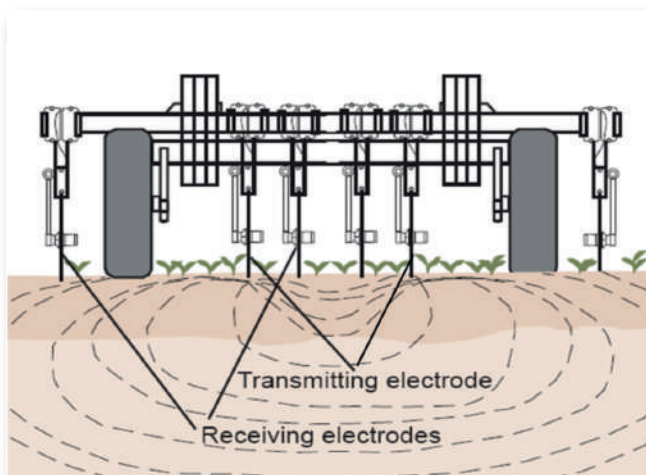


Figura 3 - Esquema de distribución de electrodos de CEa en el VERIS 3150. Fuente: Veris Technologies, Inc.

En la práctica, los valores altos de CEa se dan en suelos con mayor capacidad de retención de humedad y nutrientes, que son los que presentan una menor resistencia al paso de la corriente eléctrica y se corresponden con los de mayor contenido en arcilla.

### Sensores de inducción electromagnética.

Otro tipo de sensores ampliamente utilizados para medir la CEa son los sensores electromagnéticos.

Estos sensores, como puede verse en la imagen adjunta, disponen de unas bobinas emisoras que generan un campo electromagnético y otra bobina receptora que detecta dicho campo, el cual se ve alterado por la proximidad del suelo y por su humedad y contenido en nutrientes.

La desventaja de este tipo de sensores, con respecto a los eléctricos, es que se ven afectados por la proximidad de los metales, y, en el caso del viñedo, esto puede ser determinante para impedir su uso y por la temperatura, por lo cual su uso requiere realizar pasadas de calibración en cada jornada de trabajo.

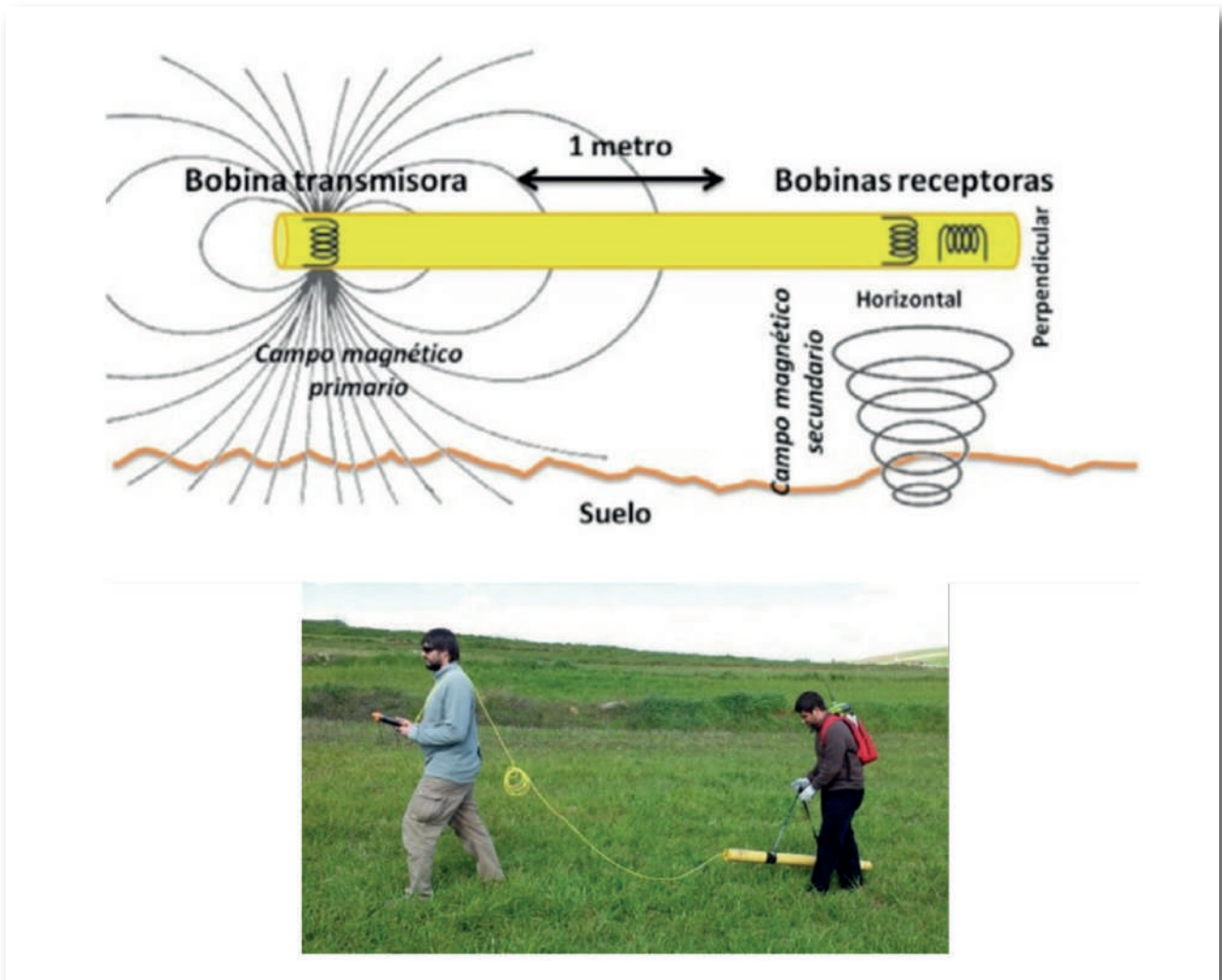


Figura 4 - Esquema de funcionamiento y ejemplo de uso en campo del sensor DUALEM 1S. Fuente: Terrón, JM

### Sensores de pH.

Existen equipos que permiten realizar mapas de pH de las parcelas de cultivo, para ello disponen de una bota metálica que se introduce en el suelo periódicamente durante la ejecución de la operación, a una distancia entre muestras que puede ser definida en función de la velocidad de trabajo, siendo la más común de unos 20 m en la dirección de avance y unos 18m entre pasadas, lo cual crea una malla de puntos muy densa que permite elaborar el mapa de pH de la parcela, que podrá ser utilizado para definir posibles enmiendas calizas a dosis variable.

En cada muestra de suelo se introducen automáticamente dos electrodos de antimonio que realizan la medida, la cual es aceptada si la diferencia entre los valores obtenidos entre los mismos es menor al 10%, y rechazada en caso contrario. Una vez hecha la medida da comienzo un



Figura 5 - Equipo de muestreo de pH. Fuente: Veris Technologies, Inc.

nuevo ciclo durante el cual, cuando los electrodos se quedan libres porque la bota se encuentra tomando una nueva muestra, son lavados por un chorro de agua destilada u osmotizada para realizar una nueva medida sin contaminación de la muestra anterior.

### Sensores de materia orgánica.

Recientemente han aparecido en el mercado sensores activos para medir materia orgánica (M.O.) del suelo también por espectroscopía. Estos sensores permiten hacer mapas de M.O. de parcelas simultáneamente con otros tipos de sensores, como pueden ser los de CEa y lo de pH, como ya se ha mencionado anteriormente.



Figura 6 - Equipo de medición de M.O. VERIS Optic Mapper. Fuente: Veris Technologies, Inc.

### II.2.4.2. SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa (radiación PAR, visible), la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis, mientras que reflejan la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano debido a que el nivel de energía por fotón en ese dominio (de longitud de onda mayor a los 700 nm) no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas: una fuerte absorción en este punto sólo causaría un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos.

En este sentido, cuando una planta está sana y vigorosa, absorbe gran parte de la radiación PAR que le llega y rechaza o refleja la que no necesita (NIR). Por otro lado, cuando esa planta sufre algún tipo de estrés, tanto hídrico como por alguna enfermedad o plaga, la cantidad de radiación PAR absorbida se reduce y la no visible aumenta ligeramente al no ser capaz de rechazarla.

Observando la ecuación del índice y el gráfico de reluctancia a diferentes longitudes de onda, se observa como el índice de vegetación proporciona un mayor valor cuando la planta no sufre estrés.

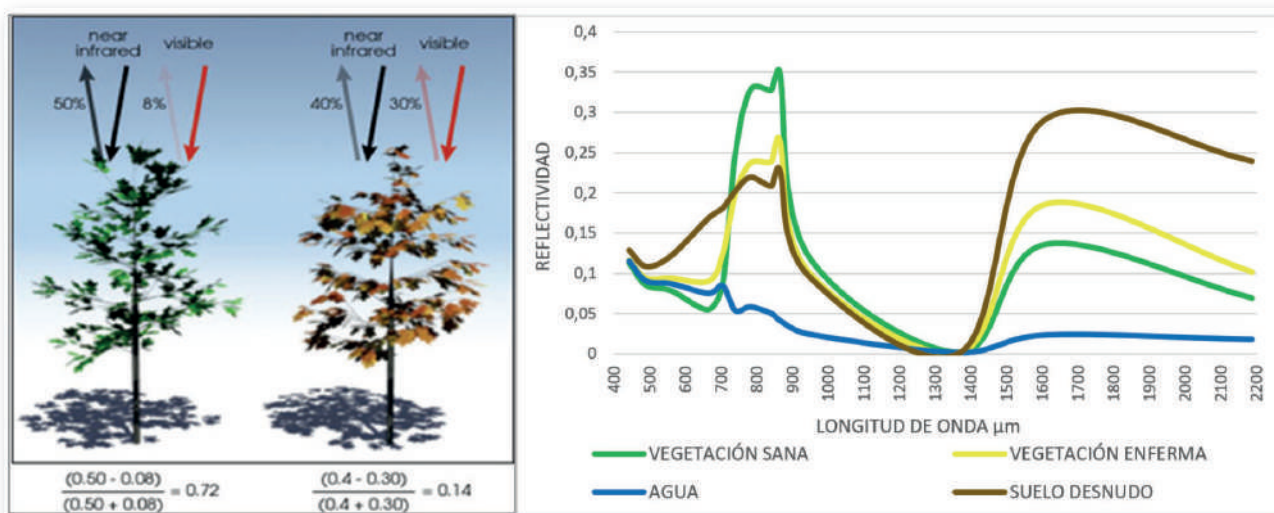


Figura 7 - Gráfica del Espectro electromagnético del satélite Sentinel 2 y esquema del efecto de la radiación solar sobre las plantas. Fuente: NASA-ARSET



Para medir el nivel de energía reflejada por las plantas, o por cualquier otro cuerpo, al recibir una determinada energía lumínica, se utilizan sensores de diversos tipos.

Estos sensores se denominan también sensores de vegetación, porque se usan para medir el desarrollo vegetativo de los cultivos mediante índices calculados a partir de los valores medidos. El más utilizado es el Índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

Figura 8 - Fórmula del cálculo del NDVI.

### Sensores satelitales.

Es una de las grandes herramientas para la gestión territorial, fundamentalmente por la capacidad de analizar grandes porciones de terreno con un rango del espectro mayor al percibido por el ojo humano.

No se trata de una tecnología nueva pues, desde finales de los años 70, existen misiones de características similares a las actuales, pero con el lanzamiento del satélite Sentinel 2 y la puesta a disposición de la ciudadanía de las imágenes del mismo (2015) se han multiplicado las aplicaciones en la A.P., por dos cuestiones principales:

- La mejora de la resolución espacial permite analizar parcelas de menor tamaño adaptándose a la realidad de la estructura de las explotaciones y sobre todo con una mayor capacidad para analizar la variabilidad espacial de las explotaciones;
- El descenso en el periodo de revisita (resolución temporal) ha permitido aportar la dimensión temporal al análisis de los cultivos.

Esta popularización de las imágenes satelitales ha incorporado al vocabulario del agricultor medio términos como el NDVI, índice de los denominados de pendiente que explota la reflexión energética de la vegetación en la franja del infrarrojo cercano en contraposición con la absorción de las plantas en la franja del rojo, y que aparecen en una gran multitud de visores gratuitos que acercan al agricultor este tipo de tecnologías de forma sencilla. Aunque menos generalizado, no hay que olvidar otro tipo de índices como el NDWI (o NDMI en otras referencias bibliográficas) que, con el mismo principio del índice anterior, compara la absorción del agua en la franja del infrarrojo de onda corta y la reflexión energética en el infrarrojo cercano.

Debido a la complejidad de manejo, procesamiento e interpretación, las imágenes procedentes de satélites con sensores activos, dentro de la región del microondas, no están tan extendidas como las procedentes de los sensores ópticos. Sin embargo, ofrecen una información muy valiosa sobre la morfología de los cultivos. Asimismo, se está estudiando la viabilidad de este tipo de productos para zonificación de suelos en función de sus características fisicoquímicas.

## Sensores aéreos.

Para completar este escenario, se han utilizado dispositivos U.A.V. (Unmanned Aerial Vehicle) para el monitoreo del estado hídrico de cultivos en ensayos de riego y otros usos.

Con la aparición de los aparatos aéreos U.A.V. se han empezado a utilizar cámaras fotográficas especiales que se han desarrollado de forma apreciable, disminuyendo mucho su tamaño y peso. Su utilización permite capturar imágenes del estado de los cultivos a muy bajo coste, en el momento que se desee y a una elevada resolución.



Figura 9 - Vehículo aéreo U.A.V.

Existen diferentes tipos de cámaras en función de los sensores que lleven instalados. Así, podemos hablar de:

- Cámaras fotográficas convencionales;
- Cámaras multi-espectrales. Recogen imágenes con longitudes de onda fijas, normalmente en la banda del verde, del rojo y del infrarrojo cercano, que son luego utilizadas para calcular índices de vegetación diversos;
- Cámaras hiper-espectrales. Recogen imágenes en una banda del espectro electromagnético a intervalos definidos por su resolución espectral. Se usan para investigar la respuesta de los cultivos ante determinadas situaciones;
- Cámaras Térmicas: Capturan imágenes en una longitud de onda fija situada en la banda del infrarrojo térmico. Se utilizan para detectar el *stress* hídrico de los cultivos.

## Sensores activos cercanos.

Uno de los tipos más utilizados en A.P. son los sensores multi-espectrales activos cercanos (Figura 11), activos porque llevan una luz modulada propia y multi-espectrales porque son capaces de percibir la reflectancia de la planta al ser iluminada en tres bandas del espectro. En los equipos de este tipo existentes en el mercado actualmente, las longitudes de onda de los tres sensores suelen ser 670 nm (Rojo), 730 nm (Rojo límite) y 780 nm (Infrarrojo cercano) y el propio *firmware* del aparato proporciona los valores calculados de los índices NDVI y NDRE (el cual se calcula mediante la misma fórmula de la Figura 8, sustituyendo el valor del Infrarrojo Cercano (NIR) por el del Rojo límite (Red Edge). Estos valores corresponden a un sensor determinado, en otros modelos, de diferentes marcas, pueden variar ligeramente.

### II.2.4.3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO VARIABLE

La aportación de abono en la A.P. se realiza a dosis variable (Variable rate technology – VRT) y puede ejecutarse mediante en forma sólida o líquida. En uno y otro caso existen equipos que, conectados al GPS del tractor, interpretan el mapa de abonado previamente definido y distribuyen el producto por la parcela con arreglo al mismo.

Para distribuir el abono sólido se utilizan abonadoras de voleo a dosis variable, las cuales también pueden ser usadas para realizar enmiendas calizas si se disponen de mapas de pH de la parcela obtenidos mediante los equipos descritos en el apartado.

El aporte de abonado de fondo en forma líquida se realiza con equipos de pulverización (Figura 10) dotados de un circuito específico con boquillas de espejo que permitan la distribución del líquido con gota gruesa sin llegar a atomizar, para ello es necesario adaptar la velocidad del equipo a la dosis prescrita y al caudal proporcionado por la boquilla, que puede oscilar entre el -20 y el + 15 % del nominal de la boquilla. Antes de la aplicación habrá que elegir el tipo de boquilla en función del estado de la parcela, que determinará el rango de velocidad a la que podrá circular el tractor.

A modo orientativo se incluye una tabla sobre el uso adecuado de cada tipo de boquilla de espejo dependiendo de la dosis de caldo a aportar por Ha y la velocidad de trabajo, la cual fue elaborada por investigadores de CICYTEX para su uso propio, por lo cual los valores pueden ser diferentes con arreglo a la marca comercial de las boquillas utilizadas.



Figura 10 - Equipo de pulverización de dosificación variable.

**Tabla 1 - Rangos de dosis optima en función de la velocidad de trabajo del pulverizador con boquillas de espejo**

Boquilla tipo	Presión referencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Capacidad de la boquilla (l/min)	Litros por Hectárea de agua											
			-20 %	8 Km/h	+15 %	-20 %	10 Km/h	+15 %	-20 %	12 Km/h	+15 %	-20 %	14 Km/h	+15 %
0	2	6.4	112	140	161	90	112	129	74	93	107	64	80	92
1	2	13.0	228	285	328	182	228	262	152	190	219	130	163	187
2	2	16.3	286	357	411	229	286	329	190	238	274	163	204	235
3	2	20.0	350	438	504	281	351	404	234	292	336	200	250	288
4	2	23.6	414	517	595	331	414	476	276	345	397	236	295	339
5	2	27.5	482	603	693	386	482	554	322	402	462	275	344	396
6	2	30.8	540	675	776	432	540	621	360	450	518	309	386	444
7	2	34.0	596	745	857	477	596	685	398	497	572	341	426	490
8	2	37.4	655	819	942	525	656	754	437	546	628	374	468	538
10	2	47.2	827	1034	1189	662	827	951	552	690	794	473	591	680

Para realizar abonados de cobertera a dosis variable existen dos soluciones:

- Elaborar un mapa de prescripción a partir de mapas de vegetación obtenidos mediante sensores remotos;
- Utilizar sensores de vegetación activos incorporados al pulverizador (Figura 10) los cuales ajustan la dosis aportada por el equipo en función del valor de vegetación medio medido por los sensores de vegetación incorporados a la barra (Figura 11), cuyo número puede variar, en función del diseño del equipo, de forma que, en tiempo real, el caudal aportado va variando en la dirección y sentido de trabajo según el estado del cultivo; este último sistema requiere una pasada previa de calibración antes de comenzar el trabajo que permita ajustar los valores mínimos de índice de vegetación por debajo de los cuales no se aportaría abono por no existir densidad de plantas suficiente. Igualmente requiere curvas de calibración de aportación específicas para cada cultivo, lo cual supone una seria limitación en su aplicación.



*Figura 11 - Sensor de vegetación multiespectral activo.*

#### **II.2.4.4. MAPAS DE RENDIMIENTO**

La elaboración de mapas de rendimiento o de producción (Yieldmaps) en una de las primeras herramientas que se comenzó a utilizar para hacer la zonificación requerida en A.P. en cultivos recolectados con cosechadoras de cereales, debido a la facilidad en incorporar la tecnología necesaria a este tipo de vehículos.

El problema que conlleva la utilización exclusiva de este equipamiento radica en la tardanza en la obtención del mapa de producción ya que éste se sólo puede ser obtenido al final del ciclo.

Los elementos necesarios para la instalación de este tipo de equipos en una cosechadora son:

- GPS mono-frecuencia con correcciones diferenciales SBAS;
- Placa de impacto o dispositivo similar en el elevador de cangilones del grano para medir el flujo del mismo;
- Sensor de humedad de grano;
- Sensor de elevación del cabezal de corte;
- Sensor de velocidad;
- Consola Monitor de cosecha.

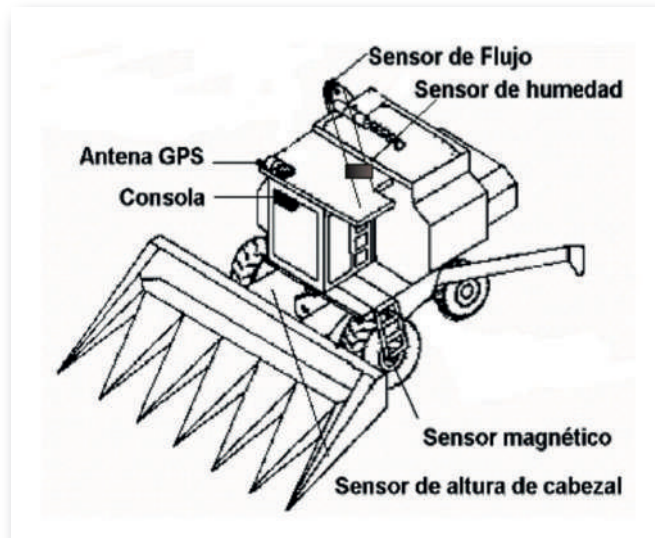
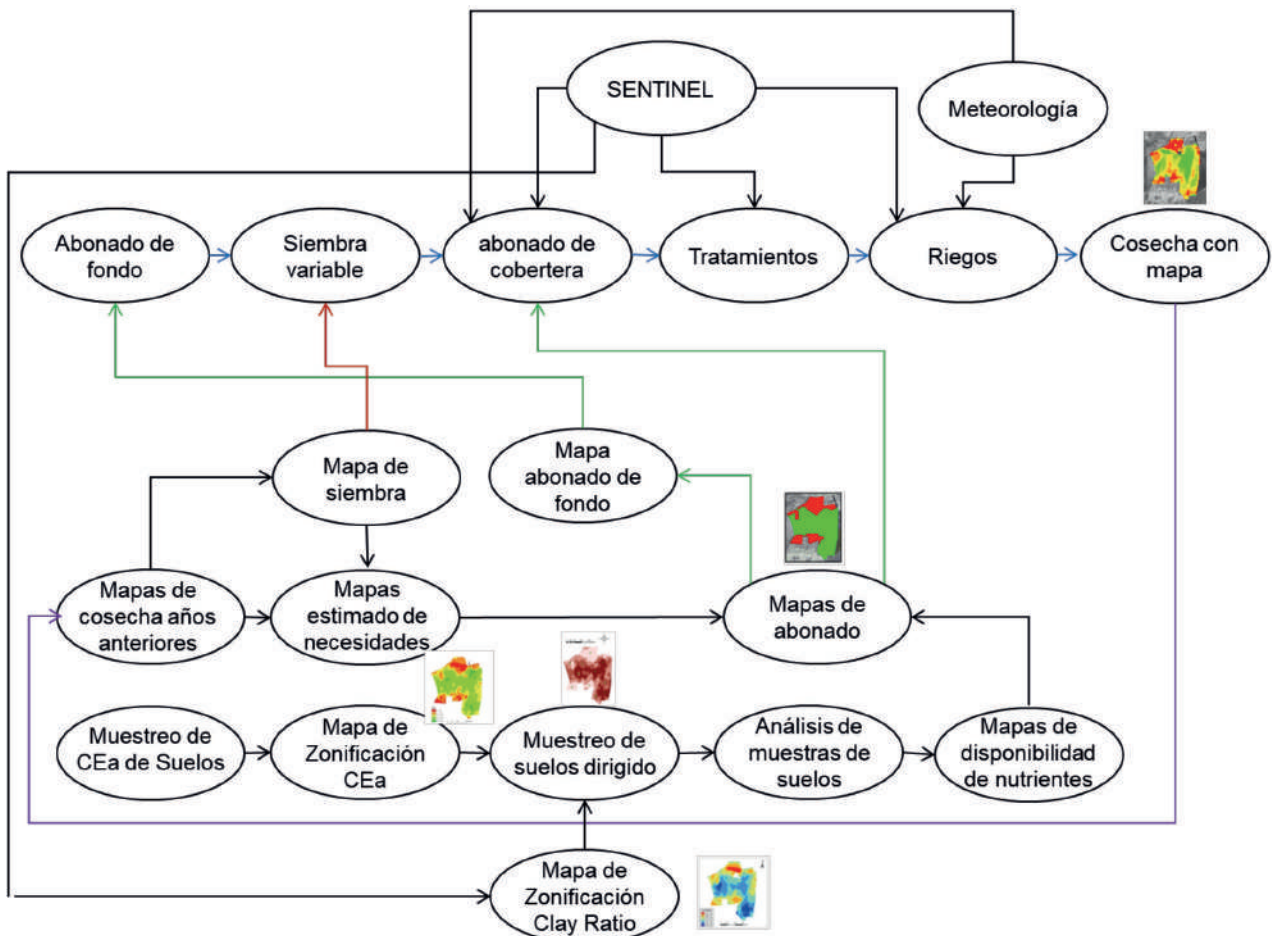


Figura 12 - Componentes del Monitor de cosecha.

### II.3. Proceso de Aplicación de la Agricultura de Precisión







### II.3.1. DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO

Es el elemento principal para comenzar a realizar A.P.

Puede ser realizado mediante diferentes procedimientos lo cual implica, evidentemente, diferentes costes de ejecución. Para ello puede utilizarse cualquier de los sensores móviles descritos en el apartado II.2.4.1, o sistemas de percepción remota descritos en el apartado II.2.4.2. La elección de uno u otro procedimiento dependerá del presupuesto y conocimientos disponibles.

A partir de los mapas de zonificación obtenidos se realizan muestreos de suelos dirigidos a puntos representativos de las parcelas, los cuales van seguidos de una analítica físico-química de las muestras obtenidas.

Los parámetros físico-químicos recomendados serían:

Arcilla	Arena	Limo	Textura
Materia Orgánica	pH	CIC	Conductividad Eléctrica
Nitrógeno	Fósforo	Potasio	

Con los parámetros anteriores pueden ser definidas las diferentes zonas homogéneas de las parcelas cuyos mapas pueden ser utilizados para diversos fines:

- Mapas de enmiendas (pH o M.O.);
- Mapas de siembra a dosis variable en cultivos anuales;
- Mapas de diseño de plantación de cultivos plurianuales;
- Diseños de zonas de riego;
- Mapas de disponibilidad de nutrientes.

### II.3.2. ELABORACIÓN DE MAPAS DE DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES

Una vez definidas las diferentes zonas de manejo y caracterizadas las mismas a través de los datos obtenidos en la analítica realizada de las muestras de suelo, tal y como se describe en el apartado anterior, podrá procederse a la cuantificación de la disponibilidad de los diferentes nutrientes en cada una de ellas con arreglo a las tablas de disponibilidades para los cultivos en función de la textura de cada suelo, pudiéndose, en este momento, definir la estrategia a seguir, la cual puede contemplar diferentes acciones, como serían:

- a) Aprovechar los nutrientes existentes en el suelo sin nuevas aportaciones, en el caso en el que los suelos mostrarán contenidos suficientes. Esto permitiría reducir la carga de nutrientes del suelo, favoreciendo la disponibilidad de agua para el cultivo, un ahorro de fertilizantes y una reducción de pérdidas por lixiviación en de los nutrientes no adsorbidos al complejo de cambio;

- b) Aumentar los niveles en el caso de que los suelos fueran muy pobres en nutrientes;
- c) Aportar las extracciones del cultivo en función de las producciones previstas en cada lugar.

### **II.3.3. DISEÑO DE SIEMBRA**

Uno de los avances más recientes en A.P. ha sido la salida al mercado de sembradoras de dosificación variable que permiten variar la densidad de siembra en función de la potencialidad productiva del suelo de cada zona de manejo o, incluso, aportar abonado de forma diferencial durante la siembra o alternar diferentes variedades en la misma parcela dependiendo de las características locales de los suelos.

La estrategia a seguir dependerá de las preferencias del agricultor y de la conveniencia de dicha tarea.

### **II.3.4. MAPAS PREDICTIVOS DE COSECHA**

Al comenzar a aplicar la A.P. la elaboración de un mapa predictivo de cosecha ha de hacerse a partir del mapa de zonificación y de la opinión y experiencia del agricultor en campañas anteriores. En años sucesivos, dependiendo del tipo de cultivo, el agricultor podrá ir obteniendo mapas de producción, que le permitirán elaborar un fichero histórico el cual le permitirá conocer el potencial productivo de cada zona de manejo y su evolución, a partir de la aplicación de las diferentes técnicas descritas. Esto es muy sencillo de hacer en el caso de cultivos extensivos que sean recogidos con cosechadoras de cereales, ya que la tecnología de elaboración de este tipo de mapas está muy evolucionada, tal es el caso de cereales de secano o regadío, oleaginosas o leguminosas. En otros cultivos, como hortalizas, frutales, viñedos u olivar, la obtención de mapas de cosecha es más complicada, debiéndose hacer, en tanto no exista tecnología adecuada, de forma manual, controlando la producción según los sectores del cultivo, o bien mediante la modelización a partir de imágenes obtenidas por sensores remotos.

### **II.3.5. MAPAS DE EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES**

Una vez definido, con mayor o menor exactitud, el mapa de producción objetivo, dependiendo del tipo de cultivo, de las extracciones del mismo, las cuales se encuentran tabuladas en la amplia bibliografía agronómica existente, en cada lugar de la parcela se definirá la extracción de los diferentes nutrientes (N-P-K) que el cultivo necesitará en función de la producción asignada a cada lugar.

### **II.3.6. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE ABONADO**

El aporte del abonado habrá de ser hecho considerando diversos factores, muchos de los cuales han de ser definidos por el propio agricultor para cada cultivo, aunque el criterio general tendrá que ser aportar en cada lugar la cantidad adecuada a las extracciones del cultivo, evitando en la medida de lo posible el exceso de abonado que daría lugar, en el caso de los abonos solubles como los nitratos, a pérdidas por lixiviación, con la consecuente contaminación de las aguas subterráneas o la excesiva salinización del suelo, en el caso de los abonos que se adsorben al complejo de cambio, como ocurre con los abonos potásicos y fosfóricos.



La estrategia a adoptar incluirá definir la aportación tanto de abonado de fondo como de cobertera, que dependerán, en buena medida, del tipo de cultivo, y de la pluviometría esperada, con lo cual, en muchos casos, no se podrá conocer *a priori*, en el caso del abonado de cobertera.

#### **II.3.6.1. ABONADO DE FONDO**

Según la estrategia que se decida, la aplicación del abonado de fondo podrá ser realizada en forma sólida o líquida según los procedimientos descritos en el apartado 2.4.3.

#### **II.3.6.2. ABONADO DE COBERTERA**

Como ya se ha descrito en el apartado 2.4.3. para aplicar el abonado de cobertera a dosis variable existen dos soluciones:

- Mediante mapa de prescripción elaborado a partir de mapas de vegetación obtenidos mediante sensores remotos;
- Utilizando sensores de vegetación activos incorporados al pulverizador que permiten ajustar la dosis aportada por el equipo en función del valor de vegetación medio del cultivo en cada lugar.

#### **II.3.7. SEGUIMIENTO DEL CULTIVO MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES**

Los sistemas de percepción remota aéreos y satelitales, fundamentalmente estos últimos por su menor coste, permiten el seguimiento del estado vegetativo de los cultivos en aras a detectar posibles anomalías en el desarrollo de los mismos, las cuales pueden ser debidas a diferentes causas como:

- Ataques de plagas o enfermedades;
- Averías en los sistemas de riego;
- Problemas de distribución del agua de riego;
- Otras causas.

La utilización de estos sistemas se ha desarrollado de forma importante en los últimos tiempos, siendo muy asequibles para los agricultores por su bajo coste y accesibilidad vía Internet, de forma que, en un corto espacio de tiempo, el agricultor puede disponer de mapas de zonificación donde se muestran las anomalías encontradas para poder actuar en consecuencia mediante los sistemas necesarios.

Paralelamente, el acceso a gabinetes técnicos de asesoramiento agronómico se ha incrementado de manera importante, de forma que el agricultor no necesita tener grandes conocimientos técnicos sino sólo la voluntad de aplicar las técnicas de la A.P.

#### **II.3.8. CONTROL DE RIEGOS**

Aparte del control de anomalías de riego ya mencionado, existen sistemas que, combinando datos climáticos obtenidos en redes de estaciones meteorológicas cercanas con imágenes captadas con sensores de infrarrojo térmico aéreos que pueden detectar el *stress* hídrico de los cultivos, permiten estimar las dosis de riego necesarias para los cultivos y aplicarlas mediante técnicas de riego de precisión.

### **II.3.9. DETECCIÓN DE PLAGAS, ENFERMEDADES Y MALAS HIERBAS**

Las imágenes satelitales también pueden ser utilizadas para detectar la aparición de plagas y enfermedades en los cultivos o, incluso, para la detección de malas hierbas, permitiendo localizar áreas de afección a fin de programar tratamientos localizados.

El tratamiento a dosis variable se realiza con los mismos equipos de pulverización utilizados en el abonado líquido, descritos en el apartado 2.4.3., ya que estos suelen disponer de un segundo circuito para boquillas de abanico. El problema radica en que este tipo de boquillas no suelen permitir cambios de caudal, aunque ya las hay que sí lo permiten. De todas formas, la aplicación de dosis variable de productos fitosanitarios es complicada y, generalmente, la opción es tratar/no tratar.

En cultivos existen sistemas que, mediante el uso de sensores ópticos, detectan la presencia de vegetación cercana, lo cual supone un ahorro importante en la cantidad de caldo a aportar y minimizan el impacto sobre el medio ambiente.

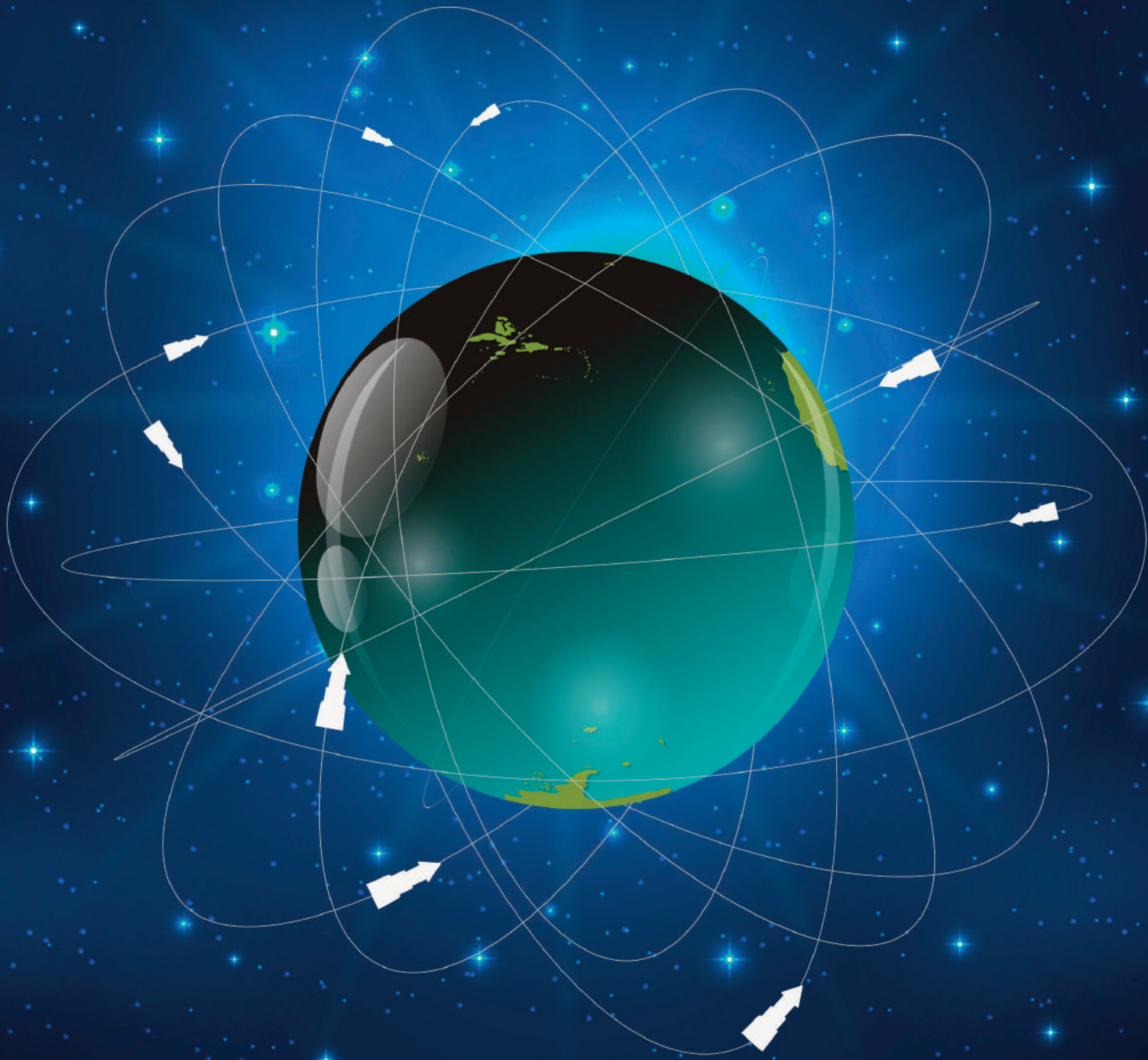
### **II.3.10. RECOLECCIÓN Y ELABORACIÓN DE MAPAS DE PRODUCCIÓN**

Una vez finalizado el ciclo del cultivo se realiza la recolección con una cosechadora dotada de monitor de producción que permite confeccionar mapas de rendimiento, los cuales son utilizados para obtener las extracciones de nutrientes realizadas por los cultivos y combinándolos con los mapas de aportación de fertilizantes realizados, permiten confeccionar mapas de balance de los diferentes nutrientes en aras a programar las dosis a aplicar en la siguiente campaña.

A medida que va aumentando el periodo de tiempo durante el cual se aplica la A.P. la cantidad de información sobre la productividad de cada zona de la parcela y su evolución temporal se va incrementando, de forma que se pueden ir aplicando estrategias de mejora de producción y evaluando los resultados obtenidos en la aplicación de las mismas.

## **II.4. Bibliografía**

TERRÓN, JM. (2017). XXXVIII Jornadas de enología y viticultura de Tierra de Barros. Aplicaciones de la agricultura de precisión a la Agricultura. Almendralejo, España. Centro Universitario Santa Ana. ISBN: 84-7930-106-6.



**Conceptos Básicos  
de Detección  
Remota  
(Programa Copernicus)**





**Domínguez, Francisco José<sup>1</sup>; Paixao, Luís<sup>2</sup>; Terrón, José María<sup>1</sup>; Fernández, José Rafael<sup>1</sup>, Marques da Silva, José Rafael<sup>2,3</sup>**

### III.1. Introducción

Cuando se habla de teledetección nos referimos a la capacidad de obtener información de un elemento terrestre sin estar en contacto con dicho elemento. Para ello, se necesitan tres elementos fundamentales: sujeto del que se obtiene información, sensor que capta dicha información y soporte para el mismo. Esta definición se puede extrapolar a la teledetección espacial, con los mismos elementos, pero con un funcionamiento bastante más complejo.

La teledetección aplicada al estudio del territorio no es una disciplina nueva, nace prácticamente con la fotografía y con la toma de las primeras imágenes desde globos aerostáticos. Como cualquier disciplina técnica, la evolución ha sido muy rápida y hasta hace pocas décadas, con clara vocación militar. Desde el desarrollo de la carrera espacial, el peso principal de la teledetección ha recaído en las misiones de la observación de la tierra a partir de sensores instalados en constelaciones satelitales, cuyo inicio se produce en los años 60, extendiéndose a la actualidad con una amplia gama de productos gubernamentales y comerciales. Desde hace pocos años esta información ha empezado a ponerse a disposición de la comunidad científica y la ciudadanía en general, de forma gratuita, primero por parte del USGS americano y posteriormente con la puesta en marcha del Programa Copernicus de la ESA (Agencia Espacial Europea).

### III.2. Fundamentos básicos de teledetección

Como se ha expuesto en la introducción, la base de la teledetección es la relación entre el sensor y el elemento observado. Esta relación se establece mediante un flujo de radiación que se dirige desde el elemento observado hasta el sensor y que puede ser de tres tipos:

- Radiación solar reflejada;
- Radiación emitida por la superficie terrestre;
- Radiación emitida por el propio sensor, reflejada por los objetos.

Esta radiación se transmite en forma de ondas en el campo electromagnético y la longitud entre las mismas va a determinar diferentes regiones dentro del denominado espectro electromagnético. Dentro de estas regiones del espectro las utilizadas en teledetección espacial son:

- Visible e infrarrojo cercano (reflexión de radiación solar);
- Infrarrojo térmico (emisión terrestre);
- Microondas (emisión y recepción de la radiación emitida por el sensor).

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura.

<sup>2</sup> Universidade de Évora y MED.

<sup>3</sup> Agroinsider, Lda.

### III.2.1. TIPOS DE SENSORES

La clasificación anterior nos aporta información sobre el tipo de sensores en teledetección, ya que los que captan la radiación reflejada o emitida por la tierra no requieren fuentes energéticas externas (denominados sensores pasivos), sin embargo, las emisiones en la franja del radar requieren que el propio sensor envíe una señal electromagnética para poder recibir la radiación reflejada por la superficie terrestre (sensores activos).

Aparte de la tipología de los sensores, los productos resultantes también se diferencian sustancialmente. Los sensores activos aportan imágenes que muestran niveles digitales sobre las características químicas de los materiales que reflejan o emiten dicha información en diferentes longitudes de onda. Por otro lado, los sensores activos construyen su información a partir de la morfología del territorio en función de los ecos producidos por la superficie terrestre por lo que variará en función de su rugosidad, disposición, ángulo...

La principal ventaja de los sensores activos la encontramos en la no interferencia de la nubosidad en esta longitud de onda, cuestión que elimina las limitaciones atmosféricas comunes en el resto de sensores, sin embargo, se trata de un tipo de imágenes más complejas en su interpretación y procesado.

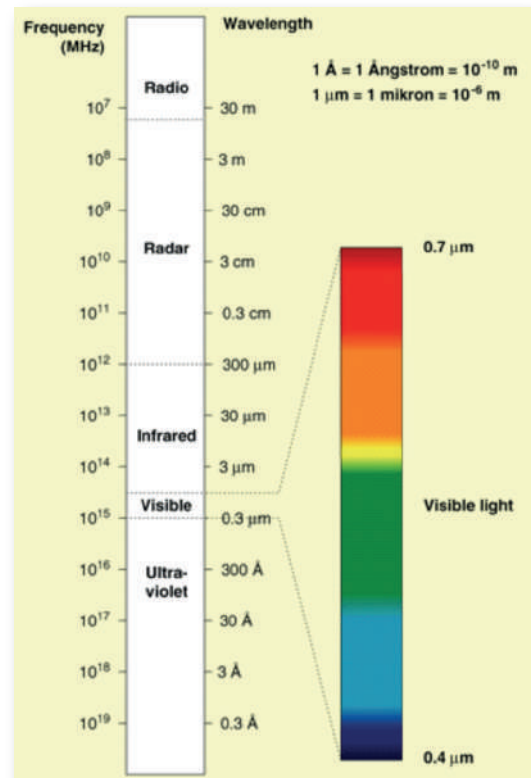


Figura 13 - Regiones del espectro electromagnético. En teledetección solo se utiliza un pequeño rango electromagnético entre el visible y el radar. Fuente: Agencia Espacial Europea-ESA

### III.2.2. RESOLUCIONES

La resolución de una imagen satelital está relacionada con la capacitación de la misma para discriminar los diferentes elementos en la superficie terrestre. Cuando hablamos de resolución en teledetección podemos aplicar cuatro clases:

- A-. **Resolución Espacial:** Es aquella referida al tamaño del pixel de la imagen georreferenciado en el territorio. Esto va a depender de la altura del satélite sobre la superficie terrestre, las características del sensor, el ángulo de captura o la velocidad de captura, cuestiones que variarán en función del cometido de cada satélite. Por ejemplo, los satélites meteorológicos como Meteosat tienen tamaños de pixel entre 1km y 5km (en función del canal), tamaño suficiente para analizar la evolución de la cobertura nubosa, la cantidad de vapor de agua, la temperatura de las nubes...sin embargo, cuando se quiere realizar un análisis territorial en detalle, los tamaños de pixel disminuyen hasta los 30m de Landsat 8, los 10m de Sentinel 2 o incluso por debajo del metro en caso de las bandas pancromaticas de los satélites Quick Bird, WorldView o Geoeeye.
- B-. **Resolución temporal:** La resolución temporal viene determinada por el tiempo que discurre entre las diferentes pasadas del satélite sobre una misma localización. Esta característica va a depender del tipo de órbita, el ancho de barrido, la densidad de satélites e incluso de la capacidad para la reorientación del sensor (esto se utiliza para el seguimiento exhaustivo de desastres). Al igual que en el caso de la resolución espacial la variedad es enorme, desde los 2,5 minutos en satélites geoestacionarios meteorológicos, a los más de 15 días en otro tipo de satélites como Landsat 8. En algunos casos, la combinación de satélites con



similares características mejora de forma sustancial este periodo de revisita como ocurre con la combinación Landsat 7-Landsat 8 reduciendo el periodo sin imágenes de 16 a 8 días o el caso de la combinación Sentinel 2A y Sentinel 2B reduciendo también a la mitad el periodo de 10 días iniciales. Existen algunos satélites comerciales con periodo de revisita diario y resoluciones espaciales menores de un metro.

C-. Resolución espectral: Hace referencia al número de bandas, el ancho de las mismas y el rango total del espectro electromagnético que abarca el sensor. Cuanta mayor resolución espectral, mayor capacidad de discriminar un cuerpo en función de la reflectividad en las diversas longitudes de onda.

Cabe destacar la importancia de la precisión en el ancho de cada banda que minimiza la influencia de elementos presentes en la atmosfera en la información recibida por el satélite como puede ser el vapor de agua y otros aerosoles. Según se puede observar en la documentación aportada por la ESA, se ha dotado de una mayor precisión espectral en algunas bandas o incluso ha creado la banda 8A, superpuesta con la B8 (infrarrojo cercano), pero de menor ancho de banda (20nm de la B8A frente a los 115nm de la B8) que minimice la contaminación del vapor de agua en el análisis de la vegetación.

Otra de las novedades que aporta Sentinel 2 frente a los satélites de similares características es la inclusión de 3 bandas (B5, B6, B7) en la región del límite del rojo (*red edge*) de gran precisión espectral (15nm) muy útil a la hora de obtener otros tipos de índices, siempre ligados a las características de la vegetación.

Por definición, los satélites activos son los que menor resolución espectral tienen, pues solo emiten-reciben en la banda del microondas-radar. En un punto intermedio están los satélites que abarcan las regiones del visible o visible e infrarrojo próximo, que generalmente son satélites de alta o muy alta resolución espacial como SPOT, Deimos o GeoEye. Los satélites de media resolución espacial incorporan el infrarrojo de onda corta o incluso el infrarrojo térmico como es el caso de la constelación Landsat (desde los sensores TM).

Mención aparte merecen los satélites hiperespectrales, con un mayor número de bandas con cobertura casi continua del espectro electromagnético desde el visible al infrarrojo térmico. Suelen ser satélites de baja resolución espacial y gran resolución temporal como MODIS o Sentinel 3.

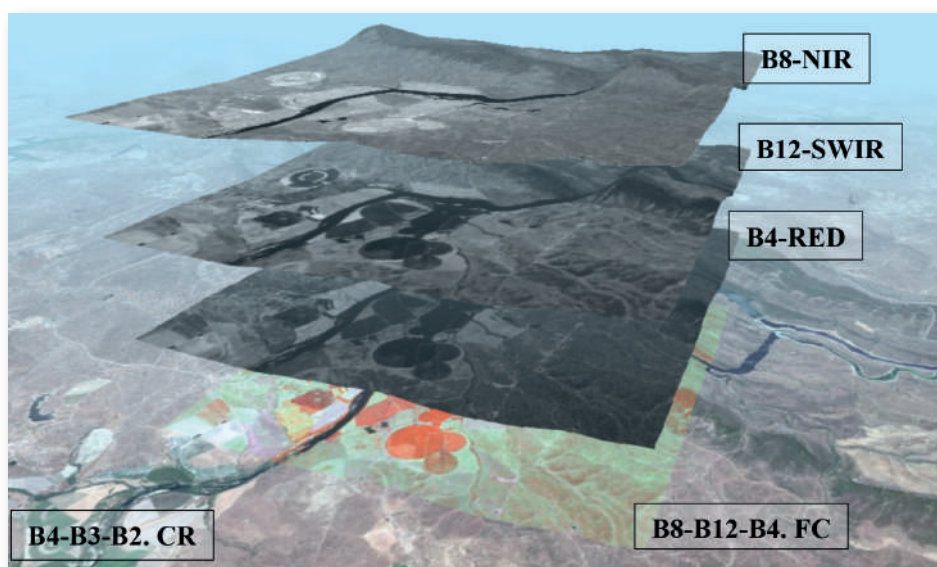


Figura 14 - Ejemplo de las diferentes bandas y el resultado de su combinación. Se puede observar la información de las bandas y como su combinación (FC-Falso Color) aportan matices que no se pueden diferenciar individualmente ni en la información visible (CR-Color real).

D-. Resolución radiométrica. Es la capacidad máxima de almacenar la información captada por el sensor en niveles de gris de una imagen digital. Esta profundidad de la imagen se mide en código binario y va a delimitar el máximo de niveles de gris de un objeto para cada banda. Para un mayor entendimiento, en la siguiente tabla se lista la cantidad de niveles de gris en función del número de *bits* de la imagen:

**Tabla 2 - Ejemplo de los niveles de grises en función del número de bits**

Número de bits	Número de niveles diferentes de grises	Satélite
1	2	
2	4	
4	16	
8	256	Landsat 7
12	4096	Landsat 8, Sentinel 2; SPOT 6
16	65.536	

### III.2.3. LIMITACIONES ATMOSFÉRICAS

Uno de los principales inconvenientes para el análisis de las imágenes satelitales son las interacciones con los elementos presentes en la atmosfera. Estas limitaciones se pueden dar en forma de nubosidad o en forma de partículas en suspensión (fundamentalmente en las capas bajas) denominadas aerosoles, que van a incluir aquellas presentes naturalmente en la atmosfera (vapor de agua, polvo en suspensión, humo de volcanes...) o las de origen antrópico (proveniente de industrias, vehículos, quemas agrícolas...).

Nubosidad. Por lo general es un elemento muy evidente, tanto para la visión directa sobre la imagen como para su identificación a partir de los metadatos las imágenes: cada cuadrícula de Sentinel 2 dispone del dato de porcentaje de nubosidad de la misma. Asimismo, para análisis más complejos, la información descargada de la ESA cuenta con información en formato GML para la aplicación de máscaras de nubosidad a las imágenes: es la capa denominada QA60 donde con la información obtenida a partir de las bandas 10 y 2 se obtiene una capa de nubosidad con los siguientes valores:

- 0 Sin nubosidad
- 1 Nubosidad densa
- 2 Cirros

En ocasiones, las nubes de cristales de hielo (cirros) son tan finas que son muy difíciles de detectar a simple vista, no son identificadas en los metadatos ni en la capa QA60, sin embargo, suelen producir anomalías en el cálculo de algunos índices.

Aerosoles. Como se ha comentado con anterioridad, se trata de partículas sólidas y líquidas (<10µm) en suspensión en la parte de la atmosfera más cercana a la tierra. Para corregir las interferencias de este tipo de materiales, la propia ESA dispone de una herramienta para la corrección atmosférica de las imágenes con nivel L1C (imágenes TOA, Top Of Atmosphere) denominada Sen2Cor, incluido en el *software* SNAP. Este tipo de



corrección funciona bastante bien en caso de vapor de agua, pero no en días de calima o con presencia de humo (incendios forestales), ofreciendo, en estos casos, resultados muy pobres.

Como se ha comentado con anterioridad, gran parte de estas limitaciones atmosféricas no interfiere en el caso de los sensores activos (microondas-radar), solo viéndose parcialmente afectados en caso de grandes acumulaciones de polvo en suspensión.

### III.3. Bandas espectrales e índices de vegetación

El espectro electromagnético tiene un gran rango que oscila entre el estudio de las partículas subatómicas en las longitudes de onda más bajas hasta el ámbito de las telecomunicaciones en el extremo opuesto.

#### III.3.1. RANGOS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

En el caso de la teledetección solo se utilizan unas pocas regiones de las que poder obtener información de las características fisicoquímicas de la superficie terrestre. Gran parte de la radiación emitida por el sol y reflejada por la tierra es dispersada por los propios componentes de la atmosfera, quedando al servicio de la teledetección las llamadas ventanas espectrales, que son aquellas franjas del espectro electromagnético donde la atmosfera es permeable a estos flujos radiativos.

Dentro de las ventanas espectrales tenemos una serie de regiones en función de la longitud de onda reflejada por la superficie terrestre. Cuando se manejan datos obtenidos por satélites normalmente se utiliza información de las regiones visibles e infrarrojo (también de la región del microondas que, por su particularidad, tratarán de forma independiente).

El *visible* es la región del espectro que el ser humano tiene capacidad para captar. Incluye una franja desde los 400nm hasta los 750nm aproximadamente. El hecho de ser la franja visible para el ojo humano hace que sea la región más utilizada desde los inicios de la teledetección siendo el denominador común en la gran mayoría de sensores de percepción remota independientemente de la plataforma donde esté instalado (drones, aerotransportados, satélites...)

La región del infrarrojo es más heterogénea, donde se pueden distinguir tres parcelas dentro de la misma región con características bien diferenciadas: infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico.

El *infrarrojo cercano* (750-900nm aproximadamente) es la región más importante para el estudio de la vegetación. Al contrario que en la franja del visible, la vegetación con una estructura foliar sana, la mayor parte del flujo radiativo será reflejado, sin embargo, en caso de marchitación de la superficie foliar (por senescencia de la planta, enfermedad, falta de nutrientes...) esta reflectividad será cada vez menor, desapareciendo en caso de vegetación sin hoja o muerta.

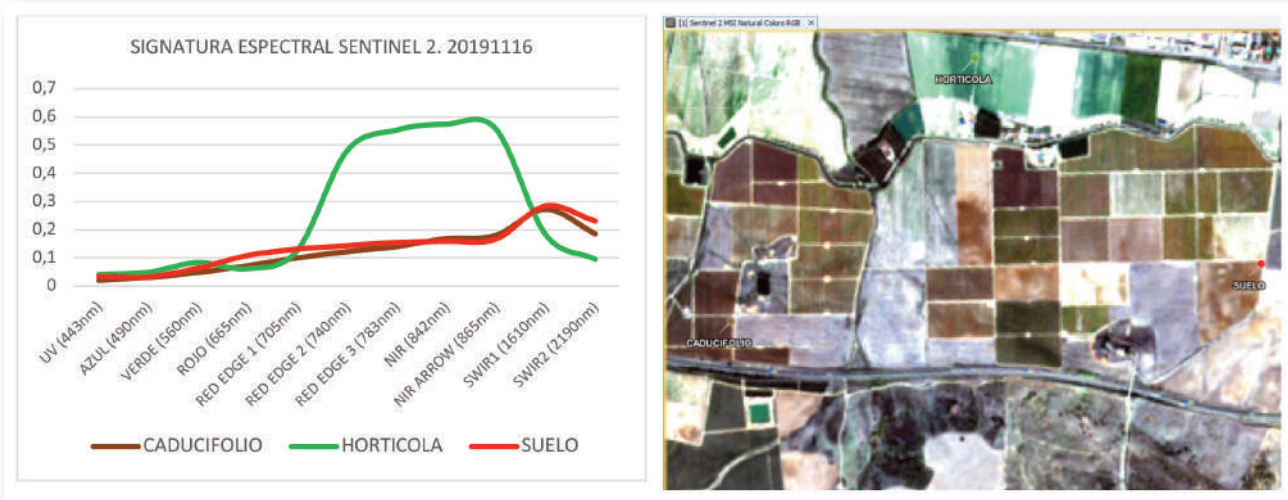


Figura 15 - Sustancial diferencia en la región del infrarrojo cercano entre un cultivo en pleno desarrollo (hortícolas de invierno) y la decadencia de un cultivo de frutal caducifolio y el suelo desnudo. Se aprecia también el leve repunte en la franja del verde debido a la reflectividad de la clorofila.

Asimismo, al igual que se pueden establecer diferentes estados de una misma formación o cultivo en función de la reflectividad de la estructura foliar, se puede realizar un análisis similar con diferentes tipos de formaciones o cultivos, ya que las diferencias en la estructura foliar reflejarán de forma diferente en la región del infrarrojo.

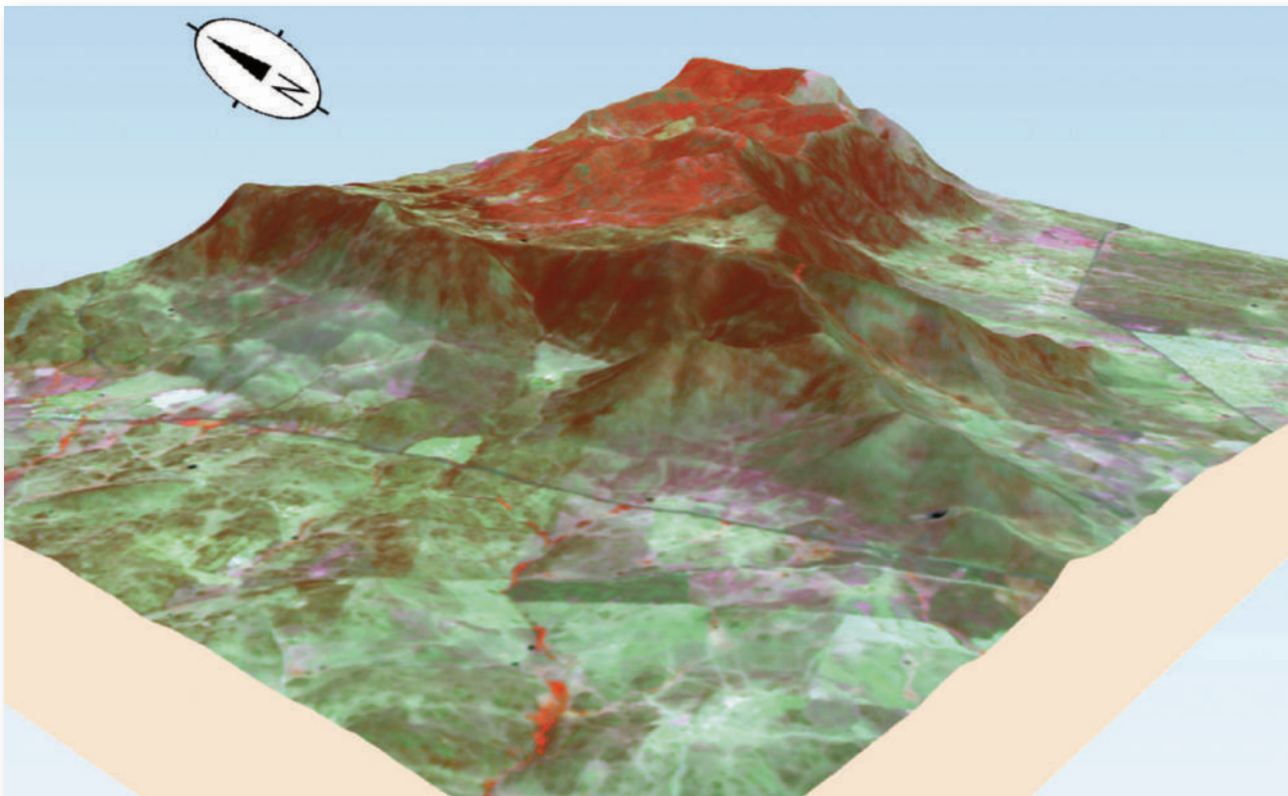


Figura 16 - Imagen en falso color donde se pueden diferenciar las estructuras esclerófilas (encinar-alcornoque) en las laderas de solana y poniente y las estructuras marcescentes y caducifolias (roble y castaño) en zonas altas y orientación norte.

Una consecuencia de todo lo anterior es que la gran mayoría de los índices espectrales para el análisis de la vegetación tienen como protagonista principal al infrarrojo cercano.

El *infrarrojo de onda corta*, SWIR en sus siglas en inglés, (1500-5500nm aproximadamente) tiene dos características principales: la sensibilidad al contenido de agua de plantas y suelos, así como la capacidad de superar ciertas barreras atmosféricas como son algunos cirros y ciertas capas de humo. Esta región del espectro está muy relacionada con la obtención de información relativa a la cantidad de agua de los cultivos o formaciones naturales con el fin de obtener información básica del desarrollo de un cultivo, de la disponibilidad de los combustibles forestales para arder... Asimismo, la posibilidad de estimar la humedad superficial de algunos suelos, aporta información importante sobre la textura de los mismos, siendo así una herramienta fundamental en la denominada agricultura de precisión, encaminada a establecer tratamientos diferenciados en zonas diferenciadas. Aunque no estemos hablando de la región del infrarrojo térmico, en ausencia de este último, se puede utilizar el SWIR como una fiable fuente de datos para la identificación de ciertas fuentes de calor como en el caso de los incendios forestales o la localización de quemaduras de eliminación de restos de podas...

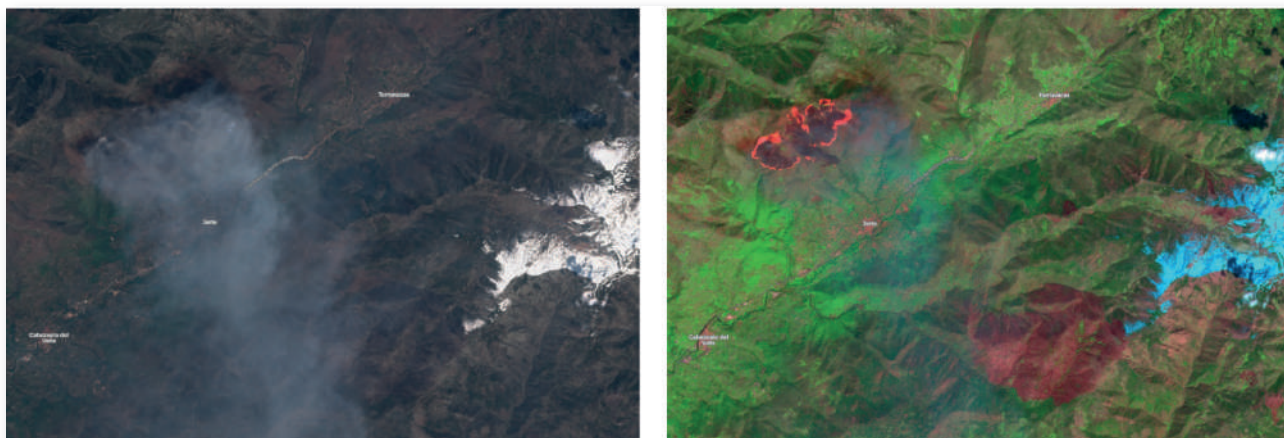


Figura 17 - Utilizando combinaciones de bandas que incluyen la región del infrarrojo de onda corta, se puede conseguir información sobre zonas con anomalías térmicas y eliminar ciertas limitaciones por humo o algunos cirros. En la imagen, incendio en el Valle del Jerte (Cáceres, España, en abril de 2017).

Como se ha comentado con anterioridad, la región del infrarrojo térmico no refleja la energía incidente del sol, sino a la emisividad energética de la propia tierra y los componentes atmosféricos. Esto permite discriminar la temperatura superficial, tanto terrestre como marítima, así como la temperatura de las nubes.

El infrarrojo térmico es quizás la región menos utilizada dentro de la región del infrarrojo, fundamentalmente por la ausencia de sensores que recojan datos en esta longitud de onda con resolución espacial suficiente.

Es bastante común contar con este tipo de sensores en satélites hiperespectrales como MODIS o Sentinel 3, con pasadas diarias (varias en el caso de MODIS), utilizados en multitud de aplicaciones basadas en el análisis de los flujos energéticos de las diferentes superficies:

- Estimación de la evapotranspiración;
- Detección de puntos calientes (volcanes, incendios forestales);
- Análisis de la temperatura de los océanos;
- Etc.

Los satélites meteorológicos también cuentan con sensores térmicos para la obtención de información independientemente del momento del día, así como para la identificación de las temperaturas de los topes de las nubes.

A su vez, la radiación electromagnética correspondiente al rango de las microondas tiene características y comportamientos distintos de las regiones del espectro electromagnético descritas anteriormente en su interacción con objetos en la superficie de la Tierra. Con una longitud de onda más larga (entre 0,75 y 120 cm) que la radiación en las áreas de luz visible e infrarroja, las microondas interactúan con los objetos de una manera más física/estructural que química. Dentro de la región de microondas, se pueden definir varios intervalos/bandas, resumidos en la siguiente tabla.

Banda	Frecuencia [GHz]	Comprimento de Onda [cm]
Ka	40 - 25	0,75 - 1,2
Ku	17,6 - 12	1,7 - 2,5
X	12 - 7,5	2,5 - 4
C	7,5 - 3,75	4 - 8
S	3,75 - 2	8 - 15
L	2 - 1	15 - 30
P	60 - 120	60 - 120

Figura 18 - Bandas en la región de las microondas.

Los sensores que capturan este tipo de radiación son en su mayoría activos, es decir, con su propia fuente de energía, y se llaman sensores SAR (Synthetic Aperture Radar). La adquisición de imágenes por estos sistemas es diferente de los sistemas ópticos, lo que requiere un procesamiento más intenso. El modo de adquisición de información se basa en una *side-looking*, con el haz de energía emitido oblicuamente, en una dirección perpendicular a la dirección de la trayectoria de la plataforma, llegando a una franja de tierra, llamada *swath* (*footprint*), lejos de la línea de nadir (línea entre el sensor y el punto en la superficie de la Tierra inmediatamente debajo).

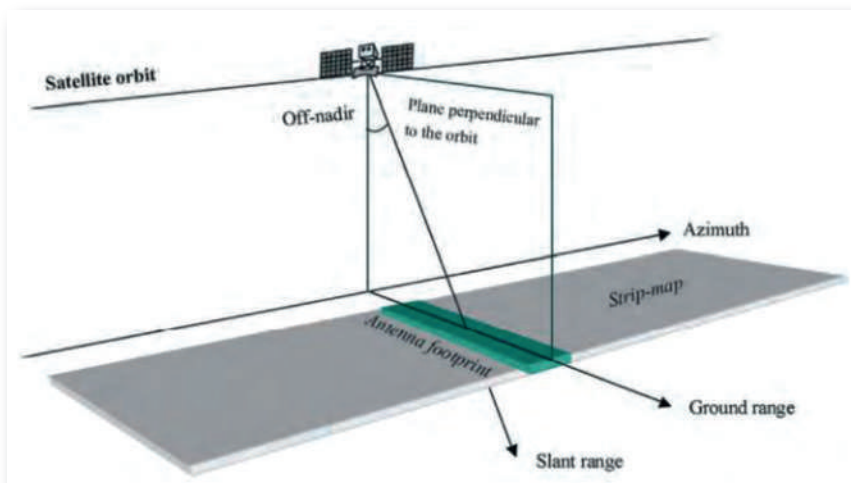


Figura 19 - Sistema SAR instalado en un satélite. Fuente: Rocca, F

El principio básico de transmisión y recepción de energía sigue siendo, sin embargo, los datos recopilados de un objeto-objetivo, son el resultado de una combinación coherente de varios pulsos de energía producidos y recibidos desde diferentes posiciones en el camino de la plataforma. La distancia entre el punto en el que un objeto objetivo ingresa al haz transmitido y el punto en el que lo deja determina el tamaño de la antena sintetizada, es decir, la resolución espacial de la imagen.

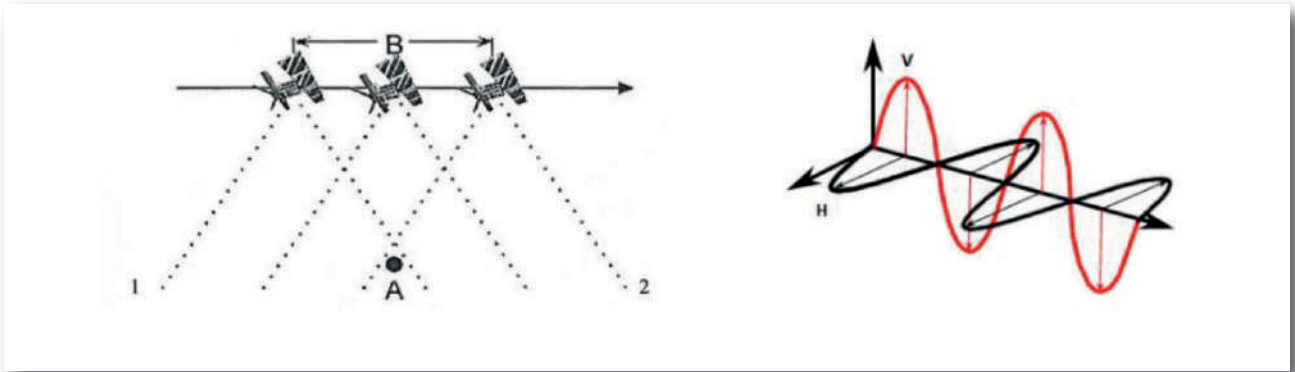


Figura 20 - Synthetic Aperture (B), objeto-objetivo (A); Polarizaciones horizontal (H) y vertical (V) Fuente: Agencia Espacial Europea. ESA

La orientación y la forma del patrón dibujado por el vector de campo eléctrico de la radiación electromagnética en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda electromagnética se llama polarización. Los sistemas SAR generalmente están preparados para transmitir radiación electromagnética en las polarizaciones horizontal (H) y vertical (V). Una onda polarizada, horizontal o verticalmente, al alcanzar un objeto puede contribuir a la retrodispersión de energía en cualquier dirección. Por lo tanto, los sistemas que utilizan estas polarizaciones pueden cubrir cuatro combinaciones de polarizaciones transmitidas y recibidas, HH: transmisión horizontal, recepción horizontal; VV - vertical transmitido, vertical recibido; VH: transmisión vertical, recepción horizontal; HV: transmisión horizontal, recepción vertical. Cada sistema SAR puede tener una o más combinaciones de polarizaciones. El análisis de estas combinaciones de polarización transmitida y recibida constituye la ciencia llamada polarimetría.

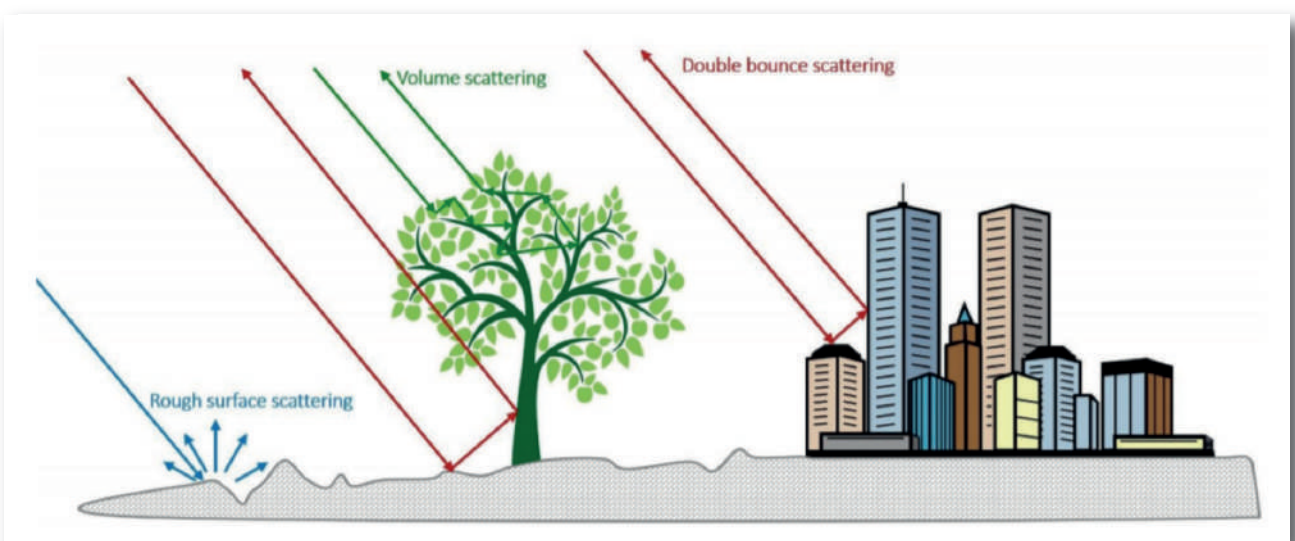


Figura 21 - Principales mecanismos de dispersión de energía microondas. Fuente: NASA



La polarimetría está respaldada por los llamados mecanismos de retrodispersión, o en otras palabras, los mecanismos que influyen en la forma en la que los objetos objetivo reflejan parte de la energía que les alcanza. Existen tres mecanismos generales de retrodispersión para la energía de microondas: superficie, volumen y doble rebote. El primero corresponde a la energía reflejada directamente por el suelo desnudo (o con maleza), caminos y áreas pavimentadas o por espejos de agua, mientras que el segundo se refiere a la energía dispersada por las copas de los árboles o la biomasa vegetal, donde la energía rebota varias veces antes para volver al sensor. A su vez, el mecanismo de “doble rebote” se refiere a objetos verticales, como edificios o troncos de árboles, que devuelven energía en grandes cantidades al sensor.

Además de la forma o “rugosidad” de los objetos, el contenido de humedad de los objetos también puede influir en la intensidad de la señal que regresa al sensor. En general, los objetos con un mayor contenido de humedad contribuyen a una señal más fuerte. La banda de microondas utilizada en el sistema SAR también es un factor a tener en cuenta al analizar este tipo de imágenes, porque cuanto más larga es la longitud de onda, mayor es la tendencia a penetrar las copas de los árboles. Por ejemplo, la banda X (2,5 a 4 cm), apenas tiene penetración en la copa y solo ofrece información desde la parte superior de los árboles, sin embargo, la banda C (4 a 8 cm) tiene una mayor penetración en la copa, debido a una longitud de onda es mayor que en banda X, ofreciendo así información sobre la biomasa de la corona. Por otro lado, la banda L (15 a 30 cm) penetra completamente y alcanza los objetos debajo de las coronas, ya sean herbáceas, arbustos o incluso la superficie terrestre.

En resumen, el sistema SAR es distinto de los sistemas ópticos y más complejo desde el punto de vista del uso de la información que se obtiene de él. Esta es una de las desventajas de este tipo de sistemas, ya que requiere una consideración de varios factores en el análisis de la información. El procesamiento de datos también es más exigente que en los sistemas ópticos, lo que hace que los sistemas SAR generalmente sean más caros. Las grandes ventajas de los sistemas SAR se relacionan con la capacidad de operar sin depender de la luz solar, ya que tiene su propia fuente de energía y el hecho de que la energía de microondas no se ve afectada por las condiciones atmosféricas, principalmente por las nubes.

### **III.3.2. SIGNATURAS ESPECTRALES**

La representación de las firmas espectrales es una forma de cuantificar el comportamiento de los diferentes materiales en función de su longitud de onda. Para disponer de una firma espectral completa han de utilizarse radiómetros hiperespectrales, bien para su utilización en campo o laboratorio.

Las imágenes satelitales pueden funcionar de forma parecida, pero solo en las bandas captadas por cada sensor. Asimismo, esta firma, y por lo tanto, la reflectividad de cada material, no solo vienen dada por la longitud de onda, sino también del ancho de banda que cada sensor capta. Es posible encontrar bandas con un ancho donde la ventana atmosférica no sea uniforme, por lo que pueden dar respuestas diferentes a bandas en la misma región, pero con un ancho de banda menor. Un ejemplo claro de esto son las bandas 8 y 8A del Sentinel 2, la primera con un ancho de banda mayor (115nm) y la segunda mucho más reducida (20nm) y, por tanto, con mayor precisión. Se puede observar esta circunstancia en las Figura 22 y 23, donde se puede apreciar un pico coincidente con los 865nm, el centro de la banda 8A.



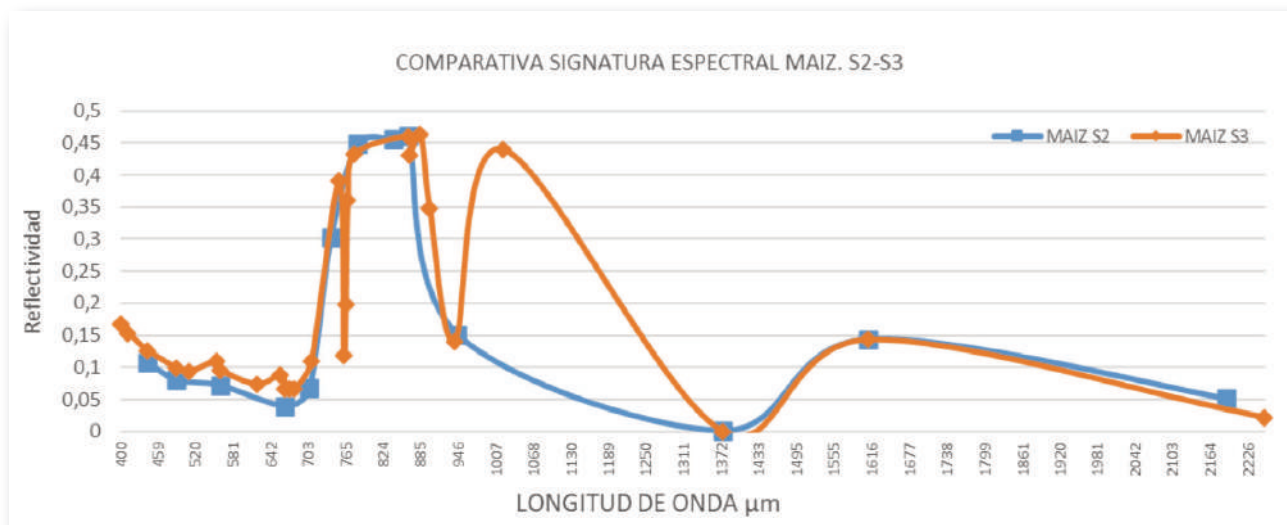


Figura 22 - Comparativa de las firmas espectrales de los satélites Sentinel 2 y 3 en un cultivo maíz.

Para el análisis de las firmas espectrales de la vegetación, hay que tener en cuenta varias cuestiones:

- Absorción energética en el visible (en mayor medida en la región del rojo), mayor cuanto más sana está la planta, con un breve repunte en la región del verde por los pigmentos de clorofila;
- Una mayor reflectividad en la región del infrarrojo cercano en el caso de la vegetación sana, con valores más discretos en caso de vegetación enferma, en periodo de senectud, sin cobertura total...;
- La presencia de agua en la vegetación o en las capas superficiales del terreno ofrece absorción energética en la región del infrarrojo de onda corta, por lo que esta franja del espectro electromagnético se utiliza para obtención de información sobre la humedad de la vegetación.

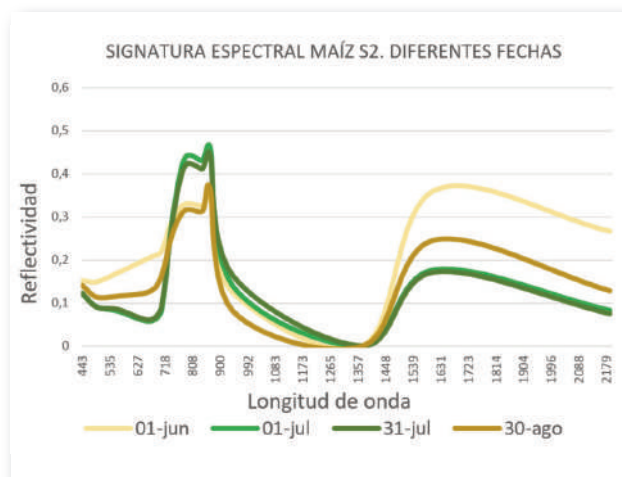
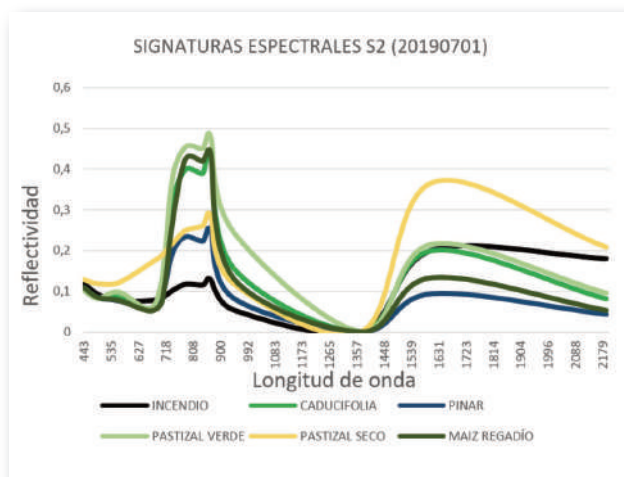


Figura 23 - Ejemplos de firmas espectrales de diferentes tipos de ocupación del suelo y diferentes fechas para un mismo cultivo. Se puede apreciar como las principales diferencias las podemos observar en las regiones del infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta.

Para el cálculo de las diferentes firmas espectrales se puede utilizar el *software* SNAP, existe una herramienta denominada SpectrumView donde se puede visualizar la firma espectral bien de la localización del puntero o de puntos de interés (Pins) preestablecidos. También se pueden consultar los datos de reflectividad de los puntos preestablecidos para cada banda con la herramienta Pin Manager, desde la que se pueden exportar los datos a una tabla en formato \*.txt.

### III.3.3. ÍNDICES ESPECTRALES

Los índices espectrales son cálculos matemáticos que pretenden obtener información de las diferentes superficies a partir de la reflectividad en las diferentes longitudes de onda, es decir, por el comportamiento de la radiación incidente en función de sus características químicas.

Aunque existen multitud de disciplinas que se nutren de la información obtenida mediante teledetección remota, sin duda, el estudio de la vegetación es el más prolífico, con una cantidad ingente de índices destinados a la caracterización de la vegetación. Según Jackson et al (1983), el índice ideal es *“aquel particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por las perturbaciones atmosféricas, los factores medioambientales y la geometría de iluminación y de observación”*. Evidentemente las condiciones de la propia naturaleza en su sentido más holístico, impiden ese índice ideal dada la variedad de ambientes, morfología del terreno, morfología de la vegetación, balance radiativo... Aun así, con el simple análisis visual de las firmas espectrales del apartado anterior, se hace evidente que existen patrones claros que permiten caracterizar la vegetación a partir de las relaciones entre la reflectividad de las diferentes longitudes de onda. En este sentido, la gran mayoría de los índices de vegetación tienen como principal protagonista al infrarrojo cercano, bien relacionado con la región del visible o relacionado con el infrarrojo de onda corta para obtener información relacionada con la cantidad de agua almacenada.

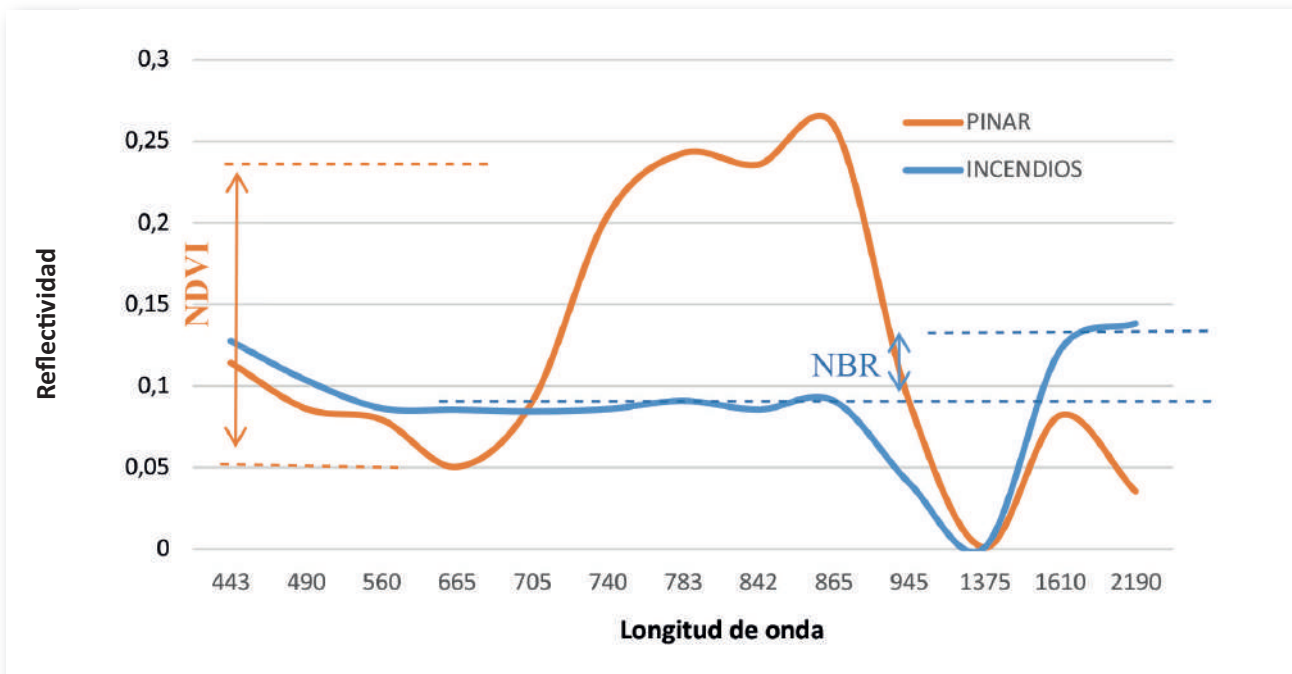


Figura 24 - El comportamiento entre las diferentes regiones del espectro electromagnético es la base de los índices espectrales. Ejemplos del NDVI ( $NIR-R/NIR+R$ ) para el análisis de la vegetación, y el NBR ( $NIR-SWIR/NIR+SWIR$ ) para la identificación de áreas quemadas.

**NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).** Es probablemente el índice espectral más utilizado para el análisis de la vegetación. Trata de cuantificar a través de la diferencia normalizada los comportamientos opuestos entre la banda del rojo, que absorbe casi el total de la energía recibida, y la banda del infrarrojo cercano, que refleja la mayor parte de la energía incidente. El NDVI está incluido en los denominados índices de pendiente resultado de comparar el comportamiento opuesto de los dos valores (Rojo-Infrarrojo Cercano) en una gráfica. Esto se traduce en un índice con un rango absoluto de  $-1 / 1$ , pero que en el caso de la vegetación fluctuará en función de la salud de la planta y la estructura foliar, oscilando entre el 0,8-0,9 de un cultivo en su máximo desarrollo (de maíz, por ejemplo) y el 0,15-0,2 de un pastizal agostado en época estival; entre medias los matices son amplios y se irán desgranando a lo largo de todo el documento para cada formación vegetal.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

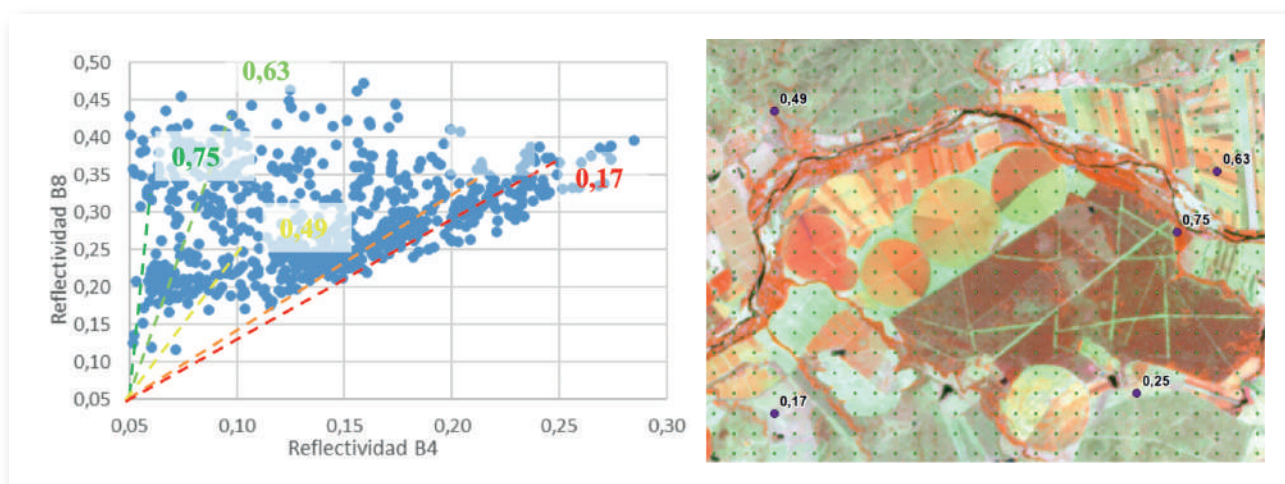


Figura 25 - Comparativa entre los niveles digitales de la banda 8 y banda 4 de una malla de puntos y representación de diferentes ejemplos de NDVI donde se puede apreciar como el índice aumenta en función de la pendiente representada en el gráfico.

**NDWI (Normalized Difference Water Index).** Este índice trata de explotar el potencial de la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) por la absorción energética del agua en dicha región espectral, por lo que se emplea para estimar la humedad almacenada en la vegetación. Si se realiza una revisión bibliográfica, se puede observar que existen diferentes métodos para el cálculo de este índice, siempre con el denominador común del infrarrojo de onda corta comparado con otras regiones como el infrarrojo cercano (NIR) o el visible, de los que el más utilizado es el que compara el SWIR con el NIR (Gao, 1996). Es curioso que en parte de la bibliografía podemos ver este mismo algoritmo con otra nomenclatura, NDMI (Normalized Difference Moisture Index), generalmente utilizado en los Estados Unidos de América en el ámbito del mundo forestal. Este índice utiliza el mismo método que el NDVI, la diferencia normalizada, pero en este caso comparando dos regiones con diferente comportamiento en función del agua almacenada: En el infrarrojo cercano la absorción radiativa del agua líquida es insignificante mientras que en el infrarrojo de onda corta está presente. También se trata de un índice de pendiente con rango absoluto  $-1/1$ , estando los valores referidos a la vegetación entre el 0,5 de un bosque caducifolio o cultivos de regadío y el  $-0,15$  de un cereal de secano previo a la cosecha.



$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

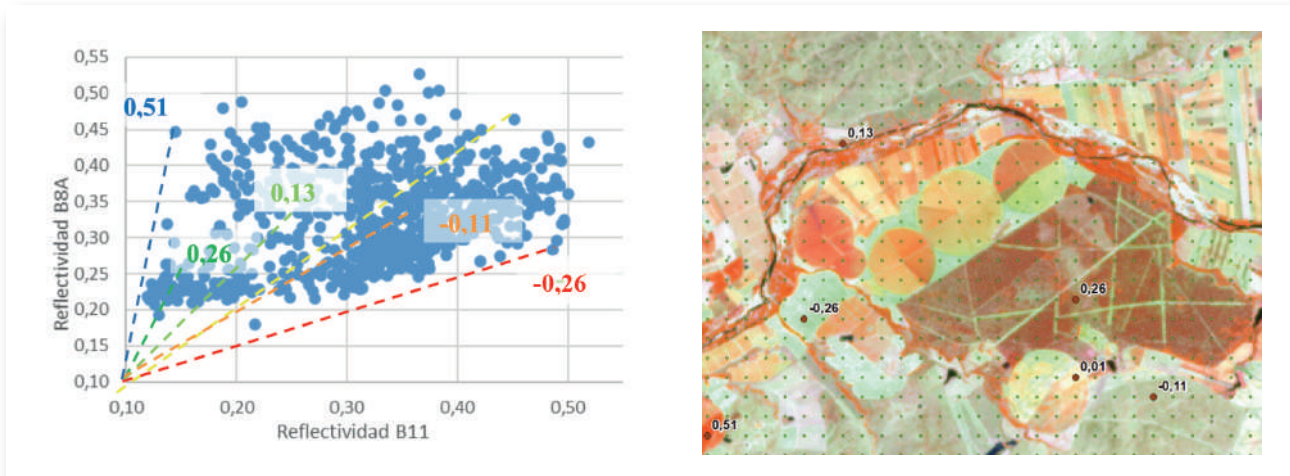


Figura 26 - Comparativa entre los niveles digitales de la banda 8A y banda 11 de una malla de puntos y representación de diferentes ejemplos de NDWI donde se puede apreciar como el índice aumenta en función de la pendiente representada en el gráfico.

### III.4. Programa Copernicus

La Unión Europea a través de la Comisión Europea (CE) lidera junto a la Agencia Espacial Europea (ESA) un programa espacial para la observación de la Tierra. Fruto de esta unión nace el Programa Copernicus .

El Programa Copernicus toma forma del trabajo previo del Programa GMES (Monitoreo Global para la Seguridad Ambiental) que empieza a operar en 1998 en Europa. En el año 2004 la CE y la ESA firman el Acuerdo Marco para proporcionar la componente espacial a GMES. En el año 2011 la CE establece un fondo específico para GMES en el cual tienen que participar todos los Estados miembros en función de sus ingresos nacionales brutos y en el año 2014 GMES pasa a denominarse Programa Copernicus , lanzándose el satélite Sentinel 1.

El Programa Copernicus tiene por objetivo monitorizar la Tierra a través de satélites con sensores activos y pasivos que transmiten información en materia de seguridad, medio ambiente, clima, estados atmosféricos, actividades económicas, etc.

La gran ventaja de este programa europeo es que los ciudadanos tienen acceso de forma libre y gratuita a la información que transmiten estos satélites. Esto permite que, con una correcta interpretación, podamos tomar decisiones en materia de medio ambiente, agricultura, desastres naturales, etc.

### III.4.1. SENTINEL 1

La misión Sentinel 1 está compuesta por dos satélites idénticos Sentinel 1A (abril de 2014) y Sentinel 1B (abril de 2016). Los dos satélites comparten el mismo plano orbital y están separados por 180° en una órbita polar. El ciclo de repetición es de 6 días considerando la misma dirección de paso. Ambos satélites están equipados con un sensor SAR para operar en la banda C (C-SAR) y con capacidad de recoger información en dos modos de polarización, HH+HV o VV+VH.

Los productos/imágenes obtenidos por los satélites Sentinel-1 tienen características específicas dependiendo del modo de adquisición utilizado. Estos satélites tienen la capacidad de operar en cuatro modos de adquisición diferentes.: *Interferometric Wide Swath*, *Wave*, *Strip Map* e *Extra Wide Swath*. La resolución espacial obtenida puede variar entre 5 y 40 metros.

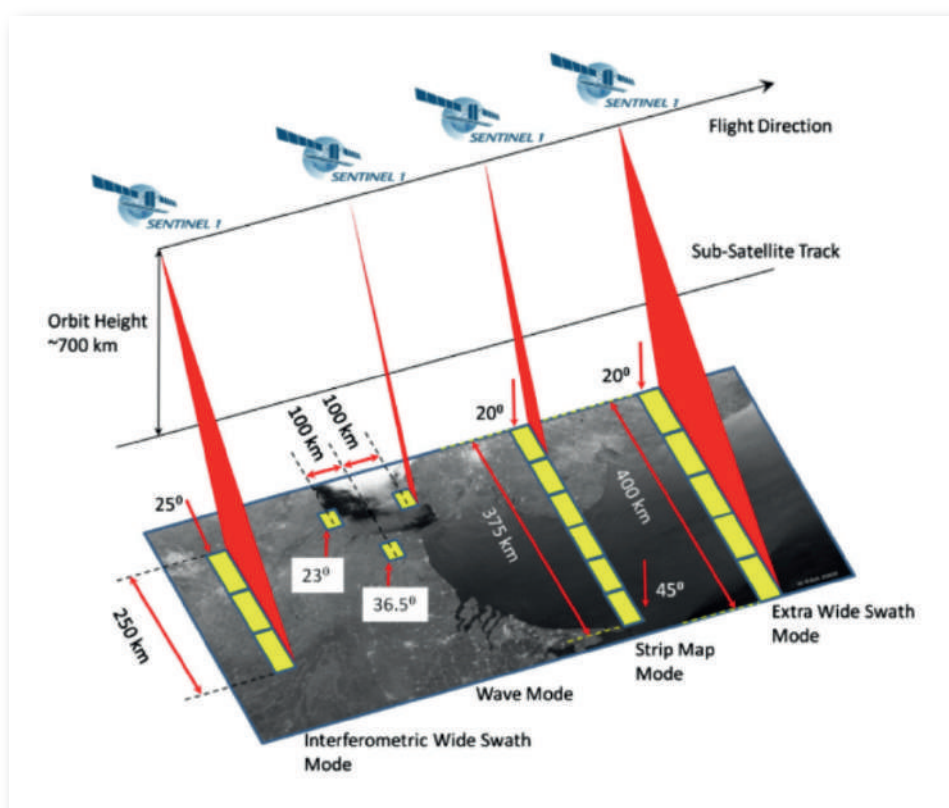


Figura 27 -Diferentes modos de adquisición de datos del satélite Sentinel 1. Fuente: NASA-ARSET.

Con un sensor activo que funciona en la región de microondas, la gran ventaja de estos satélites es la posibilidad de adquirir datos en cualquier momento del día y en todo tipo de condiciones atmosféricas. De esta manera no hay dependencia de la luz solar o problemas con las nubes.

Por otro lado, la gran desventaja de estos satélites se debe a la gran cantidad de variables a tener en cuenta para eliminar información útil de los datos obtenidos. Las especificidades de este tipo de sistemas limitan la comprensión de los datos obtenidos y aumentan la exigencia para procesarlos.



Las posibles aplicaciones de las imágenes obtenidas por los satélites Sentinel-1 son varias: monitoreo de parcelas agrícolas, estimaciones de producción de cultivos agrícolas, estimaciones de biomasa, estimaciones de retención de carbono en áreas forestales, caracterización y cuantificación de combustibles vegetales, detección de zonas de tala en áreas forestales, monitoreo de cuerpos de agua, detección de barcos y derrames en áreas marítimas, evaluación de desplazamientos terrestres y apoyo a servicios de emergencia para responder a desastres naturales, entre otros.

### III.4.2. SENTINEL 2

Así como la misión Sentinel-1, también la misión Sentinel 2 está compuesta por dos satélites idénticos Sentinel 2A (junio de 2015) y Sentinel 2B (marzo de 2017). Los satélites Sentinel 2 cuentan con una órbita polar y están separados por  $180^\circ$ , esto nos permite conseguir información de un territorio en un corto espacio de tiempo, 5 días e incluso 3 días en los territorios comprendidos en el solape de las diferentes órbitas.



Figura 28 – Satélite Sentinel 2. Fuente: ESA.

A continuación, vamos detallar las características de estos satélites.

Ventajas Sentinel 2:

- Cámara multispectral, con 13 bandas que permiten estudiar la superficie terrestre y obtener información detallada del estado de la vegetación;

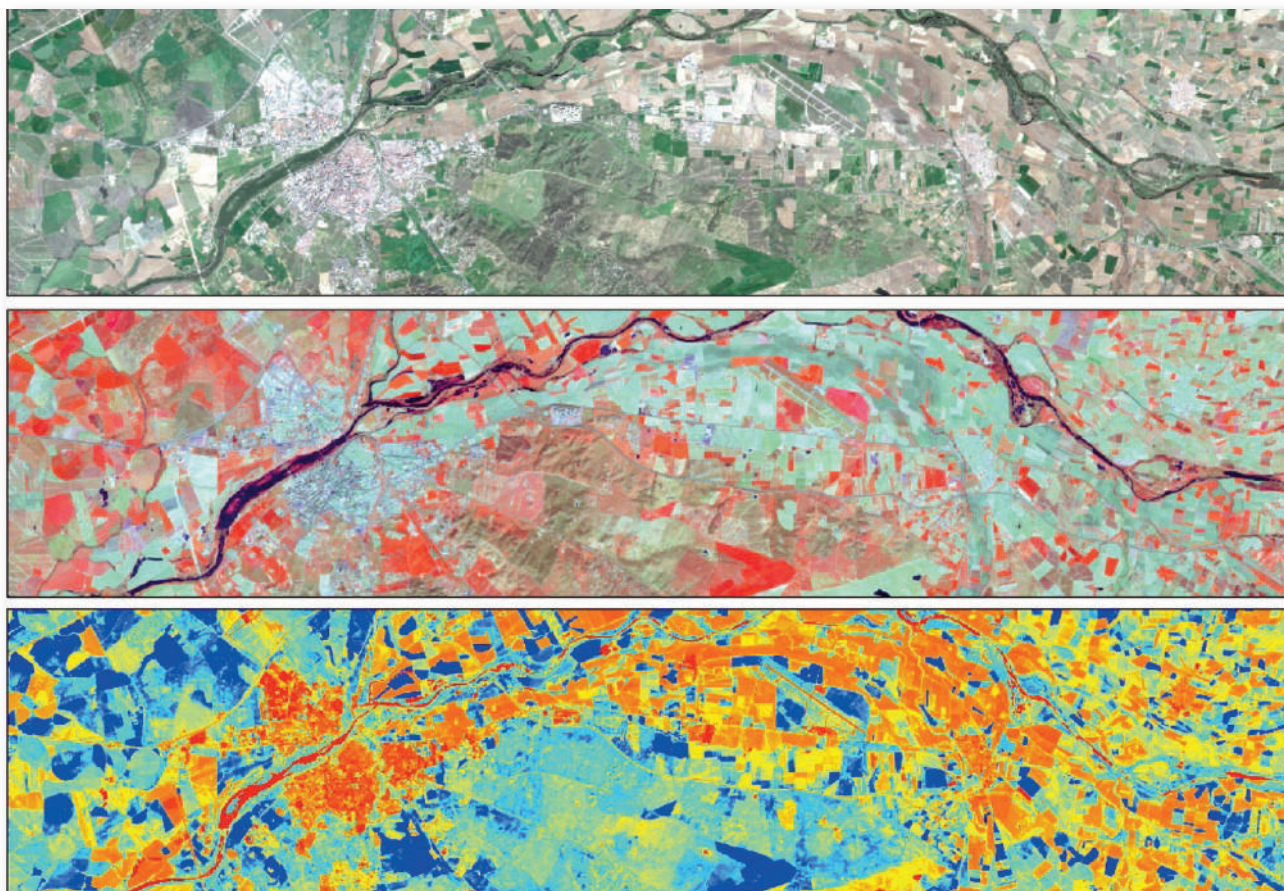


Figura 29 -Diferentes combinaciones de banda permiten diferentes formas de monitorear los cultivos a partir de las imágenes obtenidas por el satélite Sentinel 2.

- La resolución radiométrica es más alta que en otros satélites, lo que nos permite obtener un mayor abanico de colores en la imagen;
- Las imágenes que proporcionan tienen una buena resolución para realizar estudios territoriales y de cultivos ya que nos permite apreciar los cambios existentes en sus diferentes pasadas en el tiempo. La resolución espacial va de los 10 metros a los 60 metros;
- La resolución temporal del Sentinel 2 es alta ya que realiza pasadas al menos cada 5 días en la misma zona, lo que nos permite monitorizar el territorio de estudio con mayor grado que otros satélites;
- Debido a esta alta resolución temporal, este satélite óptico tiene mayor probabilidad de obtener imágenes sin nubes de nuestra área de estudio. Es decir, contaremos con más imágenes accesibles para nuestros análisis. Por ejemplo, el satélite Landsat pasa por la misma zona cada 16 días y el satélite Spot cada 26 días, si el día que hace la pasada existen nubes, en la imagen obtenida perdemos información que puede ser vital para la monitorización de nuestro cultivo.
- La franja de imágenes que va adquiriendo es su pasada tiene una anchura de 290 kilómetros lo que nos permite comparar parcelas de una misma zona;
- Disponibilidad de las imágenes de forma gratuita y con un rango temporal desde 2015 (lanzamiento del Sentinel 2A). Esto permite hacer estudios temporales del comportamiento del territorio.

## Desventajas Sentinel 2:

Existen satélites de pago con mayor resolución espacial y temporal. Por ejemplo, el satélite Spot cuenta con una resolución espacial de 2,5 metros y sin embargo una resolución temporal de 26 días y el satélite Geoeye 1 cuenta con una resolución espacial de 2 metros y una resolución temporal de 3 días.

### III.4.3. OTROS SATÉLITES

En la actualidad el Programa Copernicus está compuesto por seis tipos de misiones o satélites denominados Sentinel.

Sentinel 3 equipa sensores con menor resolución y su objetivo es estudiar la Tierra y sus océanos.

Sentinel 4 y Sentinel 5 tienen como misión el estudio de la atmósfera y serán lanzados en 2021. Sentinel 4 irá acoplado al Meteosat de tercera generación (MTG) y tendrá una órbita geoestacionaria transmitiendo información atmosférica de Europa. Sin embargo, el Sentinel 5 irá acoplado en el satélite MetOp de segunda generación de EUMESAT con una órbita que cubrirá toda la Tierra.

Sentinel 6 tendrá la misión de medir la topografía de los océanos a nivel mundial. El primero de los dos satélites programados será lanzado en 2020.

La ESA y la CE están estudiando la incorporación de nuevos satélites que cubran nuevas necesidades de componente espacial. De estas propuestas podemos destacar las siguientes misiones en estudio, por su incidencia en la agricultura:

- Misión CHIME, cuyo objetivo es proporcionar información que pueda ser utilizada para caracterizar el suelo, gestionar una agricultura más sostenible y contribuir a la biodiversidad;
- Misión LSTM, que proporcionaría la temperatura de la superficie terrestre con una alta resolución espacial, lo que tendría grandes beneficios para las explotaciones agrarias ya que el agricultor podría conocer las necesidades hídricas de su explotación ya que dispondría de los valores de temperatura y evapotranspiración de su parcela;
- Misión ROSE-L, proporcionaría información de la humedad del suelo.

## III. Bibliografía

GAO, B.C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

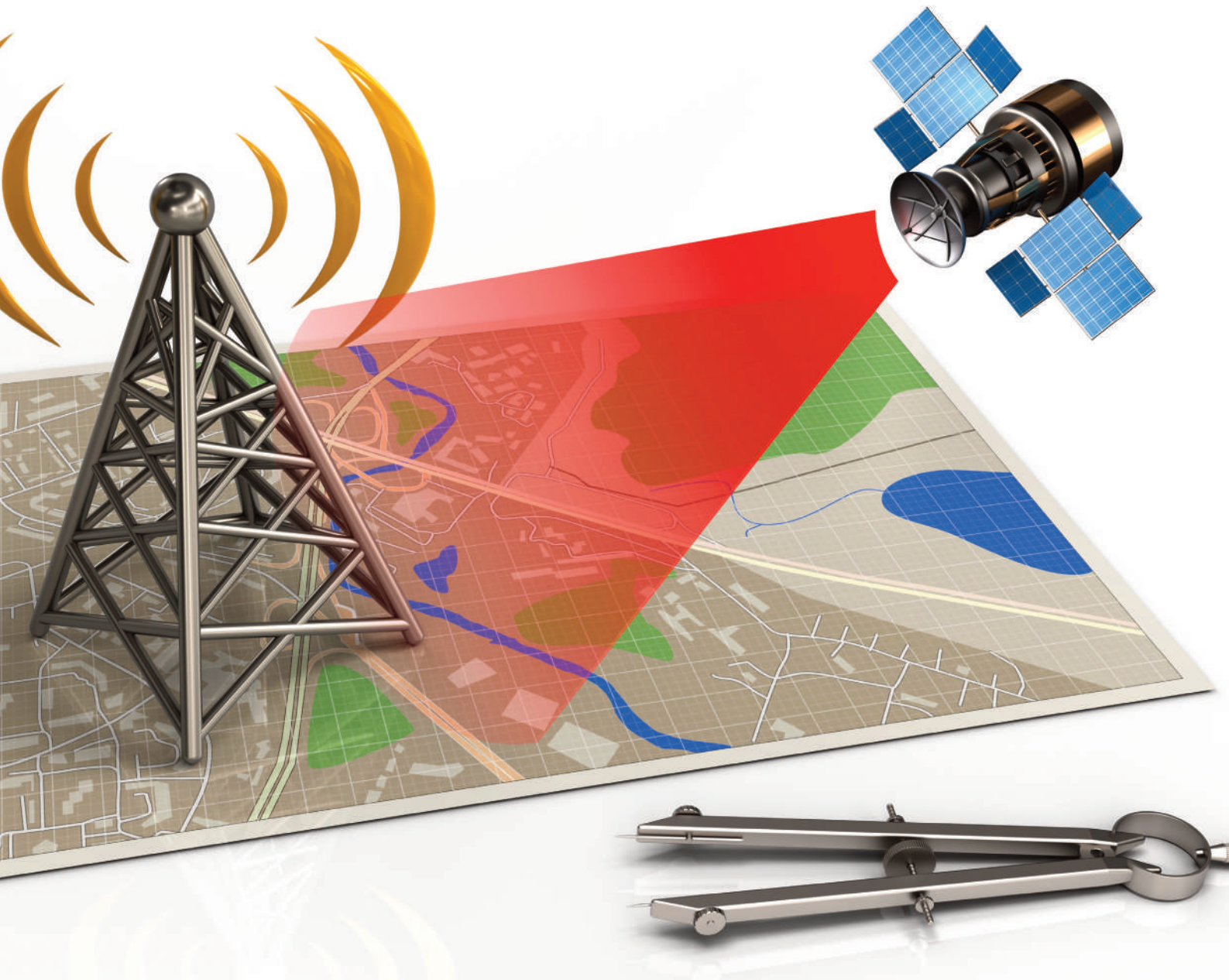
JACKSON, R et al. (1983). Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment* Volume 13, Issue 3, 187-208. Doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(83\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90039-1)

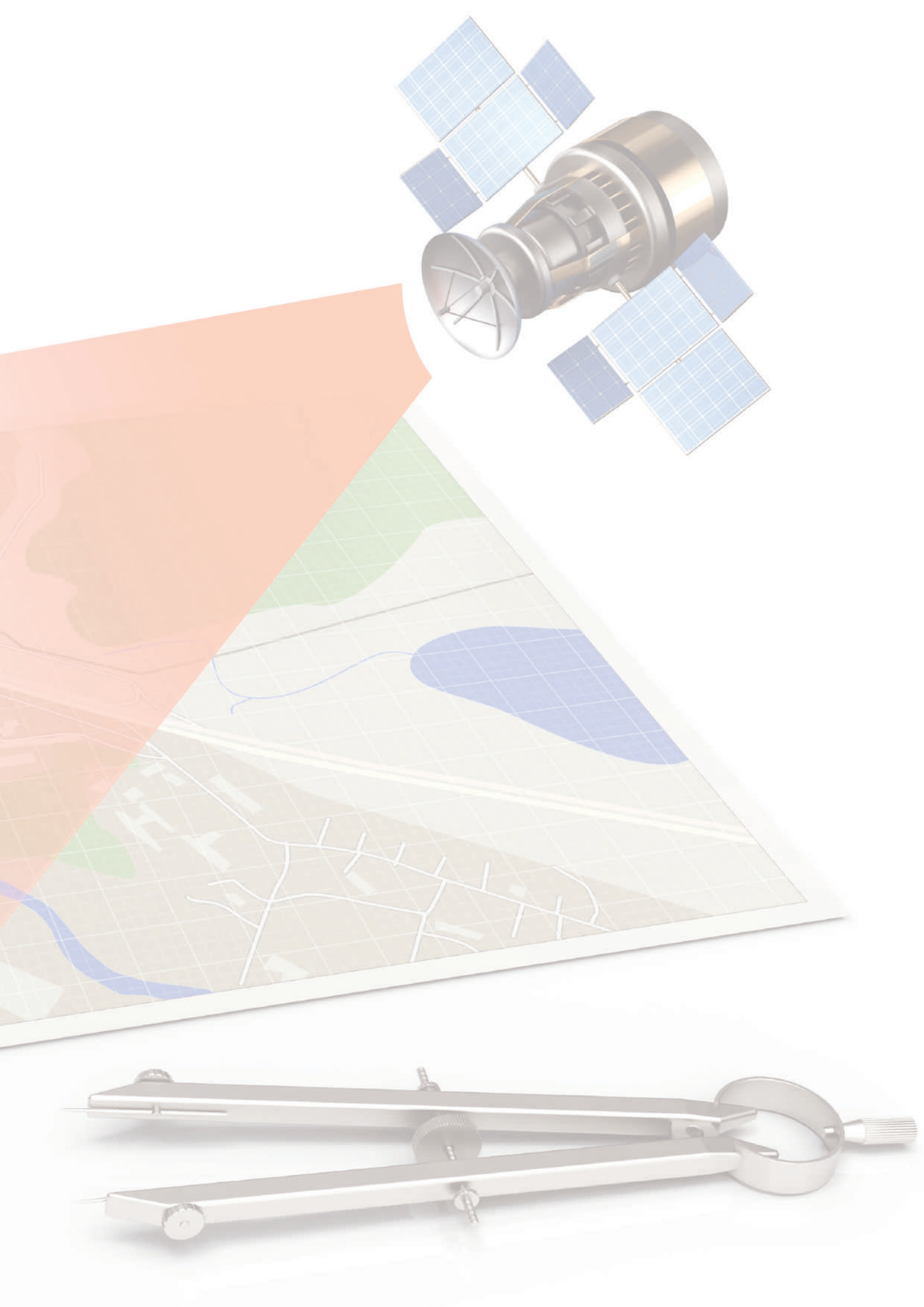
ROCCA, F. (2003). The Permanent Scatterers Technique to Measure Slow Earth Motion from Space. The 7th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics. Doi: 10.3997/2352-8265.20140044



# IV

## Casos de Estudio





## IV. Solos

### IV.1.1. ESTUDO DA QUALIDADE DO SOLO – AMOSTRAGENS INTELIGENTES

**Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup>; Paixão, Luís<sup>1</sup>; Sousa, Adélia<sup>1</sup>; Gonçalves, Ana Cristina<sup>1</sup>; Silva, Luís Leopoldo<sup>1</sup>; Baptista, Fátima<sup>1</sup>; Serrano, João<sup>1</sup>; Terrón, Mariano<sup>2</sup>.**

Este caso prático não é propriamente a ilustração de uma experiência realizada em campo, mas sim a discussão metodológica sobre alguns aspetos que têm que ver com o solo, a base de tudo o resto.

Não sei se sabe, mas poderá ter milhares de euros enterrados no solo das suas parcelas agrícolas com a probabilidade de não estar a aproveitar esse recurso em seu benefício. Monitorizar o nível de fertilidade do solo, não é só um imperativo agronómico e económico, mas é também um imperativo ambiental.

Encontramos regularmente casos de parcelas agrícolas com concentrações de fósforo nos limiares mínimos e máximos. Esta variação espacial dentro de uma mesma parcela é um indicador claro de que a gestão dos fertilizantes não está otimizada, podendo ocorrer tratar-se pior aquelas zonas que mais contribuem para o resultado líquido da atividade.

Face ao exposto, é fundamental conhecer o que temos no solo pois poderemos estar a desperdiçar milhares de euros que aí se encontram disponíveis para serem utilizados pela planta. A estratégia de amostragem do solo, plantas e frutos tem evoluído nos últimos tempos afastando-se, a passos largos, daquela estratégia aleatória em que percorríamos em ziguezague a parcela recolhendo subamostras em cada local percorrido por forma a termos uma média dos nutrientes existentes.

Como bem sabemos, a média em agricultura não existe pois a variabilidade dos nossos solos, do nosso clima, da nossa topografia, é sobejamente conhecida. Nesse sentido, há que realizar um tipo de amostragem diferente por forma a conhecer em maior detalhe toda essa variabilidade das parcelas e qual o seu impacto real sobre as relações solo-água-planta e, conseqüentemente, no resultado final.

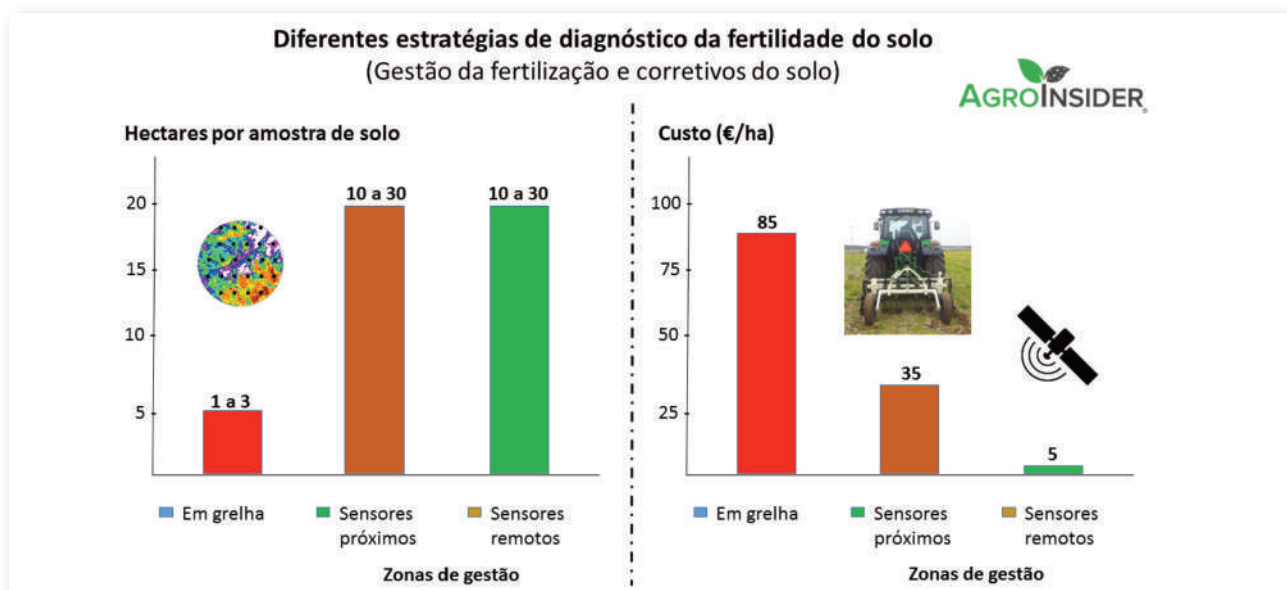


Figura 30 - Diferentes metodologias de diagnóstico da fertilidade do solo. Fonte: Agroinsider.

<sup>1</sup> Universidade de Évora y MED.

<sup>2</sup> Agroinsider, Lda.

A Figura 30 apresenta resumidamente os três tipos de estratégia de amostragem da fertilidade do solo mais atuais: i) a estratégia em grelha; ii) a estratégia de criação de zonas de gestão considerando o sinal dos sensores próximos (ex. sensores geoelectricos); e iii) a estratégia de criação de zonas de gestão considerando o sinal de múltiplos sensores remotos (ex. Satélites óticos e outros).

- i) Relativamente à estratégia em grelha, podemos perceber pela Figura 30 que é uma estratégia muito dispendiosa, pois utiliza normalmente uma densidade de pontos de amostragem muito elevada e, por isso, fica cara no levantamento das amostras. Como habitualmente tem muitas amostras, a análise físico-química em laboratório revela-se igualmente onerosa. Este tipo de amostragem, face ao custo envolvido, por norma já é pouco utilizado na Europa, sendo ainda muito utilizado na América do Sul.
- ii) A estratégia dos sensores próximos é uma estratégia muito boa, pois não considera uma amostragem regular, mas sim uma amostragem de acordo com zonas de gestão definidas pelos sensores próximos, nomeadamente a partir da condutividade eléctrica aparente do solo (CEa) medida por sensores geoelectricos (ex: Veris, Dualem, Em38...). Neste método, definimos classes de CEa do solo relevantes (Figura 31) e, posteriormente, amostramos nas diferentes classes de CEa definidas pelo levantamento efetuado. A vantagem deste método relativamente ao anterior é que reduzimos o custo, quer pelo número de amostras a recolher, quer pelo número de amostras a analisar em laboratório. Contudo, não conseguimos reduzir o custo do levantamento geoelectrico, obrigando sempre à deslocação de um sensor à parcela (Figura 30 e Figura 31). Não obstante, existe uma vantagem muito importante relativamente ao método anterior e é que a maior parte dos sensores pode analisar normalmente duas profundidades de solo na mesma passagem (Figura 31), ou seja, ficamos em simultâneo com a informação superficial e a informação mais profunda do solo. Todavia, analisamos apenas o solo e não a interação solo-água-planta muito importante do ponto de vista agronómico e ambiental.

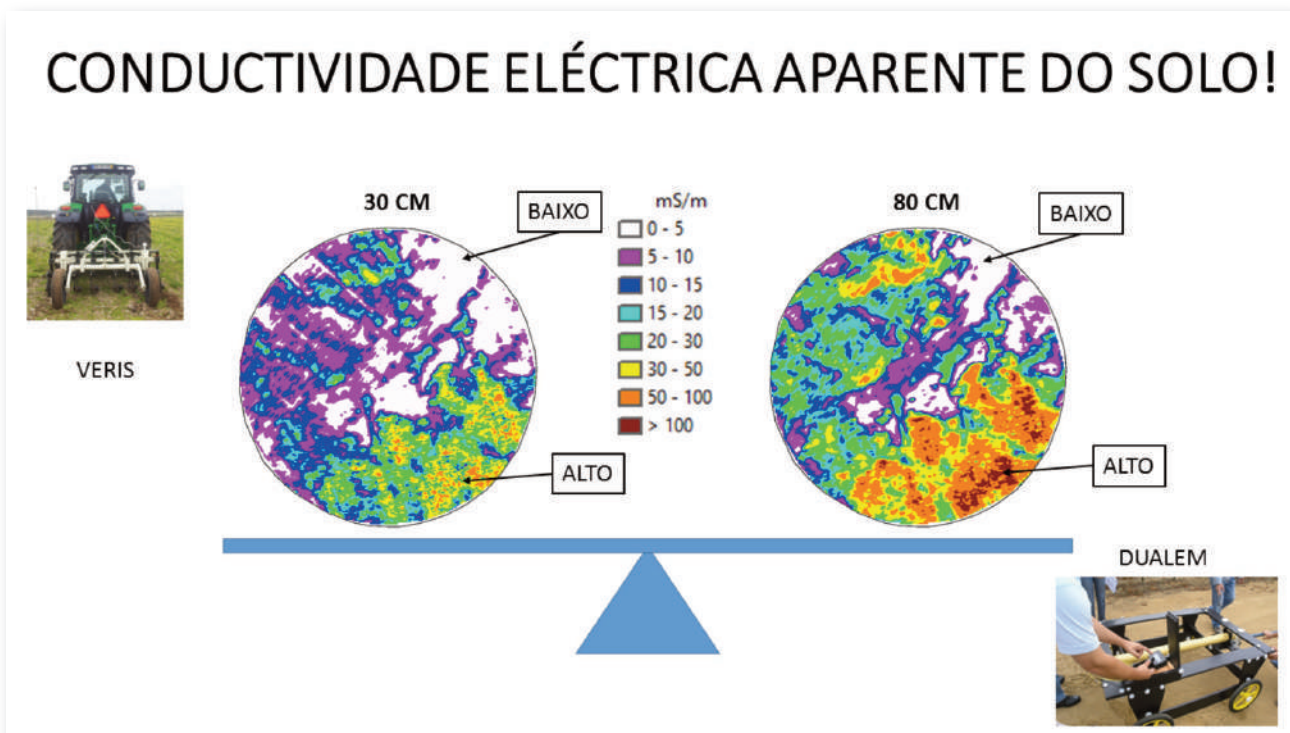


Figura 31- Condutividade eléctrica aparente do solo (CEa) medida a duas profundidades diferentes (30 cm e 80 cm) com o sensor geoelectrico VERIS. Fonte: Agroinsider.

iii) A estratégia dos sensores remotos (ex. satélites...) é uma estratégia muito boa e muito recente, pois, tal como a anterior, não considera uma amostragem regular mas sim uma amostragem de acordo com zonas de gestão definidas por diferentes tipos de satélites. Neste método, e com os satélites, podemos definir zonas de gestão de cada parcela baseadas no comportamento: i) da zona superficial do solo (Figura 32) e ii) das relações solo-água-planta (Figura 33). A grande vantagem desta metodologia, tirando o aspeto de não poder analisar o solo a maiores profundidades, como os sensores geoeletricos (Figura 31), é de que também reduzimos o custo: i) quer pelo número de amostras a recolher e a analisar em laboratório; ii) quer pela ausência de levantamentos geoeletricos em campo (Figura 31), pois a recolha de informação é efetuada diretamente pelos satélites (Figura 30).

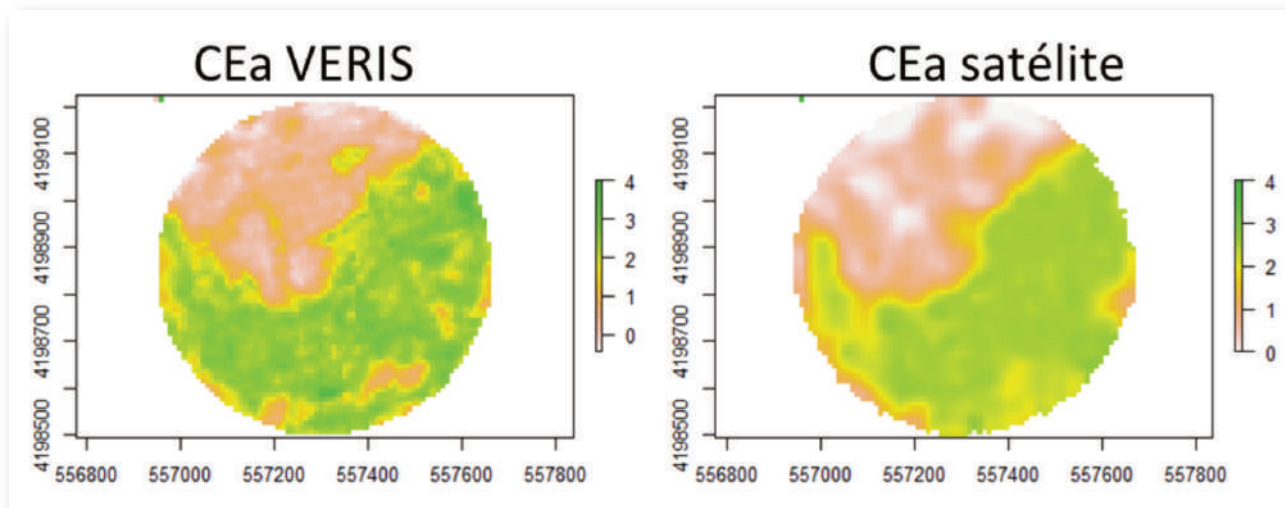


Figura 32 - Condutividade elétrica aparente do solo medida com o sensor VERIS (do lado esquerdo) e condutividade elétrica aparente do solo estimada por satélite (lado direito). Fonte: Agroinsider.

Pelas anomalias das relações solo-água-planta encontradas na Figura 33 apercebemo-nos de que a parcela em causa é muito influenciada pela qualidade do solo (Figura 32), pois nota-se que a zona a norte da parcela, em termos de desenvolvimento vegetativo, é muito afetada pelo tipo de solo aí existente uma vez que apresenta, na fase de arranque e para uma mesma data, valores de NDVI relativamente mais baixos que a zona mais a sul da mesma (Figura 33).

Estudar o tipo de comportamento das relações solo-água-planta de uma parcela, e se possível ter mapas com o histórico produtivo da mesma, são altamente relevantes para a definição das zonas a amostrar, pois as zonas mais produtivas necessitam de mais nutrientes para não se verem afetadas no seu potencial produtivo e as zonas menos produtivas necessitam de uma menor quantidade de nutrientes atendendo a que a sua capacidade produtiva é normalmente condicionada por outro tipo de fatores que não os nutrientes.

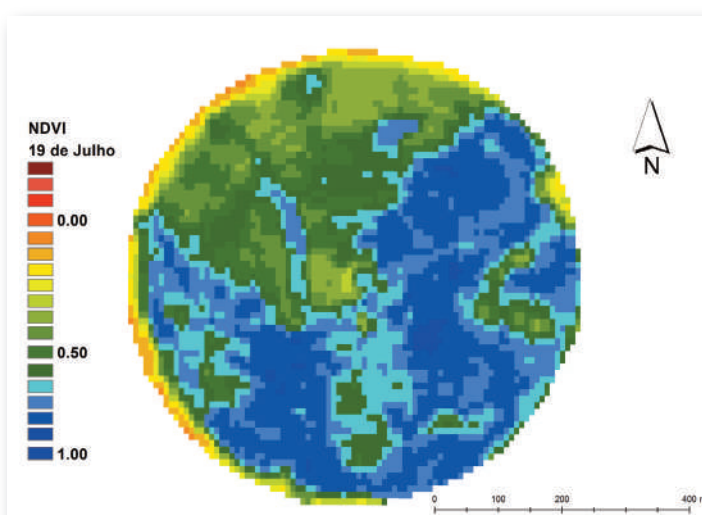


Figura 33 - Valores de NDVI da parcela no arranque da cultura muito variáveis indicando relações solo-água-planta muito variáveis. Fonte: Agroinsider.

Até aqui temo-nos focado sobretudo nos aspetos associados ao solo, todavia, a amostragem de folhas, de frutos e de outros aspetos associados à gestão das culturas é também importante e fundamental na boa gestão agronómica e ambiental da atividade agrícola. A Figura 33 poderá servir de exemplo de como poderemos dirigir a amostragem tendo em conta as diferentes relações solo-água-planta existentes. Será que a diferenciação encontrada na Figura 33 terá somente a ver com o solo? O problema será físico, químico, biológico? A produtividade e a qualidade do produto final serão afetadas?

Em resumo, os satélites poderão dar-nos uma ajuda fundamental numa das tarefas mais importantes da atividade agrícola que é a amostragem inteligente e a avaliação de todos os processos associados à produção de alimentos. No entanto, de que nos serve fazer análises se normalmente não mantemos um repositório do histórico e da localização onde as mesmas foram recolhidas?

Bem vimos pelas Figura 31, Figura 32 e Figura 33, e pela variação que as mesmas nos mostraram, que fazer uma amostragem em sítios diferentes poderá apresentar resultados diferentes.

A Figura 34 apresenta a concentração de diferentes nutrientes do solo, de uma mesma parcela, tendo em consideração a CEa do mesmo. Podemos notar, neste caso em particular, que os diferentes nutrientes apresentados sobem à medida que a CEa do solo também sobe. Em suma, se recolher uma amostra de solo numa zona com condutividade elétrica baixa poderemos receber do laboratório a informação de que que a concentração de fósforo na parcela é de cerca de 300 mg/kg de solo, contudo, se recolhermos a amostra numa zona de CEa do solo elevada o resultado poderá ser de cerca de 500 mg/kg de solo.

Em suma, o local da amostragem pode condicionar automaticamente o tipo de nutrição a desenvolver na parcela, razão pela qual há que desenvolver amostragens inteligentes e não baseadas na aleatoriedade dos processos agrícolas. O mesmo tipo de raciocínio pode ser feito com o potássio e com os outros nutrientes, só que com dimensões distintas.

A parcela da Figura 34, com a concentração de fósforo e potássio que apresenta, tem milhares de euros em nutrientes enterrados no solo e, provavelmente, ao não se estar a aproveitar esse recurso, pode estar-se a contribuir para a eutrofização de linhas de água e de outras zonas húmidas.

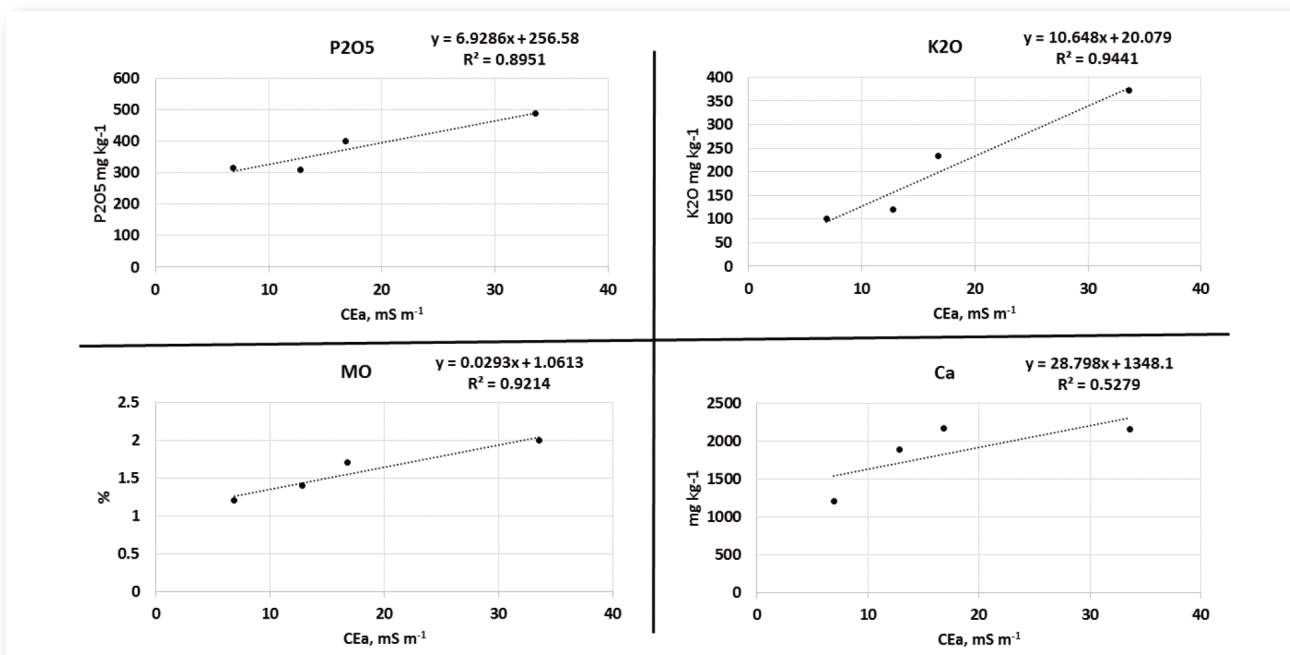


Figura 34 - Nutrição do solo: variação da fertilidade do solo de acordo com a CEa do mesmo e o local da amostragem. Fonte: Agroinsider. Elaboração própria.



Tendo em linha de conta que fazer uma amostragem em sítios diferentes pode apresentar resultados diferentes então é fundamental fazer o registo geográfico das amostras e análises, bem como do histórico que lhe está associado. Em síntese, perceber como é que a concentração de nutrientes vai variando no espaço e no tempo. Apesar disso, todos bem sabemos que o registo geográfico das amostragens efetuadas, bem como do seu histórico, é muito difícil de encontrar numa empresa agrícola, mesmo que esta esteja em produção integrada.

Sucedem com frequência que a pessoa que foi recolher as amostras num determinado ano não é a mesma a pessoa que realizou a recolha no ano anterior e, de ano para ano, vai-se perdendo a memória de onde se recolheram as amostras e, conseqüentemente, dos resultados dos anos anteriores.

Por esta altura, alguns de vós começam já a perguntar, mas porque é que isso é tão importante? Os aspetos de gestão agronómica, económica e ambiental mencionados anteriormente, só por si, justificam a coleção e armazenamento deste tipo de informação. Para além disso, em muito pouco tempo, as exigências do consumidor no que toca à qualidade alimentar, associada à certificação de alimentos e a processos de "Blockchain" irão exigir esse tipo de informação de forma a garantir as evidências necessárias que conferem confiança ao consumidor.

Face ao exposto, percebemos que existem muitas alternativas no que toca ao tipo de amostragens em agricultura e ambiente e que as mesmas podem variar no que respeita à metodologia de análise e ao preço (Figura 30). Todavia, a sua recolha tem que ser inteligente por forma a otimizar o conhecimento produzido, bem como a tomada de decisão mais acertada e em tempo útil. Por outro lado, percebemos também que realizar amostras em agricultura e ambiente, não as georreferenciar e não guardar o seu histórico é como começar sempre de novo, jogando pela janela todo o esforço financeiro efetuado anteriormente, bem como o conhecimento previamente adquirido.





## IV.1.2. ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL SUELO A PARTIR DEL SATÉLITE SENTINEL-2

**Domínguez, Francisco José<sup>1</sup>; Terrón, José María<sup>1</sup>; González, Abel<sup>1</sup>**

### IV.1.2.1. INTRODUCCIÓN

En un análisis visual básico de las imágenes satelitales no pasan desapercibidas las diferentes tonalidades que encontramos en los suelos desnudos, fundamentalmente en el laboreo previo a la siembra y una vez que pasan varios días después de llover, cuando se pone de manifiesto la diferente capacidad de retención hídrica de los diferentes materiales.

Asimismo, el análisis interanual de los índices de vegetación de una parcela, sobre todo si el cultivo siempre es el mismo, evidencian una serie de patrones en función de las características estructurales de la parcela, que fundamentalmente tienen que ver con diferentes tipos de suelo, aunque en ocasiones también representan factores como la topografía o presencia de elementos limitantes en el subsuelo como pueden ser afloramientos rocosos o estructuras de naturaleza antrópica.

Visto lo anterior, el presente proyecto se ve empujado en comprobar si mediante el análisis de las imágenes satelitales de Sentinel 2 se puede establecer una zonificación que pueda suplir a otro tipo de tecnologías más caras y en muchos casos de difícil implantación por la ausencia de sensores en el ámbito de las empresas de servicios agrícolas.

El presente capítulo se ha realizado en base a la información obtenida de parcelas acogidas a convenio entre diferentes entidades públicas, privadas y el CICYTEX en el marco del proyecto transfronterizo INNOACE en su apartado 2.1.3, Gestión Agronómica Inteligente basada en sistemas remotos de observación de la tierra.

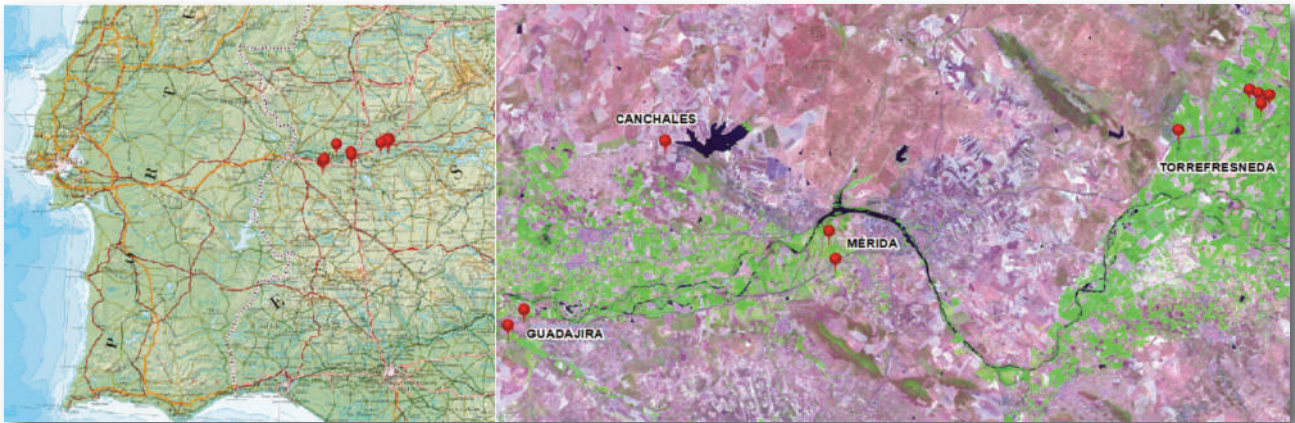


Figura 35 - Localización de las parcelas de estudio. Fuente: IGN-ESA.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura.





#### **IV.1.2.2. METODOLOGÍA**

Existe una amplia bibliografía en el estudio de la conductividad eléctrica aparente (CEa) y las características fisicoquímicas del suelo. *“Diversos autores describen que la CEa del suelo está influida por diversas propiedades del suelo como la porosidad, concentración de electrólitos disueltos, textura, cantidad y composición de los coloides (arcilla y materia orgánica), contenido de materia orgánica y contenido de agua”* (Rhoades et al. 1976; Nadler & Frenkel, 1980; Mcneill, 1980) en Machado, G. 2009.

Teniendo en cuenta la información anterior, se establece como punto de partida el mapeo de la conductividad eléctrica aparente (CEa) a la hora de establecer la caracterización de los suelos, dados sus cimientos bibliográficos, la posibilidad de establecer modelizaciones continuas del territorio comparables con la información obtenida por los satélites y por disponer del sensor de contacto VERIS (Veris Technologies, Inc., Salinas- Kansas USA) uno de los más extendidos para la obtención de mapas de CEa.

Este tipo de métodos generan una tabla plana con los datos de georreferenciación (geográficas WGS84) junto con los datos de conductividad eléctrica superficial (CEaS 0-30cm) y conductividad eléctrica profunda (CEaP 0-90cm). Esto requiere un tratamiento mediante técnicas geoestadísticas que transformen una entidad discreta de geometría puntual (vectorial) en una modelización espacial continua (ráster).

Por otro lado, la información obtenida de los satélites ha de contar con unas características específicas: el suelo debe estar totalmente desprovisto de vegetación y tiene que haber sido tratado con la misma técnica de laboreo de forma que no se aporte ruido que desvirtúe la zonificación. Aun así, dada la multitud de circunstancias presentes en las características de la parcela que pueden influir en la respuesta espectral del suelo, es sumamente complicado obtener una orden de magnitud comparativa entre diferentes zonas, siendo recomendable este análisis individual de la parcela analizada.

En base a los condicionantes anteriores, es necesario realizar un triaje exhaustivo de las imágenes satelitales disponibles para que cumplan con las características mínimas exigidas para la realización del estudio. Esto no es siempre posible, fundamentalmente por las diferentes rotaciones que puede sufrir una parcela que dificulta disponer de la totalidad de la parcela con las características mencionadas.

Para la obtención de una zonificación de las parcelas en función de la información obtenida de las diferentes bandas del satélite Sentinel 2 se establece un doble camino:

- Revisión bibliográfica de estudios realizados a este respecto;
- Análisis de las firmas espectrales de las diferentes tipologías detectadas en las parcelas de estudio.

El principal protagonista será el infrarrojo de onda corta (SWIR en la literatura anglosajona) por su capacidad de absorción energética en función de la presencia de agua (Sadeghi et al., 2015) tanto en la vegetación como en los suelos, sin embargo, también existen publicaciones donde el infrarrojo cercano (NIR en la literatura anglosajona) y la región del visible *“son potencialmente útiles para determinar muchos componentes del suelo”* (Ge, Y et al., 2011). De hecho, en el análisis de los datos, veremos cómo ambas regiones del espectro serán las que mayor información nos aportan en el análisis de la variabilidad espacial de los suelos.

#### **IV.1.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS**

Sin perder de vista los diferentes estudios científicos realizados en la materia, se procede a analizar el comportamiento en todo el rango del espectro electromagnético que nos ofrece Sentinel 2. Esto se ha realizado mediante el *software* SNAP, que dispone de dos herramientas muy útiles a este respecto:

- Spectrum View: permite visualizar las firmas espectrales del cursor o de los puntos de interés determinados por el usuario;
- Pin Manager: permite obtener de los puntos determinados por el usuario (Pins) y exportar a una tabla plana la reflectancia de cada una de las bandas de la imagen de satélite georreferenciadas en coordenadas geográficas. También permite exportar la plantilla de localizaciones (Pins) para poder realizar la misma operación en diferentes fechas.

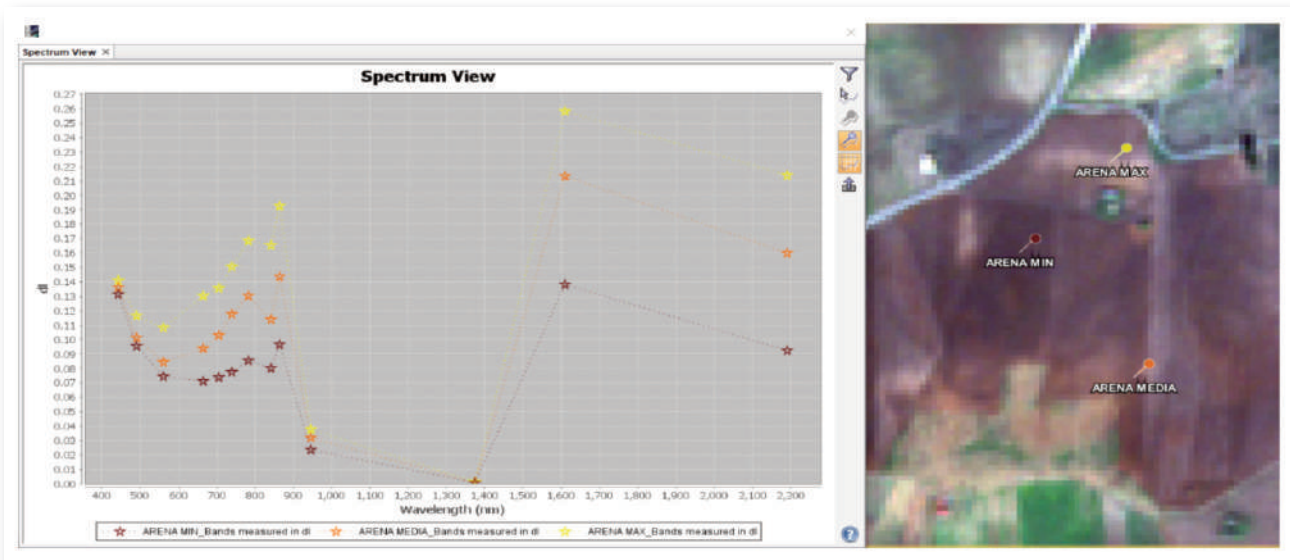


Figura 36 - Análisis de la firma espectral mediante la herramienta Spectrum View de 3 puntos de muestreo en función del porcentaje de arena (mínimo-medio-máximo). Se puede observar cómo, a mayor porcentaje de arena mayor reflectividad y como la curva tiene un comportamiento entre las diferentes bandas es muy parejo.

Ante unas ratios similares entre las diferentes regiones espectrales, no son productivos índices de pendiente como los utilizados en el análisis de la vegetación, que en ese caso sí que comparan comportamientos totalmente antagónicos de regiones como el infrarrojo cercano y el rojo. Esto encamina el análisis a otras técnicas que permitan discretizar las diferentes tipologías de suelo en función de sus características fisicoquímicas.

Aun así, existen métodos que se han demostrado fiables comparando las ratios entre las dos bandas del infrarrojo de onda corta como es el denominado Clay Ratio, tal y como se puede observar en Terron et al. (2019), donde se analiza una de las parcelas presentes en este capítulo.

En función de la información que nos aporta el análisis de las firmas espectrales, comportamiento parejo de las diferentes zonas y reflectividades más bajas en aquel suelo con mayor conductividad eléctrica aparente, se procede a analizar la relación de cada una de las bandas con los datos de conductividad eléctrica aparente obtenidos mediante técnicas de contacto (Veris). Este análisis realizado en las parcelas de estudio viene a corroborar lo consultado en las diferentes publicaciones, siendo las regiones del visible (fundamentalmente el rojo) y el infrarrojo de onda corta los que mejores resultados han ofrecido.

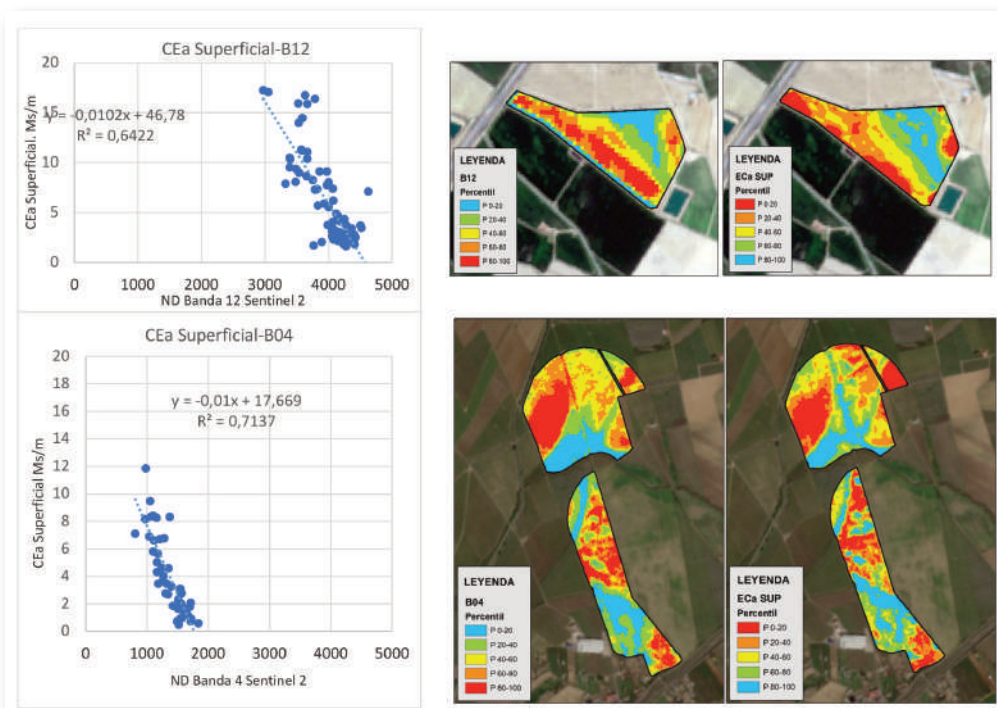


Figura 37 - Ejemplo de correlación entre el mapa de la banda 12 (infrarrojo de onda corta) en la parcela de Torrefresneda, de la banda 4 (rojo) en la parcela de Mérida, y el mapa de conductividad eléctrica aparente superficial obtenido a partir de métodos de contacto mediante el sensor VERIS. Datos de los mapas referidos a rangos de quintiles.

En cualquier caso, utilizando una técnica multivariante de estas bandas que se ajustan mejor a los valores de la conductividad eléctrica aparente, como el Análisis de Componentes Principales, todas las parcelas donde se aprecia variedad espacial presentan unos valores de colinealidad aceptables como se puede observar en las siguientes gráficas.

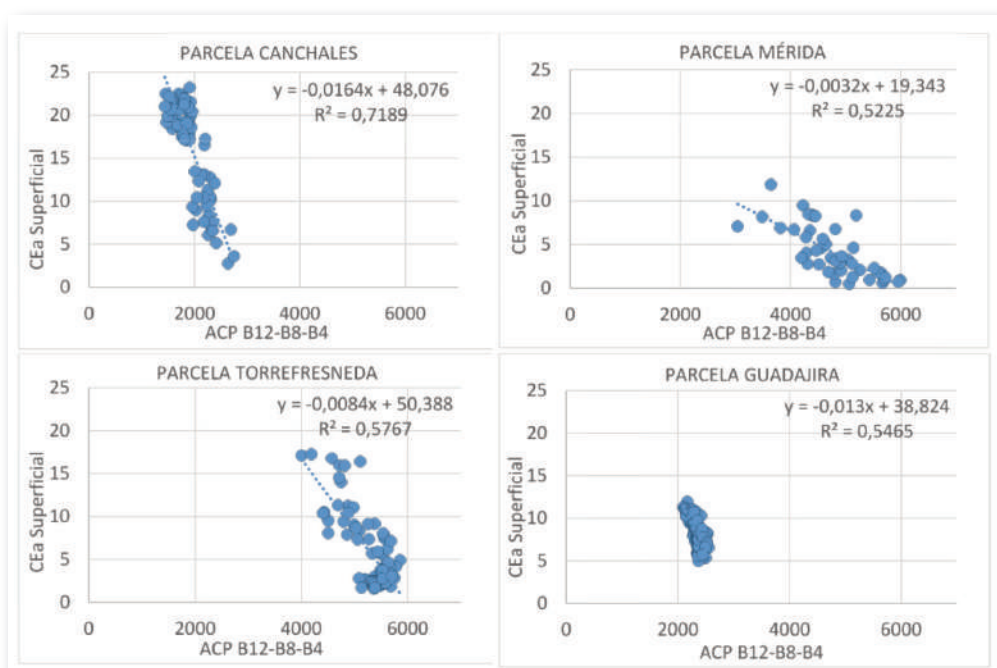


Figura 38 - Correlaciones de 4 de las parcelas analizadas entre el mapa de la componente principal primera del análisis de componentes principales de las bandas 12, 8, 4 de y el mapa de conductividad eléctrica aparente superficial obtenido a partir de métodos de contacto.

Para establecer una zonificación en base a la respuesta espectral de las imágenes satelitales, se han utilizado diversas técnicas de análisis espacial, siempre mediante el uso de sistemas de información geográfica, lo que aporta cierta complejidad al análisis. Para las parcelas de estudio se han realizado las técnicas de clasificación no supervisada mediante el *software* ArcGis (Version 10.6.1, ESRI Inc. Redlands, CA, USA), clasificación supervisada mediante el plugin SCP para el *software* QGIS, tanto a las imágenes multiespectrales con las regiones nombradas con anterioridad o a partir del análisis de componentes principales de las mismas (mediante la extensión Spatial Analyst del *software* ArcGis). Todos los resultados han sido bastante parejos, pudiéndose obtener una delimitación bastante clara de las zonas candidatas al tratamiento diferenciado.

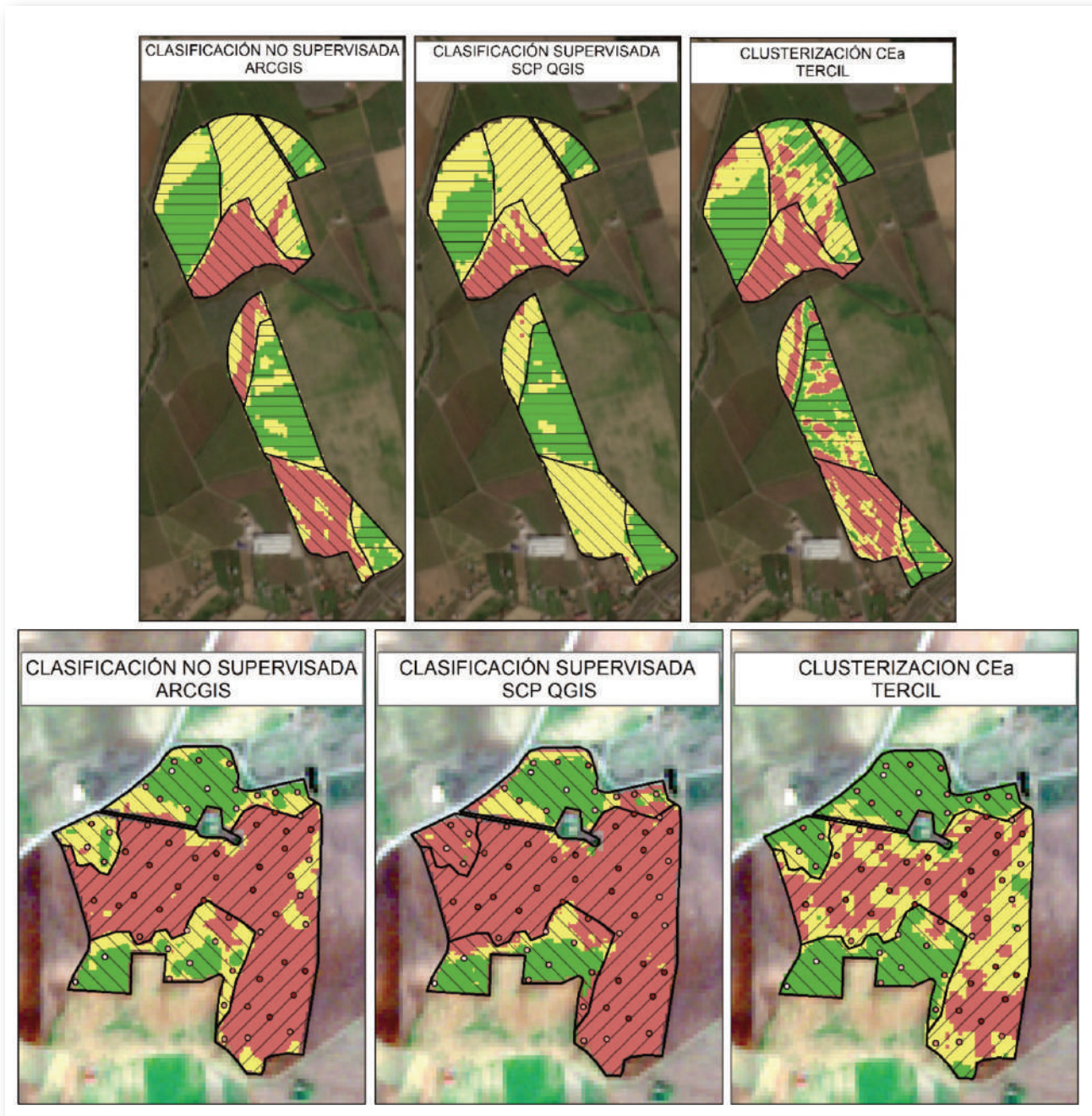


Figura 39 - Clusterización de dos parcelas en función de herramientas de clasificación supervisada y no supervisada a partir del análisis de imágenes multibanda originales del satélite Sentinel 2 (arriba) o a partir de imágenes multibanda del mapa de análisis de componentes principales (abajo).

También podemos realizar este tipo de técnicas de clusterización en alguna de las *webs* gratuitas que ofrecen acceso a las imágenes satelitales. Sin perder la visión del objetivo principal de la zonificación de suelos para un cultivo (posibilidad de aplicar tratamientos diferenciados), se establecen como máximo tres zonas diferentes e intentando tener dimensiones mínimas que posibiliten ser operativos a la hora de aplicar estos tratamientos diferenciados.



Figura 40 - Clusterización realizada a partir de la herramienta gratuita Landviewer (EOS, Menlo Park, CA 94027 EE.UU), con menos potencial pero fácil de utilizar y de acceso gratuito. Fuente: Landviewer

¿Pero qué se puede hacer con este tipo de zonificaciones? Realmente este tipo de análisis deben ser corroborados con el refuerzo de datos de campo, bien como plantilla a la hora de realizar un muestreo de suelos dirigido a las zonas prediseñadas o, en caso de no disponer de los recursos necesarios para la realización de las analíticas de suelo, puede servir como plantilla de seguimiento, comprobando si el cultivo, efectivamente, se comporta bajo las premisas que, *a priori*, se han prejuzgado en función de la zonificación del suelo.

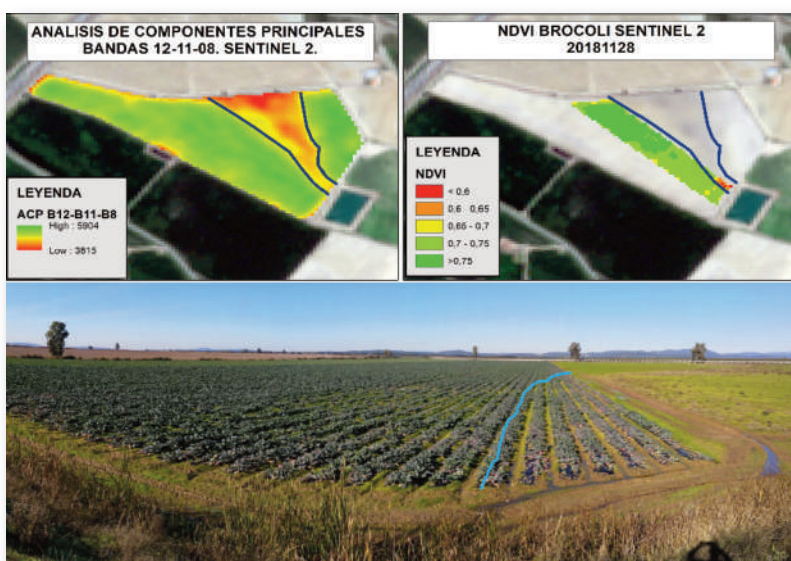


Figura 41 - Coincidencia de un problema de encharcamiento en un cultivo de brócoli en una parcela en Torrefresneda. Este problema de encharcamiento lo identificamos también en el mapa de NDVI y además se aprecia como esa zona queda incluida en la zona de menor reflectividad de las bandas incluidas en el mapa de análisis de componentes principales, que, como vimos en la Figura 36, coincide con un porcentaje de arena menor, es decir, se trata de una zona con mayor capacidad de retención hídrica.

Siguiendo la trazabilidad citada en el párrafo anterior, a continuación, se mostrarán los datos obtenidos del análisis de dos muestreos de suelos en las parcelas de Canchales y Mérida, la primera con datos previos al análisis de las imágenes satelitales, y la segunda siguiendo como guía los mapas obtenidos a partir de las imágenes satelitales. Aparte de la circunstancia anterior, hay que destacar que geológicamente son parcelas de origen distinto (depósitos terciarios en el caso de Canchales y llanuras aluviales del cuaternario en el caso de la parcela de Mérida), por lo que los valores de los datos analizados son diferentes, pero el comportamiento entre las variables analizadas y las imágenes satelitales son parejos.

De los datos analizados en las dos parcelas, podemos encontrar un denominador común, existe una clara relación entre la información obtenida de las imágenes satelitales y la textura del suelo, así como aquellas variables que dependen de la misma. En estas imágenes se muestran ejemplos de algunas de las variables de ambas parcelas y su distribución espacial.

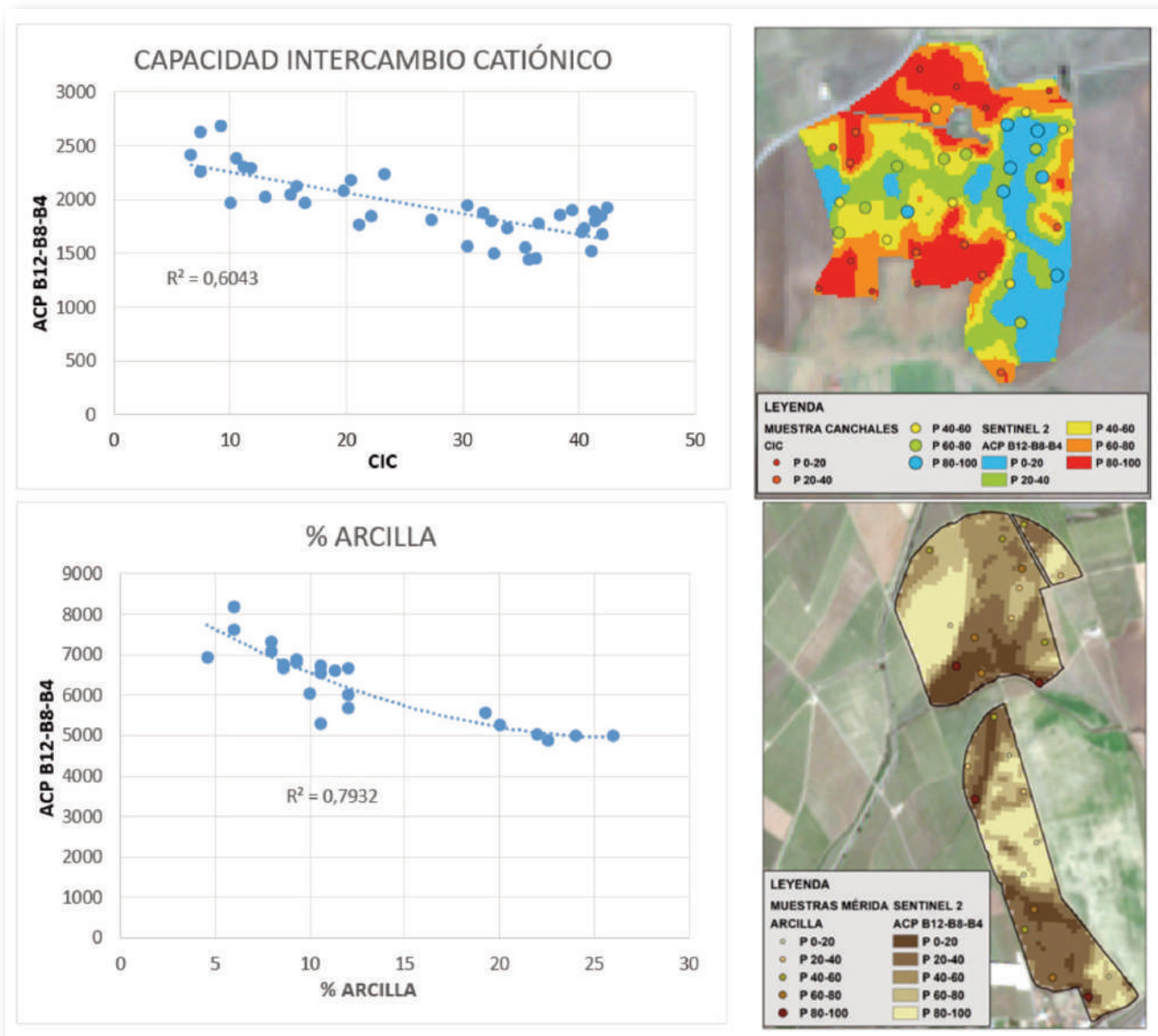


Figura 42 - Relación entre los mapas obtenidos a partir del satélite Sentinel 2 y los datos del muestreo de suelos (arcilla y CIC), mostrando los mapas en percentiles para que sean simbologías comparables. Hay que hacer dos aclaraciones en esta figura, una sobre la relación negativa, obediendo a lo mostrado en la Figura 36, donde se evidenciaba la menor reflectividad de las zonas arcillosas; y la otra por la diferencia de escala de la información relativa a los datos de las imágenes satelitales de la gráfica, mucho mayores en la parcela de Mérida debido al mayor porcentaje de arena.

Aunque estos datos sean interesantes *per se* hay que relativizarlos a una escala operativa, es decir, transfiriéndolos a una delimitación en zonas homogéneas operativas para el agricultor. Para ello, se va a utilizar la zonificación realizada en la Figura 39 basada en la información del satélite Sentinel 2, a la que se le calculará el valor medio de las diferentes variables analizadas en la muestra del suelo. A continuación, se mostrarán algunos de los datos obtenidos:

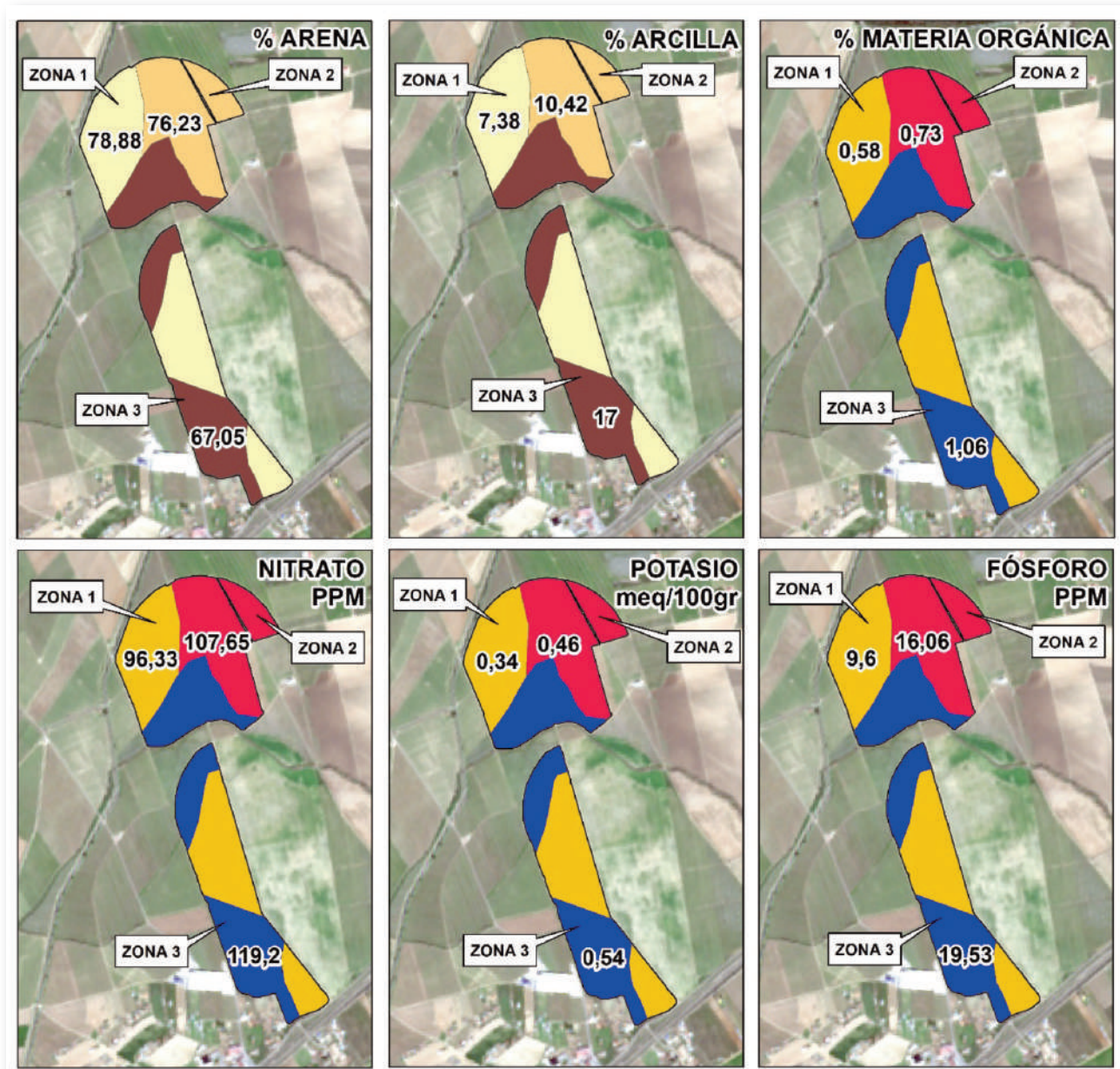


Figura 43 - Reducción de los datos de las 25 muestras a la zonificación propuesta a partir de la información obtenida del satélite Sentinel 2.

Esto nos hace retroceder al apartado II.3 para tomar las premisas del proceso de aplicación de la agricultura de precisión, donde se establecen los caminos a seguir para la adaptación de tratamientos diferenciados en función de las características estructurales de la parcela.

De forma general, la zonificación propuesta queda corroborada por el cálculo de los datos de forma agrupada, si bien entre las dos zonas 1 y 2 (las más arenosas) se observan valores similares en algunas variables: se trata de suelos encuadrados en un entorno de depósitos aluviales caracterizados por un gran porcentaje de arenas bastante homogéneos salvo en la zona 3 donde existen depósitos arcillosos de un antiguo cauce proveniente del lavado de estructuras de raña de la cercana Sierra de Arroyo.

En cualquier caso, queda patente la mayor capacidad de retención de nutrientes en las zonas con mayor porcentaje de arcillas, y valida esta metodología para establecer un proceso de abonado variable.

#### **IV.1.2.4. CONCLUSIONES**

Visualmente, las imágenes satelitales permiten identificar la variabilidad espacial de los suelos de una parcela, confirmando lo que el agricultor puede observar desde el suelo, pero aportando la dimensión territorial desde la perspectiva cenital y permitiendo establecer de forma sencilla una zonificación desde la que, o bien se permite planificar un muestreo de suelo dirigido, o bien realizar un seguimiento del cultivo que permita identificar patrones de desarrollo del mismo que permita establecer un plan de tratamiento diferencial.

Este proceso sencillo se puede hacer más complejo y preciso a la vez. Como se puede observar a lo largo del documento, existen comportamientos de las respuestas espectrales de las imágenes satelitales que pueden resultar muy útiles para determinar de forma bastante aproximada una zonificación basada en la conductividad eléctrica aparente, supliendo la dificultad de encontrar empresas que ofrezcan este tipo de servicios y con el consecuente ahorro de costes. Asimismo, vemos como este tipo de análisis puede aportar información valiosa en aspectos como la textura de los suelos y las variables procedentes de la misma.

Siguiendo el esquema del proceso de aplicación de la agricultura de precisión que podemos encontrar en el II.3 del presente manual, este tipo de información derivada del análisis de las imágenes satelitales se convierte en un pilar más de un proceso productivo orientado a tratar de forma diferente lo que es diferente, encuadrado en el proceso sinérgico que es la agricultura de precisión.

#### **IV.1.2.5. BIBLIOGRAFIA**

GE, Y., THOMASSON, J.A. & SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Front. Earth Sci.* 5, 229–238 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0>

MACHADO, G. (2009). Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo por inducción electromagnética y variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidade de Santiago de Compostela.

TERRÓN, JOSE MARÍA & DOMÍNGUEZ, FRANCISCO & GONZÁLEZ RAMIRO, ABEL & VILLALBA, MARIANO & PAIXÃO, LUÍS & MARQUES DA SILVA, JOSÉ. (2019). 2019-07-02 Use of sentinel 2 images to delineate soil management zones using the clay ratio. 10.13140/RG.2.2.27295.10406.

TERRÓN, JOSE MARÍA & MARQUES DA SILVA, JOSÉ & MORAL GARCÍA, FRANCISCO JESÚS & GARCÍA-FERRER, ALFONSO. (2011). Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. *Precision Agriculture*. 12. 750-761. 10.1007/s11119-011-9218-5.



## IV.2. Cereais e Forragens

### IV.2.1. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y LA ESTIMACIÓN DE COSECHA DE *TRITICUM SPP.* (TRIGO) A PARTIR DEL ÍNDICE NDVI

**Domínguez, Francisco José<sup>1</sup>; Terrón, José María<sup>1</sup>; González, Abel<sup>1</sup>**

#### IV.2.1.1. INTRODUCCIÓN

A día de hoy no se entiende la agricultura sin las mejoras tecnológicas que dominan nuestra sociedad y que, paulatinamente, se han ido haciendo imprescindibles en el manejo de los cultivos. En este sentido, la democratización de las imágenes satelitales aporta un importante avance dentro de un sistema de ayuda a la toma de decisiones.

El trigo es una gramínea con un ciclo fenológico muy marcado que necesita suelos relativamente profundos que permitan el desarrollo de su sistema de raíces que suelen llegar a 1 metro y en suelos sueltos hasta 1,5 metros. Por lo general, los suelos arcillosos por su alta capacidad de retención de humedad son más aptos para este tipo de cultivos, pero también pueden generar problemas de encharcamiento en inviernos lluviosos. En Extremadura es, fundamentalmente, un cultivo de secano muy vulnerable a los condicionantes atmosféricos, sobre todo al régimen pluviométrico de primavera, cuestión que queda de manifiesto en el presente capítulo.

Vistas las características anteriores, es un cultivo propicio para el análisis mediante técnicas de percepción remota, siendo la constelación Sentinel 2 ideal por su combinación de resolución espacial, temporal y espectral.

Para el presente estudio se han realizado diversos convenios con entidades particulares en el entorno de las Vegas Bajas del Guadiana, con terrenos de diversas características y un elemento relativamente extraño como es la posibilidad de riego en este tipo de cultivo.



Figura 44 - Localización de las parcelas. Fuente: ING-ESA

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura.

#### **IV.2.1.2. METODOLOGÍA**

Teniendo en cuenta la sensibilidad del infrarrojo cercano con los cambios vegetativos, y las mejoras que aporta la constelación Sentinel 2 en lo referente a la combinación resolución temporal-espacial, en el presente capítulo se pretende analizar como las imágenes satelitales Sentinel 2 y sus índices derivados pueden aportar una información importante a la hora de establecer diferentes zonas de manejo en el cultivo del trigo, en base a la experiencia adquirida tras el análisis de los datos de las campañas 2018 y 2019. Todos los datos están referidos a 8 parcelas conveniadas en el marco del proyecto INNOACE donde se contaban mapas de cosecha realizado mediante cosechadoras con monitor de rendimiento.

En un principio es relativamente sencillo realizar un análisis de patrones del comportamiento del cultivo a lo largo de los años. Esto nos va a permitir establecer zonas de similar comportamiento a lo largo de diferentes campañas o incluso el caso contrario, zonas que dependiendo el año el desarrollo del cultivo es totalmente diferente (Figura 47).

Con la puesta en órbita de Sentinel 2 (y sobre todo por la combinación de la dupla S2A-S2B), su acceso gratuito y del desarrollo de diferentes portales de Internet, (gratuitos también), cualquier ciudadano puede acceder a este tipo de datos en casi tiempo real y con accesibilidad a la totalidad del histórico de imágenes desde la puesta en marcha de la misión Sentinel 2 (verano 2015). Además, la mayoría de estos portales te permiten establecer diferentes combinaciones de banda, visualizar diferentes índices espectrales derivados o incluso realizar diferentes tipos de gráficos.

Otro de los aspectos que se quiere poner de manifiesto en este capítulo es la extraordinaria relación entre el índice NDVI y el rendimiento del cultivo. En este caso, la complejidad técnica es mayor debido a la necesidad de disponer de mapas de cosecha georreferenciados, siendo imprescindible la corrección de estos datos y la aplicación de técnicas geoestadísticas para la obtención de mapas continuos con un mínimo de fiabilidad. Tras estos trabajos de adecuación de los datos, se ha procedido a la delimitación zonas de rendimientos similares como unidad territorial para el análisis de la información obtenida de las imágenes satelitales.

Al igual que en el caso de los datos de cosecha, para el trabajo con la serie de imágenes satelitales de toda la campaña de un cultivo, es obligatorio establecer un procedimiento que permita obtener datos óptimos de las imágenes satelitales:

- Localizar y desechar las imágenes con limitaciones atmosféricas. Esta es una tarea relativamente sencilla en los casos evidentes, pues las propias imágenes disponen de esa información en los metadatos. La dificultad es mucho mayor en imágenes con nubes de cristales de hielo (nubes altas, fundamentalmente cirros), polvo en suspensión o humo. Esos casos no están registrados en los metadatos y, en ocasiones, las imágenes tienen apariencia de validas, sin embargo, los datos obtenidos aportan anomalías que desvirtúan el análisis;
- Utilización de imágenes corregidas atmosféricamente (L2A), minimizando así el efecto de aerosoles y vapor de agua en la atmosfera. El portal de la ESA que sirve las imágenes permite discriminar las imágenes corregidas (L2A o también denominadas BOA) de las que no tienen corrección atmosférica (L1C o también denominadas TOA) pudiendo elegir para la descarga la que mejor se adapte al trabajo a realizar.

Para establecer la relación entre la zonificación derivada de los mapas de rendimiento y la información obtenida de las imágenes de satélite, se opta por utilizar el índice NDVI cuya base es la reflectividad de la vegetación en la franja del infrarrojo cercano.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$
$$\text{NDVI} = \frac{\text{B8} - \text{B4}}{\text{B8} + \text{B4}}$$

Figura 45 - Fórmula del cálculo del NDVI, a la derecha las bandas utilizadas en el satélite Sentinel 2.

Para cada zona homogénea de producción se calcula el NDVI medio de todas las imágenes disponibles sin limitaciones atmosféricas en el periodo desde la siembra hasta la cosecha, estableciendo, por una parte, el perfil de evolución temporal del índice NDVI que, a su vez, permite establecer la fecha o el momento del cultivo que mejor se ajusta al mapa de producción (Figura 50).

#### IV.2.1.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Durante el periodo de análisis del cultivo, la pretensión del presente estudio era identificar los patrones de relación entre la producción y el índice NDVI. Esto implicaba el análisis de multitud de imágenes de satélite, que además se mostraron como una buena herramienta para establecer zonas de manejo más allá de su relación con la producción.

Analizando patrones interanuales, con la mera visualización de los índices NDVI, combinaciones de imágenes falso color (B8-B4-B3 o B8-B12-B4) e incluso con el visible (B4-B3-B2) de varios años, se pueden observar patrones que se repiten en el cultivo, manifestando un elemento estructural de la parcela, siendo las características físico-químicas del suelo, el causante más probable de esta diferencia zonal.

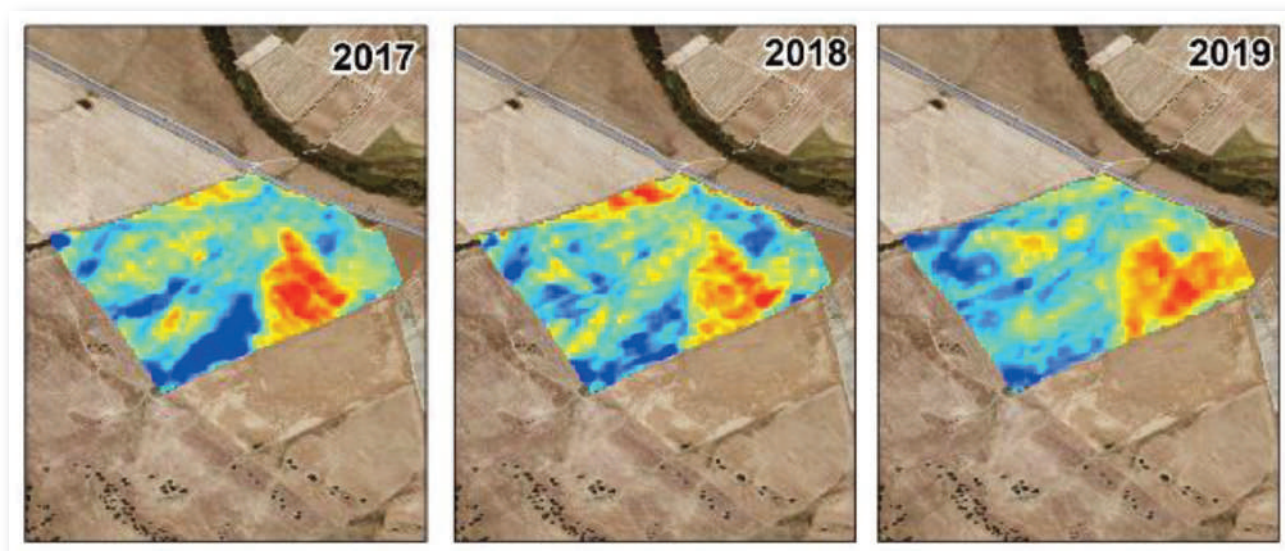


Figura 46 - Secuencia de imágenes en una parcela del centro de la Provincia de Badajoz, Extremadura (España). El estudio de patrones en la secuencia de imágenes, en fechas iniciales o finales del cultivo, permite establecer zonas con las que posteriormente se puede trabajar para realizar tratamientos diferenciados.



A su vez, estos análisis interanuales también han sacado a la luz problemas de encharcamiento en función del comportamiento del año hidrológico. Durante la fase de estudio de las imágenes satelitales, se han detectado zonas de asfixia radicular por acumulaciones de agua en años de pluviometría abundante, siendo el comportamiento contrario en años de escasez pluviométrica, donde estas zonas de acumulación de agua (muchas veces antiguos cursos de agua) ofrecen un mejor ambiente para el crecimiento del cultivo.

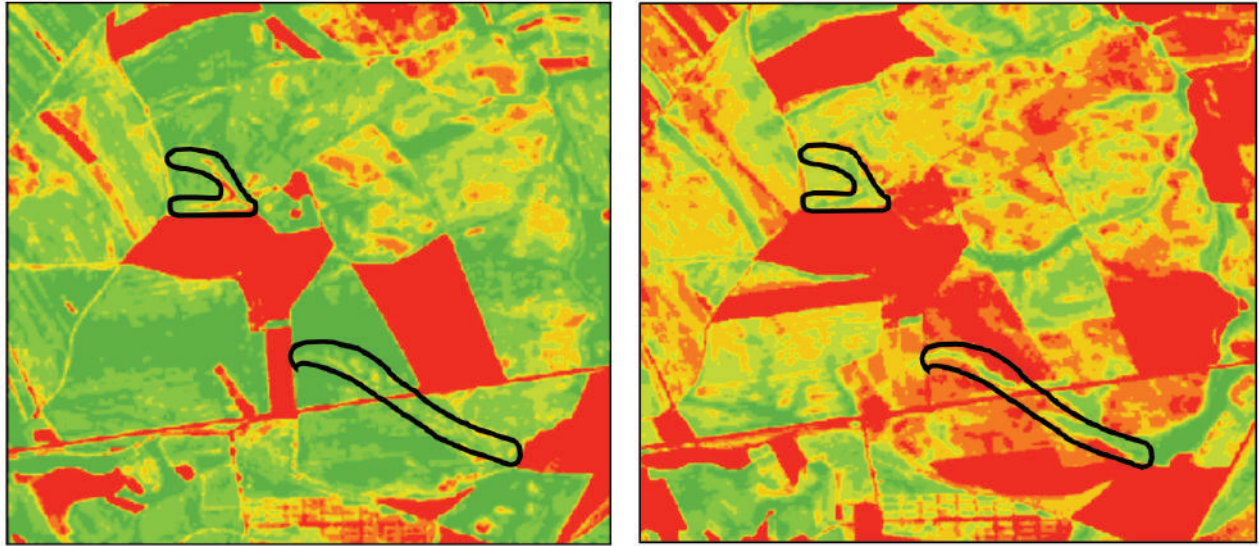


Figura 47 - Comparativa de imágenes entre 2018 (izquierda) y 2019 (derecha) con comportamiento opuesto en zonas de antiguos cauces de agua donde se producen acumulaciones de agua pluviales.

Para el análisis de los escenarios de producción en función del índice NDVI, el principal problema lo encontramos a la hora de establecer un eje temporal normalizado de los datos de NDVI para todas las parcelas, pues tenemos parcelas con características muy diferentes:

- Dos campañas con comportamiento pluviométrico antagónico. La campaña 2017-2018 tenía un superávit hídrico muy marcado a partir de marzo, mientras que en el caso de la campaña 2018-2019 el comportamiento ha sido el opuesto;
- Aunque las parcelas se encuentran relativamente cercanas, existen diferencias significativas entre ellas, fundamentalmente entre las que se encuentran en zonas aluviales del cuaternario y las situadas sobre depósitos terciarios;
- Fechas de siembra muy diferentes, limitadas por las condiciones meteorológicas. El otoño de la campaña 2018-2019 fue lo suficientemente lluvioso como para limitar el laboreo, posponiendo algunas siembras hasta enero. El diferente comportamiento del cultivo entre siembras de octubre-noviembre y enero no permite utilizar los días desde la siembra como eje temporal de análisis;
- Gran parte de las parcelas tienen la posibilidad de riego, cuestión fundamental en el desarrollo del cultivo en la campaña 2018-2019. En aquellas parcelas donde se han podido realizar riegos en momentos puntuales de la primavera el rendimiento ha sido mucho mayor que en aquellas parcelas estrictamente de secano. Aun así, en la P25 se ha producido el caso contrario, el riego uniforme de la parcela produjo un encharcamiento en la zona más propicia a la retención de agua con la consiguiente merma en la producción (parte sur y noreste de la Figura 50).

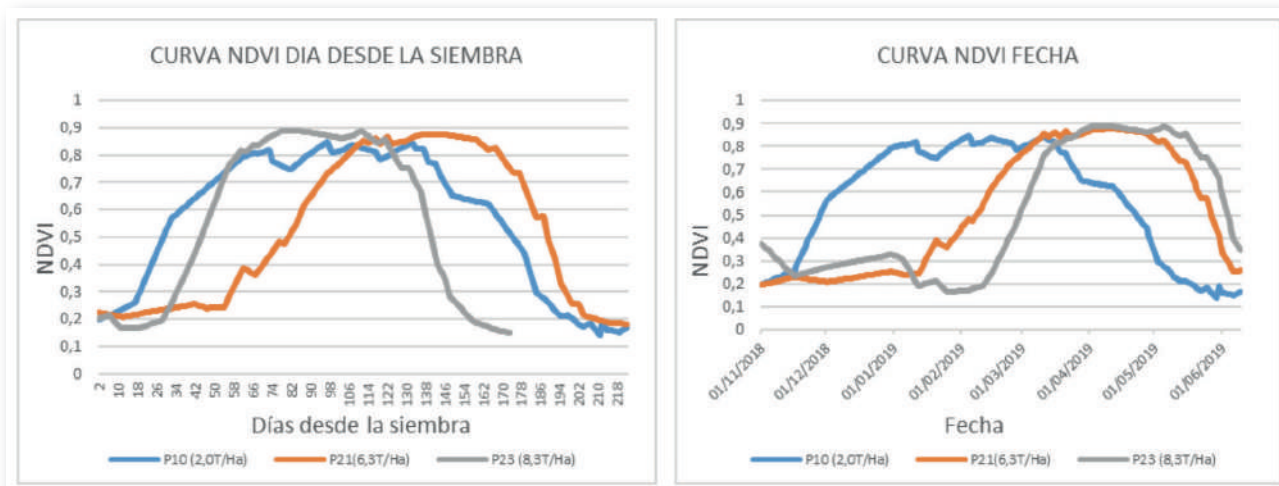


Figura 48 - Comparativa del eje temporal de tres parcelas en función de los días desde la siembra o la fecha. La disimetría de las curvas NDVI imposibilita un análisis comparativo de calidad.

Dadas las limitaciones a la hora de comparar datos de diversa naturaleza, se establece un hito común entre todos los cultivos, que no puede ser de temporal pero que sirva de inicio para un análisis temporal. Para ello, se establece el valor de NDVI que coincide con una cobertura continua del cultivo sobre el suelo, que suele oscilar entre 0,4 y 0,5.

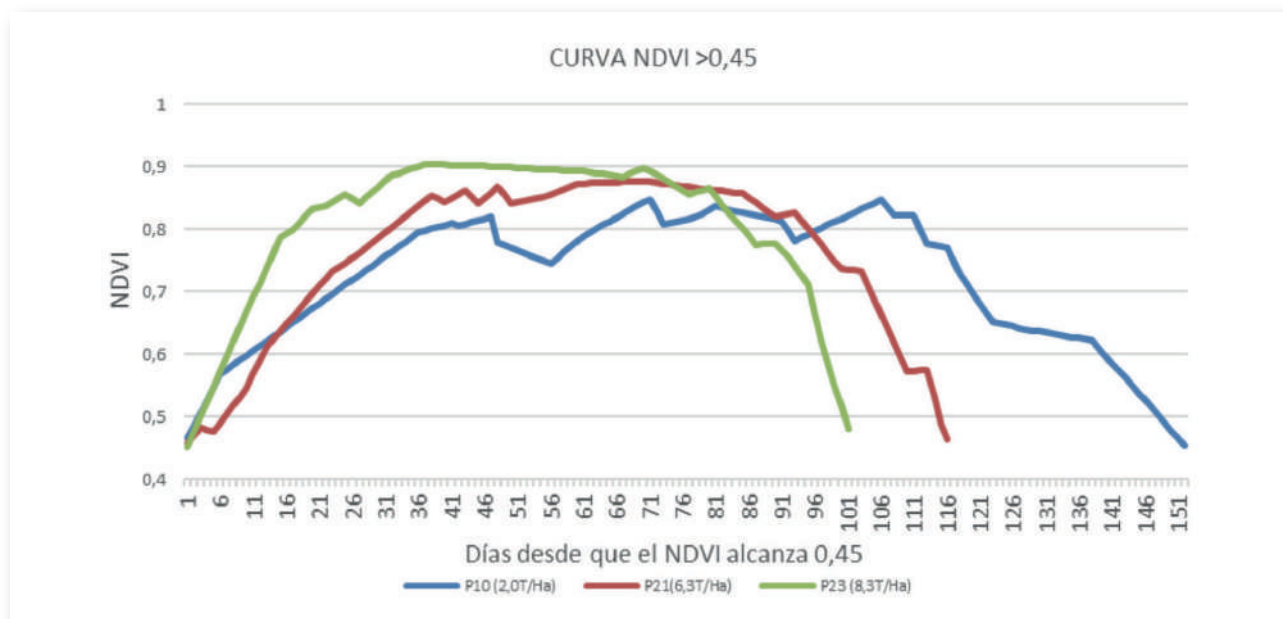


Figura 49 - Comparativa de curvas NDVI a partir de los valores de 0,45 permite contrastar mejor las diferentes zonas establecidas.

Con el establecimiento de este rango se evitan las disimetrías que aportan las sustanciales diferencias entre parcelas a la vez que quedan reflejadas dos de las cuestiones que hemos observado a lo largo de las dos campañas de estudio:

- Se ha podido constatar que la irregularidad de la curva de NDVI (herencia de las irregularidades pluviométricas) en los periodos reproductivos y de llenado del grano deriva en un menor rendimiento

del cultivo. En la Figura 49 se puede observar como la P10 (secano) tiene un desarrollo muy irregular de la curva como consecuencia de pérdidas de vigor vegetativo por déficit de agua;

- La amplitud del periodo de llenado de grano. A lo largo de todo el estudio se ha constatado como las zonas con una senectud de la planta más tardía, tienen un mayor rendimiento en el cultivo.

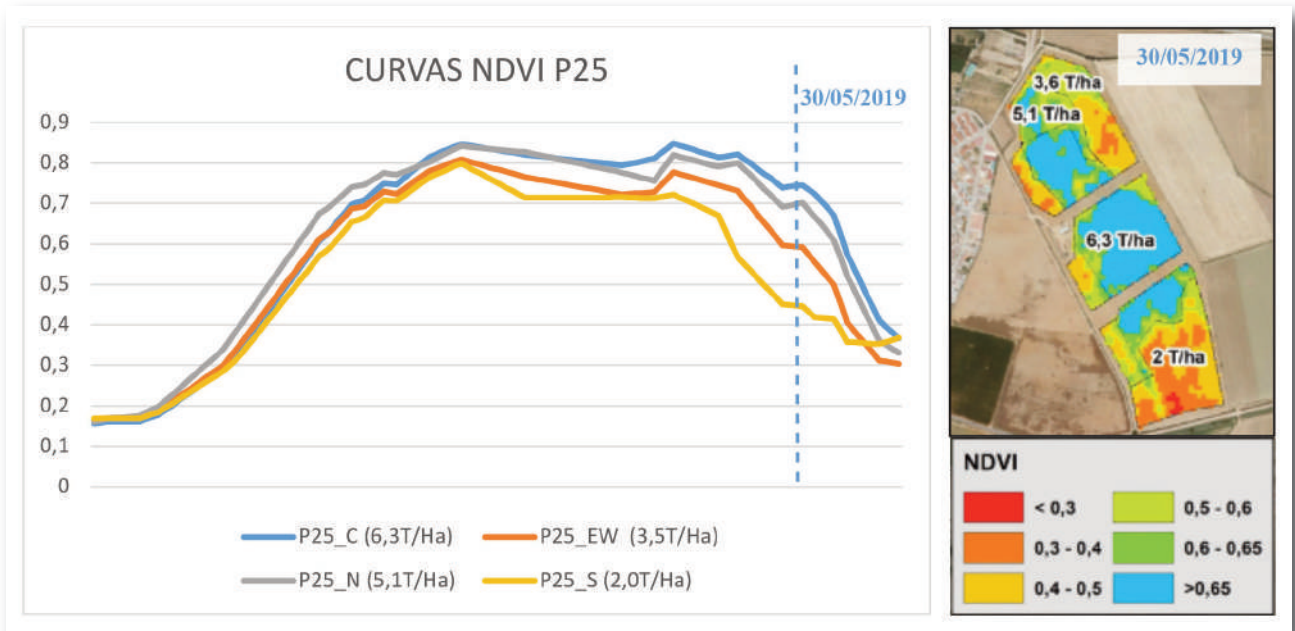


Figura 50 - Ejemplo claro de cómo la prolongación del cultivo en verde se corresponde con una mayor producción. El análisis de este tipo de curvas te permite ver qué imagen de satélite correlaciona mejor con el rendimiento del cultivo. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito.

El establecimiento del punto basal en el momento que el cultivo tiene una cobertura continua en el terreno ha permitido también establecer un buen modelo predictivo a la hora de relacionar el índice NDVI con la producción al final. Se ha optado por establecer la media del índice en valores superiores a 0,45 del que se obtiene una regresión lineal simple obteniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,8 y puede considerarse estadísticamente significativo a  $p < 0.01$ .

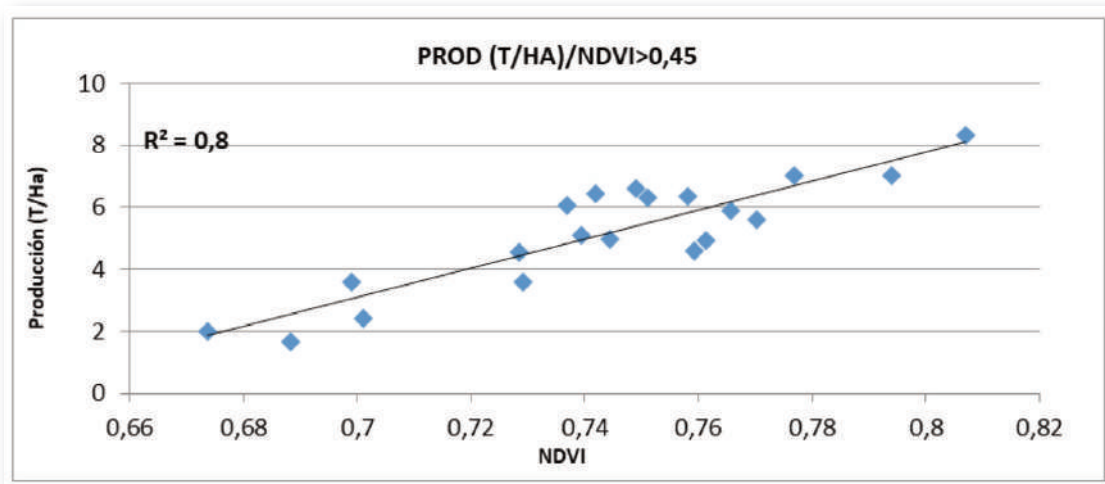


Figura 51 - Relación lineal entre los valores medios de rendimiento de la zonificación establecida y los valores medios de NDVI para la misma superficie. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito



#### **IV.2.1.4. CONCLUSIONES**

Tras el análisis de los datos del presente capítulo queda patente la utilidad de las imágenes satelitales de la misión Sentinel 2 a la hora de realizar un seguimiento del cultivo del trigo.

El periodo de revisita (en el caso de las parcelas analizadas era de 2-3 días) aporta una visión temporal de todo el proceso fenológico del cultivo con una resolución espacial suficiente para poder localizar variaciones en el cultivo a escalas razonables y el valor añadido de la región del infrarrojo, todo ello desde una perspectiva diferente a la visión desde el terreno.

En definitiva, las imágenes provenientes de la misión Sentinel 2 son una importante herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permiten localizar y delimitar diferentes comportamientos del cultivo que el agricultor debe analizar para dar la mejor solución posible y optimizar el rendimiento cuantitativo y cualitativo de la parcela.

Por último, se ha podido constatar como el comportamiento del índice NDVI es un indicador fiable para la estimación del rendimiento del cultivo, que permite localizar deficiencias en el cultivo, pudiéndose subsanar como es el caso de la aplicación del riego en momentos críticos del cultivo, al menos en aquellas parcelas con infraestructuras para el riego en primavera.



## IV.2.2. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y LA ESTIMACIÓN DE COSECHA DEL ZEA MAYS (MAÍZ) A PARTIR DEL ÍNDICE NDVI

Domínguez, Francisco José<sup>1</sup>; Terrón, José María<sup>1</sup>; González, Abel<sup>1</sup>

### IV.2.2.1. INTRODUCCIÓN

Los exigentes requerimientos hídricos y edáficos (profundos y bien drenados) del maíz (*Zea mays*) circunscribe este cultivo a suelos profundos con infraestructuras de riego suficientes. Esto hace que en Extremadura se ciña, casi exclusivamente, a las grandes zonas regables de las Vegas del Guadiana y los entornos aluviales de Alagón, Árrago y Tiétar.

El maíz es un cultivo ideal para el análisis mediante imágenes de detección remota ya que cuenta con un perfil muy evidente en los índices espectrales cuyo protagonista es el infrarrojo cercano, lo que lo hace especialmente sensible a incidencias de riego, enfermedades, aparición de especies competidoras en los estadios iniciales... En este sentido, hay que exigir a la constelación satelital una resolución espacial mínima que cubra la estructura del parcelario en las zonas anteriormente descritas y una resolución temporal que minimice las imágenes, las limitaciones atmosféricas y aporte una fuente relativamente continua de datos. Visto lo anterior, la constelación Sentinel 2 es ideal para el estudio del cultivo del maíz, máxime si se trata de una zona de solape con un retardo de 2-3 días de las diferentes órbitas del satélite.

Para el presente estudio, se han realizado diversos convenios con entidades particulares en el entorno de las Vegas Bajas del Guadiana, en un marco geológico similar (llanuras aluviales del cuaternario) pero con variedad edafológicas entre las diferentes parcelas e incluso dentro de una misma parcela. Todas las parcelas se encuentran dentro de las zonas regables de Lobón, Montijo y Alange, en el macro-entorno de Vegas Bajas.



Figura 52 - Localización de las parcelas. Fuente: IGN-ESA.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura.



#### IV.2.2.2. METODOLOGÍA

Dadas las características de las imágenes de la constelación Sentinel 2 del programa Copernicus de la ESA, con una resolución espacial de 10m que permite el análisis de parcelas de escaso tamaño y una resolución temporal entre 5 días (sin solape entre órbitas) y 2-3 días (con solape entre órbitas, órbitas relativas 037 y 137 en los casos de estudio) que permite analizar con bastante precisión la dimensión temporal, este tipo de imágenes se ha convertido en una herramienta muy valiosa a la hora de monitorizar un cultivo.

La línea principal del presente estudio está encaminada a establecer una correlación entre la información obtenida de las imágenes satelitales y la producción obtenida final. Para ello, se ha marcado un itinerario técnico con dos líneas principales:

- Obtención, depuración y mapeo de la cosecha basado en monitores de rendimiento incluidos en las cosechadoras;
- Obtención, depuración y análisis del histórico de las imágenes satelitales y productos derivados de las mismas;
- Análisis comparativo de los resultados.

Toda esta información queda enmarcada territorialmente en las parcelas convenidas entre Cicytex y diferentes entidades y particulares bajo el paraguas del Proyecto INNOACE con el fin de dar desarrollo al apartado 2.1.3 del mismo: Gestión Agronómica Inteligente basada en sistemas remotos de observación de la tierra.

Como se ha podido ver en apartados anteriores del presente documento, existe una clara relación entre la región del infrarrojo cercano y el vigor vegetativo de las plantas, por lo que *a priori* parece un buen indicativo para obtener una buena previsión de la producción final del cultivo. Asimismo, el maíz dispone de un desarrollo fenológico muy evidente, lo que se traduce en unas curvas evolutivas de los índices espectrales muy marcadas, con un periodo de “saturación” de los índices en los momentos de mayor auge del cultivo.

Para poder realizar los diferentes análisis espaciales con datos mínimamente fiables, primero es necesario un proceso de depuración de los mismos, sobre todo en la nube de puntos obtenida de los monitores de rendimiento de la cosechadora. Es relativamente común contar con errores puntuales propiciados por la propia cosechadora u otros de tipo lineal relacionados con el proceso de cosechado (cosechado en diferentes direcciones, líneas de cosecha que no ocupan el peine entero...) Existen procesos automáticos de análisis y depuración de datos, siendo necesario realizar revisiones manuales para terminar de limpiar la información.

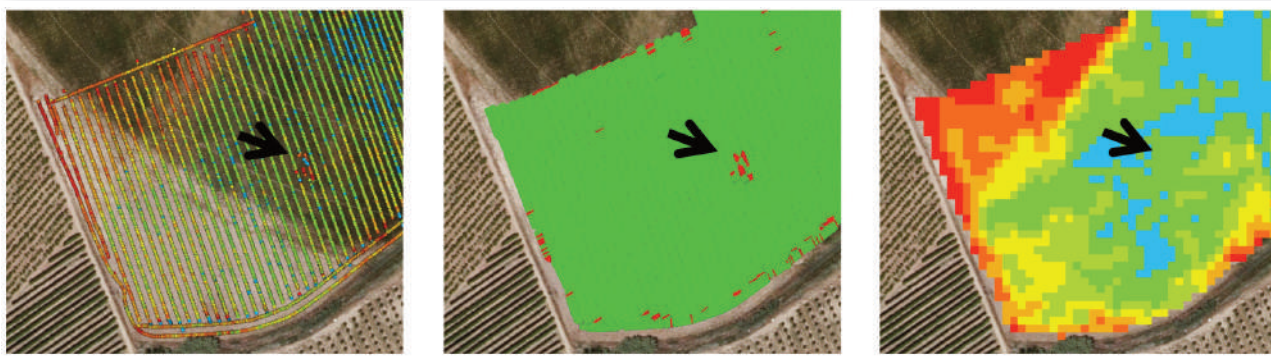


Figura 53 - Ejemplo de anomalía de datos debido a la presencia de una boca de riego que dificulta un proceso de cosechado homogéneo. La utilización de técnicas como los polígonos Voronoi (centro) permite identificar elementos discordantes con la vecindad. Este tipo de circunstancias no deben influenciar en un mapa continuo. Fuente: Cooperativa El Chaparrito.

En el caso de las imágenes de satélite también existe un proceso de criba para la viabilidad de las propias imágenes. Este proceso está condicionado por la propia localización de las parcelas a analizar y la presencia de limitaciones atmosféricas, fundamentalmente por nubes, pero también por la presencia de calimas e, incluso, humo.

Esta disponibilidad de imágenes también condiciona la posibilidad de establecer un modelo predictivo pues existe una gran variabilidad del número de imágenes analizadas en función de la localización de las parcelas analizadas y, por lo tanto, diferencias de datos disponibles para el análisis. Solo el hecho de que una parcela se encuentre en una zona de solape de órbitas, duplica el número de pasadas de la misma, minimizando así los días sin datos por presencia de nubes. Aunque el cultivo del maíz se desarrolla en época estival, y las localizaciones elegidas para este análisis se encuentran en zonas bajo la influencia anticiclónica en este periodo del año, existe la posibilidad de verse afectado por nubosidad de tipo alto que, aunque deja pasar parte de la radiación solar y permite al satélite recibir datos, desvirtúa el cálculo de los índices espectrales. Asimismo, es relativamente común contar con advecciones de polvo sahariano a lo largo del verano, tanto por la proximidad del continente africano como por la configuración sinóptica típica veraniega. Por último, también se han detectado anomalías en el cálculo de índices espectrales por la afeción de humo proveniente de incendios forestales de gran magnitud. Salvo en el caso de nubes altas más densas, estas son circunstancias que no vienen reflejadas en los metadatos de la imagen, lo que obliga a ser muy cuidadoso a la hora de elegir los datos, condicionando en algunos casos la posibilidad de automatizar ciertos procesos.

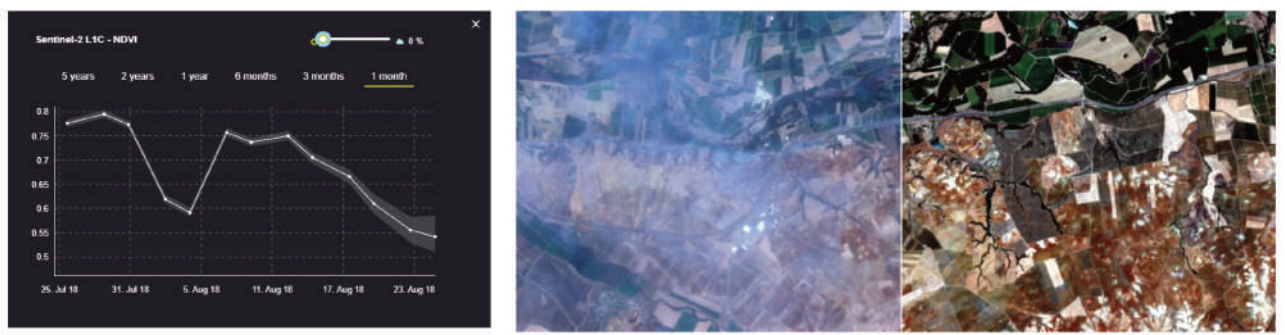


Figura 54 - Dos ejemplos de las limitaciones atmosféricas descritas con anterioridad: A la izquierda un gráfico de la evolución del índice NDVI donde se aprecia la anomalía que aportó una potente advección de calima que afectó a gran parte del oeste peninsular. A la derecha, una comparativa de imágenes (continua) entre el 21 y el 19 de julio de 2019 con una importante de acumulación de humo que limitaba la recepción de los sensores del Sentinel 2. Fuente: EO Browser.

Tras el proceso de depurado de las diferentes fuentes de datos, se establece una zonificación en función de la producción de cada parcela como unidad territorial de referencia para el cálculo de los índices espectrales.

Se establece el NDVI como índice de referencia para realizar el análisis con la producción ya que es un índice sobradamente testado en numerosos estudios.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

$$\text{NDVI} = \frac{\text{B8} - \text{B4}}{\text{B8} + \text{B4}}$$

Figura 55 - Fórmula del cálculo del NDVI, a la derecha las bandas utilizadas en el satélite Sentinel 2.



Dado que no se trata de un cálculo puntual, sino que tiene una dimensión temporal, se hace imprescindible establecer los automatismos necesarios para agilizar la obtención de los datos, ya que son varios los procesos a realizar para la obtención de un valor por zona e imagen que ha de repetirse para cada fecha con imagen disponible.

**Tabla 3. Número de imágenes disponibles en función de la localización en las dos anualidades estudiadas. En zonas sin solape de órbita, la densidad de imágenes desciende considerablemente.**

AÑO	TILE	NÚMERO DE IMÁGENES
2018	29SPD	32
2018	29SQD	14
2019	29SPD	37
2019	29SQD	26

En el caso de las parcelas de este estudio se han establecido dos métodos para la obtención de los valores referidos con anterioridad:

Model Builder de ArcGis (Version 10.6.1, ESRI Inc. Redlands, CA, USA). Se establece la automatización de los procesos mediante el constructor de procesos de ArcGis, donde se agrupan los diferentes procesos en una sola herramienta a la vez que se establecen los límites de las zonas de estudio y el almacenamiento de los datos en una Geodatabase. Dadas las limitaciones de esta herramienta, este proceso ha de realizarse para cada una de las imágenes independientemente. Este método es ideal si se realizan los cálculos durante el periodo del cultivo.

Google Earth Engine. Mediante código Java, se automatizan todos los procesos requeridos para la obtención de los datos zonales de NDVI. Requiere un esfuerzo inicial para establecer todos los parámetros necesarios mediante el código, sin embargo, al disponer toda la colección de imágenes, aligera mucho los procesos ya que la computación se realiza en servidores externos. Este método permite agilizar los procesos para los cálculos una vez ha pasado toda la campaña del cultivo.

#### **IV.2.2.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS**

En una visión global de los datos analizados aparecen más incógnitas que certezas, sin embargo, tras un análisis más pormenorizado, se pueden sacar conclusiones fructíferas, no solo en la relación entre la producción y el índice NDVI, sino también en lo referente al desarrollo del cultivo o la obtención de una zonificación generalmente explicada por las características fisicoquímicas de los suelos.

La primera incertidumbre la aporta la propia metrología en la generación de los mapas de rendimiento a partir de los sensores instalados en las cosechadoras. El hecho que sea un dato derivado de diferentes parámetros (humedad, flujo, fuerza...) requiere una calibración muy minuciosa, más aún si se trata de diferente maquinaria utilizada para diferentes tipos de cultivo. Este proceso queda fuera del alcance si se trata de maquinaria externa. Esta circunstancia va a dificultar la normalización de los datos de diferentes fuentes, sin embargo, sirve para establecer patrones dentro de una misma unidad territorial de cultivo.

Al igual que sucede en otro tipo de cultivos, la variedad de suelos, diferentes híbridos, ciclos, condiciones meteorológicas...dificultan mucho el poder establecer modelos productivos globales, es decir, una curva tipo de NDVI que oriente al agricultor en casi tiempo real sobre el estado del cultivo. Aun así, analizando las parcelas individualmente, se ha obtenido información de gran utilidad que nos puede permitir poder actuar sobre el cultivo, tanto de forma inmediata (anomalías evidentes) o a lo largo de varios años.

En aquellas parcelas que tienen variabilidad espacial, fundamentalmente aportada por el tipo de suelo, se han encontrado relaciones significativas entre el desarrollo del cultivo, el índice NDVI y la producción final. En las siguientes gráficas, se observa como existe una correlación bastante importante entre la producción media de las zonas homogéneas establecidas a partir del mapa de cosecha y el valor medio de NDVI. Para el cálculo de la media solo se utilizan los datos coincidentes con los valores de la pendiente ascendente y descendente de la curva del cultivo, cuando tiene una cobertura dominante sin el ruido aportado por el suelo (estadios iniciales) o presencia de malas hierbas.

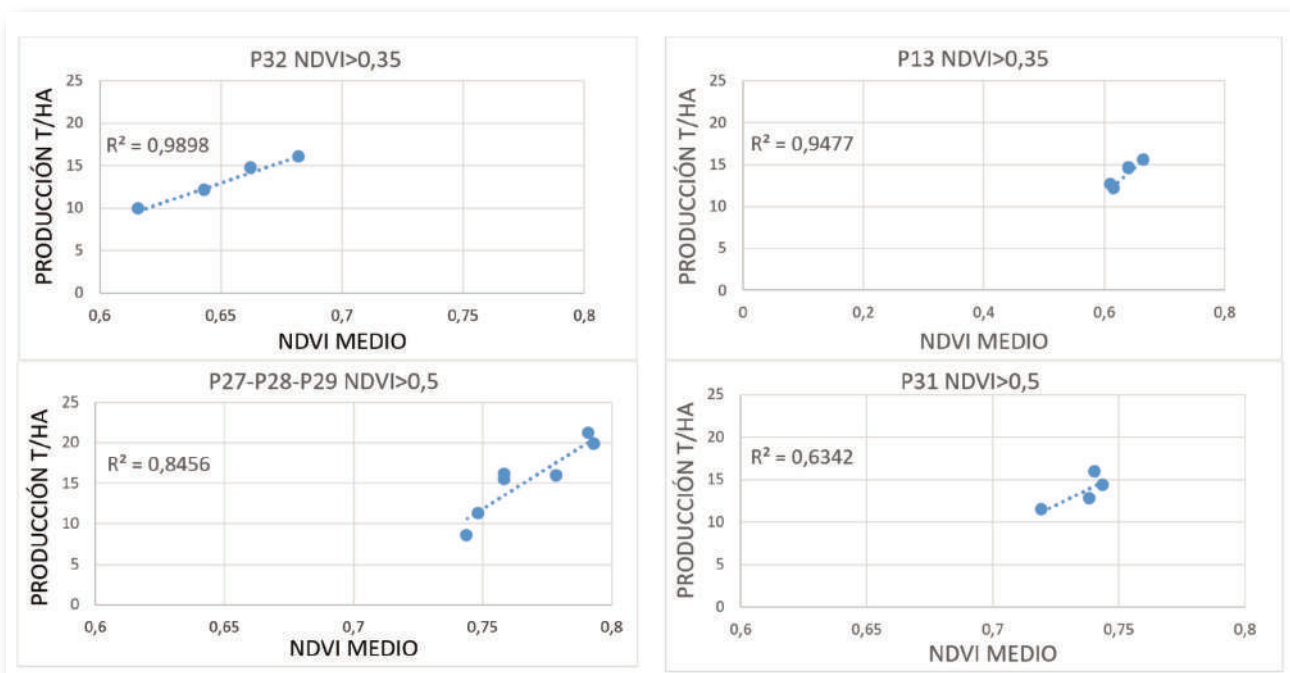


Figura 56 - Individualmente, la correlación entre NDVI y la producción es muy alta, incluso en diferentes parcelas en un mismo entorno se cumple esta premisa (Parcelas 27, 28 y 29). La parcela 31 queda un poco al margen debido a que se trata de un ensayo con diferentes variedades que aporta mucho ruido al estudio. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito.

Cualquier índice que utilice el infrarrojo cercano para el análisis de un cultivo con el maíz, de gran cobertura y muy vigoroso, aporta una saturación absoluta en los estadios centrales del cultivo, provocando una meseta con niveles de NDVI superiores a 0,75 en torno a los 45 días o superior, (en los casos estudiados solo hemos encontrado una parcela que no lo cumple por siembra tardía). En cualquier caso, esta circunstancia obliga a detenerse a analizar los periodos de crecimiento y decadencia del cultivo para analizar los índices espectrales, bien con métodos como descrito anteriormente o bien simplificando el análisis utilizando el número de días que un cultivo se desarrolla por encima de un nivel de NDVI determinado. En este sentido, se pueden realizar análisis interesantes comparando imágenes satelitales concretas dentro de esos periodos ascendentes y decadentes del cultivo con la producción.

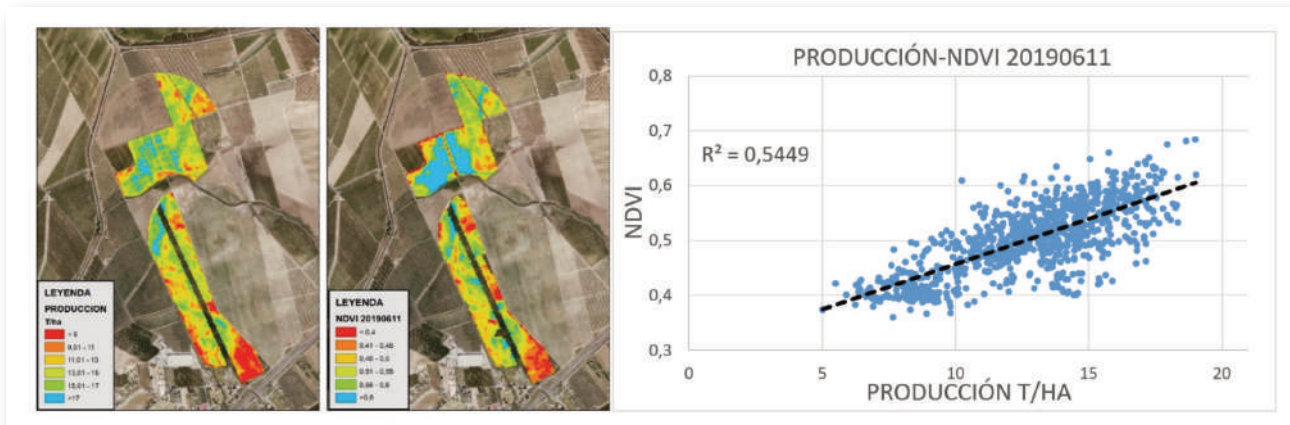


Figura 57 - Visualmente se aprecia una zonificación pareja entre la producción y el NDVI en fase de crecimiento. Para la obtención de la recta de regresión se ha generado una malla de 15x15m obteniendo los datos mediante la herramienta Extract multi values to point del Software ArcGis. En la parcela norte (P32), a pesar del bandeado que aportan los diferentes híbridos ensayados, se aprecian grandes zonas de similar desarrollo. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito.

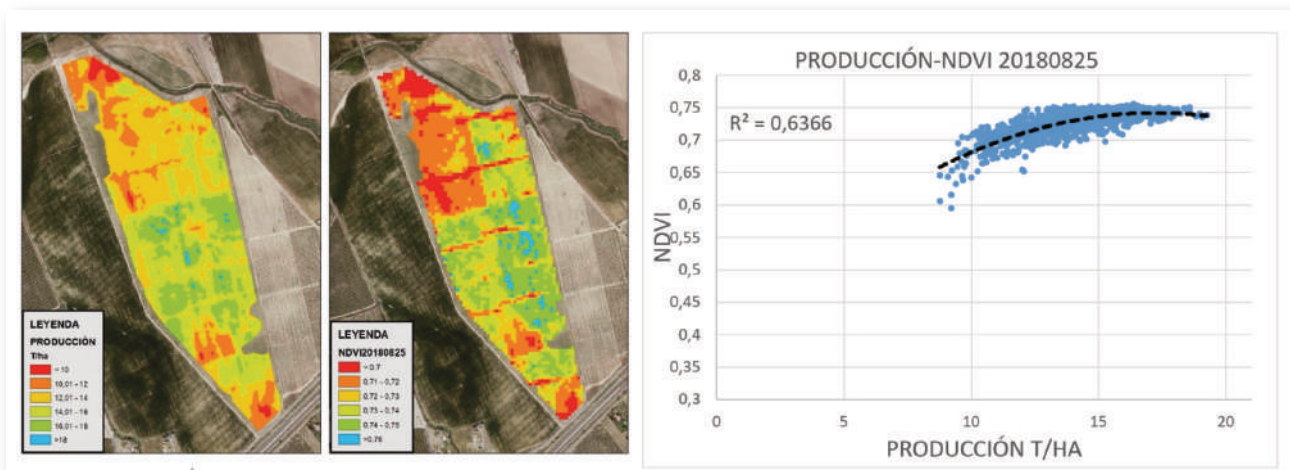


Figura 58 - Comportamiento similar al caso anterior pero, en este ejemplo, el mayor ajuste se produce en la senescencia del cultivo con una relación polinómica entre producción y NDVI. Para la obtención de la recta de regresión se ha generado una malla de 15x15m obteniendo los datos mediante la herramienta Extract multi values to point del Software ArcGis. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito.

La mayor parte de los resultados obtenidos establecen diferencias espaciales dentro de las parcelas, relacionados fundamentalmente con las características fisicoquímicas de los suelos. Los siguientes ejemplos ilustran perfectamente esta relación entre el desarrollo de los cultivos con la realidad edafológica y geológica de las parcelas.

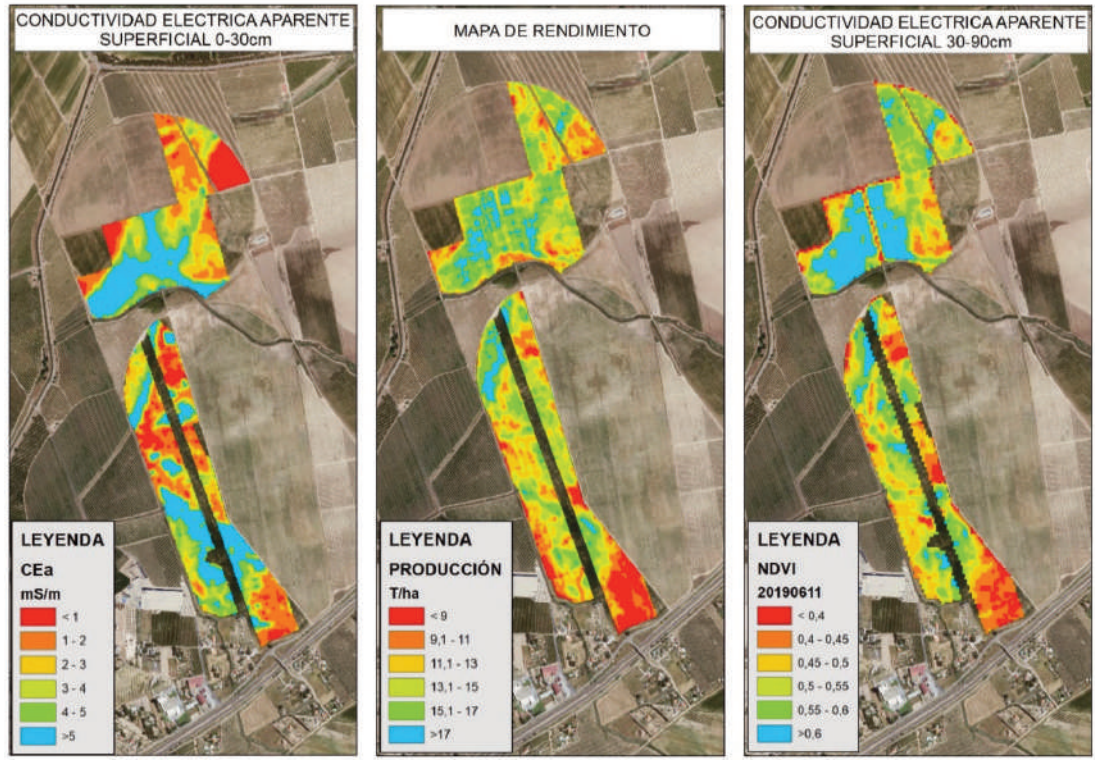


Figura 59 - Se puede observar que el desarrollo del cultivo y, por consecuencia, el rendimiento del mismo, tiene una distribución muy similar a las características del suelo, en este caso la comparativa se realiza con el mapa de conductividad eléctrica superficial obtenida a partir del sensor Veris. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito.

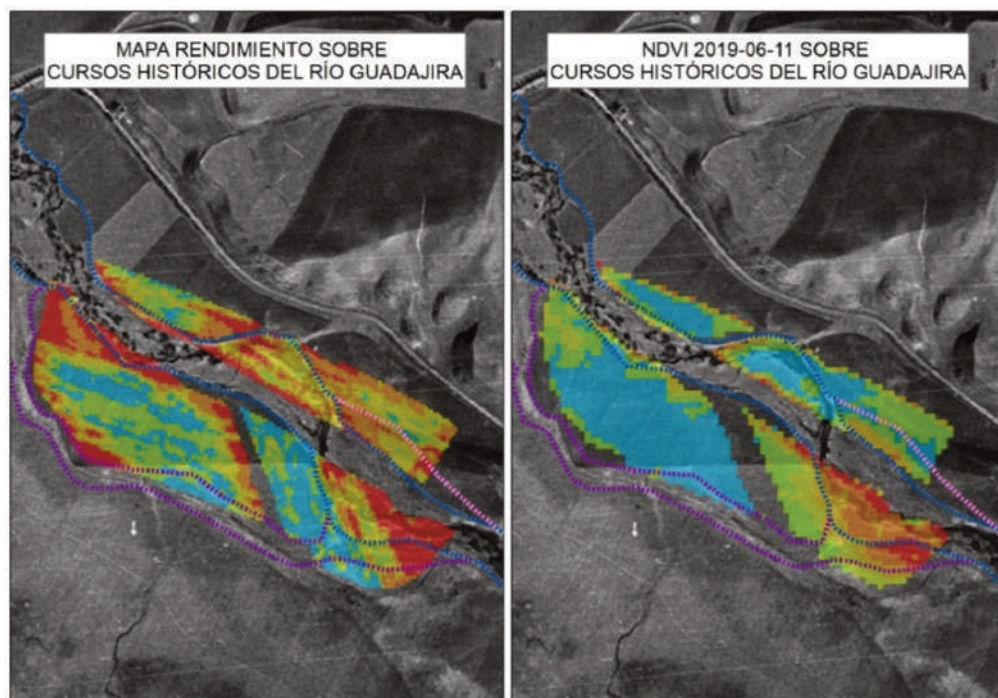


Figura 60 - La presencia de arenas de relleno tras el encauzamiento del río Guadajira condiciona el desarrollo del cultivo del maíz. En la imagen, la fotografía aérea del vuelo americano Serie A (1945-46) previa al encauzamiento, los vectores corresponden con el cauce principal (azul) previo al encauzamiento junto con brazos secundarios en 1946-47 (morado) y 1956-57 (rosa). Fuente: IDEEX.

Asimismo, el uso de las imágenes satelitales para el monitoreo del cultivo del maíz, sacan a la luz algunas incidencias relacionadas con enfermedades, dinámica de riego... En las siguientes imágenes se pueden observar algunas de las acontecidas en las parcelas analizadas estudiadas.

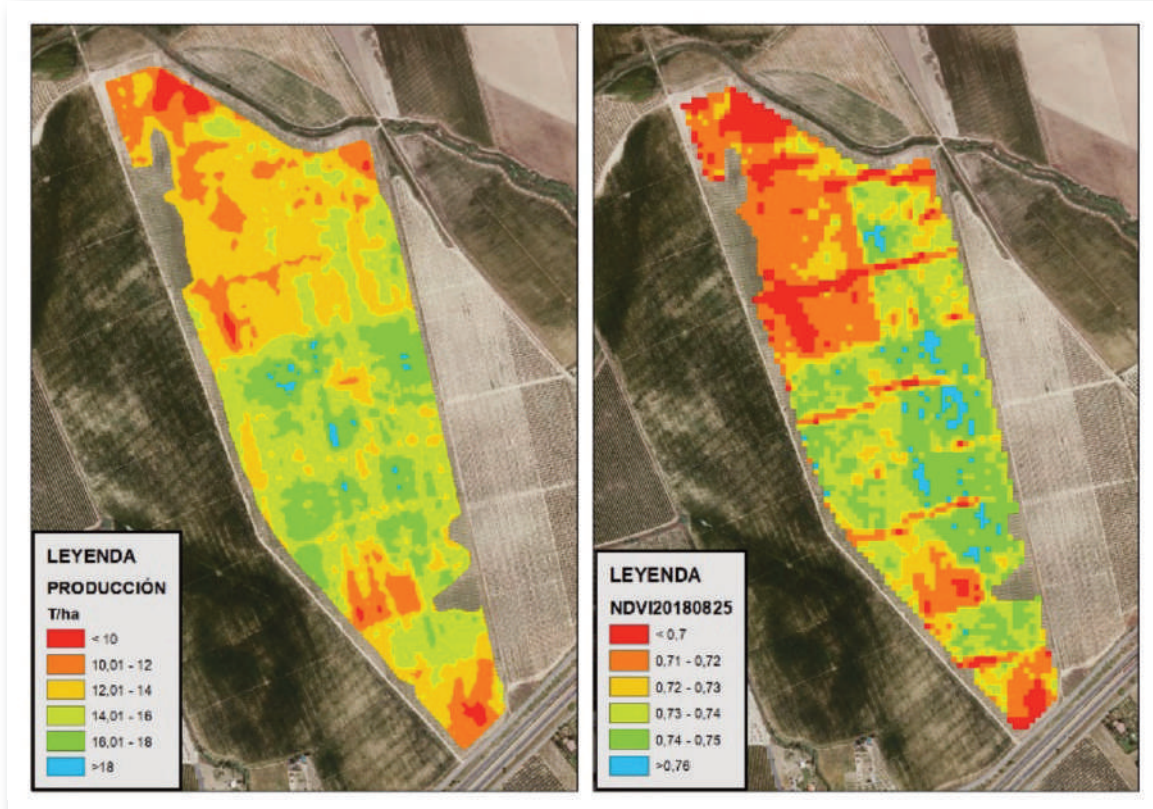


Figura 61 - Con determinados índices espectrales se pueden identificar incidencias en los sistemas de riego. En este caso, el corte regular en el Índice NDVI (Izquierda) pone de manifiesto alguna irregularidad en los cuarteles de riego. Fuente: Sociedad Cooperativa El Chaparrito.

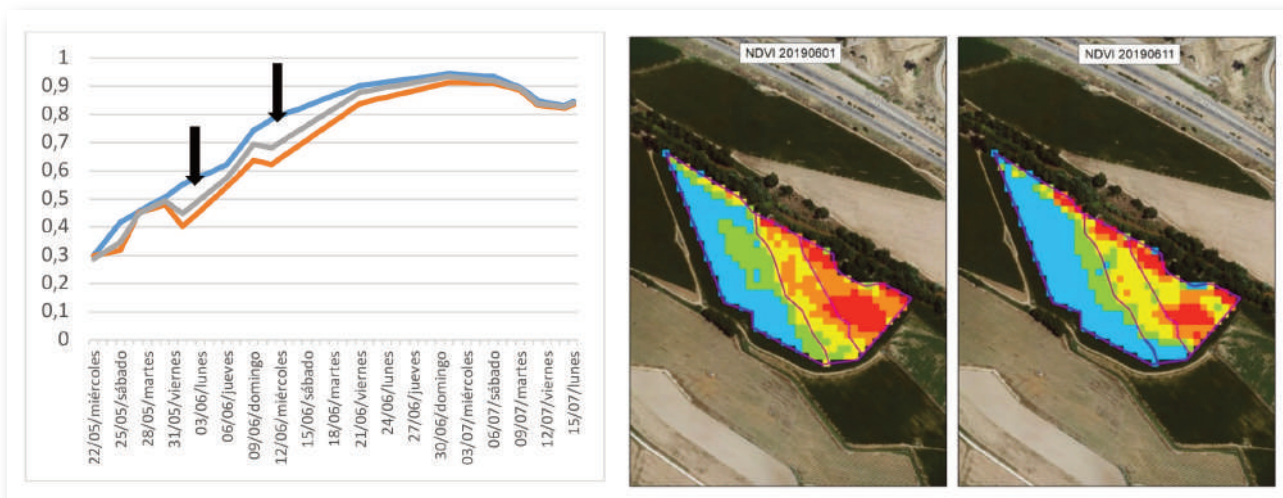


Figura 62 - En este caso el riego uniforme en una parcela con texturas diferenciadas puede derivar en déficit hídrico en las zonas con menor capacidad de retención. En la gráfica se observan dos caídas en el vigor vegetativo relacionado con riego insuficiente en una zona con una textura más arenosa.

Las imágenes satelitales también pueden aportar una valiosa información con el análisis de las series completas de datos. Hasta hace poco tiempo esto era materialmente imposible por la incapacidad de almacenamiento y procesamiento en los equipos de escritorio, sin embargo, con la aparición del almacenamiento y la computación en la nube se hace posible el análisis masivo de datos. Al poder programar mediante código, son muchas las posibilidades de condicionar las consultas a la hora de obtener la información deseada (porcentaje de nubes de cada escena o máscara de nubes mediante el layer QA60, técnica estadística más apropiada, análisis de un periodo concreto dentro del total del año...) Es necesario que la parcela a analizar tenga siempre el mismo tipo de cultivo.

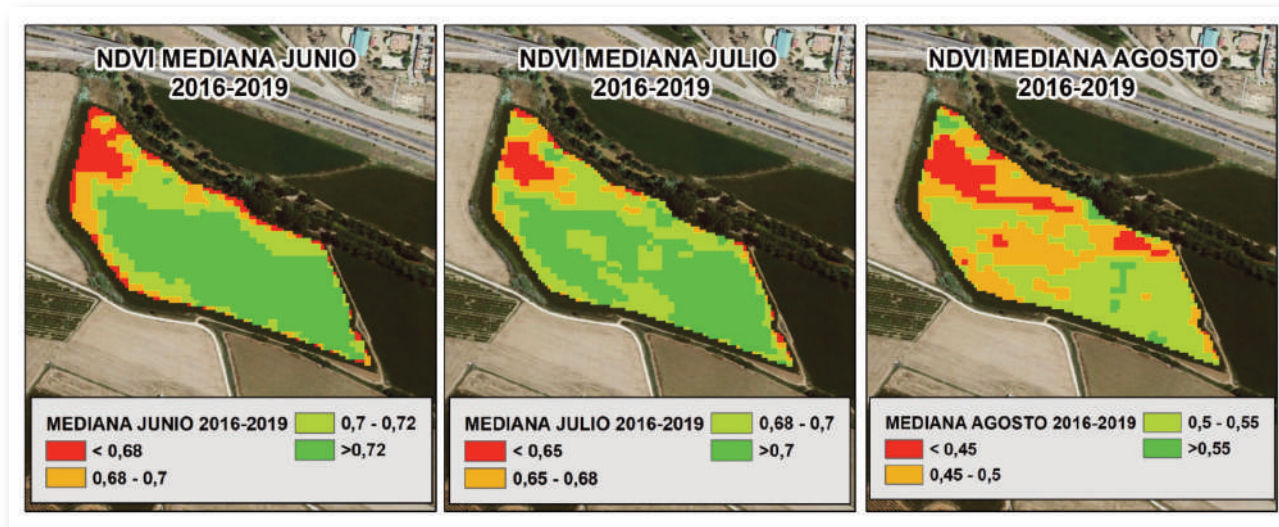


Figura 63 - Cálculo de la mediana del índice NDVI para una parcela cultivada de maíz desde 2016 a 2019 obtenido mediante Google Earth Engine. En este caso se han analizado un total de 241 imágenes desde 2016 a 2019. Se puede observar que existen patrones que se repiten, una vez más por las características físico-químicas del suelo. Esta herramienta permite establecer una zonificación que puede servir de guía a la hora de realizar analíticas de suelo, tratamientos variables o riegos diferenciados.

#### IV.2.2.4. CONCLUSIONES

La sensibilidad de la vegetación ante el infrarrojo cercano permite llevar un seguimiento, en casi tiempo real, del desarrollo del cultivo bien por interpretación directa o a través de los diferentes índices espectrales. Como se ha podido comprobar en el periodo de análisis de las diferentes parcelas participantes en el presente proyecto, es una herramienta perfecta para identificar irregularidades como déficit de riego, enfermedades o presencia de malas hierbas. El cambio en la tendencia esperada en la curva de NDVI es un buen indicador para identificar estas circunstancias.

La utilización de los diferentes índices espectrales evidencia comportamientos zonales diferenciados en el cultivo, tanto en un análisis anual como en un análisis multitemporal mayor. Este desarrollo diferencial del cultivo obedece, fundamentalmente, a causas estructurales de la parcela con las características edafológicas como principal causa. Esto aporta una valiosa información, de gran ayuda a la hora del tema de decisiones (guía para la toma de muestras de suelo, diferentes tratamientos del cultivo, densidades de siembra...)

Sin embargo, en los análisis realizados en la relación entre la producción y los índices espectrales no aportan resultados concluyentes, al menos de forma global, si bien individualmente las unidades con procesos de producción similares, sí que se puede observar una correlación entre el índice espectral utilizado (NDVI) y la producción final.





### **IV.2.3. ESTUDO DA APLICAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE NDVI COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DO CULTIVO DA CEVADA DÍSTICA**

**Ferro Palma, José; Patanita, Manuel; Sampaio, Miguel; Tomaz, Alexandra; Dôres, José; Patanita, Maria Isabel; Guerreiro, Isabel; Penacho, José; Regato, Mariana**

#### **IV.2.3.1. INTRODUÇÃO**

A progressiva expansão do regadio na região abrangida pelo Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva vai permitir uma produção agrícola mais intensiva, com uma maior utilização de fatores de produção que, por sua vez, irá possibilitar um melhor aproveitamento do potencial produtivo instalado. Esta evolução vai aumentar, igualmente, a necessidade de uma correta e sustentável gestão técnica e ambiental desses fatores de produção, o que requer a adoção de novas tecnologias. Neste sentido, as imagens obtidas pelos satélites Sentinel, pertencentes ao Programa Copernicus da European Space Agency, poderão ser muito úteis para monitorizar as mais variadas culturas, o que será possível através da análise e processamento dessas imagens no espaço e no tempo, complementada com a utilização da informação recolhida por sensores instalados nas parcelas cultivadas.

Com este conjunto de tecnologias poderá ser possível que, num futuro próximo, a planificação, a monitorização e a gestão da produção agrícola possam ser auxiliadas pela observação e análise de imagens de satélite obtidas gratuitamente *on-line*, em tempo real, que fornecem informação útil sobre o estado de desenvolvimento das culturas. Estes dados irão servir de suporte para a aplicação diferenciada dos fatores de produção, condição básica para a prática de uma “Agricultura de Precisão” e para uma maior sustentabilidade económica e ambiental da produção agrícola.

#### **IV.2.3.2. A CULTURA DA CEVADA DÍSTICA**

A cevada dística (*Hordeum vulgare* L. ssp *distichum*) é um cereal utilizado fundamentalmente pela indústria do malte, matéria-prima base para a produção de cerveja. Em Portugal, a sua produção está sobretudo concentrada na região de Beja, sendo tanto cultivada em regime de sequeiro como de regadio. Em regadio os rendimentos podem mais do que duplicar os obtidos em sequeiro.

Os principais estrangulamentos para o cultivo da cevada dística nas regiões com clima mediterrânico estão relacionados com:

- Irregularidade no início das chuvas no outono;
- Risco de encharcamento dos solos durante o período de outono-inverno;
- Irregularidade da precipitação na primavera (abril-maio);
- Geadas tardias na primavera;
- Temperaturas elevadas no final da primavera.

A escolha de solos com características físico-químicas adequadas à cultura, a correta seleção da variedade em função da data de sementeira e a rega nos períodos mais críticos para a formação do rendimento da cultura (Figura 64), quando a climatologia do ano não é favorável, permitem, de uma forma geral, ultrapassar os estrangulamentos descritos.

<sup>1</sup> Escola Superior Agrária de Beja.

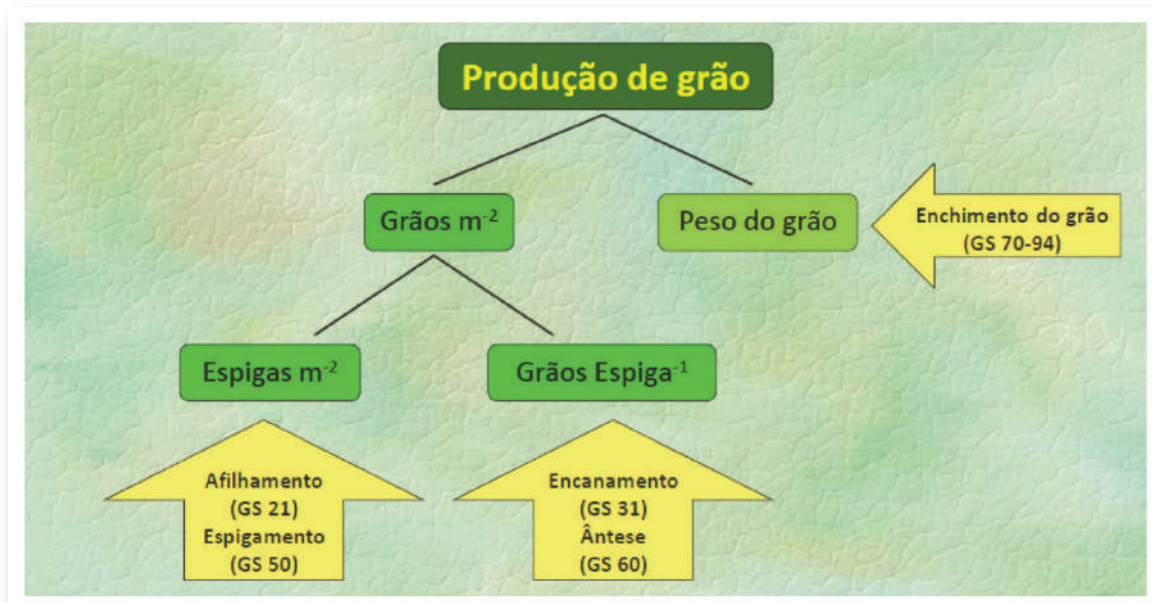


Figura 64 - Componentes do rendimento e formação da produção de grão.

O sucesso da cultura está dependente de múltiplos fatores, interrelacionados entre si, mas podemos considerar particularmente importantes os seguintes:

- Escolha da variedade;
- Fertilização azotada;
- Rega.

A variedade escolhida, além de obedecer a critérios agrónómicos, deve também estar incluída na lista das variedades recomendadas pelo Comité de Cevada e Malte dos Cervejeiros de Portugal. A cevada produzida deve, ainda, satisfazer os critérios mínimos de qualidade tecnológica, nomeadamente os relacionados com o teor de humidade, teor de proteína, calibre, pureza varietal e capacidade germinativa (Tabela 4).

**Tabela 4 - Especificações mínimas de qualidade que garantem a produção de malte com qualidade cervejeira**

HUMIDADE	<11,5%
PROTEÍNA	10-11% s.m.t.q.
CALIBRE > 2,5mm	>70%
CALIBRE < 2,2mm	<8%
PUREZA VARIETAL	>95%
CAPACIDADE GERMINATIVA	>97%

Relativamente à fertilização azotada é necessário estabelecer um equilíbrio entre um elevado rendimento em grão e o cumprimento das especificações mínimas de qualidade. O azoto quando aplicado em excesso ou numa fase adiantada do ciclo vegetativo da cultura pode levar a um aumento indesejado do teor de proteína

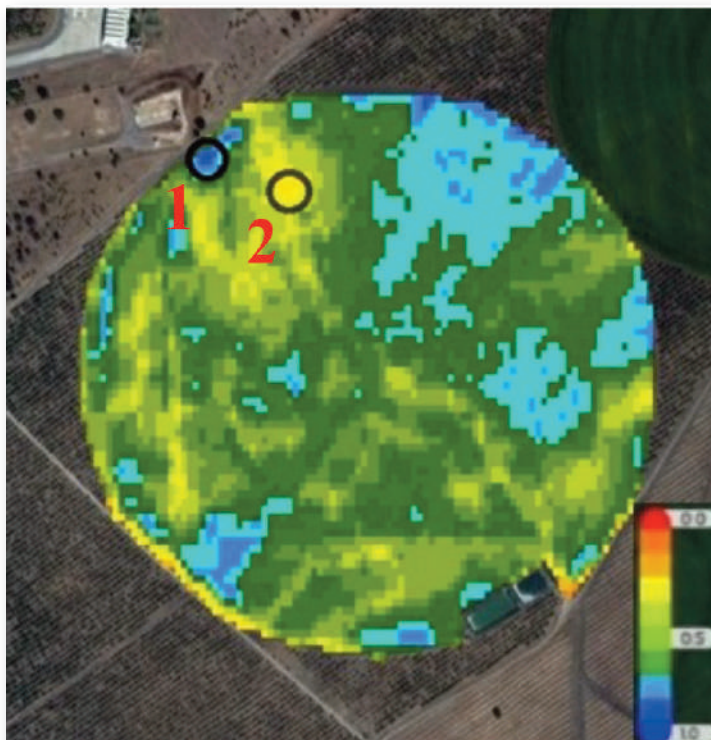
do grão, que acarreta uma redução da sua qualidade para a produção de malte e de cerveja. Assim sendo, em regime de sequeiro recomenda-se uma dose de 80 a 100 kg/ha, aplicados 1/2 à sementeira e 1/2 em cobertura, nunca depois do afilhamento. Em regadio a dose recomendada é mais variável, de 130 a 170 kg/ha, repartidos por igual entre a sementeira, o afilhamento e o encanamento/emborrachamento.

A rega é especialmente necessária quando a precipitação durante a primavera é insuficiente para satisfazer as necessidades da cevada num período especialmente crítico para o rendimento final. Regando durante a primavera (março a maio), de forma a cobrir o *deficit* hídrico resultante de uma precipitação insuficiente, podem ser obtidos rendimentos de aproximadamente 6000 kg/ha, com um consumo de água relativamente baixo, sempre muito dependente da climatologia de cada ano.

#### **IV.2.3.3. APLICAÇÃO DAS IMAGENS NDVI PARA A MONITORIZAÇÃO E GESTÃO DA CULTURA DA CEVADA DÍSTICA: CASOS PRÁTICOS**

Para este estudo foi escolhida uma parcela de cevada dística regada por center-pivot, localizada na região de Beja, em solos maioritariamente classificados como “Barros Pretos”. Procedeu-se à avaliação do estado de desenvolvimento da cultura recorrendo às imagens NDVI dos satélites Sentinel, recolhidas em intervalos de cinco dias, e a medições feitas no terreno com dispositivos/sensores portáteis, em concreto com um sensor NDVI Trimble GreenSeeker e com um medidor da concentração relativa de clorofila Minolta SPAD-502 Plus. Com este estudo, pretendeu-se confrontar diferentes metodologias e equipamentos para avaliar o vigor da cultura e validar no terreno os dados obtidos através das imagens de satélite. Para este efeito, foram escolhidos, com base nas imagens de satélite previamente obtidas, dois locais em que a cultura apresentava vigor vegetativo muito contrastante (Figura 65, Local 1 e Local 2). Nesses locais foram realizadas as medições com os dispositivos portáteis e foram feitas, de forma aleatória, colheitas de amostras de material vegetal para estimativa do rendimento total em biomassa ao espigamento e, no final do ciclo, a colheita de amostras para a estimativa do rendimento em grão.

O final do inverno e início da primavera foram, no ano agrícola de 2017/2018, extremamente chuvosos (mais de 200mm de precipitação em março), o que em manchas de solos sem escoamento superficial e com fraca permeabilidade associada a uma textura argilosa provocou, de forma localizada, graves problemas de encharcamento. Em consequência, registou-se, nessas zonas, uma elevada mortalidade de plantas e um atraso no desenvolvimento da cultura, o que se traduziu em baixos valores do NDVI (Figura 66, Local 2). Nas zonas em que não houve problemas de encharcamento o desenvolvimento da cultura foi normal (Figura 66; Local 1).



*Figura 65 - Imagem NDVI de satélite da parcela de cevada dística com a localização dos pontos em que se realizaram as medições com os sensores portáteis e a recolha de amostras de plantas para a determinação dos rendimentos em biomassa e em grão (Local 1 e Local 2). Fonte: Agroinsider.*

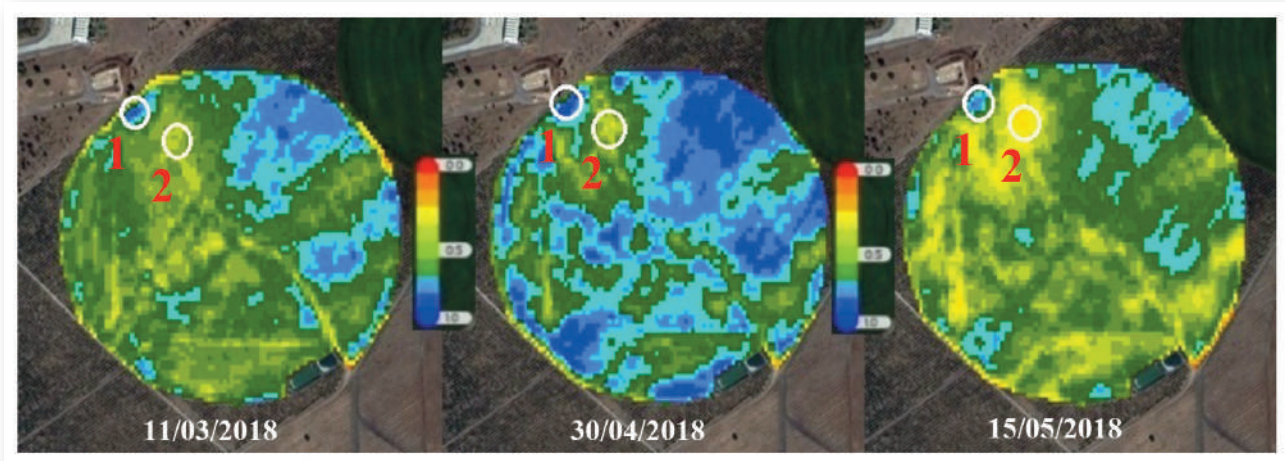


Figura 66 - Imagens de Satélite NDVI referentes à evolução observada em três diferentes datas (11/03/2018; 30/04/2018 e 15/05/2018) no desenvolvimento da cevada dística com a localização dos pontos de amostragem (Local 1 e Local 2). Fonte: Agroinsider.

Observando a sequência de imagens verifica-se que as zonas em que, no início de março, ainda antes do espigamento, a cultura apresentava um maior vigor vegetativo, traduzido em valores mais elevados do NDVI, mantiveram essa tendência até ao início da senescência que se iniciou mais cedo nas zonas em que a cultura se apresentava com menor vigor. É, portanto, possível distinguir dentro da área do center-pivot zonas em que a cultura apresenta diferente potencial produtivo sendo que esta heterogeneidade, muito relacionada com a mesma heterogeneidade dos solos, torna necessária a aplicação diferenciada dos fatores de produção, nomeadamente, fertilizantes e água de rega.

Os problemas de encharcamento localizado do solo, relacionados com o excesso de precipitação em março, detetados através das imagens NDVI de satélite, foram facilmente comprovados no campo, como se pode constatar na Figura 67.



Figura 67 – Aspeto geral dos locais 1 e 2.



Comparando o rendimento da cevada dística entre os dois locais de amostragem (Tabela 5) verifica-se que no local com problemas de encharcamento o rendimento em biomassa foi metade e o rendimento em grão foi um quinto do observado na zona sem problemas de encharcamento. No entanto, a concentração de clorofila medida nas plantas foi semelhante nas duas zonas. A elevada mortalidade de plantas nas zonas sujeitas a encharcamento fez com que a disponibilidade de azoto para cada planta fosse maior, o que se traduziu num maior teor de clorofila. Pode, assim, concluir-se que os baixos valores do NDVI nas zonas sujeitas a encharcamento estiveram, sobretudo, relacionados com a diminuição da cobertura vegetal e da fotossíntese total realizada por esse coberto e não com a diminuição da capacidade fotossintética de cada planta *per si* só.

**Tabela 5 - Valores do NDVI, Teor de Clorofila, Biomassa total e Rendimento em grão para cada uma das zonas de amostragem.**

Zona de Amostragem	NDVI	Teor de Clorofila	Biomassa total (kg/ha)	Rendimento em grão (kg/ha)
Local 1	0,74	46,9	10657	5018
Local 2	0,33	47,8	5480	1129

A observação da imagem NDVI levanta questões relacionadas com o itinerário técnico seguido, nomeadamente no que diz respeito à adubação azotada de cobertura. Nas zonas em que o NDVI é mais baixo a dose de fertilizante aplicado deveria ter sido reduzida pois o potencial produtivo é mais baixo. Também nas zonas mais sujeitas a encharcamento a densidade de sementeira deveria ser um pouco mais alta a fim de compensar uma maior taxa de perda de plantas. Verifica-se, assim, que as imagens NDVI podem ser uma ferramenta muito útil para aplicar de forma diferenciada os fatores de produção.

#### **IV.2.3.4. CONCLUSÕES**

As imagens de satélite NVDI mostram um grande potencial para serem utilizadas como uma ferramenta a ser aplicada na definição dos itinerários técnicos das culturas pois permitem detetar, com bastante precisão, a variabilidade existente no desenvolvimento das culturas e respetivo potencial produtivo. Será assim possível adequar os níveis de aplicação de fatores de produção em função do estado em que se encontra a cultura e do potencial produtivo ao longo de cada parcela cultivada, afinal, o grande objetivo da “Agricultura de Precisão”. Torna-se também evidente que o uso das imagens NVDI tem de ser complementado com a observação da cultura no campo a fim de melhor identificar os fatores que explicam a variabilidade observada nas imagens.

#### IV.2.4. MODELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO ARROZ A PARTIR DAS IMAGENS SENTINEL 1 E 2

Palminha, António<sup>1</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>2,3</sup>; Paixão, Luís<sup>2</sup>; Marques, Francisco<sup>3</sup>; Terrón, Mariano<sup>3</sup>.

##### IV.2.4.1. INTRODUÇÃO

Este caso prático pretende mostrar que pequenas anomalias detetadas pelos satélites ao nível das parcelas/culturas podem significar grandes ineficiências económicas e ambientais.

Na sua maioria, as ineficiências passam por uma relação solo-água-plantas deficitária e como tal há que analisar e estudar todo o sistema.

Como se verá mais à frente, a anomalia é detetada pelos satélites ao nível das plantas e, despistado qualquer tipo de problema ao nível de doenças ou pragas, só nos resta começar por estudar o solo. Nesse sentido, foi efetuado o levantamento geoelectrico das parcelas de arroz em questão.

A condutividade eléctrica do solo é uma ferramenta fundamental na análise da variabilidade horizontal e vertical do solo. A partir desta poderá ser estruturado todo um conjunto de operações a montante de qualquer atividade agrícola, nomeadamente o desenho dos sistemas de rega, a nutrição, a seleção de plantas mais adequadas, etc., pois a boa utilização dos recursos disponíveis é determinante para a competitividade de todos os sistemas agrícolas.

A CEa do solo está normalmente correlacionada com alguns elementos do solo, nomeadamente a textura (> níveis de argila > níveis de CEa do solo), a concentração de matéria orgânica (> níveis de MO > níveis de CEa do solo), a concentração de sais (> níveis de sais > níveis de CEa do solo), e a humidade do solo (> níveis de humidade do solo > níveis de CEa do solo), entre outros.

Em termos gerais, pode dizer-se que os solos com uma condutividade eléctrica aparente (CEa) abaixo dos 5 mSm<sup>-1</sup> são solos arenosos; solos com uma CEa à volta dos 15 a 20 mSm<sup>-1</sup> são solos francos e que solos com uma CEa entre 30 e 100 mSm<sup>-1</sup> já serão solos argilosos. Como referência, pode indicar-se que um barro de Beja terá aproximadamente entre 80 a 90 mSm<sup>-1</sup> de CEa do solo. Os solos com uma CEa superior a 100 mSm<sup>-1</sup> normalmente indicam presença de elevadas concentrações de sais no solo e tal deverá ser despistado, analisando o mesmo em laboratório.

Pela observação do mapa de CEa (Figura 68), damo-nos conta que existe uma grande variabilidade do mesmo, transitando desde o mais arenoso ao mais argiloso. Com esta variabilidade poderemos imediatamente pensar que o tipo de abordagem na gestão operacional do arroz terá que ser diferenciado pois a mesma atitude nos talhões de solo mais arenoso terá um resultado totalmente diferente se for também aplicada nos solos mais argilosos.

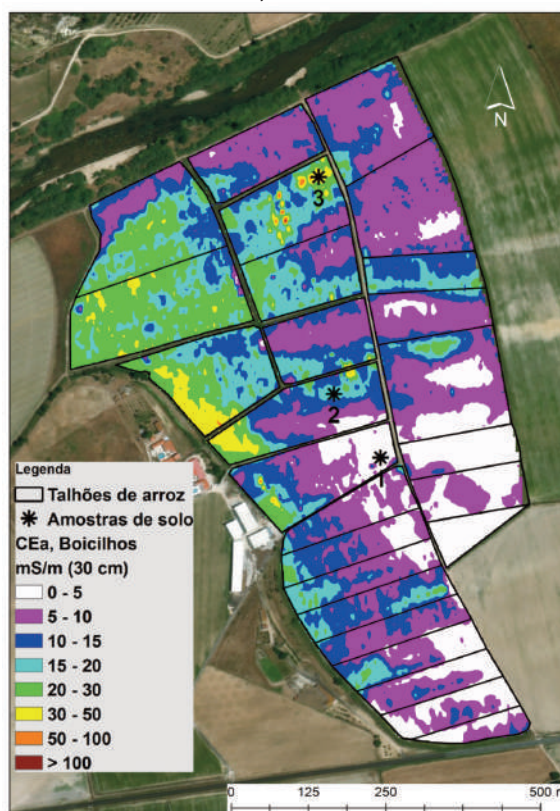


Figura 68 – Condutividade eléctrica aparente (CEa) do solo a 30 cm.

<sup>1</sup> Escola Superior Agrária de Santarém; <sup>2</sup> Universidade de Évora y MED. <sup>3</sup> Agroinsider, Lda.



#### **IV.2.4.2. A CULTURA DO ARROZ**

A cultura de arroz é uma cultura cerealífera, normalmente inundada. Em Portugal, a produção de arroz tem maior expressão nas zonas que se localizam próximo dos estuários dos rios Tejo, Sado e Mondego, onde os fatores edafo-climáticos são mais adequados. Os fatores mais importantes para esta cultura são: temperatura, luz e água. A soma do número de graus dia térmicos tem um papel fundamental no desenvolvimento da cultura do arroz, variando de 3500 a 4500 °C (consoante se trata de variedades precoces ou tardias). Além deste fator, é também importante que não ocorram mudanças bruscas da temperatura pois podem resultar em impactos negativos para as produções.

Para temperaturas superiores a 40 °C e inferiores a 13 °C o crescimento é interrompido, estando a temperatura ótima situada entre os 30- 35 °C.

Atualmente, as produções de arroz, a nível mundial, rondam os 730 milhões de toneladas (em casca–paddy) ocupando uma área de 164 milhões de hectares, sendo considerado como um dos principais alimentos para mais de metade da população mundial. Assume bastante relevância no continente asiático onde cerca de 91% da cultura é semeada e consumida. Em Portugal, a média de produção ronda as 180000 toneladas (INE, 2013-2017) e as densidades de sementeira utilizadas em Portugal, no cultivo de arroz, rondam os 180 kg/ha.

#### **IV.2.4.3. CASO PRÁTICO**

Este caso prático iniciou-se em 2017 até à presente data. Todavia, neste caso prático, serão apenas apresentados os dados entre 2017 e 2019.

Pela observação das cartas de NDVI (teor de clorofila) da campanha de 2017 (Figura 69), damo-nos conta que a 25/05/2017 estávamos sensivelmente 20 dias depois da sementeira, como tal, já após a emergência do arroz. Nota-se, contudo, nesta data, que algumas zonas já manifestam valores de NDVI intermédios (cor verde) o que pode indiciar emergências diferenciais ou, então, uma concentração diferencial das infestantes. Se se verificar que este é o caso, poder-se-á elaborar um mapa de aplicação diferencial de herbicida, em função da concentração de infestantes apresentada pelas imagens de satélite. Para validar tais questões são importantes e decisivas as visitas ao campo, dado que as variações espaciais e temporais de clorofila ao nível dos talhões, se podem dever a causas múltiplas, nomeadamente, uma sementeira deficiente, uma emergência deficiente, etc. Como tal, as visitas ao campo são fundamentais e imprescindíveis para perceber o processo e poder ser corrigido nas campanhas seguintes.

Se olharmos para os dois mapas de NDVI de 4 e 14 de junho de 2017 (Figura 69), damo-nos conta que existe uma descida de NDVI de uma data para a outra e, conseqüentemente, da concentração de clorofila. Este efeito deve-se, sem dúvida, à atuação do herbicida aplicado em 05/06/2017. Contudo, como se pode verificar na carta do dia 14/06/2017, existe alguma variação da concentração de clorofila em alguns dos talhões, apresentando alguns talhões valores de clorofila mais elevados que outros. De imediato, as perguntas que surgem têm que ver com a eficácia do herbicida, pois pode ter-se dado o caso que o herbicida não tenha atuado da mesma forma em todos os talhões.

Bem sabemos que a concentração de herbicida a aplicar não depende só da densidade de infestação, mas também, do tipo de solo onde será efetuada a aplicação, pois, devido ao efeito tampão que o solo normalmente exerce, são habitualmente indicadas maiores concentrações de herbicida nos solos mais argilosos quando comparados com os solos arenosos. Se olharmos para a Figura 68 conseguimos perceber que temos diferentes tipos de solos nesta mancha de talhões, como tal, a dosagem deve ser ajustada à tipologia de solos encontrada, normalmente com concentrações de herbicida mais elevadas, nos solos com CEa do solo mais elevada.

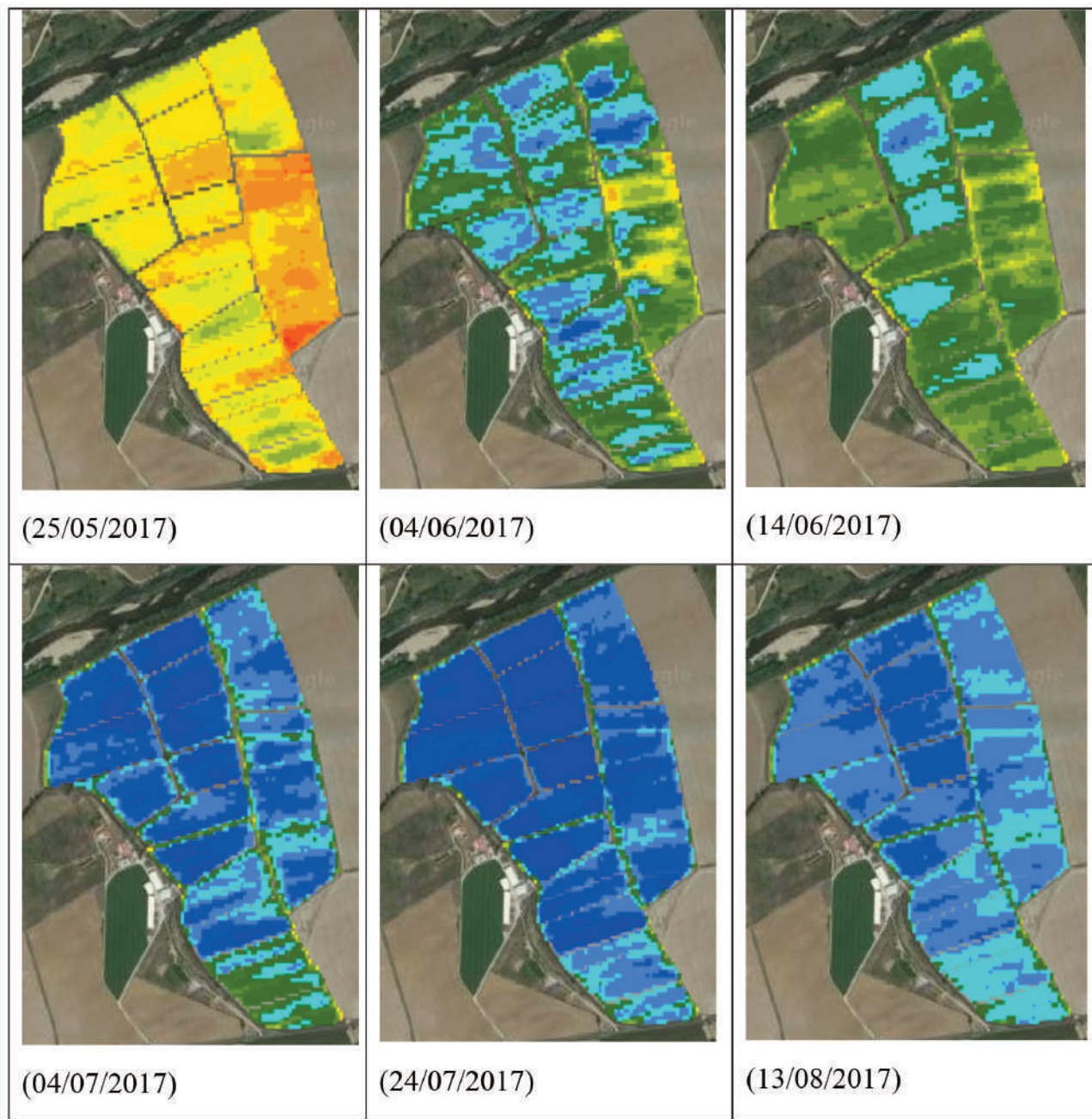


Figura 69 – NDVI em distintas fases do ciclo fenológico. (cores vermelhas e amarelas índice de NDVI baixo; cores verdes índices de NDVI intermédio; cores azul-escuras índice de NDVI muito elevado) Fonte: Agroinsider.

Não considerar a necessidade de ajustes ao nível do herbicida pode levar a vários tipos de consequências: i) o tratamento herbicida é pouco eficiente pois a dosagem, por defeito, não está ajustada, nem à concentração de infestantes, nem ao tipo de solo em questão; ii) o tratamento herbicida é muito eficiente pois a dosagem, por excesso, não está ajustada, nem à concentração de infestantes, nem ao tipo de solo em questão; iii) dosagens por defeito resultam normalmente num controle de infestantes deficiente e possíveis impactos



futuros no que toca à resistência dos seus princípios ativos; e iv) dosagens por excesso resultam normalmente num bom controlo de infestantes, contudo, com possíveis impactos ao nível da fitotoxicidade sobre a própria cultura, diminuindo dessa forma o seu potencial produtivo.

Entre 4 de julho e 13 de agosto (Figura 69) pode notar-se que a concentração de clorofila dos talhões mais a este e a sul da zona estudada é relativamente inferior aos talhões mais a oeste e a norte da mesma. Se compararmos os valores de NDVI em toda a campanha dos talhões 23 (3,5 ton/ha) e 25 (8,25 ton/ha) que estão nestas condições, notamos que são diferentes (Figura 70). Notamos ainda que, desde muito cedo, no ciclo fenológico, o talhão 23, menos produtivo (Tabela 6, 2017), apresenta um *deficit* de clorofila (Figura 70) quando comparado com o talhão 25, um dos mais produtivos (Tabela 6, 2017).

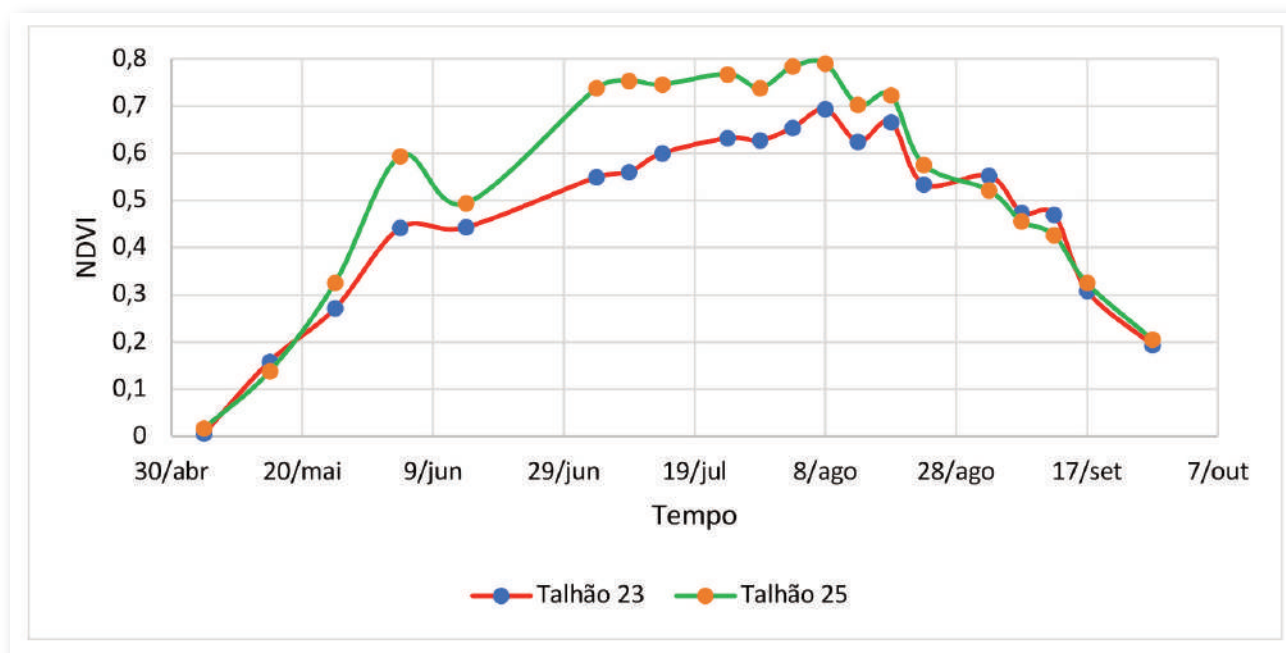


Figura 70 – NDVI em distintas fases do ciclo fenológico para os talhões 23 e 25.

Será que as diferenças de clorofila encontradas entre os vários talhões promovem diferenças ao nível da produtividade nos diferentes anos? Se olharmos para a Tabela 6 e para a Figura 71 podemos dar-nos conta de que existe uma diferença real ao nível da produtividade dos talhões, bem como ao nível do rendimento líquido dos mesmos (Figura 72), sendo beneficiados, em termos gerais, os talhões com maior CEa do solo. A diferença em alguns talhões, no ano de 2017, chega a ser do simples para o dobro em termos de produtividade Figura 71, apresentando conseqüentemente, neste ano, rendimentos líquidos negativos (Figura 72).

**Tabela 6 – Produtividades de arroz em 2017, 2018 e 2019, por parcela**

Número da parcela	Produtividade média 2017 (ton/ha)	Produtividade média 2018 (ton/ha)	Produtividade média 2019 (ton/ha)
1	8,3	9,0	11,1
2	8,3	8,5	10,5
3	8,3	9,1	10,5
4	8,3	9,1	9,2
5	8,3	9,4	10,0
6	8,3	9,1	10,0
7	6,6	7,9	8,6
8	6,6	8,4	11,7
9	6,6	7,7	10,5
10	6,6	5,8	9,4
11	6,2	5,6	7,2
12	4,5	5,8	7,0
13	4,5	5,7	7,7
14	4,5	5,1	7,5
15	5,2	8,0	9,1
16	5,2	6,8	9,6
17	5,2	6,1	8,8
18	5,2	5,2	7,9
19	3,5	5,3	8,0
20	3,5	3,9	6,9
21	3,5	4,1	6,3
22	3,5	4,7	5,1
23	3,5	3,9	5,4
24	10,0	8,8	8,7
25	8,3	8,1	8,0
26	6,6	8,0	8,7

Face aos resultados de produtividade obtidos em 2017 (Tabela 6) elegeram-se vários aspetos a observar e a ajustar nas campanhas seguintes:

- 1) Verificar se uma maior dosagem relativa do herbicida em solos arenosos pode ter levado a uma maior fitotoxicidade sobre a planta, bem como a uma diminuição do seu vigor vegetativo e da sua capacidade produtiva;



- 2) Verificar a emergência das sementes, pois se em talhões mais arenosos, a emergência das sementes é prejudicada, relativamente aos solos argilosos, então há que aumentar a densidade de semente em campanhas futuras nos talhões/solos mais arenosos;
- 3) Verificar se existe uma menor eficiência dos nutrientes, nos solos mais arenosos, devido a uma maior percolação da água ao nível do perfil e, conseqüentemente, maior perda de nutrientes que não são aproveitados pelas plantas;
- 4) Ajustar a dimensão da nutrição ao potencial produtivo de cada zona produtiva.

Face ao exposto, e ao estudo efetuado nas campanhas seguintes, os processos foram sendo ajustados por forma a reduzir o efeito dos fatores controladores identificados em 2017, nomeadamente, a mudança da tecnologia de fertilizantes, o aumento de densidade de sementeira nos talhões mais arenosos e ao ajuste da nutrição face ao potencial produtivo de cada talhão.

As decisões foram sendo ajustadas ao longo dos dois anos seguintes, tendo como resultados o que poderemos observar na Tabela 7.

**Tabela 7 – Produtividades e margens líquidas médias da atividade arroz em 2017, 2018 e 2019 relativamente aos 45 ha associados à zona de estudo**

Ano	Produtividade (ton/ha)	Preço arroz (€/ton)	Custos (€/ha)	Margem bruta (€/ha)	Margem líquida (€/ha)
2017	7.6*	272	1550	2067.2	517.2
2018	8.3*	295	1650	2448.5	798.5
2019	6.0	335	1585	2010	425
	8.0		1660	2680	1020
	9.1*		1666	3049	1383
	10.0		1755	3350	1595

\* - Produtividade média.

Pode notar-se que em termos médios a produtividade da zona de estudo foi aumentando consideravelmente, passando de uma produtividade média de 7.6 ton/ha em 2017 para uma produtividade média de 9.1 ton/ha em 2019. Para além dos resultados da produtividade média terem sido muito bons em 2019, os resultados líquidos da atividade ainda são melhores pois denotam um crescimento médio de 200% relativamente a 2017 ajudados também por um aumento do preço do arroz em cerca de 23% quando comparado com o preço de 2017.

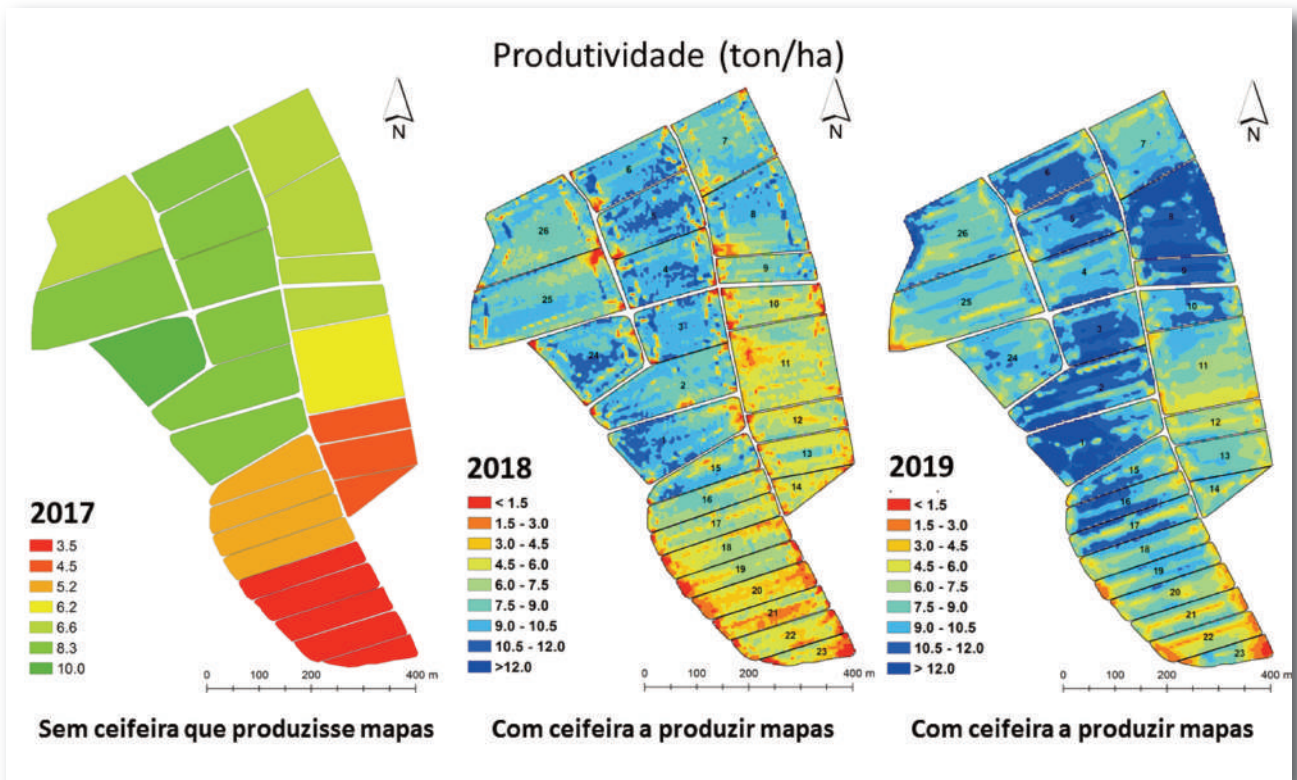


Figura 71 – Produtividade de arroz nos diferentes talhões para os anos de 2017, 2018 e 2019.

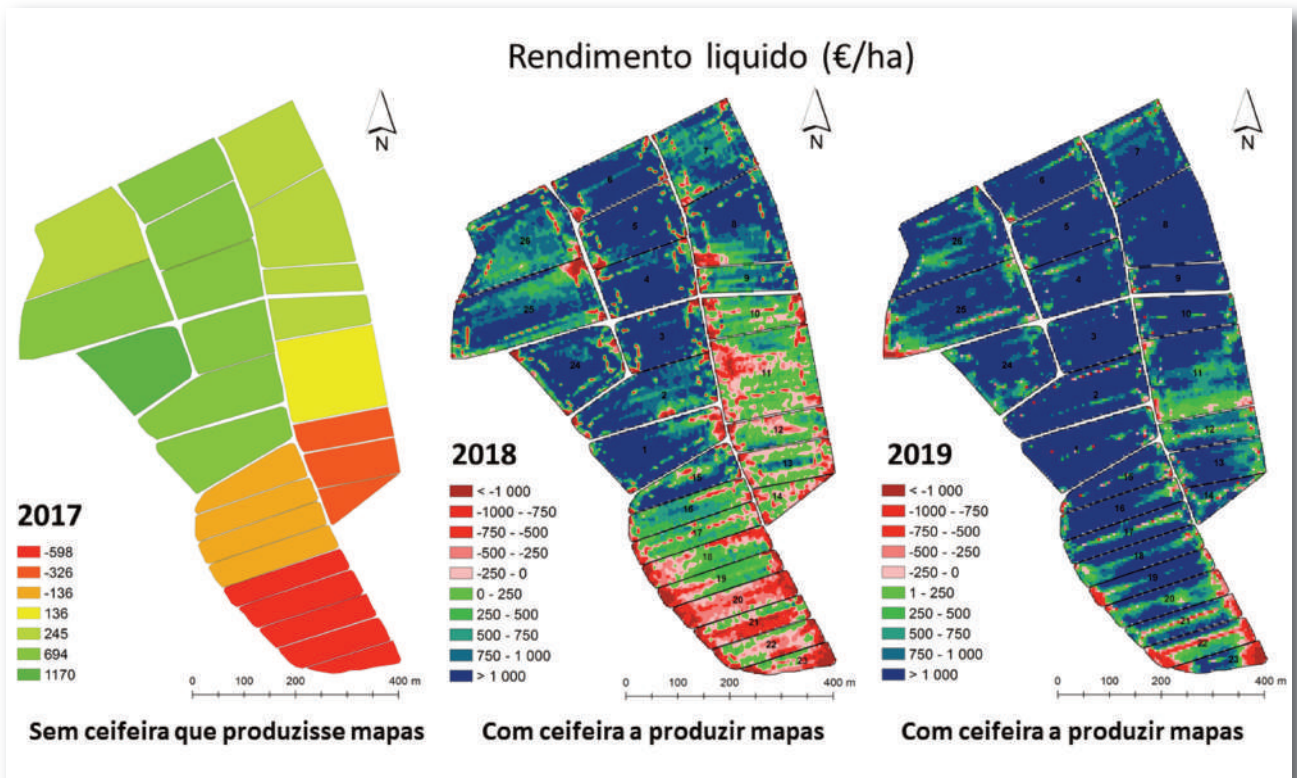


Figura 72- Rendimento líquido do arroz nos diferentes talhões para os anos de 2017, 2018 e 2019.



#### IV.2.4.4. CONCLUSÕES

A título de conclusión poderemos dizer que, neste caso de estudo, a tecnología satelital permitiu identificar e quantificar as anomalías existentes ao longo da área de arroz en estudo. Uma vez identificadas e quantificadas as diferenzas existentes há que pensar en estudar os procesos para perceber como mellor poderá optimizar o sistema. Quem pensa obter resultados de un ano para o outro, desengane-se, pois a actividade agrícola tem esta característica muito propia de traballar con fenómenos multifactoriais (auga, solo, planta, clima, etc.) e que, na maioría das veces, presentan interaccións entre eles. Portanto, mudar algo no sistema, aínda que ligeiramente, pode ter impactos muito positivos ou muito negativos. Nesse sentido, as decisións técnicas têm que ser ponderadas e amadurecidas para que possam ter resultados positivos.

Este proceso de optimización nunca está totalmente concluído pois é un proceso de estudo contínuo, procurando sempre afinar o sistema para que con menos “inputs” podamos ter máis “outputs”, sem que con isto tenhamos máis impactos ao nivel do ambiente e da paisagem. Como exemplo, poderemos dizer que a campaña de 2020, já em marcha, presenta novas tomadas de decisión quanto ao sistema, pretendendo con isto atingir as 10 ton/ha de média para toda a zona de estudo, bem como, un rendemento líquido aínda maior, se possível, superior a 1600 €/ha.



#### **IV.2.5. MODELAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE UMA CULTURA FORRAGEIRA COM UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE**

**Conceição, Luís Alcino<sup>1,2</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>3,4</sup>; Paixão, Luis<sup>3</sup>**

##### **IV.2.5.1. INTRODUÇÃO**

Culturas forrageiras são as culturas de plantas herbáceas de ciclo vegetativo anual ou vivaz destinadas à alimentação animal, complementares ao uso de pastagens e aproveitadas predominantemente através de corte mecânico para posterior alimentação fora do local de produção, seja sob a forma de erva verde ou conservadas sob a forma de feno, silagem e feno silagem. Nos climas mediterrâneos, a produção deste tipo de culturas é determinante para a sustentabilidade alimentar dos efetivos pecuários de ruminantes em sistemas de produção extensiva dados os períodos de escassez de pastagem, tanto de inverno como de verão.

De acordo com o anuário estatístico do Instituto Nacional de Estatística de 2017, as culturas forrageiras em Portugal ocupam uma área de 423670 ha com a maior extensão na região do Alentejo (37% do total), sendo cada vez mais predominante a utilização de consociações sob a forma de culturas biodiversas pela sua importância tanto do ponto de vista nutricional dos efetivos pecuários como do ponto de vista da melhoria das condições do solo e retenção de carbono.

Infelizmente, a ocorrência de fenómenos climáticos extremos, afetando o ciclo regular de desenvolvimento destas culturas, sugere o uso de tecnologias que, de forma expedita, facultem ao agricultor informação que lhe permita rápidas tomadas de decisão sobre o manejo das mesmas. Em agricultura de precisão, o uso de deteção remota na monitorização de culturas tem demonstrado ser uma tecnologia eficaz na avaliação espacial e temporal das culturas e, ao mesmo tempo, cada vez mais uma tecnologia de baixo custo.

Através de índices vegetativos construídos com base em modelos matemáticos desenvolvidos a partir das bandas espectrais de imagens de satélite torna-se possível avaliar e diagnosticar a cobertura vegetal e ter, assim, uma rápida perceção do estado de desenvolvimento das culturas, identificando zonas de maior e menor produção. Em culturas forrageiras, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) são dois dos índices mais frequentemente utilizados. O objetivo deste ensaio foi, através do uso de imagens de satélite da constelação Sentinel-2 da Agência Espacial Europeia, avaliar a correlação entre o NDVI e NDWI e a produtividade de uma forragem consociada semeada de acordo com um itinerário cultural de sementeira direta.

##### **IV.2.5.2. MATERIAIS E MÉTODOS**

O ensaio decorreu na herdade experimental da Comenda em Caia do INIAV Elvas (coordenadas 38° 53' 39''N; 7° 03' 03''W) no ano agrícola de 2019. A forragem constituída por uma consociação de sementes de azevém (*Lolium multiflorum westerwoldicum* e *Lolium multiflorum italicum*) e trevos anuais (*Trifolium isthmocarpum*, *Trifolium suaveolens* e *Trifolium michelianum*) foi semeada no decorrer do mês de setembro numa área total de 30 ha sob pivot, cujo solo apresenta dois tipos de solos, Pag e Sr com texturas franco arenosas a sul-sudoeste e arenosas na restante área. Ao longo do ciclo da cultura foram realizados um corte a “dente”, dois cortes para feno silagem e um corte para feno nos meses de outubro, janeiro, março e maio, respetivamente. À data de sementeira foi realizada uma adubação de fundo e a adubação de cobertura foi repartida entre o primeiro corte (a dente) e o primeiro corte para feno silagem. Neste último, foi simultaneamente realizada uma rega estimada em 32mm.

<sup>1</sup> Instituto Politécnico de Portalegre; <sup>2</sup> MED – Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development, Institute for Advanced Studies and Research, Universidade de Évora; <sup>3</sup> Universidade de Évora y MED; <sup>4</sup> Agroinsider, Lda.

A avaliação de produtividade fez-se à data dos cortes a partir de amostras da biomassa da forragem colhidas em gaiolas de exclusão distribuídas numa malha georreferenciada regular com 32 pontos. Em laboratório, cada amostra foi pesada em fresco, desidratada (48h a 65 °C) e determinada a produtividade da matéria seca. A análise multiespectral da cultura fez-se para cada momento do corte com base nas imagens de satélite da constelação Sentinel-2 com correção atmosférica a partir da banda 8 (infravermelho próximo; 10 m resolução espacial; 842 nm) e banda 4 (vermelho; 10 m resolução espacial; 665 nm) a determinação do NDVI e banda 3 (verde; 10m resolução espacial; 560 nm) e banda 8 para a determinação do NDWI. O processamento da imagens fez-se através da plataforma Agromap <https://agroinsider.com/>.

Para cada momento foram determinados os valores médios de NDVI, NDWI e produção e determinadas as respetivas retas de regressão.

#### IV.2.5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 73 mostra os dados meteorológicos registados na estação meteorológica do INIAV Elvas, no período de setembro de 2018 a agosto de 2019.

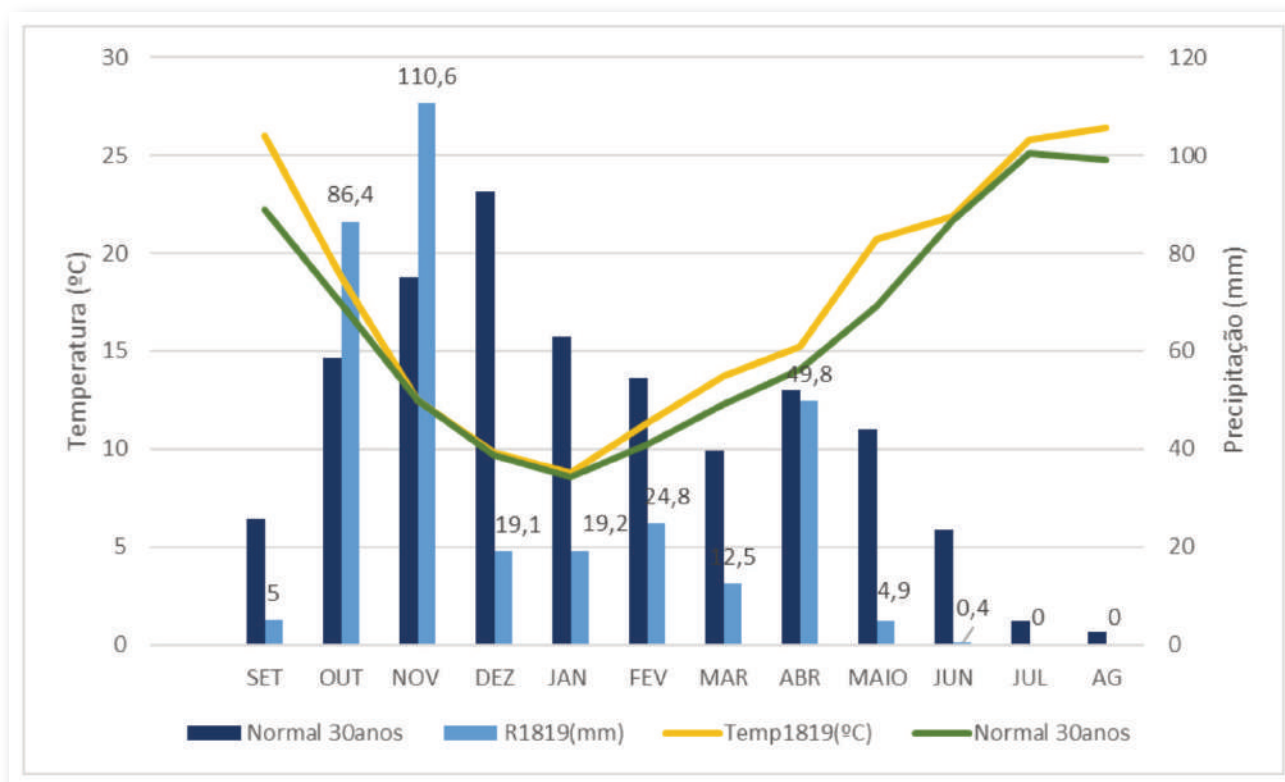


Figura 73 - Dados meteorológicos de temperatura e precipitação registados no INIAV Elvas e Normal climática para o período de setembro de 2018 a agosto de 2019.

A Figura 74 mostra a evolução das curvas de produção em matéria verde (MV) e matéria seca (MS), NDVI e NDWI para cada momento do corte da forragem.

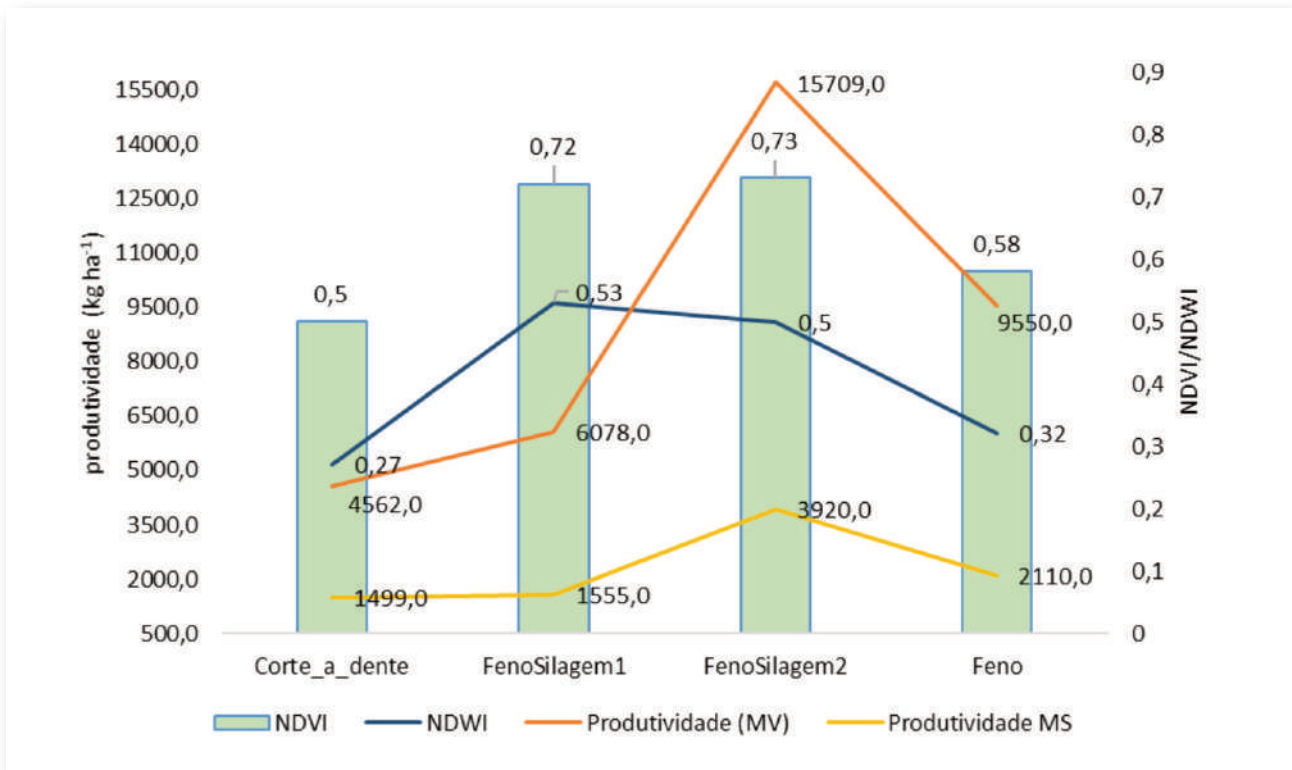


Figura 74- Evolução dos valores de produção MV (kg ha<sup>-1</sup>), NDVI e NDWI da forragem em cada momento de corte.

Com uma produção total de 9028 kg de MS, ao longo do ciclo da cultura os valores de produção, NDVI e NDWI apresentam evolução similar cujas relações lineares são comprovadas nas Figura 74 e Figura 75. O maior valor de produção de forragem verificou-se no segundo corte de feno silagem, muito provavelmente derivado à combinação de fatores resultantes da adubação de cobertura, rega e condições meteorológicas em que se verificou um aumento de temperatura acompanhado de alguma precipitação ocorrida entre os meses de fevereiro e março (Figura 73).

Evolução idêntica tiveram os índices de NDVI e NDWI com os valores máximos a corresponderem com os cortes para feno silagem e diminuição no momento do corte da forragem para feno, altura em que apesar de um maior valor de produção relativamente ao primeiro corte para feno silagem, neste período do ano, a cultura evolui rapidamente para uma fase deiscente do ciclo de desenvolvimento que se traduz por um menor teor em água das plantas e redução da taxa clorofilina.

A Figura 75 mostra a relação entre os valores de NDVI e os valores de produtividade da forragem em cada um dos momentos de corte.



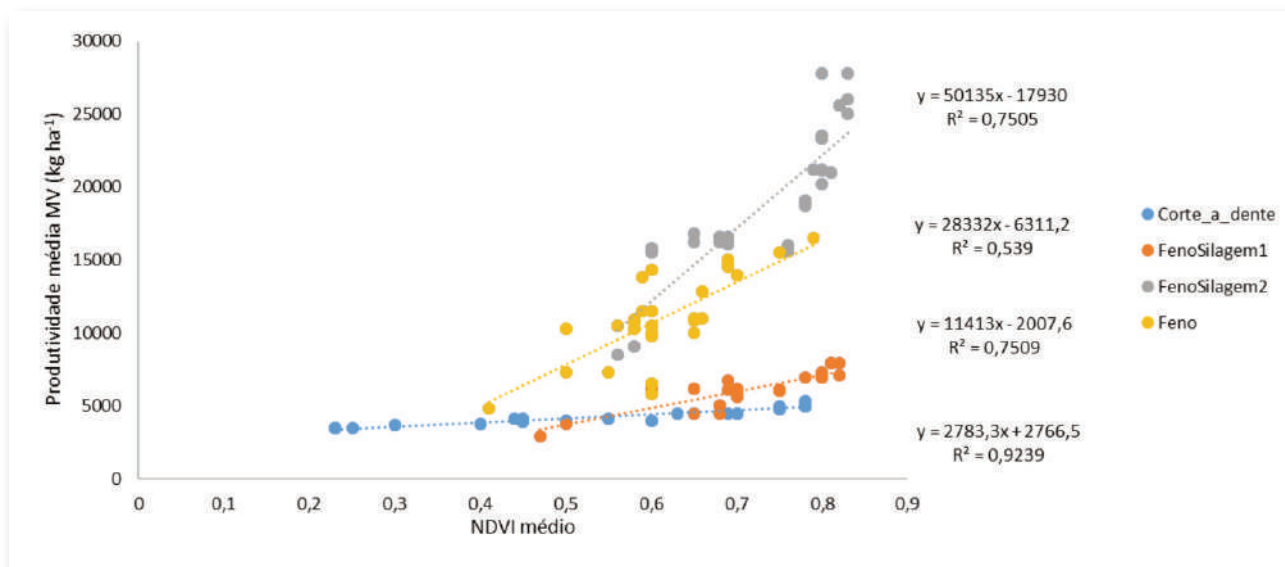


Figura 75 - Modelo linear de relação entre os valores de produtividade MV (kg ha<sup>-1</sup>) e o NDVI médio para cada um dos momentos de corte da forragem.

Em qualquer um dos momentos do corte da forragem o resultado da relação entre os valores de NDVI e a produção é explicado por modelos de ajuste linear com coeficientes de determinação de  $R^2$  0.53 (corte para feno) a  $R^2$  0.92 (corte a dente), e valores intermédios de  $R^2$  0.75 para ambos os cortes para feno silagem sendo os valores estatisticamente significativos ( $p < 0.01$ ).

Estes dados mostram que, em qualquer um dos momentos observados, existe uma relação positiva entre os valores de produção e os valores de NDVI em que a produção média tende a ser maior quanto mais alto for o valor médio de NDVI.

A Figura 76 mostra a relação entre os valores de NDWI e os valores de produtividade da forragem em cada um dos momentos do corte.

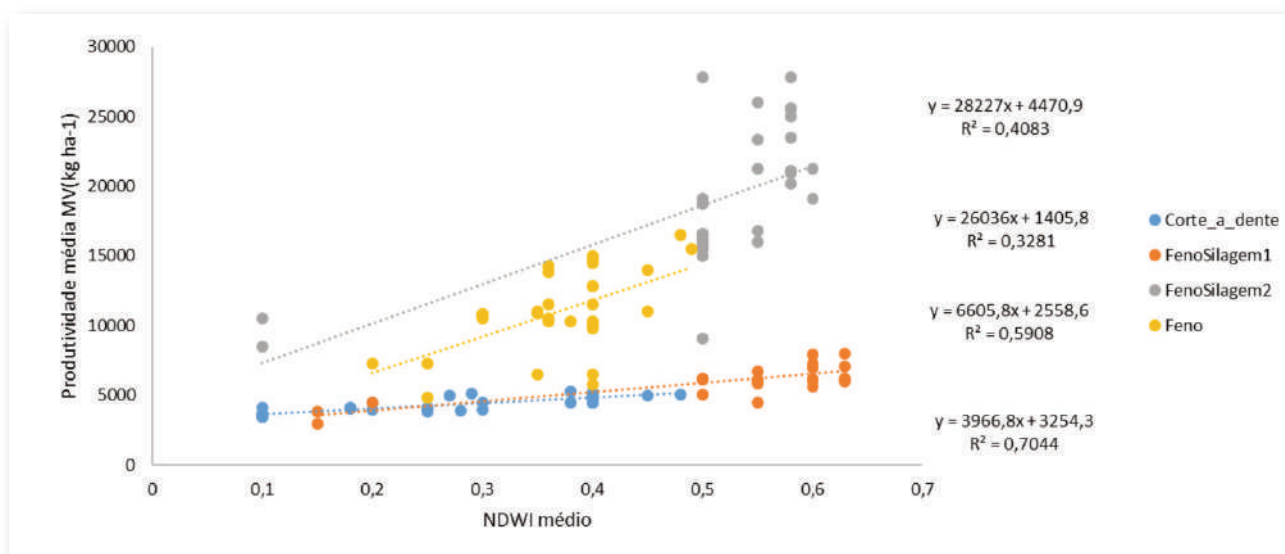


Figura 76 - Modelo linear de relação entre os valores de produtividade MV (kg ha<sup>-1</sup>) e o NDWI médio para cada um dos momentos de corte da forragem.



À semelhança do verificado com o NDVI, também para o NDWI apresenta uma relação linear positiva significativa ( $p < 0.01$ ) com a produção em MV em cada um dos cortes da forragem realizados, sendo os coeficientes de determinação do corte a dente e do primeiro corte para feno silagem os que apresentam maiores coeficientes de determinação  $R^2$  0.70 e  $R^2$  0.59, respetivamente

A Figura 77 mostra as imagens de NDVI e NDWI à data de realização dos cortes da forragem onde é possível observar a variação espacial dos referidos índices.

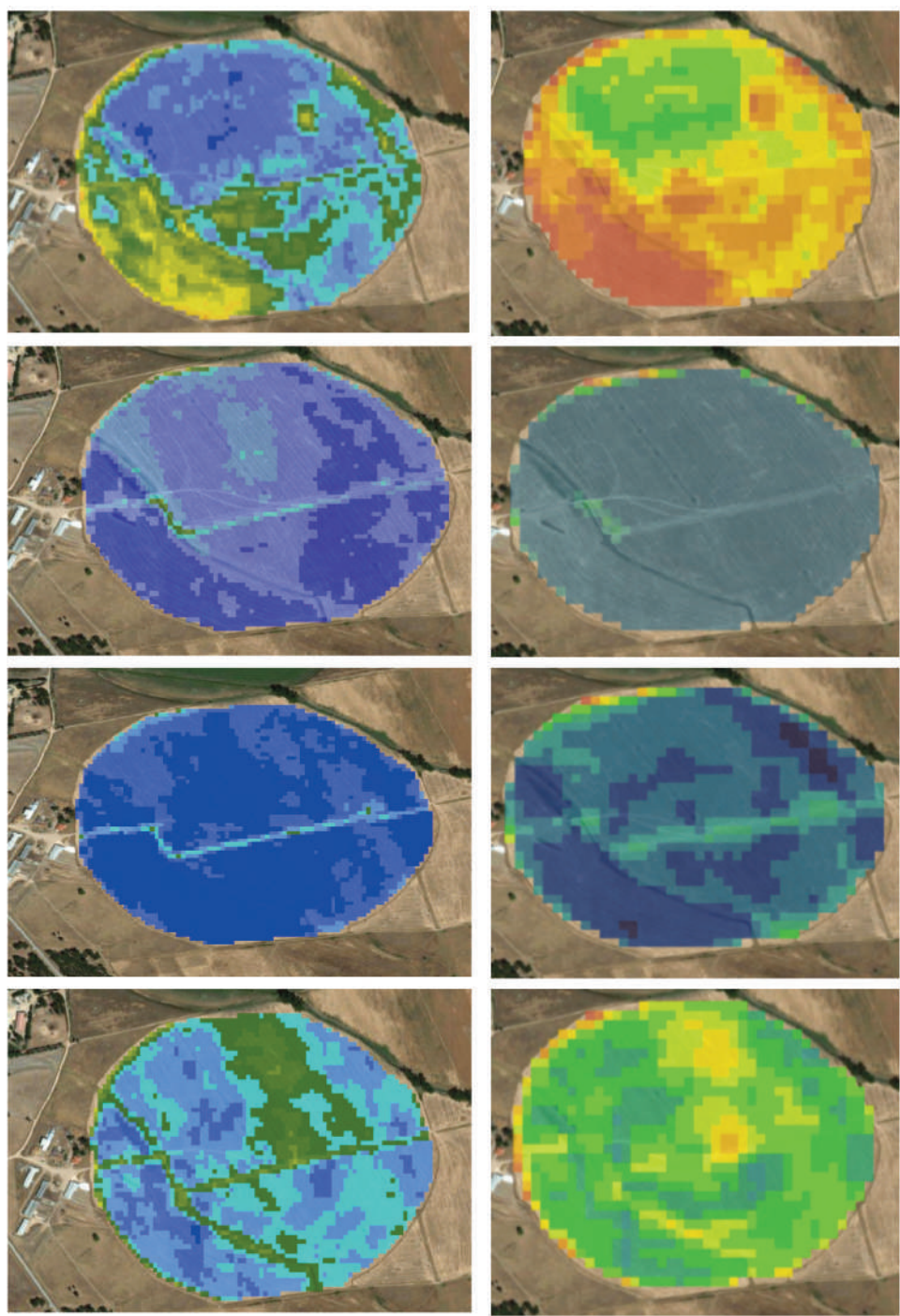


Figura 77 - Sequência de imagens do NDVI (coluna da esquerda) e NDWI (coluna da direita) da forragem (de cima para baixo): ao corte a dente, primeiro corte de feno silagem, segundo corte de feno silagem e corte para feno. Fonte: Agroinsider



Nas imagens é possível identificar zonas de maior vigor vegetativo (a azul) e de maior teor de água nas plantas (verde ou azul) sendo que as áreas com maior vigor apresentam, em regra, também maiores teores de água na planta.

À exceção da fase de arranque da cultura e entrada dos animais para o corte a dente em que os valores de NDVI se apresentam mais baixos na zona mais a sul da parcela, em todo o restante ciclo de produção se faz notar a existência de valores mais elevados tanto de um índice como do outro nessa zona da parcela. A composição da consociação assente maioritariamente em variedades de azevéns anuais e a presença de textura franco arenosa nessa zona, ao contrário da restante parcela em que a textura é arenosa, estará muito provavelmente relacionada com essa variação pois a presença de materiais mais finos do solo, conseguindo gerir de forma mais eficiente o respetivo teor de humidade, proporciona melhores condições de desenvolvimento vegetativo da cultura, nomeadamente num ano agrícola de baixa precipitação e em que a rega apenas funcionou como meio de ajuda ao sequeiro.

Esta diferença delimita de forma evidente duas zonas da parcela criando oportunidade à gestão diferenciada dos fatores de produção, entre os quais, a rega e a aplicação de agroquímicos.

Através da segmentação é possível, nestas zonas, obter valores médios de NDVI e NDWI distintos. Exemplificando para o caso do NDVI e no corte a dente, o modelo estima uma produção de 3601.5 kg ha<sup>-1</sup> na zona verde e de 4715 kg ha<sup>-1</sup> na zona azul ou para o corte em que ocorreu maior produção de 964403 kg ha<sup>-1</sup> para as zonas de azul mais claro e de 22178kg ha<sup>-1</sup> nas zonas de azul-escuro.

#### **IV.2.5.4. CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos neste caso de estudo demonstram existir uma boa relação entre as imagens de satélite, nomeadamente o índice NDVI e índice NDWI, e a produção de uma cultura forrageira. No caso deste tipo de culturas a identificação de zonas de produção distinta cria oportunidades de determinar o momento mais adequado à realização dos respetivos cortes e a gestão diferenciada de aplicação de fatores de produção, nomeadamente agroquímicos e rega, contribuindo para a eficiência económica da cultura. No caso de itinerários em sementeira direta, como o foi a condução da cultura neste ensaio, a deteção precoce da área de infestantes resultantes da falsa emergência à sementeira pode, ainda, reduzir significativamente a quantidade de herbicida necessária através da sua aplicação a taxa variável com a vantagem acrescida de tornar a técnica ainda mais amiga do ambiente.

Em trabalhos futuros importa determinar o padrão dos índices estudados para as variedades de plantas das consociações e a respetiva separação daqueles que podem representar a presença de plantas infestantes sem interesse zootécnico.

## IV.3. Horticultura e Leguminosas

### IV.3.1. UTILIDADE DAS IMAGENS DOS SATÉLITES SENTINEL-1 E SENTINEL-2 NA GESTÃO DA CULTURA DE BRÓCOLO

Paixão Luís<sup>1</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup>; Marques, Francisco<sup>2</sup>.

#### IV.3.1.1. INTRODUÇÃO À CULTURA

Nos últimos anos, a cultura do brócolo tem registado um aumento de área em Portugal. Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística, a área cultivada de brócolo foi de 2500 ha em 2016, de 2885 ha em 2017 e de 3238 ha em 2018, tornando-se nesse ano a hortícola a ocupar maior área em Portugal.

Considerada uma cultura de estação fresca tolerante à geada, a temperatura ideal de crescimento situa-se entre os 13°C e os 20°C, sendo que temperaturas abaixo dos 5°C ou acima dos 25°C podem limitar o seu desenvolvimento. Prefere solos ricos em matéria orgânica, com boa capacidade de armazenamento de água e pH entre os 6,5 e 7,5. Necessita de humidade constante no solo de modo a atingir máxima produtividade, especialmente durante a fase de formação das inflorescências. No entanto, excesso de água pode reduzir a produtividade e qualidade do produto. A carência de boro pode originar caules ocos.

As atividades do itinerário técnico da cultura podem ser resumidas nos seguintes passos: i) Preparação do solo; ii) Adubação de fundo; iii) Herbicida pré-plantação; iv) Plantação; v) Herbicida pós-plantação; vi) Adubação de cobertura; vii) Aplicação de Boro; viii) Fungicida e Inseticida; ix) Colheita.

Monitorizar a cultura de brócolo e prever o estado de maturação da mesma são aspetos essenciais, não só para responder às exigências do mercado, mas também para melhorar a gestão agrícola através de redução de custos e/ou aumento de produtividade. Neste sentido, os satélites Sentinel, pertencentes ao Programa Copernicus da ESA (European Space Agency), constituem uma excelente oportunidade para obter informação gratuita, regular e precisa acerca das mais variadas culturas agrícolas e gerar valor para produtores e empresas.

#### IV.3.1.2. METODOLOGIA

O estudo incidiu sobre 3 parcelas de brócolo, situadas nos arredores da cidade de Évora, Portugal, (Lon: - 7.796576, Lat: 38.518288) e plantadas entre agosto e outubro de 2017. As características de cada parcela estão resumidas na Tabela 8. A variedade de brócolo plantada foi Parthenon, caracterizada pela sua versatilidade e grande capacidade/qualidade produtiva.

Tabela 8 - Resumo das características das 3 parcelas consideradas.

Parcelas	Área (ha)	Data de Plantação	Densidade de Plantação (nº de plantas/ha)	Sistema de Rega
P2	24	ago/17	33000	Center Pivot
P5	17.5	out/17	16500	Gota-a-Gota
P6	7.5	out/17	33000	Aspersão Fixa

<sup>1</sup> Universidade de Évora y MED.

<sup>2</sup> Agroinsider, Lda.

A empresa AgrolInsider processou automaticamente as imagens obtidas dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, à medida que eram disponibilizadas, desde as datas de plantação até depois da colheita, para todas as parcelas. Foi calculado o índice NDVI através das imagens do satélite Sentinel-2 e também recolhida a informação das bandas VH e VV do sensor Radar do satélite Sentinel-1. Cerca de 30 dias após a plantação, em cada parcela, foram analisados os mapas de NDVI e escolhidos pontos de monitorização (Figura 78), consoante a dimensão das parcelas e as diferenças de valores NDVI dentro de cada uma.

Em cada ponto foram escolhidas e identificadas 10 plantas, nas quais, semanalmente, se registou informação de dimensões de três folhas por planta e do diâmetro das inflorescências, sempre que presentes, desde início de dezembro de 2017 a meados de janeiro de 2018. Foram calculadas as médias desses valores em cada ponto e data, sendo estes considerados representativos para cada localização.

Conseguir prever e distinguir espacialmente o estado da cultura, nomeadamente as dimensões das inflorescências, ao longo do seu desenvolvimento, através da informação obtida das imagens dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, foi o principal objetivo do estudo.

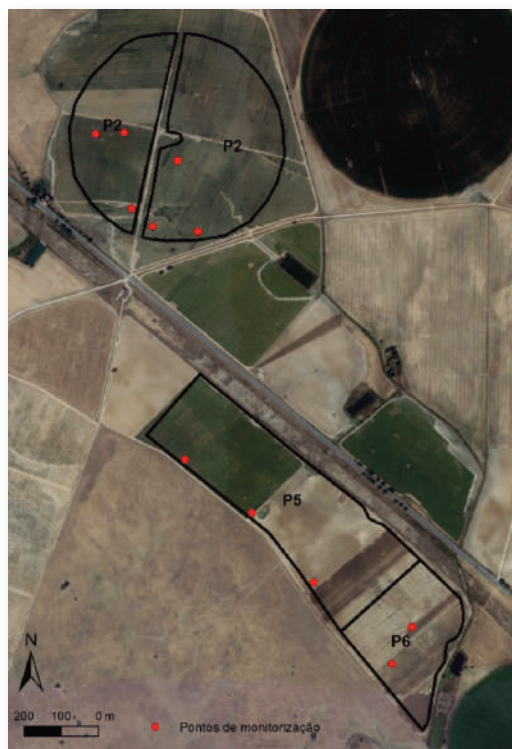


Figura 78 – Pontos de monitorização das 3 parcelas.

#### IV.3.1.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Devido à forte presença de nuvens que se fez sentir nos meses de desenvolvimento da cultura, e ao facto do sensor do satélite Sentinel-2 ser influenciado pelas mesmas, foi avaliada uma possível relação entre o índice NDVI e as bandas VH e VV do sensor Radar do satélite Sentinel-1. Uma vez que o sensor Radar não é influenciado pelas nuvens, essa relação seria uma ótima ferramenta para avaliar o estado da vegetação em datas com nebulosidade. Através das médias, por parcela e data, do índice NDVI e da banda Radar VH, foi possível verificar que existe uma relação, a qual é evidenciada na Figura 79. O resultado da relação é um modelo linear com ajuste de 79% e estatisticamente significativo a  $p < 0.01$ .

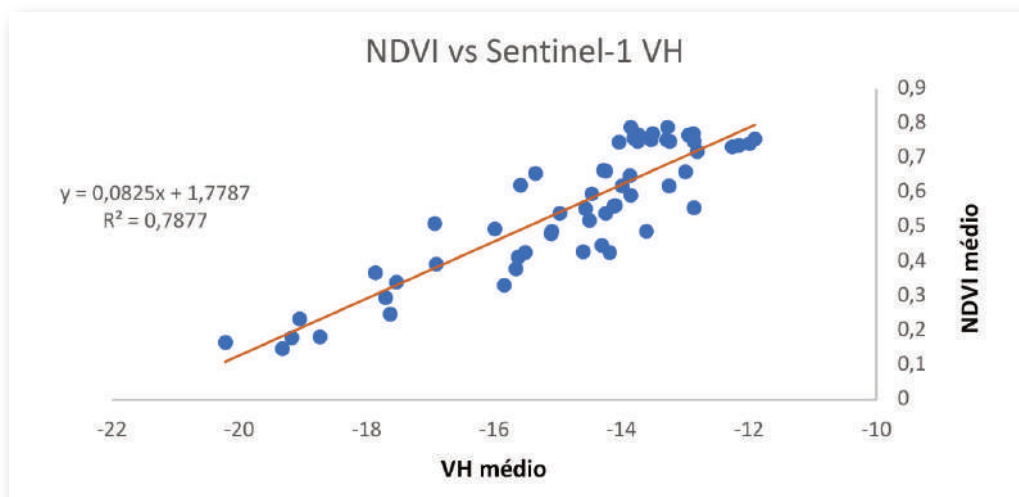


Figura 79 – Relação entre NDVI médio e VH médio para as 3 parcelas.

O valor médio da banda VH sobe com o aumento do valor médio de NDVI o que sugere que a capacidade fotossintética da planta está relacionada com o seu porte físico. Com base neste modelo e em imagens VH do satélite Sentinel-1, foi possível elaborar mapas de NDVI para datas influenciadas por nuvens e assim obter uma curva de NDVI médio ao longo do tempo para cada parcela (Figura 80), com início a cerca de 30 dias após plantação.

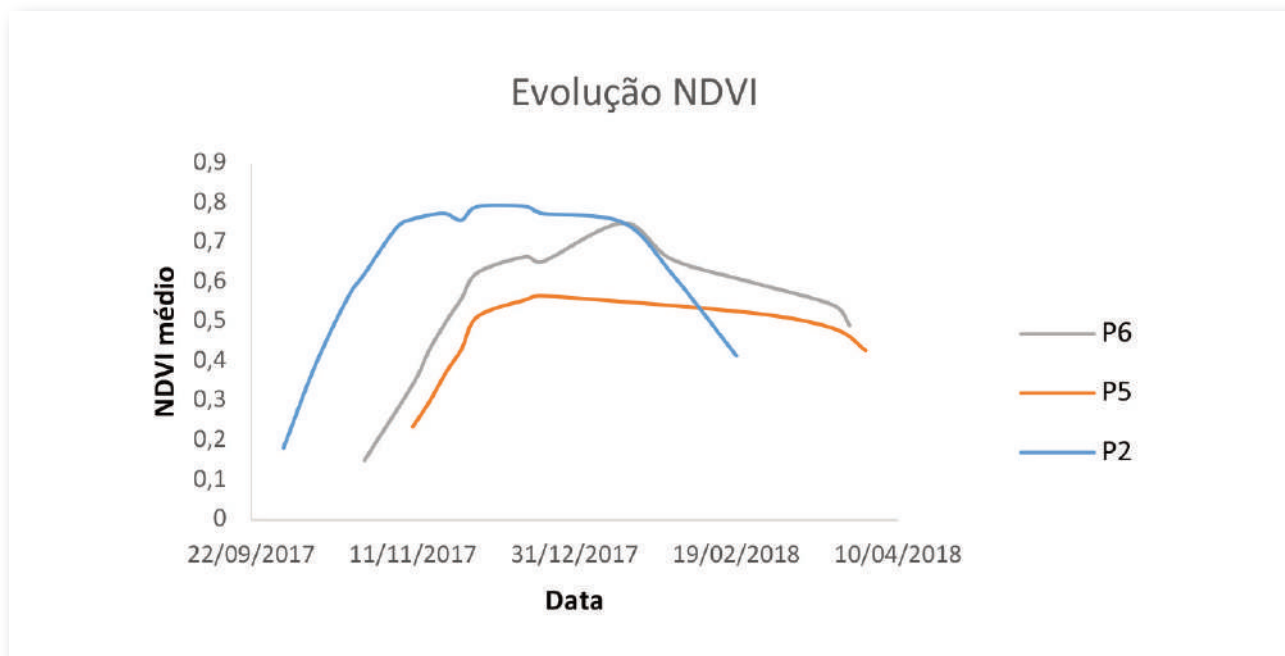


Figura 80 – Evolução temporal do NDVI médio para cada parcela.

A parcela P2 atingiu um patamar de NDVI mais elevado enquanto as outras parcelas, P5 e P6, apresentaram um patamar de NDVI de valor mais baixo. A diferença evidenciada pode estar relacionada com as horas de sol acumuladas em cada parcela, uma vez que a parcela P2 foi plantada em agosto, e as parcelas P5 e P6 foram plantadas em outubro, mês com temperaturas médias mais baixas comparativamente ao mês de agosto. O facto da densidade de plantação ser menor na parcela P5, pode também justificar os valores de NDVI médio como os mais baixos das três parcelas.

Por parcela, foram calculados mapas de acumulado de NDVI, com ponto de partida a 30 dias da plantação, para cada data entre 7 a 15 dias antes das datas em que foram recolhidos dados de diâmetro de inflorescência. Desses mapas foram obtidos os valores dos respetivos pontos de monitorização e, por sua vez, comparados aos valores médios de diâmetro de inflorescência. A relação entre o diâmetro médio das inflorescências de cada ponto e o acumulado de NDVI de 7 a 15 dias antes da data de colheita pode ser analisado na Figura 81.

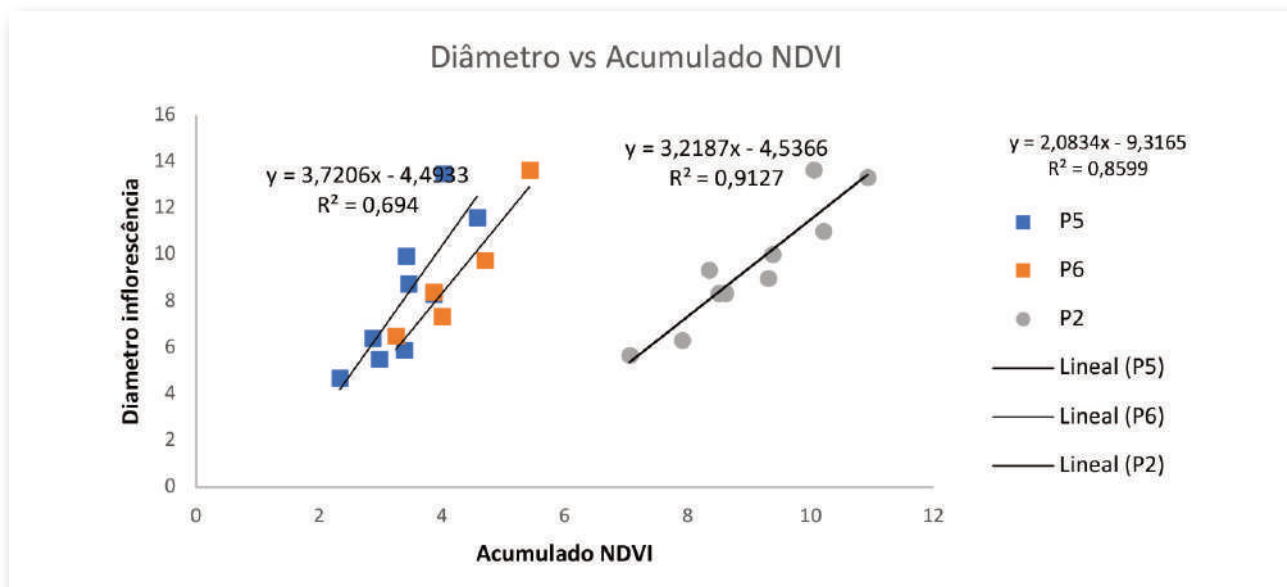


Figura 81 – Relação entre diâmetro médio das inflorescências e acumulado de NDVI de 7 a 15 dias antes da colheita, para cada ponto de monitorização.

Em todas as parcelas, o diâmetro da inflorescência cresce, naturalmente, com o aumento do acumulado de NDVI. No entanto, a parcela P2 demonstra necessidade de maior valor de acumulado NDVI, ou seja, maior acumulação térmica, para que as inflorescências atinjam as mesmas dimensões atingidas nas outras parcelas, P5 e P6, com acumulados NDVI mais baixos. Tal aspeto pode ser explicado pela forma como a planta reagiu às condições climáticas aquando da sua plantação. As plantas da parcela P2, ao serem plantadas em agosto, época com temperaturas mais altas, investiram inicialmente mais recursos na sua fase vegetativa e daí os valores de NDVI serem mais elevados que nas outras 2 parcelas. Por seu lado, as parcelas P5 e P6 foram plantadas em outubro, época com temperaturas mais baixas, obrigando as plantas a investir mais cedo na sua fase reprodutiva. Os valores médios de dimensão de folha são, também, mais elevados na parcela P2, 750 cm<sup>2</sup>, comparativamente às parcelas P5 e P6, 650 cm<sup>2</sup> e 665 cm<sup>2</sup>, respetivamente. Outro aspeto a considerar tem que ver com o tipo de variedades plantadas, bem como a densidade de plantas utilizada, todavia, poder estimar o diâmetro da cabeça no espaço e no tempo é uma informação relevante na segmentação da colheita face às exigências de mercado, bem como na logística e organização da apanha.

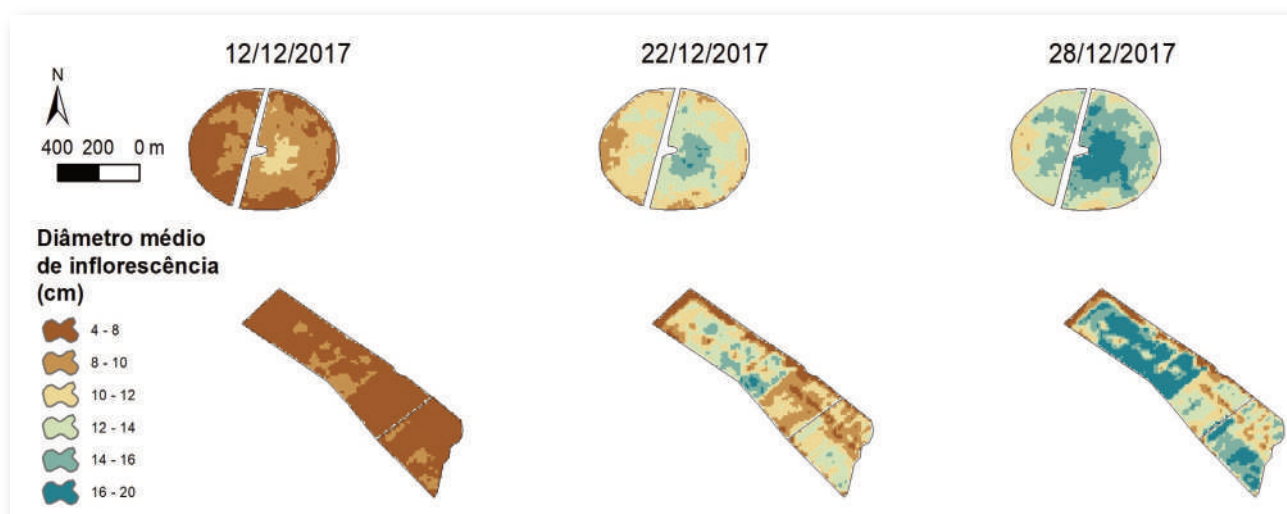


Figura 82 – Previsão de diâmetro médio de inflorescência para as 3 parcelas ao longo do mês de dezembro de 2017.

As imagens dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2 demonstram assim um grande potencial no apoio à gestão da cultura do brócolo. A Figura 82 mostra mapas de diâmetro médio de inflorescência para as parcelas de estudo em 3 datas de dezembro de 2017, calculados a partir dos modelos descritos no capítulo anterior.

#### **IV.3.1.4. CONCLUSÕES**

Este estudo aponta para uma boa relação entre o índice NDVI e a banda VH do sensor Radar do satélite Sentinel-1 na cultura do brócolo. Tal relação permite a monitorização da cultura, mesmo em épocas do ano com muita presença de nuvens. É também evidente a relação do acumulado de NDVI com o diâmetro das inflorescências, embora seja necessário avaliar a época de plantação e respetiva reação da planta às condições do acumulado térmico.

Espera-se que o trabalho desenvolvido permita:

- Prever, com antecedência, o grau de maturação (dimensão) da inflorescência do brócolo;
- Apoiar o planeamento de colheita escalonada de modo a obter a qualidade desejada (ou possível) do produto e/ou preço;
- Reduzir custos e/ou aumentar produção, em suma, aumentar a rentabilidade.

Em termos de desenvolvimentos futuros: i) validação/adaptação dos modelos elaborados, em campanhas futuras; ii) recolher dados adicionais sobre as inflorescências, nomeadamente o peso, altura, largura; e iii) relacionar os mesmos com os modelos elaborados de modo a prever produção e qualidade do produto.







## **IV.3.2. MODELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO TOMATE A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE SENTINEL 1 E 2**

**Marques, Francisco<sup>2</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup> Paixão, Luís<sup>1</sup>**

### **IV.3.2.1. INTRODUÇÃO À CULTURA**

O tomate de indústria é uma das culturas horto-industriais mais importantes em Portugal, sendo exportado cerca de 95% do concentrado produzido. É importante referir, ainda, que os aumentos de produção por unidade de superfície aumentaram nos últimos anos, contudo, tais produções foram conseguidas com um menor número de produtores, o que reflete bem o aperfeiçoamento técnico dos produtores e da maior eficiência na utilização de recursos.

O tomate é também uma cultura onde os riscos de investimento são muito elevados pois os custos associados à produção de 1 ha de tomate podem facilmente rondar os 6000 € a 8000 €. Nesse sentido todos os detalhes são importantes aquando da sua produção de maneira a reduzir riscos e a aumentar a sua *performance* económica.

Face ao exposto, consideramos que as imagens de satélite podem de alguma forma ajudar a tarefa do produtor e nesse sentido apresentam-se, seguidamente, alguns exemplos concretos.

### **IV.3.2.2. METODOLOGIA**

As parcelas a observar para a cultura do tomate situam-se no distrito de Portalegre (38.900490, -7.050948), estando as parcelas analisadas com maior detalhe, situadas perto de Elvas. A totalidade da área destas parcelas é de 85 ha, dividida em 11 parcelas de dimensões variáveis (de 2 ha a 21 ha, Figura 83a).

Com base nos dados fornecidos pelo produtor, nomeadamente itinerários técnicos e produtividades de cada parcela, foram estabelecidas relações entre as curvas de referência para cada parcela ao nível do vigor vegetativo e a produtividade, de forma a atingir um modelo que permitisse chegar a estimativas de produtividade.

Foram, ainda, feitas análises ao nível da qualidade do fruto (parcelas C2 e C3), nomeadamente conteúdo de açúcar neste (SST) procurando encontrar uma relação entre o vigor (NDVI) e o mesmo, com o objetivo de chegar a um modelo que pudesse auxiliar o produtor na gestão da colheita diferenciada.

Ao longo do desenvolvimento da cultura, foram identificados pontos de distinto vigor em cada parcela maioritariamente relacionados com diferentes condições edáficas, conforme pôde ser observado pelas imagens radar obtidas antes da plantação (índice VV).

No dia 7 de setembro de 2019 foram realizadas amostragens de grau Brix em duas parcelas distintas (C3 e C2 – Figura 83b) na zona de Elvas, sendo as áreas respetivamente de 7 e 6 ha. As plantações em ambas as parcelas foram realizadas em junho de 2019, em que C2 foi plantado anteriormente a C3. Já a colheita, foi efetuada em inícios de setembro.

Os pontos de amostragem (7 pontos) foram escolhidos com base nos diferentes níveis de clorofila que se observaram ao longo do ciclo do tomate. Em cada ponto foram escolhidas 3 plantas, que posteriormente

<sup>1</sup> Universidade de Évora y MED;

<sup>2</sup> Agroinsider, Lda.

foram colocadas em sacos com a devida identificação. Posteriormente, foi levada a cabo uma medição relacionada com os sólidos solúveis totais (grau Brix), onde foram escolhidos de forma aleatória 10 frutos de cada amostra, sendo depois analisados com o auxílio de um refratómetro.

Após recolha de todos os pontos, todos os frutos foram pesados de forma a descortinar a produtividade média em cada ponto onde se observou o grau Brix. Foi também feita a contagem do número de tomates maduros e verdes em cada amostragem.

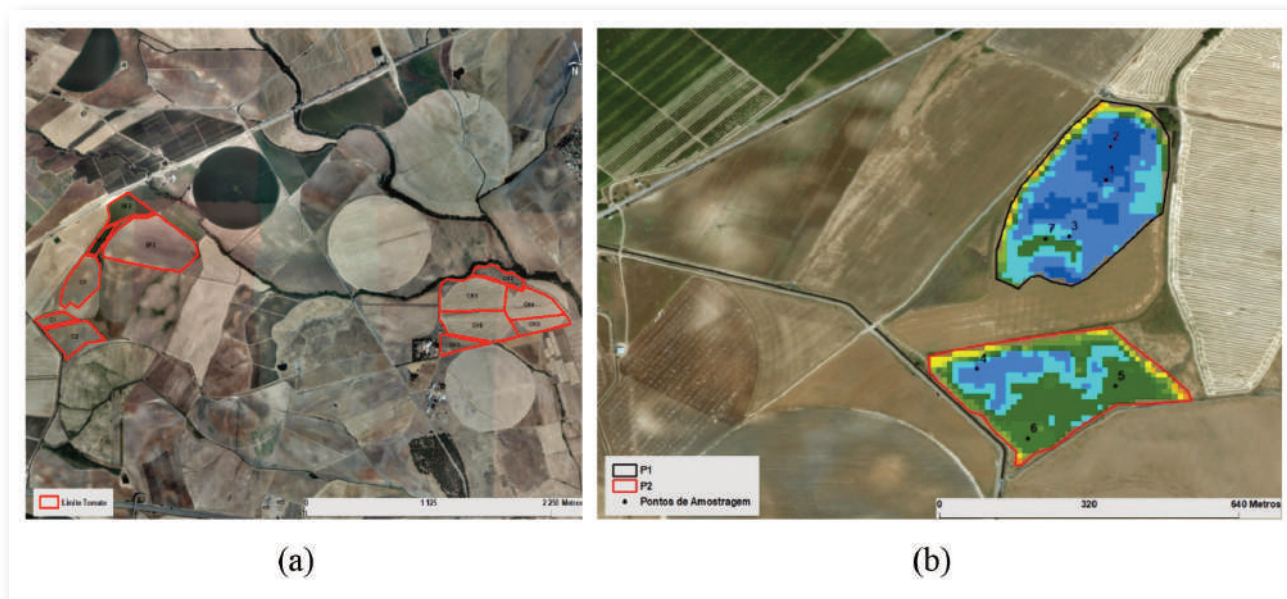


Figura 83 – a) Vista geral das parcelas; b) NDVI absoluto no dia 2 de setembro de 2019 nas parcelas C3 e C2.

No dia 8 de agosto de 2019 foram realizadas exclusivamente amostragens de produtividade em cinco parcelas distintas (CH1, CH2, CH4, CH5 e CH6 - Figura 83a) na zona de Elvas. A parcela CH3, já se encontrava colhida. As plantações foram iniciadas em abril e colhidas em agosto de 2019.

Os pontos de amostragem unicamente dedicados à produtividade (10 pontos) foram escolhidos com base nos diferentes níveis de clorofila que se observaram ao longo do ciclo do tomate. Em cada ponto, foram escolhidas 3 plantas e recolhidos os frutos. Posteriormente, cada amostra foi pesada, tendo-se feito depois a extrapolação dos valores de produtividade com base nos valores pesados.

Na Figura 84 apresentam-se os pontos escolhidos para amostragem e na Tabela 9, as coordenadas relativas a estes mesmos pontos bem como as produtividades observadas.



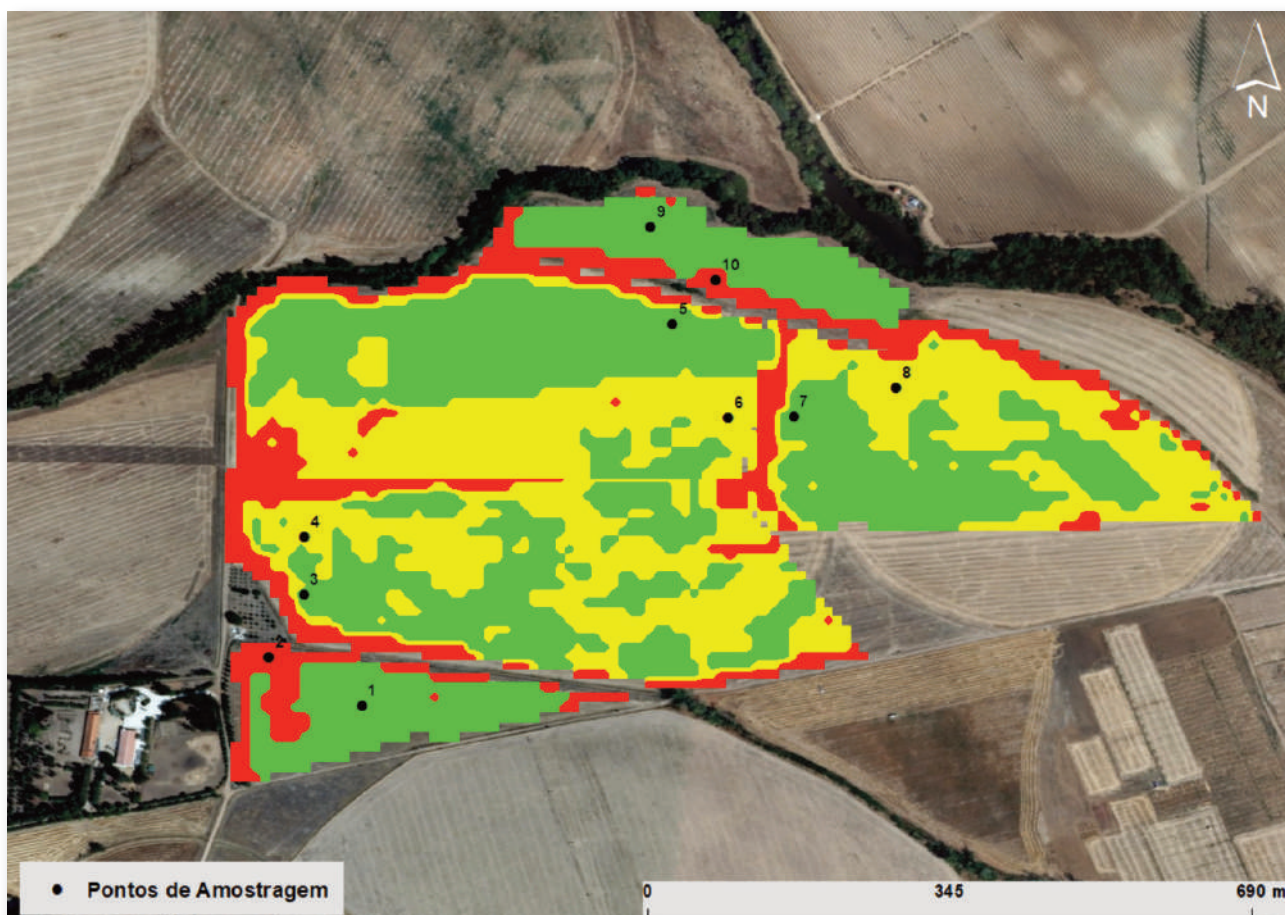


Figura 84 – Pontos de amostragem escolhidos com base nos níveis NDVI.

Tabela 9 – Pontos de amostragem (coordenadas wgs84) e produtividade observada

Ponto	Lat	Long	Prod
1	38,898	-7,054	5,20
2	38,898	-7,055	5,00
8	38,901	-7,048	3,70
9	38,902	-7,051	4,10
10	38,902	-7,050	3,95
7	38,900	-7,049	3,86
5	38,901	-7,051	4,20
3	38,899	-7,054	5,90
4	38,899	-7,054	6,10
6	38,900	-7,050	3,10

### IV.3.2.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na Tabela 10 apresenta-se o sumário da análise efetuada.

Tabela 10 – Resultados da amostragem (N.º frutos, Produção média e Grau Brix médio)					
Amostra	NDVI	N.º tomates Maduros	N.º tomates Verdes	Prod. média (kg)	Brix Médio
1	0,728	149	59	11,08	4,16
2	0,73	217	69	20,02	3,89
3	0,66	216	90	15,99	4,17
4	0,67	141	45	11,49	4,55
5	0,59	191	18	11,84	5,18
6	0,526	297	56	18,3	4,9
7	0,579	325	49	21,04	4,68

Posteriormente, foram efetuadas análises de regressão ao nível do grau Brix – NDVI à data próxima da colheita (Figura 85). Os resultados mostraram que existe uma correlação significativa ( $p < 0,05$ ), entre o conteúdo de clorofila e a quantidade de açúcares nos frutos, sendo o  $R^2$  de 71 %. Ou seja, existem evidências estatisticamente significativas que comprovam que quanto menor for o valor de NDVI maior será o grau Brix (SST).

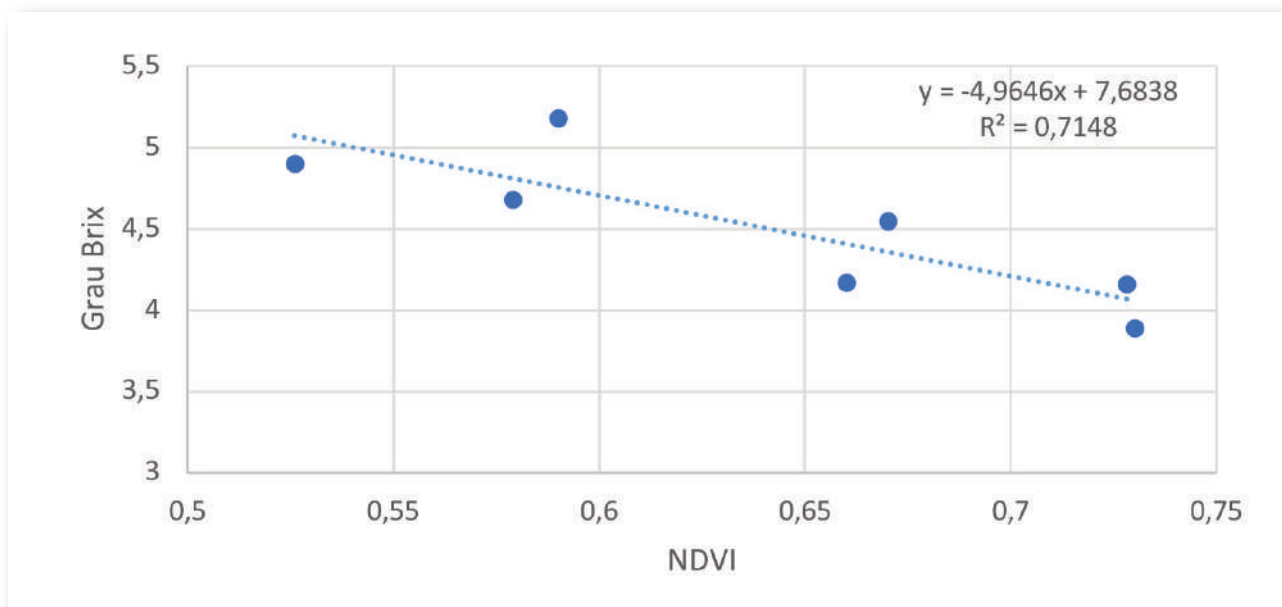


Figura 85 – Correlação entre NDVI e Grau Brix.



Tanto no ponto 1 (Figura 86) como no ponto 2 (Figura 87), o elevado NDVI observado à data, sendo de 0,73 em ambos os casos, pode ser explicado pela alta densidade de infestantes que cobriam em algumas partes a totalidade do tomatal. O baixo Brix observado (ponto 1: 4,16 e ponto 2: 3,89) pode ser explicado maioritariamente por uma razão: a competição das infestantes pelos nutrientes, água e acima de tudo radiação solar, uma vez que estas apresentavam alturas algo razoáveis que possivelmente impediram a produção de fotoassimilados por parte dos tomateiros, de forma adequada.



Figura 86 – Amostragem recolhida no ponto 1 (6 de setembro de 2019).



Figura 87- Presença de infestantes no ponto 2 (6 de setembro de 2019).

Embora observadas em menores quantidades, as infestantes no ponto 3 (Figura 88) também podem explicar os baixos níveis de açúcar que se verificaram nos frutos das plantas localizadas neste ponto.



*Figura 88 – Presença de infestantes no ponto 3 (6 de setembro de 2019).*

No que diz respeito ao ponto 7, caracterizado por plantas que já apresentavam sinais de dessecação (NDVI = 0,57), este apresentou em média um grau Brix de 4,68, bastante superior ao observado nos outros pontos. Esta dessecação foi provavelmente causada por alguma falha no sistema de rega uma vez que, nesta zona, o conteúdo de clorofila era bastante inferior àquele que se verificou por toda a parcela. Estando as plantas em situação de *stress* hídrico, as reservas começaram a ser canalizadas para os frutos, resultando num aumento dos SST dos frutos. Devido à forte exposição solar provocada pela ausência de cobertura das folhas, muitos dos frutos já se encontravam em más condições (Figura 89).



*Figura 89 – Dessecação das plantas no ponto 7 (6 de setembro de 2019).*

Em C2 (Figura 83), os níveis de clorofila observados eram bastante inferiores ( $NDVI=0,529$ ) aos verificados em C3 ( $NDVI=0,655$ ), indiciando uma data de plantação mais precoce, e em que a rega já tinha sido possivelmente interrompida, explicando os níveis superiores de Brix.

Tal pode ser observado na Figura 90, onde se observa que o declínio do NDWI, relativo ao conteúdo de água na folha é bem superior em C2 quando comparado com C3.

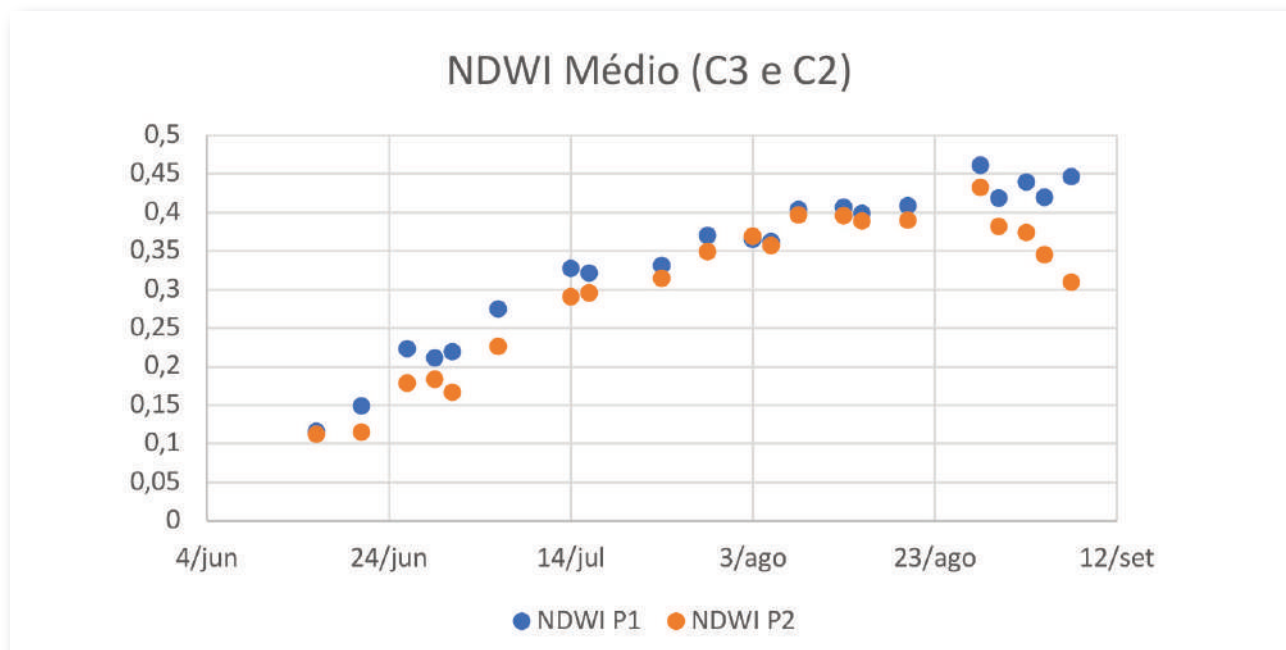


Figura 90 – Evolução do NDWI médio em C3 e C2.

No ponto 4 (Figura 91), onde a quantidade de clorofila era superior ao observado nos pontos 5 e 6, verificou-se um maior vigor vegetativo nas plantas instaladas naquela zona, sinal de que beneficiavam de melhores condições hídricas, ao contrário das plantas que se encontravam nos pontos 5 e 6 (Figuras 92 e 93). Tal facto pode ser explicado pelas diferentes condições de solo, apresentando as zonas com maior vigor, teores de argila superiores às zonas de menor vigor, como pode ser observado pela imagem radar (Figura 94), em que o sinal refletido é mais intenso (cor verde), naquele dia (27 de fevereiro de 2019), indiciando, por isso, maiores teores em argila. Sendo assim, e tendo o corte da rega já sido efetuado, as plantas que se encontravam nas zonas mais argilosas beneficiaram desta maior capacidade de retenção de água do solo acabando por senescer mais tarde.



Figura 91 – Plantas com maior vigor vegetativo no ponto 4 (6 de setembro de 2019).



Figura 92 – Plantas do ponto 5 com sinais de défice hídrico (6 de setembro de 2019).



Figura 93- Plantas no ponto 6 (6 de setembro de 2019).

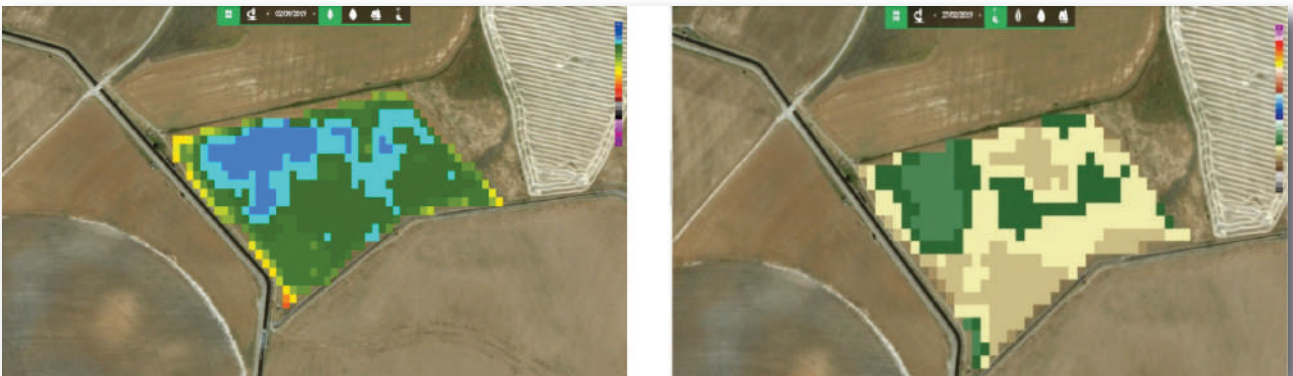


Figura 94 – Contraste do mapa NDVI com mapa relativo ao índice de solo (VV).



Segundo a correlação estabelecida entre o NDVI e o grau Brix foram elaboradas duas cartas que dizem respeito ao SST expectáveis ao longo das parcelas C3 e C2 (Figura 95). Sustentados nestes resultados poderão ser realizados mapas de segmentação de colheita, não só com base nas imagens radar que poderão dar uma ideia ao produtor de quais as zonas que começarão a senescer mais cedo como também pela relação NDVI-Brix.



Figura 95 – Teor provável de SST nos frutos de C3 e C2.

Na Figura 96, encontra-se o gráfico relativo ao desenvolvimento vegetativo da cultura do tomate para as 6 distintas parcelas. Através da análise destas curvas é possível compreender de que forma evoluíram as plantas, em termos médios, ao longo do ciclo. Fruto da época de plantação mais precoce, a variedade H-1301 (4 abril de 2019) apresentou um desenvolvimento mais acelerado, seguido da variedade Olivenza (16 de abril de 2019) e finalmente a variedade H-1015 (23 de abril de 2019). Em termos médios, as parcelas que apresentaram plantas com níveis de desenvolvimento inferiores foram as CH5 e CH4 (0,47 e 0,49). A explicação não passará pela variedade pois estas eram distintas em ambas as parcelas (CH5 – H1015; CH4 – Olivenza). Sendo assim, este menor desenvolvimento ter-se-á devido às próprias relações solo-água-plantas dentro da parcela. Apesar de, no cômputo geral, as produtividades terem sido muito elevadas para a variedade H-1015 (Tabela 11- 162 ton/ha), na parcela com menor NDVI (CH5), a amostragem realizada apontou para níveis de produtividade bem inferiores (Tabela 11- 98 ton/ha). Já a parcela CH2, foi aquela que apresentou plantas com maior vigor vegetativo médio ao longo do ciclo (0,53) tendo atingido produtividades também elevadas (Tabela 11 - 142 ton/ha), muito perto do valor amostrado no campo (Tabela 11 - 143 ton/ha).

### Vigor Vegetativo Tomate (Maio - Setembro 2019)

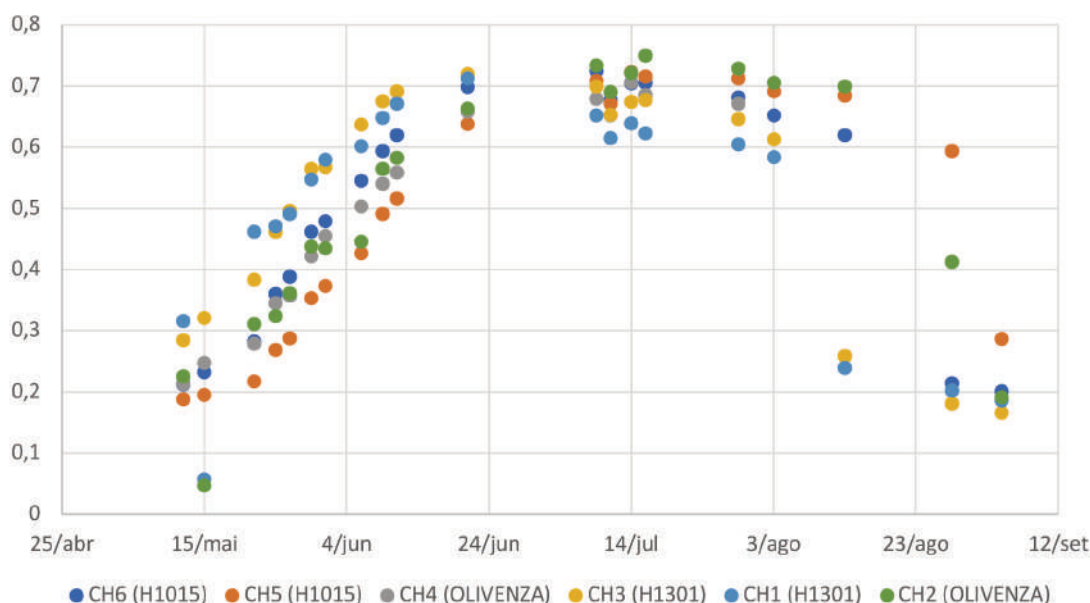


Figura 96 – Vigor vegetativo médio da cultura do tomate (maio – setembro 2019).

Analisando a Tabela 11, é notório que os níveis de vigor vegetativo médio e máximos observados ao longo do ciclo, não apresentam diferenças significativas, não sendo, portanto, possível estabelecer um padrão entre NDVI e produtividade. No entanto, no que toca à soma da variabilidade entre plantas dentro de cada parcela ao longo do ciclo, parâmetro obtido através da diferença entre as plantas com vigor vegetativo mais elevado e mais baixo numa determinada data, é visível que as parcelas que apresentaram maior variabilidade tiveram produtividades menores, como é o caso das parcelas CH4 (Figura 97) e CH2 (Figura 98). As figuras representam o máximo de variabilidade entre plantas dentro de cada parcela. Isto significa que a heterogeneidade entre plantas foi superior, podendo ter-se devido a condições edáficas, hídricas ou nutricionais. Já nas parcelas que apresentaram menor variabilidade (CH5 e CH6), as produtividades foram mais elevadas. Assim, a análise da variabilidade através das imagens de satélite poderá ser um excelente auxiliar, na medida em que pode avaliar de forma eficiente estas diferenças, podendo depois o produtor tomar decisões distintas no que toca à gestão de cada parcela.

**Tabela 11 – NDVI Máximo, Variabilidade entre plantas ao longo do ciclo, NDVI Médio, Produtividade Média e Produtividade Estimada para as diferentes parcelas na cultura do tomate**

Parcela	Varietade	NDVI Máximo	Variabilidade Ciclo	NDVI Médio	Produtividade	Produtividade Estimada
CH5	H-1015	0,72	2,24	0,47	167,427	98,96
CH6		0,72	1,48	0,50		162,52
CH3	H-1301	0,72	2,51	0,51	146,046	-
CH1		0,73	1,32	0,50		140,40
CH4	Olivenza	0,71	2,46	0,49	142,728	131,72
CH2		0,71	1,60	0,53		143,60



Figura 97 – Variabilidade entre plantas na cultura do tomate (CH4 – 06/06/2019).



Figura 98 – Variabilidade entre plantas na cultura do tomate (CH2 – 30/05/2019). Fonte: Agroiinsider.

A questão da variabilidade/antecipação do comportamento da vegetação pode ser previamente descortinada através da análise do histórico das imagens de satélite processadas para certos índices tais como o NDVI ou, como mencionado anteriormente, índices de solo provenientes de imagens radar (Figura 94). Após esta análise, é possível dividir as parcelas em zonas de gestão distintas permitindo ao produtor tomar decisões de forma atempada. Nas Figuras 99, 100, 101 e 102 mostra-se quatro exemplos destas zonas de gestão que foram obtidas através da análise das imagens correspondentes ao vigor vegetativo médio ao longo do ciclo da cultura (2019) bem como das imagens relativas ao índice de solo. As zonas vermelhas correspondem a locais da parcela onde o desenvolvimento vegetativo foi menor, fruto das condições edáficas distintas, nomeadamente manchas mais arenosas, com menor capacidade de retenção de água. Nas zonas verdes, mais argilosas, o desenvolvimento vegetativo foi superior, fruto da maior fertilidade e da maior capacidade de retenção de água que estes solos apresentam. Após a rega ser interrompida, as plantas instaladas nestes locais demoram mais tempo a senescer, fruto da maior quantidade de água presente no solo. Acedendo a este tipo



de ferramentas, o produtor poderá prever o comportamento da vegetação tendo em mente as necessidades logísticas, nomeadamente colheita, bem como adequar o dimensionamento do sistema de rega em função da textura do solo presente nas diferentes zonas, bem como adaptar a quantidade de *inputs*, nomeadamente fertilizantes, tendo em vista os distintos potenciais produtivos de cada zona.



Figura 99 – Zonas de Gestão.



Figura 100 - Zonas de Gestão.



Figura 101– Zonas de Gestão.

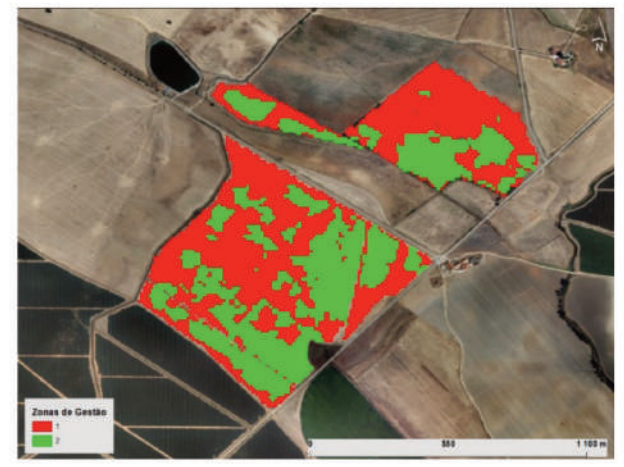


Figura 102 - Zonas de Gestão.



Figura 103- Zonas de Gestão.

#### IV.3.2.4. CONCLUSÕES

Os resultados deste caso de estudo mostram que os satélites podem ter alguma importância na gestão da cultura do tomate e na maximização da produtividade, bem como na redução do risco de produção para este tipo de cultura. Demonstrou-se que é possível estimar a previsão do grau Brix do tomate a partir dos valores de NDVI médios numa data próxima da colheita, permitindo dessa forma que os produtores possam ter uma noção mais aprofundada dos níveis de sólidos solúveis totais existentes nos frutos, estimando assim o real valor das suas colheitas, pois o preço em fábrica varia normalmente em função da concentração dos sólidos solúveis nos frutos. Se, por um lado, as estimativas de produtividade com base no NDVI, não se revelaram satisfatórias, por outro lado, a amostragem de produtividade feita em campo leva a crer que existirão possibilidades de desenvolver tal modelo, sendo apenas necessário um maior número de pontos amostrais por forma a reduzir a variância do fenómeno.

### **IV.3.3. MODELAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE ERVILHA COM UTILIZAÇÃO DE MAPAS NDVI DO SATÉLITE SENTINEL-2**

**Paixão, Luís<sup>1</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup>; Sousa, Adélia<sup>1</sup>; Gonçalves, Ana Cristina<sup>1</sup>; Silva, Luís Leopoldo<sup>1</sup>; Baptista, Fátima<sup>1</sup>.**

#### **IV.3.3.1. INTRODUÇÃO À CULTURA**

A previsão de produtividade pode ser um fator de grande importância para produtores e empresas agroalimentares. A crescente presença de novas tecnologias na agricultura permite o rápido desenvolvimento de dados úteis e fiáveis para o negócio agrícola. Neste aspeto, os satélites Sentinel, pertencentes ao Programa Copernicus da ESA (European Space Agency), são uma oportunidade a não perder no sentido de monitorizar as mais variadas culturas agrícolas e gerar valor para o produtor e empresas.

A ervilha é uma planta anual comumente cultivada em Portugal num grande leque de variedades. Necessita, diariamente, de algumas horas de luz direta e a temperatura ideal de crescimento está entre os 13°C e os 18°C, sendo que não tolera bem temperaturas acima dos 30°C. Prefere solos bem drenados, férteis, ricos em matéria orgânica e com pH entre os 6 e 7.5. Necessita de humidade constante no solo, sendo que o excesso ou a falta de água podem ser prejudiciais ao seu desenvolvimento.

Em Portugal, a sementeira da ervilha ocorre, geralmente, entre os meses de dezembro e fevereiro, sendo a colheita entre abril e maio. O itinerário técnico da cultura pode ser resumido nos seguintes passos:

- Grade e Chisel (é comum a rotação entre o cultivo de ervilha e o cultivo de milho);
- Adubação de fundo;
- Sementeira;
- Herbicida pós-sementeira;
- Fungicida e Inseticida (início da floração);
- Adubação de cobertura (planta com 10-12 cm de altura);
- Colheita (120-150 dias após sementeira, para as variedades mais comuns).

#### **IV.3.3.2. METODOLOGIA**

Como objetivo geral, foi proposto o desenvolvimento de um modelo de relação entre a produtividade da ervilha e o índice NDVI. Foram escolhidas 45 parcelas geridas pela empresa agroalimentar DARDICO S.A., divididas pelas campanhas de 2017, 2018 e 2019 e localizadas nos vales do Tejo e Sorraia, Portugal. Os valores de produção média das parcelas, em Kg/ha, foram facultados pela DARDICO. Os valores médios do índice NDVI para cada parcela foram calculados a partir de imagens do satélite Sentinel-2 para datas entre os 100-120 dias após sementeira, processo efetuado pela empresa parceira AgroInsider. No total, a área cultivada foi de 1052 ha, com uma produção total cerca de 7100 ton (7 das 45 parcelas foram consideradas em ambas as campanhas de 2017 e 2019).

#### **IV.3.3.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE CASOS DE ESTUDO**

O resultado da relação entre os valores de NDVI e a produção foi um modelo potência com ajuste de 65% e estatisticamente significativo a  $p < 0.01$ .

<sup>1</sup> Universidade de Évora y MED;

<sup>2</sup> Agroinsider, Lda.

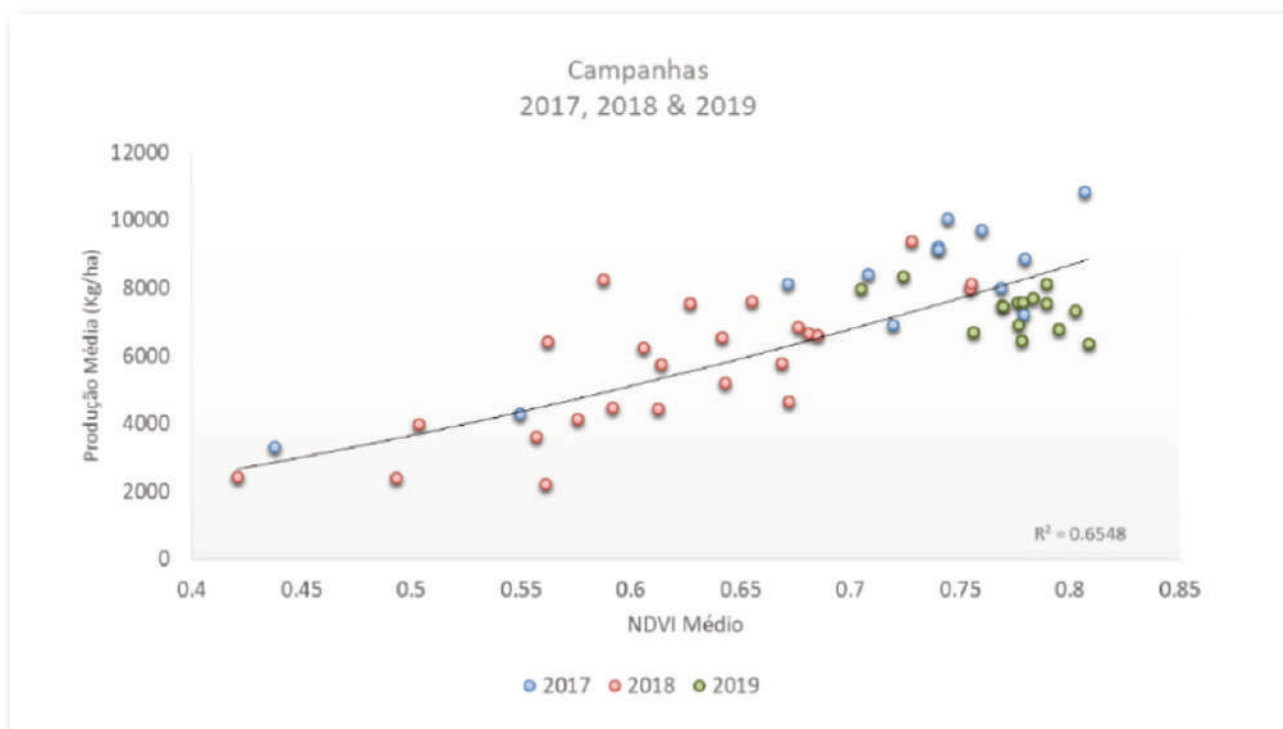


Figura 104 – Modelo linear de relação entre a produção (Kg/ha) e o NDVI médio para as parcelas de ervilha.

Pela análise da Figura 104 é possível verificar a tendência positiva entre as duas variáveis: a produção média tende a ser maior quanto mais alto for o valor médio de NDVI.

No geral, os anos de 2017 e 2019 foram mais produtivos que 2018. O fator diferenciador foi, principalmente, o clima. O ano de 2017 foi dos mais secos das últimas décadas em Portugal, situação compensada pelos sistemas de irrigação das parcelas. Já em 2018, a pluviosidade anormalmente excessiva no mês de março causou encharcamento em zonas de menor capacidade de infiltração o que levou à ocorrência de asfixia radicular e consequente fraco desenvolvimento da cultura.

Como exemplo, apresenta-se uma imagem NDVI, de uma parcela da campanha de 2018, a cerca de 100 dias após sementeira.

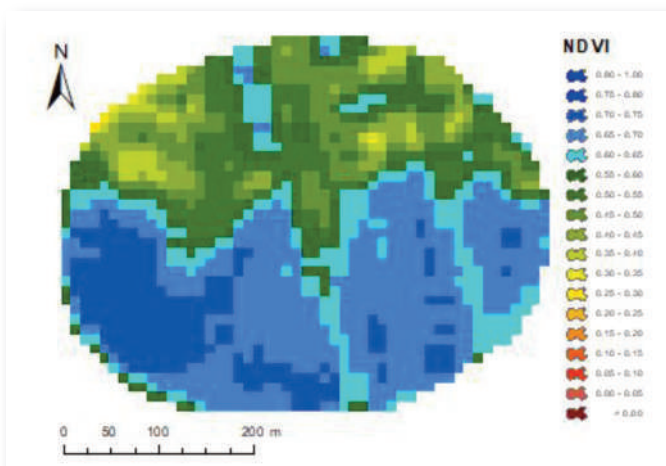


Figura 105 – Imagem NDVI, de uma parcela da campanha de 2018, a 100 dias após a sementeira. Fonte: Agroinsider

Na imagem é possível constatar uma zona com vegetação mais vigorosa a azul e outra com vegetação menos vigorosa a verde. Fotos do local, perto da data da imagem, mostram a diferença de vigor vegetativo das duas zonas, onde se nota claramente o efeito do encharcamento na zona a verde. A imagem pode também ser um excelente indicador de como segmentar a parcela em secções de gestão. Neste caso existem claramente 2 zonas de gestão.

Através da imagem e da segmentação da mesma pelas zonas de gestão, é possível obter os valores médios de NDVI para cada uma dessas zonas. Pelo modelo apresentado anteriormente, obtemos uma estimativa de produção para cada zona de gestão. Na zona a verde o modelo estima uma produção de 3648 Kg/ha enquanto na zona a azul estima uma produção de 6256 Kg/ha. Idealmente as duas zonas apresentariam uma produção média semelhante, no entanto, o que se verifica é uma produção média na zona menos produtiva a metade comparativamente com a zona mais produtiva.

Outro exemplo de como o NDVI está relacionado com a produção de ervilha pode ser observado na seguinte figura.

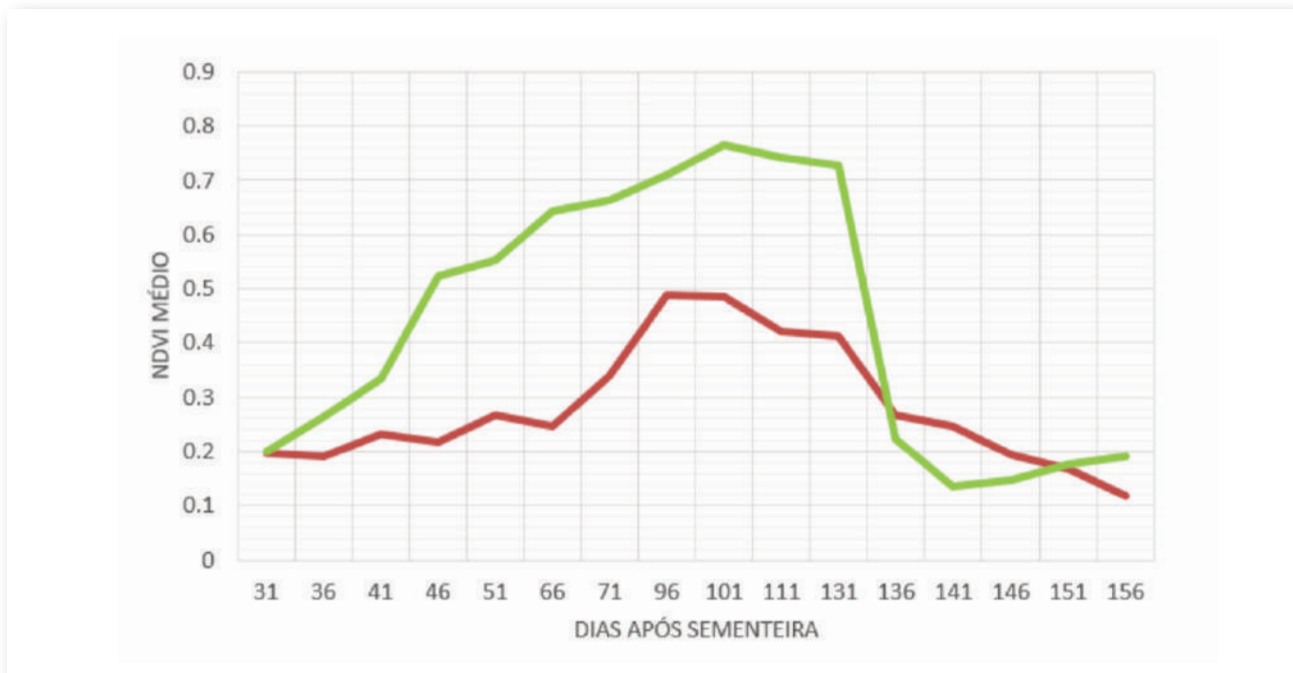


Figura 106 – Gráfico de evolução temporal de NDVI para duas parcelas da campanha de 2018.

As duas linhas apresentadas dizem respeito à evolução temporal de NDVI médio de duas parcelas da campanha de 2018 (P9 e P27). A linha a verde representa a parcela P27 com uma produção real de 9371 Kg/ha onde o NDVI médio ronda os 0.7. Por sua vez, a linha vermelha representa a parcela P9 com produção real de 2416 Kg/ha onde o NDVI médio foi cerca de 0.4. Considerando o modelo apresentado anteriormente e utilizando imagens NDVI das duas parcelas, cerca de 100 dias após a sementeira, foi possível elaborar mapas de previsão de lucro/prejuízo. Relativamente aos custos de produção foi considerado o valor de 750€/ha, enquanto a tonelada de produto foi vendida a 210€.

Através da análise da Figura 107 podemos constatar que a parcela P27 apresenta grande homogeneidade produtiva com resultados líquidos unitários acima dos 900 €/ha, enquanto a parcela P9 apresenta grande variabilidade produtiva e prejuízo na maior parte da mesma. Com todos os valores apresentados, a produção mínima necessária para igualar o valor dos custos de produção, teria que ter sido de perto de 3570 Kg/ha. Conclui-se, assim, que a parcela P27 (7.45 ha) apresenta **um lucro final** de cerca de 9073€ e a parcela P9 (11.12 ha) apresenta **um prejuízo final** de cerca de 2700€.



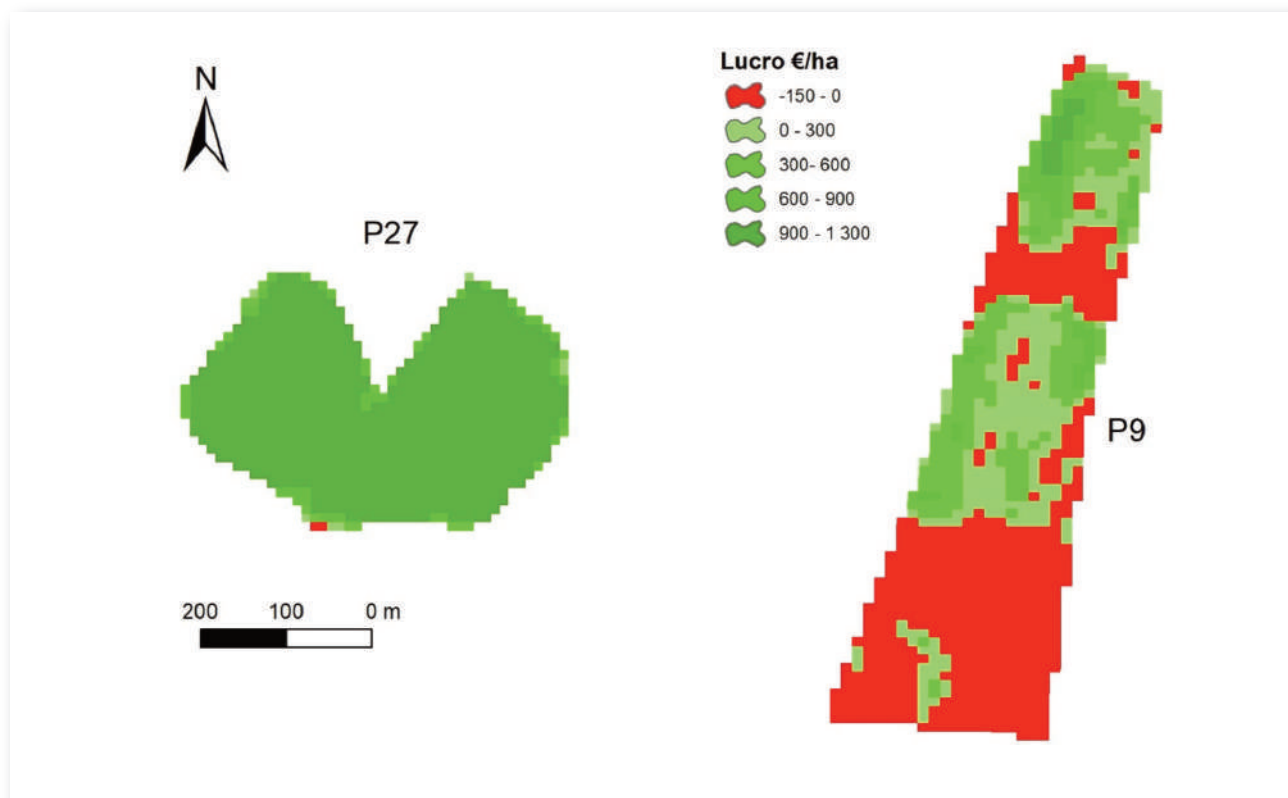


Figura 107 – Mapas de lucro previsto para duas parcelas (P9 e P27) da campanha de 2018.

#### IV.3.3.4. CONCLUSÕES

Os exemplos e dados apresentados apontam para uma boa simbiose entre as imagens de satélite, nomeadamente o índice NDVI, e a produção de ervilha. Espera-se que o trabalho desenvolvido possa permitir à DARDICO:

- Previsão da quantidade de produto a chegar à fábrica. Melhor organização de processos operacionais da fábrica;
- Apoio à gestão de fertilização de Azoto;
- Apoio ao planeamento de colheita de modo a obter a qualidade desejada (ou possível) do produto e/ou preço.

Desenvolvimentos futuros: i) validação do modelo com campanhas futuras; ii) prever o efeito de possíveis plantas infestantes no valor de NDVI; iii) automatizar a segmentação de parcelas com vista a gerir qualidade de produto.

## IV.4. Floresta e Pastagens

### IV.4.1. VARIABILIDADE ESPACIAL DE POVOAMENTOS AGROFLORESTAIS EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES NDVI E NDWI

**Sousa, Adélia<sup>1</sup>; Gonçalves, Ana Cristina<sup>1</sup>; Barcelos, Carina<sup>1</sup>; Paixão, Luís<sup>1</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup>; Silva, Luís Leopoldo<sup>1</sup>; Baptista, Fátima<sup>1</sup>.**

#### IV.4.1.1. INTRODUÇÃO

Os sistemas agroflorestais de sobreiro, azinheira e pinheiro manso representam 39% da área florestal portuguesa (23 %, 11% e 6%, respetivamente), estando concentrados no sul do país (IFN6, 2013). Estes sistemas são caracterizados por povoamentos de densidades baixas, copado heterogéneo, árvores em crescimento livre e termo de explorabilidade longo. As produções principais são a casca (cortiça) para o sobreiro e o fruto para a azinheira, pinheiro manso e sobreiro, estando também associados a elevada biodiversidade e à proteção do solo, água e conservação de fauna e flora, assim como à pastagem e pastoreio em extensivo (Ferreira *et al.*, 2001; Costa *et al.*, 2008; Aronson *et al.*, 2009; Bugalho *et al.*, 2011; Pinto-Correia *et al.*, 2013).

Os dados obtidos por deteção remota têm vindo a ser usados na estimação de diversos parâmetros de densidade absoluta de povoamentos (grau de coberto, número de árvores, área basal, volume e biomassa), na monitorização dos povoamentos florestais e na deteção e avaliação de incêndios florestais, em termos de área, na quantificação de parâmetros de densidade absoluta dos povoamentos pós fogo e na sua regeneração (Huesca, *et al.*, 2008; Sousa, *et al.*, 2015; Laurin, *et al.*, 2016; Noorian, *et al.*, 2016; Gonçalves, *et al.*, 2017; Macedo, *et al.*, 2018).

Os índices de vegetação são modelos matemáticos com duas ou mais bandas multiespectrais de sensores óticos (Jones e Vaughan, 2010), que permitem estimar parâmetros da vegetação. O índice mais utilizado em estudos de vegetação é o índice de vegetação de diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), que através da região do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético permite avaliar o vigor e a densidade da vegetação (Rouse, *et al.*, 1973). Outro índice, o índice de diferença normalizada da água (*Normalized Difference Water Index*, NDWI), baseado na região do infravermelho próximo e do médio, permite obter indicação do conteúdo hídrico na vegetação (Gao, 1996), podendo ser usado como indicador de *stress* hídrico da vegetação (Jones e Vaughan, 2010). O objetivo deste estudo é a avaliação da dinâmica temporal e espacial de povoamentos de sobreiro, azinheira e pinheiro manso com os dois índices de vegetação, NDVI e NDWI.

#### IV.4.1.2. DADOS E METODOLOGIA

Neste estudo foram avaliados 30 povoamentos, 10 de sobreiro (*Quercus suber* L.), 10 de azinheira (*Quercus rotundifolia* Lam.) e 10 de pinheiro manso (*Pinus pinea* L.). Os povoamentos situam-se no Alentejo (Figura 108) e as suas características são apresentadas no Quadro 1. Os povoamentos estão localizados em clima mediterrânico e o terreno é caracterizado por pequenas variações de altitude, com uma elevação média de 200 m.

Os índices de vegetação NDVI e NDWI foram calculados para todas as parcelas para o mês de agosto de 2016, 2017, 2018 e 2019 e obtidos através da plataforma AgroMap da AgroInsider (Agroinsider, 2019). A es-

<sup>1</sup> Universidade de Évora y MED;

<sup>2</sup> Agroinsider, Lda.

colha do mês de agosto para este estudo deve-se a época do ano que oferece melhor contraste entre a componente arbórea e o andar inferior do povoamento (principalmente vegetação herbácea e arbustiva). A análise estatística foi efetuada com o teste de Wilcoxon, visto que os dados não apresentam distribuição normal.



Figura 108 – Localização dos povoamentos (A - Alcácer, B - Mora, C - Herdade da Mitra, D - Evoramonte e E - Torre de Coelheiros). (Fonte da imagem: ArcGIS web services).

**Tabela 12-Localização e características dos povoamentos**

Local (coordenada central)	Parcela	Espécie	Composição	Fase de desenvolvimento	Área (ha) [min, max]
Alcácer (38°27'30"N, 8°40'08"W)	4	Sb	Puro	Adulto	[23.9;34.5]
	2	Pm	Puro	Jovem	[15.2;17.1]
	4	Pm	Puro	Adulto	[8.4;49.3]
Evoramonte (38°44'19"N, 7°41'48"W)	3	Sb	Puro	Adulto	[11.7;17.3]
	1	Pm + Sb	Misto	Jovem	6.1
	1	Sb	Misto	Jovem	5.8
Herdade da Mitra (38°31'44"N, 8°01'00"W)	1	Sb	Puro	Adulto	1.5
	5	Az	Puro	Adulto	[1.4;8.1]
Mora (38°49'21"N, 8°04'52"W)	2	Sb	Puro	Adulto	[12.0;40.0]
	5	Az	Puro	Adulto	[17.3;24.6]
Torre de Coelheiros (38°30'37"N, 7°53'51"W)	2	Pm	Puro	Jovem	[4.9;5.6]

*Sb sobreiro, Az azinheira e Pm pinheiro manso.*

Os valores de precipitação foram obtidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), com base nos registos mensais nas estações meteorológicas mais próximas das áreas em estudo. A precipitação acumulada (Figura 109) refere-se aos valores de precipitação dos meses correspondentes ao ano hidrológico, ou seja, de outubro do ano anterior a julho do ano em estudo, que corresponde ao mês anterior à aquisição das imagens de satélite.

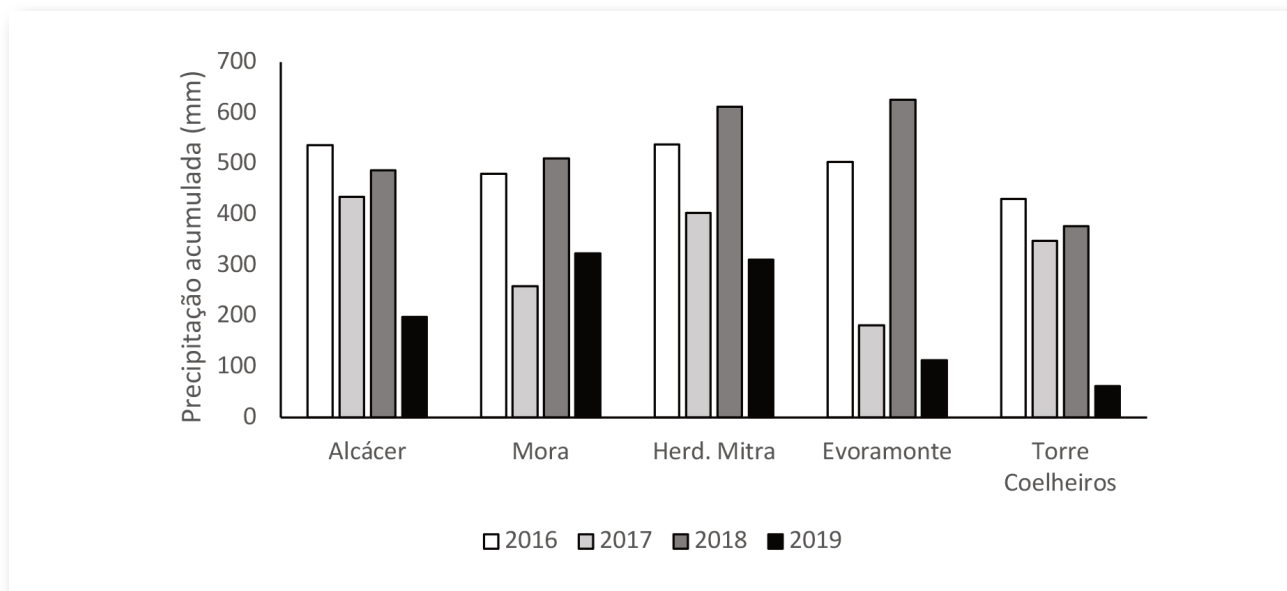


Figura 109 – Precipitação acumulada (mm) de outubro do ano anterior a julho do ano considerado, para as 5 áreas e para os 4 anos em estudo.

#### IV.4.1.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE ESTUDOS DE CASO

A análise da dinâmica temporal e espacial foi baseada nos valores médios dos dois índices de vegetação por parcela, para cada espécie, local e ano em estudo.

Com o NDVI observaram-se diferenças significativas entre espécies, locais e anos ( $p < 0.05$ ) apresentando valores sempre positivos, indicando a presença de vegetação, neste caso as copas das espécies florestais presente nas parcelas (Figura 110). Para o sobreiro e pinheiro manso os valores de NDVI são, em geral, mais elevados do que para a azinheira, indicando maior presença de clorofila nestas espécies nesta época do ano.

Os valores de NDVI mais elevados podem explicar-se, pelo menos parcialmente, com os valores da precipitação anual, maior disponibilidade de água no solo maior densidade de clorofila. De facto, vários autores (Maselli, 2004; Huang e Wang, 2010; Ramos, *et al.*, 2015; Asner, *et al.*, 2005; Schiavo, *et al.*, 2015) verificaram que existem correlações positivas entre a precipitação de inverno e os valores de NDVI. Verifica-se que são os locais com precipitação acumulada mais elevada que apresentam maiores valores de NDVI, nomeadamente para o sobreiro e para a azinheira na Herdade da Mitra. O ano de 2019 tem a menor precipitação acumulada refletindo-se nos valores de NDVI para as três espécies em estudo, destacando-se o local de Mora com os valores mais baixos de NDVI.

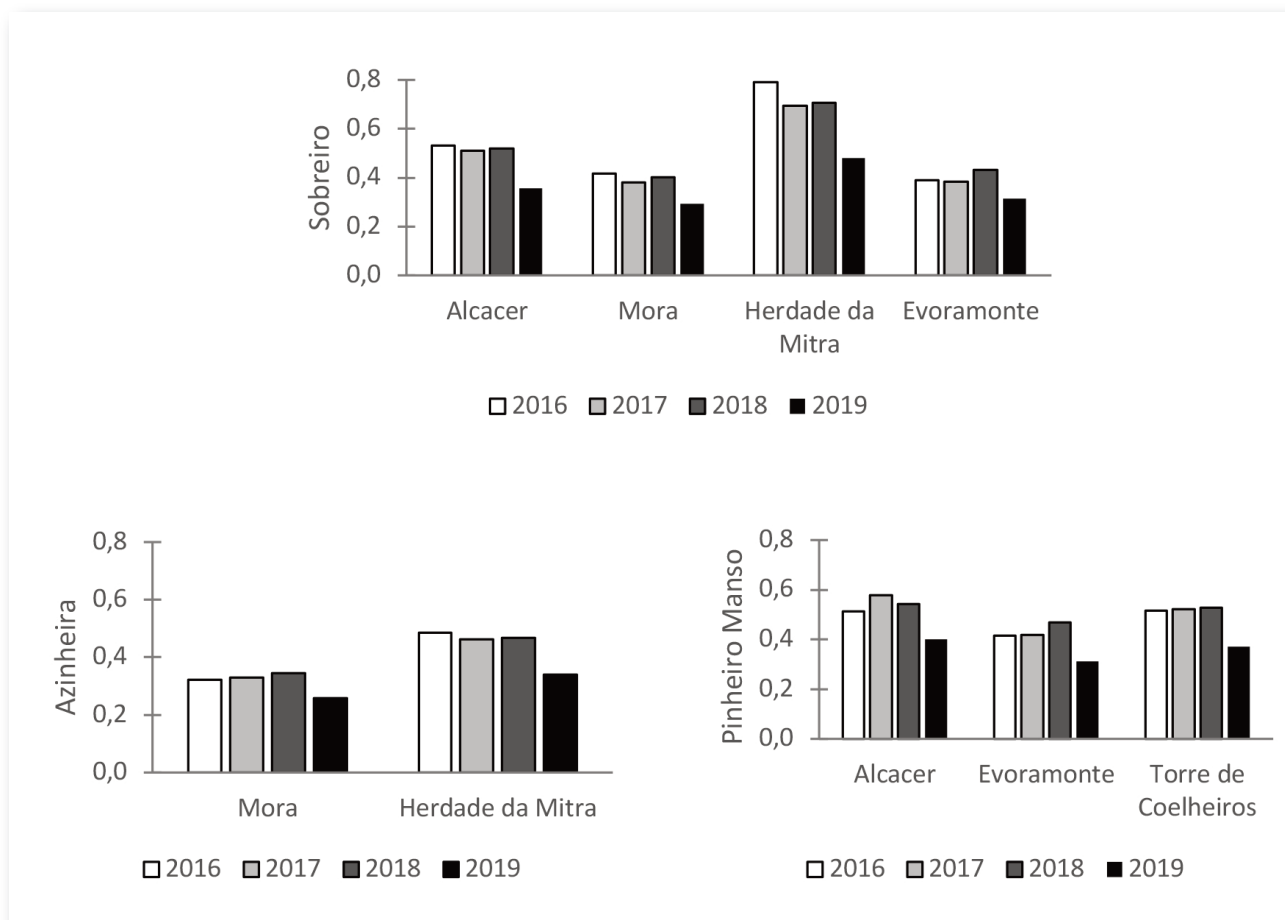


Figura 110 – Valores médios por parcela do NDVI por espécie, local e ano.

De modo semelhante, o NDWI segue as mesmas tendências do NDVI, com diferenças significativas entre espécies, locais e anos ( $p < 0.05$ ) (Figura 111). Os valores de NDWI são negativos para a azinheira (-0,07) indicando *stress* hídrico, mais acentuado em Mora do que na Herdade da Mitra, comportamento de acordo com a precipitação acumulada (maior precipitação acumulada, menor NDWI). O sobreiro tem comportamento semelhante em Mora, onde a média de precipitação acumulada é ligeiramente inferior. Em oposição, para esta espécie, na Herdade da Mitra encontram-se os maiores valores de NDWI, indicando maior teor de água nas folhas, o que poderá ser explicado pelo valor mais elevado de precipitação e, assim, maior disponibilidade de água no solo. O pinheiro manso apresenta maiores valores para os dois índices para a região de Alcácer, indicando mais clorofila e maior teor de água nas folhas.

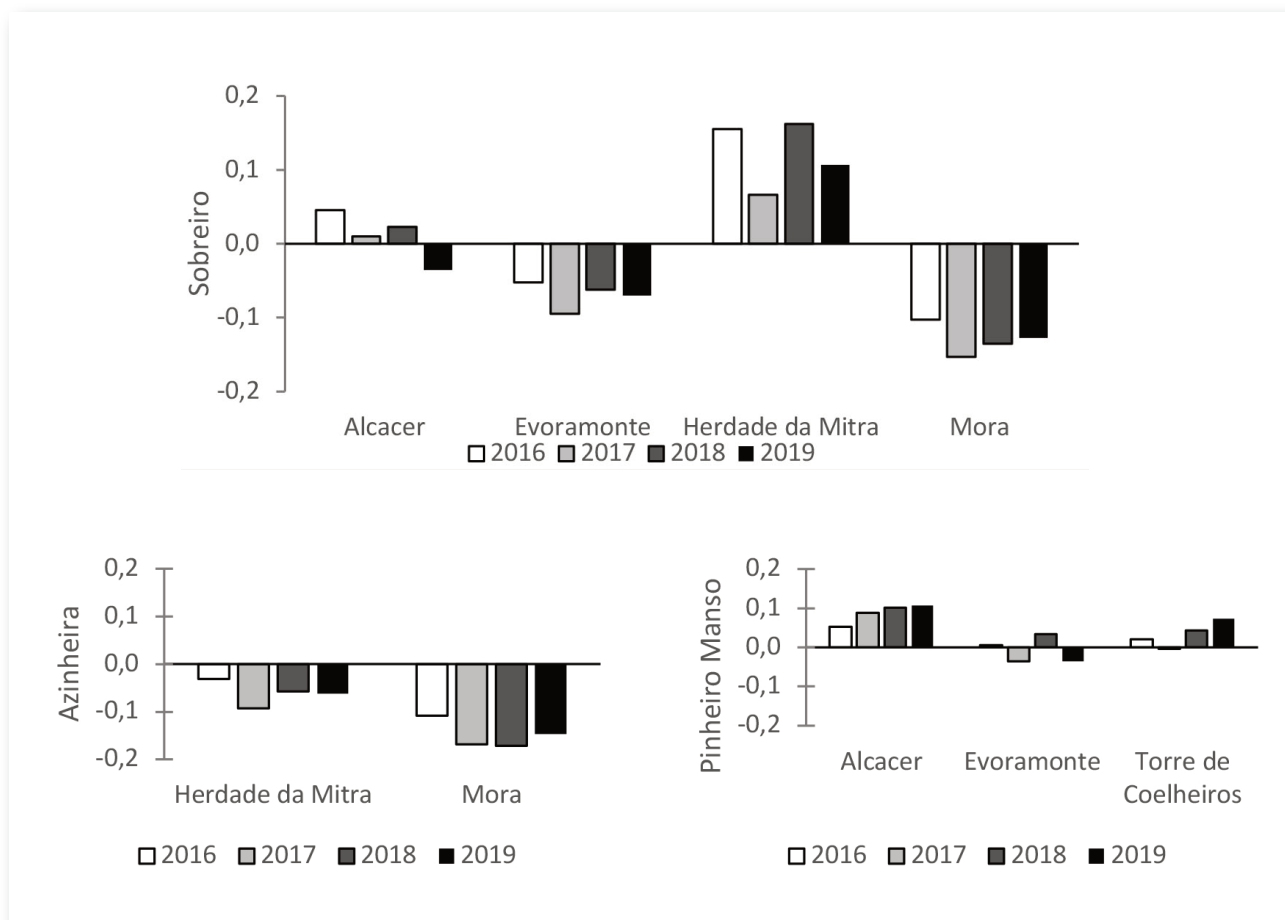


Figura 111 – Valores médios do NDWI por espécie, local e ano.

Existe uma forte correlação entre os valores de NDWI e NDVI (0.89), valores baixos correspondem a vegetação com baixo teor de água e menor quantidade de clorofila nas folhas. Para os anos com maior precipitação acumulada, 2016 e 2018, pode analisar-se maiores valores destes índices, indicando maior presença de clorofila e maior quantidade de água presente nas folhas.

Numa análise por local, verificou-se que os povoamentos com maior grau de coberto apresentavam valores de NDVI e NDWI mais elevados que outros com menor grau de coberto. Da mesma forma, a fase de desenvolvimento (jovem vs adulto) e a composição (puro vs misto) condicionam o valor dos índices, com uma tendência de valores mais elevados para povoamentos adultos.

#### IV.4.1.4. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu verificar a dinâmica temporal e espacial de povoamentos de sobreiro, azinheira e pinheiro manso, com base nos valores de dois índices de vegetação, com imagens do satélite Sentinel 2, especificamente com os índices de vegetação NDVI e NDWI.



Os índices de vexetación mostran a mesma tendencia, maior presenza de clorofila, maior teor de auga nas follas. Ambos com elevada correlación com a precipitación acumulada para o ano hidrológico anterior à data de adquisición das imáxens de satélite, indicando assim a grande importancia da dispoñibilidade de auga no solo.

O local xeográfico influencia o valor dos índices de vexetación, que poderá ter justificación com base na precipitación anual e com o tipo de solo.

Outros factores que influencian o valor dos índices de vexetación, são o grao de coberto, a composición e a fase de desenvolvemento. Quanto maior é o grao de coberto e a idade dos povoamentos mais elevados são os valores dos índices, variando consoante a súa composición.

#### **IV.4.1.5. BIBLIOGRAFIA**

AGROINSIDER (2019). Agromap - Agroinsider. Consultado em Novembro 2019. <http://agromap.agroinsider360.com/index.php>

BUGALHO, M. N., CALDEIRA, M. C., PEREIRA, J. S., ARONSON, J., PAUSAS, J. G. (2011). Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(5), 278-286. doi:<https://doi.org/10.1890/100084>

IFN6, 2013. 6º Inventário Florestal Nacional - Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental 1995, 2005, 2010. Retrieved July 18, 2018, from Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas- ICNF: <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/ifn/resource/ficheiros/ifn/ifn6-res-prelimv1-1>

GAO, B.C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

GONÇALVES A.C., SOUSA A.M., MESQUITA P.G. (2017). Estimation and dynamics of above ground biomass with very high resolution satellite images in Pinus pinaster stands. *Biomass and Bioenergy* 106: 146-154.

MACEDO F.L., SOUSA A.M., GONÇALVES A.C., SILVA J.R., MESQUITA P.A., RODRIGUES R.A. (2018). Above-ground biomass estimation for Quercus rotundifolia using vegetation indices derived from high spatial resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing* 51 (1): 932-944.

PINTO-CORREIA, T., RIBEIRO, N., & POTES, J. (2013). Livro verde dos montados. Évora: ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J. A., DEERING, D.W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Progress Report RSC 1978-1, Texas A&M University, Remote Sensing Center.



#### **IV.4.2. USO DE SENTINEL 2 EN EL ÁMBITO FORESTAL: DETERMINACIÓN DE ANOMALÍAS EN ÍNDICES ESPECTRALES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DE LOS COMBUSTIBLES FORESTALES**

**Domínguez, Francisco José<sup>1</sup>; Terrón, José María<sup>1</sup>**

##### **IV.4.2.1. INTRODUCCIÓN**

El sector forestal, como cualquier disciplina que tiene un marcado carácter territorial, cuenta con la teledetección satelital como un aliado fundamental a la hora de realizar labores de ordenación y gestión de la superficie que ocupa. Ha de entenderse la utilización de las imágenes de satélite como parte del engranaje sinérgico de las diferentes técnicas utilizadas, tanto a través de sensores remotos como las actuaciones realizadas en el campo.

Aunque la utilización de las imágenes satelitales en el mundo forestal no supone una novedad (los inicios de la teledetección satelital se remontan a los años 70), son varias las razones por las que en la actualidad son herramientas cada vez más utilizadas y que se antojan imprescindibles en la gestión de la información territorial:

- Aumento significativo de la resolución temporal, espacial y radiométrica;
- Capacidad de procesamiento de los equipos informáticos;
- Capacidad de intercambio de datos a través de la nube;
- Capacidad de procesamiento en la nube.

Si analizamos las razones anteriores, el Programa Copernicus se ha convertido en actor principal en la democratización de la utilización de las imágenes satelitales para la gestión territorial y, concretamente, en el análisis, gestión y ordenación de los recursos forestales:

- Capacidad de analizar grandes superficies;
- Información con gran densidad temporal de imágenes que permite añadir esta dimensión en el análisis;
- Resolución espacial suficiente para realizar análisis a menor escala;
- Longitudes de onda imperceptibles para el ser humano (infrarrojo, microondas);
- Posibilidad de acceso gratuito a los datos.

Con la aparición de la misión Sentinel 2 se da un gran salto cualitativo en la resolución espacial de las imágenes satelitales de acceso gratuito. Con un píxel de 10m en visible e infrarrojo cercano es posible analizar actuaciones antrópicas en el monte como pistas, cortafuegos, tratamientos selvícolas... si a esto le unimos la posibilidad de disponer de imágenes cada 5 días (2/3 días en caso de solape de las órbitas) supone una excepcional herramienta para el seguimiento de obras o trabajos forestales.

Esta excepcional combinación de resolución temporal y espacial también aporta nuevas oportunidades en el análisis del estado de la masa. En caso de afección de plagas que influyan al pigmento foliar, rápidamente podrán ser detectadas a partir de índices o combinaciones de bandas que utilicen el infrarrojo cercano, cuya reflectividad es muy elevada en la vegetación sana y muy sensible al cambio de la misma. A partir del mismo principio se pueden analizar las oscilaciones fenológicas de especies caducifolias cuyo patronaje puede resultar un indicador importante sobre los cambios en la dinámica climática a mesoescala.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura.



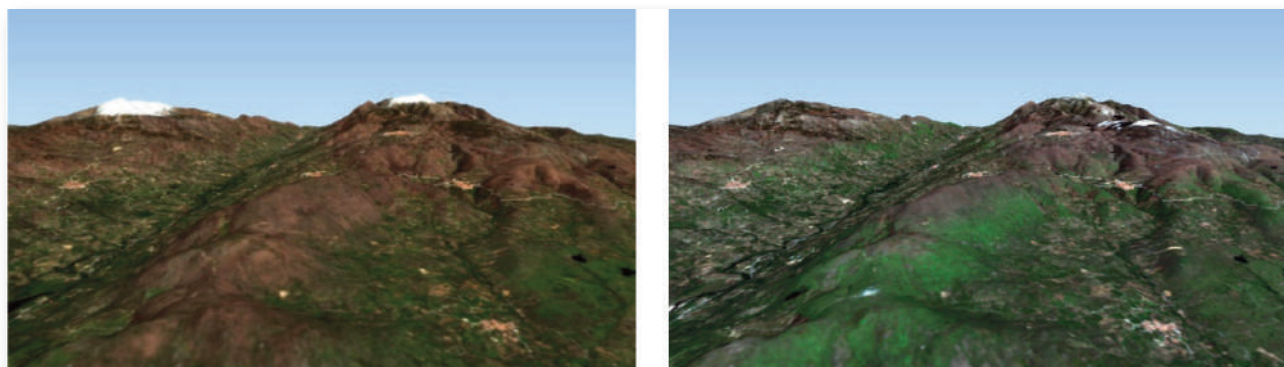


Figura 112 - Oscilación fenológica para el mes de abril de 2018 y 2019 en el Valle del Jerte (Cáceres-España).

#### IV.4.2.2. METODOLOGÍA

Las características anteriormente descritas también se pueden aplicar al ámbito de los incendios forestales. Como se puede ver en el presente capítulo, la teledetección es una herramienta muy eficaz en la planificación y análisis de los incendios forestales en las tres fases de los incendios forestales: previo al incendio, el incidente y análisis posterior al incendio.

La puesta en órbita de la constelación Sentinel 2, no solo ha aportado las ventajas intrínsecas a las características propias de la constelación, sino que han ido apareciendo un gran número de herramientas gratuitas para la visualización y el análisis de las imágenes satelitales, haciendo este tipo de tecnologías accesibles a un público mucho mayor al tradicional. Teniendo en cuenta la premisa anterior, a continuación, se aportan una serie de funcionalidades escaladas en función de la complejidad del manejo de la información captada remotamente.

En el primer escalón, nos encontramos con la posibilidad de disponer de manera inmediata (a través de visores *web* gratuitos) imágenes con antigüedad de pocos días donde se pueden interpretar con cierta facilidad las masas susceptibles de arder, infraestructuras de apoyo y zonas de oportunidad, acceso a repositorios de agua o infraestructuras vulnerables; y por supuesto permite discriminar con gran exactitud la superficie quemada, incluso establecer diferentes rangos de severidad del incendio, pero esto requiere una mayor capacitación técnica. Esto supone un gran valor añadido con el que no se podía contar hace pocos años.

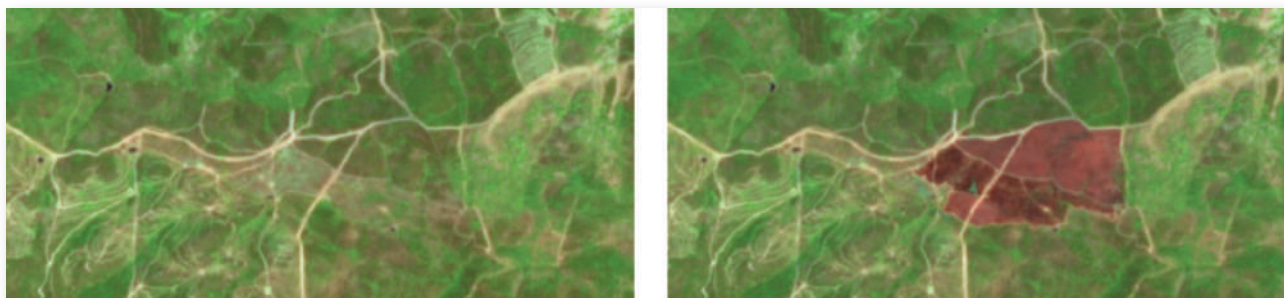


Figura 113 - En estas imágenes se pueden identificar las posibles líneas de control en un incendio. Sobre un 50% del incendio queda contenido en líneas preexistentes. En el resto se puede observar la línea de control realizada con maquinaria pesada.



A medida que avanzamos en la complejidad del análisis podemos distinguir tipos de vegetación, cobertura de la misma e incluso la especie dominante, y es que el aporte de información del infrarrojo cercano (sobre todo) o el infrarrojo de onda corta, permiten segregar con facilidad la vegetación arbórea de la arbustiva o la herbácea e incluso especies arbóreas de diferente naturaleza como pueden ser coníferas, fagáceas caducifolias y esclerófilas... Asimismo, hay diferentes vías para poder identificar que infraestructuras preventivas son aptas para ser utilizadas en caso de incendio forestal o por contrario, su mal mantenimiento puede ser un riesgo para el personal del operativo. Visto lo anterior, la utilización de las imágenes satelitales permite identificar claramente la posible evolución del incendio, el posible comportamiento del fuego, o la identificación de elementos en el territorio importantes por su vulnerabilidad o idoneidad en el establecimiento de líneas de control; en definitiva, las imágenes satelitales pueden ser una herramienta fundamental en la ayuda a la toma de decisiones en la gestión de un incendio forestal.



*Figura 114 - Con Sentinel 2 podemos diferenciar claramente las actuaciones preventivas con asociación entre línea preventiva de defensa más área preventiva de defensa (azul), idóneas para establecer una línea de control aun con fuegos de cierta intensidad, y las que solo disponen de líneas preventivas de defensa (naranja), poco recomendadas para el trabajo de personal en zonas de altas pendientes y gran acumulación de combustible. Las Hurdes (Cáceres, España).*

Uno de los principales interrogantes en el mundo de los incendios forestales es la disponibilidad de los combustibles para arder. Se trata de una ecuación compleja de resolver pues intervienen multitud de factores, entre ellos los estrictamente meteorológicos, de gran variabilidad espacial y temporal con grandes dificultades para la modelización a microescala (la escala en el ámbito de la planificación y las operaciones en incendios forestales). En este aspecto las imágenes satelitales pueden ser utilizadas para interpretar la cantidad de humedad de que disponen los combustibles vivos, y por ende a la disponibilidad de los mismos para arder. Esta humedad en la vegetación está vinculada al balance hídrico, las especies y al momento fenológico de las mismas.

Otra vez es la franja del infrarrojo la que nos puede aportar información sobre este aspecto, bien a través del verdor foliar y su respuesta espectral en la banda del infrarrojo cercano o a partir de la relación entre el agua presente en la masa foliar y la absorción energética en la banda del infrarrojo de onda corta. A partir de

las bandas que ocupan estas regiones espectrales, se van a obtener índices que nos permiten interpretar esta disponibilidad de los combustibles forestales para arder. En este capítulo se han analizado dos de los numerosos índices disponibles como son:

$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$	$\text{NDVI} = \frac{\text{B8} - \text{B4}}{\text{B8} + \text{B4}}$
$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$	$\text{NDWI} = \frac{\text{B8A} - \text{B11}}{\text{B8A} + \text{B11}}$

Figura 115 - Fórmula de los índices NDVI y NDWI (en algunas publicaciones NDMI).

Existen artículos científicos (Yebra, M et al, 2013) que referencian esta relación entre el contenido de humedad del combustible (FMC en inglés) con la probabilidad de inicio y la capacidad de propagación de los incendios forestales, siendo la teledetección una herramienta fundamental para la realización de análisis de gran superficie, aunque no están exentas de ciertas dificultades que aporta la propia naturaleza de los combustibles forestales:

Estructura de la masa. Los sensores remotos captan la información reflejada por la superficie con una unidad mínima (pixel) con un tamaño determinado. Esto implica que dentro de esa unidad mínima se incluyan superficies de muy diferente naturaleza: desde una cobertura total de zona arbolada monoespecífica a otras con cobertura mixta donde el suelo mineral tenga un porcentaje de cobertura importante; y no es esta una realidad circunstancial: la irregularidad de factores como la cobertura o la densidad foliar de las formaciones vegetales es el patrón normal en la naturaleza, incluso en explotaciones forestales intensivas con marco regular de plantación. Este es uno de los principales limitantes a la hora de establecer una clasificación normalizada en el monitoreo de los diferentes índices que aportan información sobre la humedad de los combustibles forestales, máxime en marco forestal como el suroeste de la Península Ibérica con predominancia de monte mediterráneo con diversos grados de antropización y degradación, junto con plantaciones (extensas en algunas zonas) de especies forestales foráneas de mayor tasa de crecimiento.

Materia seca. La presencia de materia seca en la masa foliar es otro de los factores que aportan incertidumbre a la hora de modelizar el porcentaje de humedad del combustible forestal. Aspectos como la sanidad vegetal o la edad de la masa pueden hacer variar la cantidad de materia muerta en la superficie foliar, modificando a su vez la reflectividad tanto en la banda del infrarrojo cercano como el infrarrojo de onda corta.

Aun con las dificultades descritas, el propio análisis de los diferentes índices calculados a partir de las regiones espectrales nombradas anteriormente, puede aportar una gran información sobre la distribución territorial de las diferentes masas y la aproximación al nivel de disponibilidad de las mismas. Esta es una información que también se puede obtener de herramientas gratuitas basadas en el *webmapping*. Ahora bien, en el caso de querer calcular medidas estadísticas de parcelas concretas o regiones de muestreo, es recomendable realizar dichos cálculos a partir de la información original ofrecida por la ESA, máxime cuando

desde la propia *web* de la ESA podemos descargar las imágenes corregidas atmosféricamente (L2A), donde se minimiza la influencia de los diferentes aerosoles presentes en la atmosfera. Esto requiere trabajos de mayor complejidad que implican una formación específica en herramientas de sistemas de información geográfica.

Una vez que no podemos establecer rangos normalizados dada la diversidad de estructuras en el territorio, debemos establecer otros procedimientos que nos ayuden a entender el comportamiento de los índices espectrales. Esto implica seguir escalando en la complejidad de los análisis realizados. En este sentido, uno de los caminos a utilizar es el establecimiento de comparativas con valores estadísticos concretos o con años precedentes en los que se conoce el comportamiento del fuego.

Existen fórmulas relativamente sencillas para la realización de este tipo de análisis comparativo, a través aplicaciones basadas en *webmapping* gratuitas que permiten visualizar estos índices, pudiendo comparar fechas de años diferentes o la realización de gráficos de la evolución de un área determinada, sin embargo, en comprobaciones realizadas, se aprecian ciertos valores anómalos en este tipo de graficas que invitan a “fabricarse” la propia información a partir de los datos brutos ofrecidos por la ESA.

Además, si lo que se pretende es el análisis de un territorio a escala regional (en España los operativos de lucha contra incendios forestales trabajan a escala de comunidad autónoma), nos encontramos con el problema del procesamiento de datos: para una región como Extremadura es necesario procesar alrededor de 500 cuadrículas UTM para establecer el valor representativo o de referencia del índice requerido (NDVI, NDWI...). Por ello, se hace necesario acudir al procesamiento en la nube como herramienta que permita analizar grandes colecciones de imágenes y grandes superficies. En este caso se ha utilizado Google Earth Engine (GEE), una plataforma que ofrece la base de datos completa de las diferentes constelaciones Sentinel junto con las principales herramientas para el análisis de imágenes satelitales multiespectrales. El gran inconveniente de este sistema es que hay que tener conocimientos de programación para poder realizar este tipo de análisis.

#### **IV.4.2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este apartado se van a exponer los resultados del análisis de comparar el los índices NDVI y NDWI de 2019, obtenidos a partir del satélite Sentinel 2, con los valores que se han considerado representativos del histórico del mismo satélite para la Comunidad Autónoma de Extremadura, España. Esto ha sido posible gracias al potencial de procesamiento y almacenamiento que ofrece Google Earth Engine, obteniendo resultados instantáneos sin necesidad de procesar alrededor de 400GB de imágenes.

Tal y como se ha comentado a lo largo del documento, a falta de unas condiciones mínimas que garanticen datos normalizados de los diferentes índices, se ha procedido a establecer las anomalías respecto a los valores determinados como normales en un doble sentido:

- Valores de anomalía para cada pixel del territorio analizado;
- Comparativa de áreas testigos respecto a los valores normales para cada uno de los años.

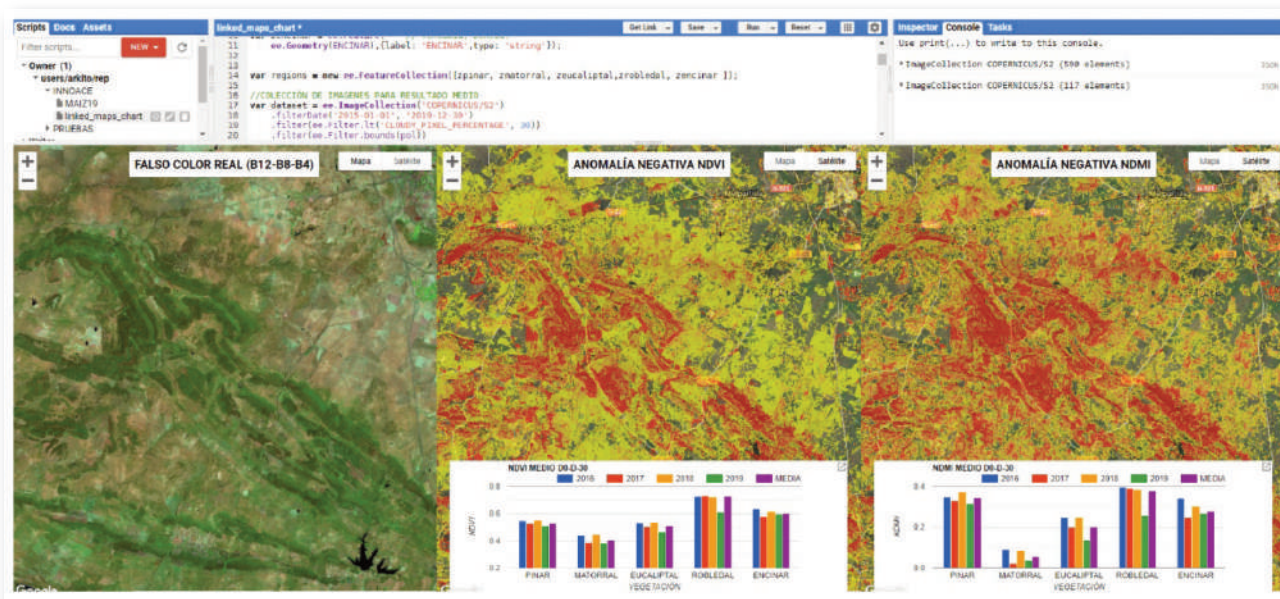


Figura 116 - Ejemplo del trabajo con GEE. Mapa de anomalía de los índices NDVI y NDWI para una zona de Sierra de San Pedro (Extremadura, España) para el mes de julio. El número de imágenes utilizadas para estos cálculos supera las 650. Fuente: GEE, elaboración propia.

La principal característica, lógica, es la dependencia de las condiciones y registros climáticos del año hidrometeorológico, los meses previos al periodo analizado o el comportamiento térmico del verano (cabe recordar que 2016 y 2017 son los años más cálidos desde que hay registros). Hay un patrón general bastante claro, donde en los años 2017 y 2019 (balance hídrico bastante pobre en cantidad e irregularidad) se observan anomalías negativas marcadas, mientras que en 2016 y 2018, con primaveras excepcionalmente lluviosas, se observan anomalías positivas.

Pero a medida que se profundiza en el análisis se pueden sacar una serie de aspectos a destacar:

- Con el avance del periodo estival, el descenso de los índices referenciados se estabiliza, minimizando la anomalía (cercanía al nivel base). En cualquier caso, las comparativas con otros años, aun con distribuciones similares, plantean significativas diferencias en función del comportamiento del balance hídrico. En el siguiente gráfico se observa la evolución en este sentido de una parcela testigo en una zona de matorral de solana en el entorno del Parque Nacional de Monfragüe. El descenso en el índice NDWI es más pronunciado en la parte inicial del periodo estival, estabilizándose en la parte media del verano. Se puede apreciar como al final del verano, con la aparición de las primeras precipitaciones y un aumento de la humedad relativa media, el matorral recupera parte de la humedad perdida en la fase más cruda del estío. Esa recuperación se acentúa en el mes de octubre (no representado en el gráfico), tras lluvias significativas (más de 40mm a finales de septiembre en la EMA CC105 Mirabel, de la Red de Asesoramiento al Regante de Extremadura) hace que el índice NDWI alcance niveles de mediados de mayo.

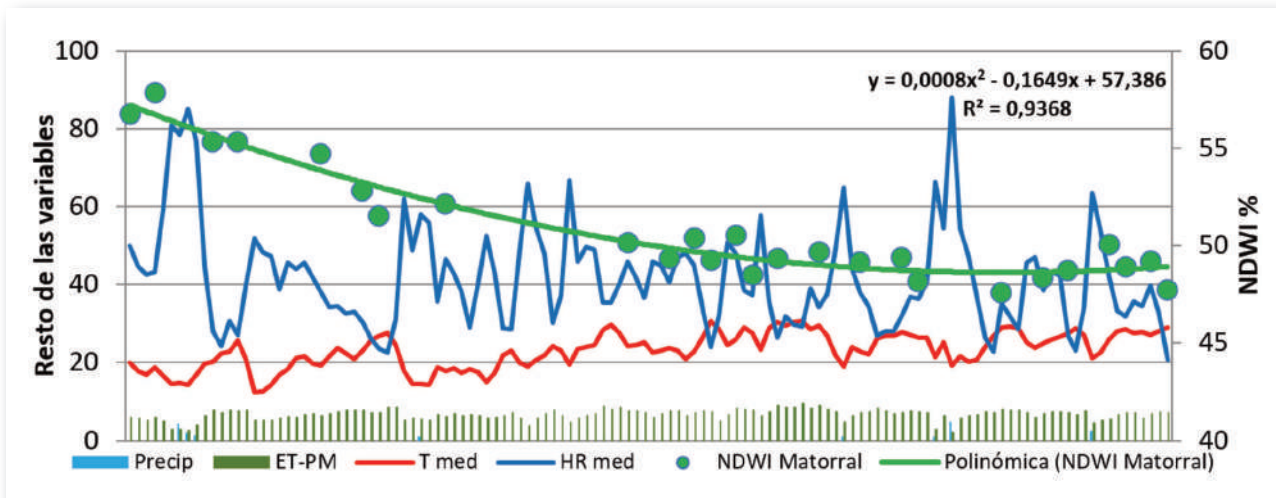


Figura 117 – Evolución temporal (mayo-octubre) del índice NDWI (en porcentaje entre máximo 1 y mínimo -1) en zona de matorral de Monfragüe (Cáceres, España). Desarrollo típico de este tipo de índices espectrales en el matorral. En caso de lluvias intensas, se han observado recuperaciones significativas del índice.

- Las anomalías en zonas de pastizal solo tienen sentido (en el ámbito de los incendios forestales) al inicio del periodo estival, siendo un gran indicativo para el seguimiento del agostamiento de los pastos. Desde finales de primavera el pasto se convierte en combustible fino muerto, muy sensible a las condiciones ambientales (los llamados combustibles de 1 hora). Las técnicas de detección remota permiten identificar con facilidad zonas de oportunidad en caso de incendio forestal como son los vallicares y bonales, donde se mantienen las especies herbáceas verdes (mayor humedad) y por lo tanto fácilmente identificables tanto a partir de NDVI como NDWI.
- A pesar de tener un marco territorial relativamente homogéneo, se puede apreciar cierta zonificación de los registros de anomalías de los índices. El régimen de precipitaciones en verano obedece casi exclusivamente a la aparición de fenómenos tormentosos mucho más comunes en las zonas más continentalizadas. Se ha podido constatar, a lo largo del periodo estival de 2019, como en las zonas más orientales de Extremadura (Villuercas, Siberia), con una mayor recurrencia de episodios tormentosos, el mapa de anomalías de los índices NDWI y NDVI ha alcanzado niveles más bajos que para zonas de similares características de otras zonas de la región.
- Es relativamente normal que algunas especies de matorral (*Genista hirsuta*, *Cistus salvifolia*, *Lavandula stoechas*...) sufran un agostamiento o muerte de gran parte de la masa foliar, lo que la convierte en formaciones que facilitan sobremanera la propagación gracias a la gran acumulación de materia seca en la parte aérea de la planta. Cuando encontramos años con déficit hídrico acentuado, esta circunstancia puede extenderse a otro tipo de formaciones arbustivas e incluso arbóreas. Es especialmente significativo el caso de algunas especies arbóreas marcescentes (*Quercus pirenaica*, fundamentalmente) que en años de balance hídrico negativo sufren un estrés hídrico muy significativo, con la aparición de materia seca en la masa foliar por el déficit de savia que es capaz de procesar el árbol. Esto transforma este tipo de formaciones, donde las transiciones aéreas de un incendio son bastante raras, a un tipo de combustible con mayor cantidad de materia seca en la masa foliar, y por lo tanto, mucho más disponible para dar continuidad a los fuegos de superficie. Estas circunstancias son fácilmente identificables analizando los mapas de anomalía de los índices espectrales analizados. De hecho, este año 2019 ha sido especialmente significativo, y la prueba de ello la tenemos tanto en el gráfico del área testigo del robleal de la Figura 116, donde tanto NDVI como NDWI tienen valores excepcionalmente bajos, como en las siguientes imágenes donde se puede constatar el estrés hídrico que han sufrido los robleales de *Quercus pyrenaica* en este año 2019.



Figura 118 - Incendio en zona de robleal el 23/07/2019 en Cilleros (Cáceres, España). Se observa como el robleal empieza a perder el pigmento foliar por estrés hídrico. El año 2019 ha sido especialmente desfavorable. Fuente: AT BRIF.



Figura 119 - Cálculo de severidad de incendio forestal calculado a partir de imágenes de Sentinel 2 en Villanueva de la Vera el 10/09/2019 (Cáceres, España). Se observa en la parte centro-oeste, alta severidad en zonas de robleal. Estas circunstancias solo se observan en condiciones de alto estrés hídrico.

#### IV.4.2.4. CONCLUSIONES

Vistas las características y las capacidades que tienen las imágenes de satélite, es imposible no incluirlas como una herramienta más al sistema de manejo y gestión de los incendios forestales. A continuación, se enumeran las principales conclusiones obtenidas de los trabajos realizados:

- Te permiten localizar e identificar los elementos en el territorio que pueden influenciarte en un incendio forestal en un marco temporal de casi tiempo real, incluida la delimitación de las áreas quemadas;
- La utilización del infrarrojo cercano y de onda corta te permite discriminar de forma más exhaustiva la ocupación del territorio;
- Con el cálculo de índices espectrales donde la región del infrarrojo es clave, se pueden obtener relaciones con la disponibilidad de los combustibles y el comportamiento del fuego.

Estos tres puntos carecen de especial validez si no tenemos en cuenta la revolucionaria aparición de la constelación Sentinel 2, que ha sabido solventar las principales deficiencias de misiones de características similares, aportando una nueva dimensión en la utilización de las imágenes de satélite para la gestión del territorio:

- Gran salto cualitativo en las diferentes resoluciones (radiométrica, espacial y temporal) que permiten realizar análisis que anteriormente no eran posibles;
- Amplio rango de herramientas que permiten utilizar las imágenes satelitales desde usuarios básicos, simplemente visualizando la parte visible del espectro electromagnético, a perfiles más avanzados que permiten la configuración de herramientas hechas *ad-hoc*;
- Con la computación en la nube se abren un gran abanico de posibilidades impensables desde la visión tradicional del tratamiento de imágenes en escritorio.

#### **IV.4.2.5. PERSPECTIVAS FUTURAS**

En la actualidad, la gran mayoría de los operativos contra incendios utilizan el FWI como base para el establecimiento de los diferentes niveles de riesgo potencial para los incendios forestales. Este sistema, incluye un subíndice para identificar los efectos de la sequía en los combustibles (Drought code), basado únicamente en las precipitaciones y temperaturas en días precedentes. Una de las perspectivas más interesantes para los índices espectrales es poder incluirlos dentro de los cálculos de los niveles de riesgo. Con una mayor perfección de los modelos de predicción para la identificación del riesgo de incendio nos permitirá afrontar con mayor seguridad cuestiones tan cotidianas como dimensionar el operativo en la movilización a un incendio forestal, el establecer limitaciones de actividades de riesgo para el inicio de un incendio forestal, flexibilidad en los calendarios de declaración de épocas de peligro o establecer condiciones extraordinarias en los operativos.

Por otro lado, es cada vez más común la utilización del fuego prescrito como herramienta preventiva, para entrenamiento del personal o con carácter experimental (algunas de estas de alta intensidad) en ambientes que cada vez se parecen más a las condiciones reales de un incendio. Es por tanto fundamental el conocimiento de las condiciones del combustible con el fin de poder realizar la quema con éxito y con un marco de seguridad que garantice que el fuego no exceda los límites preestablecidos. El poder incluir los índices espectrales en las ventanas de prescripción permitiría poder afinar más en este tipo de limitaciones garantistas a la vez que daría una gran información de cómo se comportan estos índices espectrales en condiciones de fuego real.

Aun así, hay que ser consciente de la heterogeneidad del medio natural en el que aparecen los incendios forestales como un elemento más del territorio. Esto aporta un grado de incertidumbre que la modelización aun no es capaz de solventar, por ello debemos ser conscientes de que tenemos una herramienta muy válida para un sistema de apoyo a la toma de decisiones que debe ir avanzando para limar los recelos que aún se encuentran en su utilización práctica en el día a día.

#### **IV.4.2.6. BIBLIOGRAFÍA**

- CHUVIECO E., AGUADO I., JURDAO S., PETTINARI M. L., YEBRA M., SALAS J., HANTSON S., DE LA RIVA J., IBARRA P., RODRIGUES M., ECHEVERRÍA M., AZQUETA D., ROMÁN M. V., BASTARRIKA A., MARTÍNEZ S., RECONDO C., ZAPICO E., MARTÍNEZ-VEGA F. J. (2012) Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire* 23, 606-619. <https://doi.org/10.1071/WF12052>
- GITAS IOANNIS Z., SAN-MIGUEL-AYANZ JESÚS, CHUVIECO EMILIO, CAMIA ANDREA (2014) Advances in remote sensing and GIS applications in support of forest fire management. *International Journal of Wildland Fire* 23, 603-605. <https://doi.org/10.1071/WF14117>
- YEBRA, M. et al. (2013). A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment* Volume 136, Pages 455-468. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.029>





#### **IV.4.3. AS IMAGENS DE SATÉLITE NA MONITORIZAÇÃO DAS PASTAGENS E NO APOIO À GESTÃO DO ECOSISTEMA MONTADO**

**Serrano, João M.<sup>1</sup>; Paixão, Luís<sup>1</sup>; Terrón, José María<sup>3</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup>**

##### **IV.4.3.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS**

O montado é um sistema de produção misto (agro-silvo-pastoril) característico da região Mediterrânica. A produção animal extensiva neste sistema baseia-se no consumo de pastagens permanentes de sequeiro. Estas pastagens desenvolvem-se a partir de setembro-outubro, após as primeiras chuvas, atravessam um período de fraco crescimento durante os meses de dezembro a fevereiro (devido às baixas temperaturas), a que se sucede o pico de produção primaveril (entre abril e maio), devido à conjugação favorável da humidade no solo com a subida da temperatura do ar. A partir de junho, a escassez de precipitação, a consequente descida dos teores de água no solo e a subida acentuada das temperaturas, leva à senescência das plantas e ao fechar do ciclo, com uma quebra abrupta da produtividade. A qualidade da pastagem, caracterizada por altos teores de proteína bruta e baixos teores de fibra, tende a diminuir ao longo do ciclo vegetativo levando, no final da primavera, a um período crítico que exige a suplementação alimentar dos animais com forragens conservadas ou com alimento concentrado. Este padrão de desenvolvimento é típico das pastagens na região quando a distribuição da precipitação acontece de forma regular nas estações de outono, inverno e primavera. No entanto, a irregularidade inter-anual da precipitação pode levar a padrões diferentes. Por exemplo, anos com primavera chuvosa permitem a manutenção durante mais tempo de teores de humidade no solo, o que se reflete positivamente na produtividade e na qualidade da pastagem, atrasando a necessidade de suplementação alimentar dos animais.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de precipitação acumulada (em mm) por estação do ano, em cada ano agrícola considerado neste estudo (registos da Estação Meteorológica da Mitra, da Universidade de Évora). É evidente a variabilidade inter-anual da distribuição da precipitação, característica do clima Mediterrânico: o ano de 2015/2016 apresentou uma distribuição regular da precipitação entre o outono, o inverno e a primavera; no ano de 2016/2017 a precipitação concentrou-se especialmente no outono, apresentando-se o inverno e a primavera relativamente secos; no ano de 2017/2018 a precipitação concentrou-se especialmente no inverno e na primavera.

**Tabela 13- Precipitação acumulada (mm) por estação do ano, em cada ano agrícola considerado (registos da Estação Meteorológica da Mitra, Universidade de Évora).**

Ano agrícola	Outono	Inverno	Primavera	Verão
2015/2016	116,3	206,7	123,6	9,2
2016/2017	183,5	118,7	48,1	8,6
2017/2018	130,5	354,5	178,4	12,8

A disponibilidade de técnicas e tecnologias eficientes na monitorização de parâmetros relacionados com a qualidade da pastagem é essencial, especialmente no cenário de incerteza climática atrás descrito. A avaliação convencional dos teores de humidade no solo exige um trabalho exaustivo de recolha de amostras de solo e posterior análise laboratorial. Por outro lado, o método tradicional para determinação da qualidade da pastagem baseia-se no corte de amostras no campo seguido da determinação laboratorial de vários parâmetros (entre eles a PB e o NDF). Este processo é, no entanto, moroso, exigente em mão-de-obra e caro, incompatível com uma gestão racional das explorações agrícolas.

<sup>1</sup> Universidade de Évora y MED; <sup>2</sup> Agroinsider, Lda; <sup>3</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura.

A utilização de sensores próximos para determinação da humidade do solo (normalmente sondas TDR-“Time Domain Reflectometry”) é uma possibilidade expedita mas que requer a prévia instalação de tubos de plástico no solo, dentro dos quais são realizadas as medições com as sondas a diferentes profundidades, e a deslocação frequente de técnicos ao campo para realizar as medições. Por outro lado, a monitorização da qualidade da pastagem tem merecido um grande desenvolvimento na última década, nomeadamente, através de sensores óticos como o “OptRx®” ou o “Crop Circle™”, montados em plataformas móveis. A medição de diferentes bandas de radiação permite o cálculo de índices diversos, especialmente o NDVI (“Normalized Difference Vegetation Index”), fortemente correlacionado com os teores de clorofila e, portanto, com o vigor vegetativo das plantas. No entanto, esta abordagem exige também deslocações frequentes ao campo para captar a evolução do estado vegetativo da pastagem e, conseqüentemente, da sua qualidade.

A disponibilidade de acesso a imagens de satélite representa atualmente uma abordagem tecnológica expedita e regular, com resolução espacial e temporal muito interessante. Vários autores publicaram trabalhos com aplicação da deteção remota (DR) à monitorização das culturas: o NDVI, obtido por DR (equação 1), na monitorização da produtividade e da qualidade das culturas, enquanto o NDWI, obtido por DR (equação 2), na monitorização da humidade do solo ou da cultura.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

$$\text{NDVI} = \frac{\text{B8} - \text{B4}}{\text{B8} + \text{B4}}$$

Onde B4 e B8 são bandas de reflectância com comprimentos de onda de 665 nm e 842 nm, respetivamente, obtidas a partir de imagens de satélite (Sentinel-2).

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

$$\text{NDWI} = \frac{\text{B8A} - \text{B11}}{\text{B8A} + \text{B11}}$$

Onde B8A e B11 são bandas de reflectância com comprimentos de onda de 865 nm e 1610 nm, respetivamente, obtidas a partir de imagens de satélite (Sentinel-2).

Em face do exposto, este estudo teve por objetivo avaliar o potencial das imagens de satélite para monitorizar a qualidade das pastagens e a humidade na camada superficial do solo no ecossistema montado.

#### **IV.4.3.2. METODOLOGIA**

O ensaio decorreu entre 2016 e 2018 numa parcela de montado de azinho de 2,3 ha situada na Herdade da Mitra (Universidade de Évora), em Valverde (Évora). Foram identificados 12 pixéis de amostragem do “Sentinel-2” (áreas de 10m x 10m, sem árvores), onde se procedeu mensalmente, durante o período de primavera, à recolha de amostras de pastagem e à extração dos valores dos índices “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) e “Normalized Difference Water Index” (NDWI). A extração dos índices foi da responsabilidade da empresa “AgroInsider”. Entre janeiro de 2017 e junho de 2018 foram também registados mensalmente os valores da humidade na camada superficial do solo (0-0,20m).

A amostragem da pastagem consistiu na determinação da produtividade, em termos de matéria seca (MS,  $\text{kg ha}^{-1}$ ), e da qualidade, baseada nos teores de humidade (HP, %), de proteína bruta (PB, % da MS) e de fibra (NDF, “Neutral Detergent Fiber”, % da MS). Estes parâmetros foram obtidos após análises laboratoriais, segundo protocolos *standard*, das amostras compósitas de pastagem recolhidas mensalmente entre fevereiro ou março e junho dos anos 2016, 2017 e 2018. Foi ainda calculado o rácio NDF/PB, identificado como índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP).

Em dezembro de 2016 foram instalados 12 tubos de plástico (em PVC), um em cada área de amostragem. A humidade do solo (HS, %) foi medida por sondas TDR, mensalmente, entre janeiro de 2017 e junho de 2018. Neste estudo, foram consideradas as medições de humidade na camada de solo de 0-0,20 m, tendo em conta a profundidade normalmente explorada pelas raízes das pastagens.

A empresa “AgroInsider” procedeu à extração de imagens óticas de satélite (Sentinel-2) para obtenção das bandas de reflectância necessárias ao cálculo dos índices NDVI (equação 1) e NDWI (equação 2). Foram considerados os registos, sem perturbação de nuvens, temporalmente mais próximos de cada data da recolha das amostras de pastagem e de humidade do solo.

#### IV.4.3.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS NO CASO DE ESTUDO

As Figuras 120 a125 mostram a relação entre as variáveis medidas no campo (por sensores próximos, HS, ou resultado de análises laboratoriais, HP, PB, NDF, IDQP) e os índices de vegetação obtidos a partir das imagens de satélite (NDVI e NDWI).

Todas as correlações do NDVI com os parâmetros de qualidade da pastagem (Figuras 120 e 121) foram significativas, diretas com a PB e a HP e inversas com o NDF e com o IDQP, o que confirma o potencial dos sensores óticos para caracterizar o estado das culturas, o que pode ser atribuído à absorvância da radiação visível pela clorofila, a qual é abundante na vegetação verde.

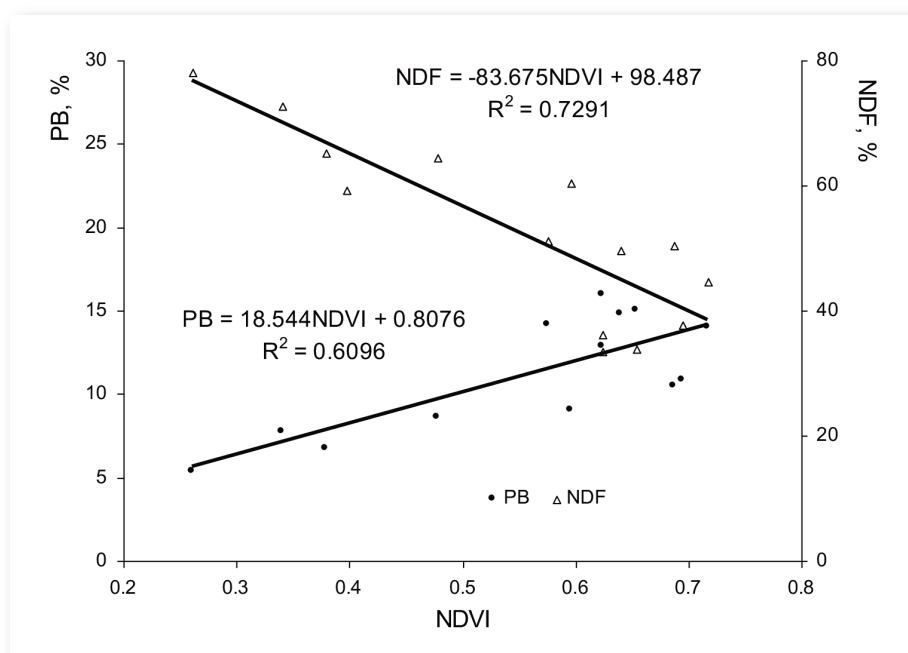


Figura 120 - Relação entre o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), a proteína bruta (PB) e a fibra (NDF) da pastagem.

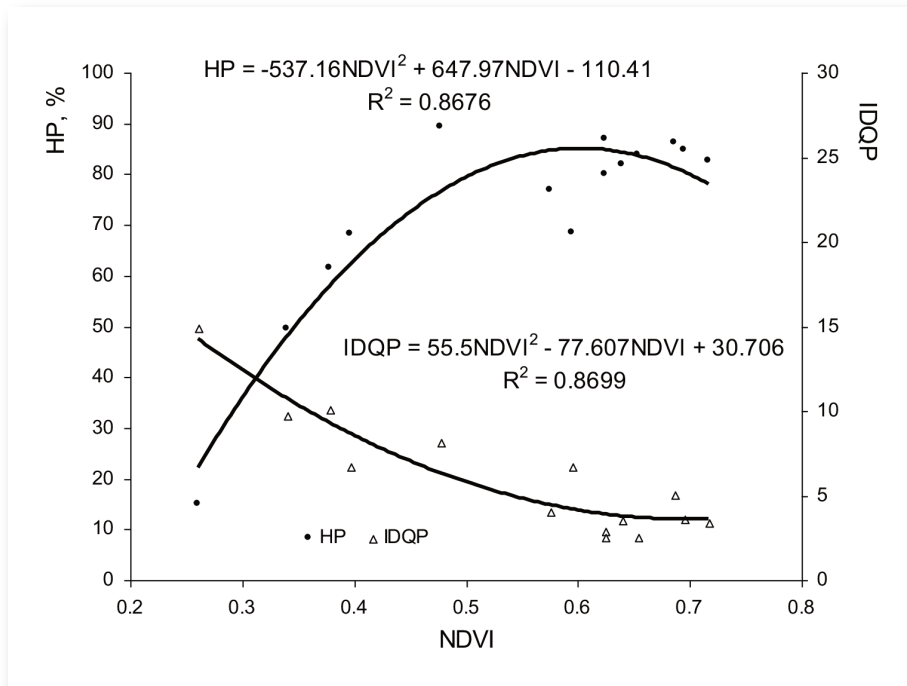


Figura 121 - Relação entre o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), a humidade (HP) e o índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP).

Da mesma forma, todas as correlações do NDWI com os parâmetros de qualidade da pastagem (Figuras 122 e 123) foram significativas, diretas com a PB e a HP e inversas com o NDF e com o IDQP.

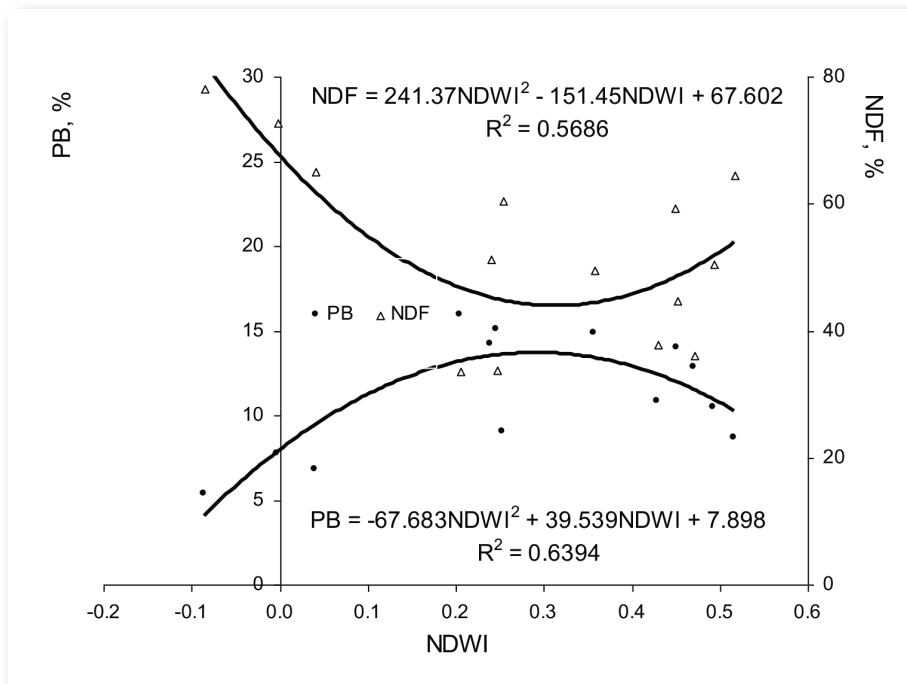


Figura 122 - Relação entre o “Normalized Difference Water Index” (NDWI), a proteína bruta (PB) e a fibra (NDF) da pastagem.

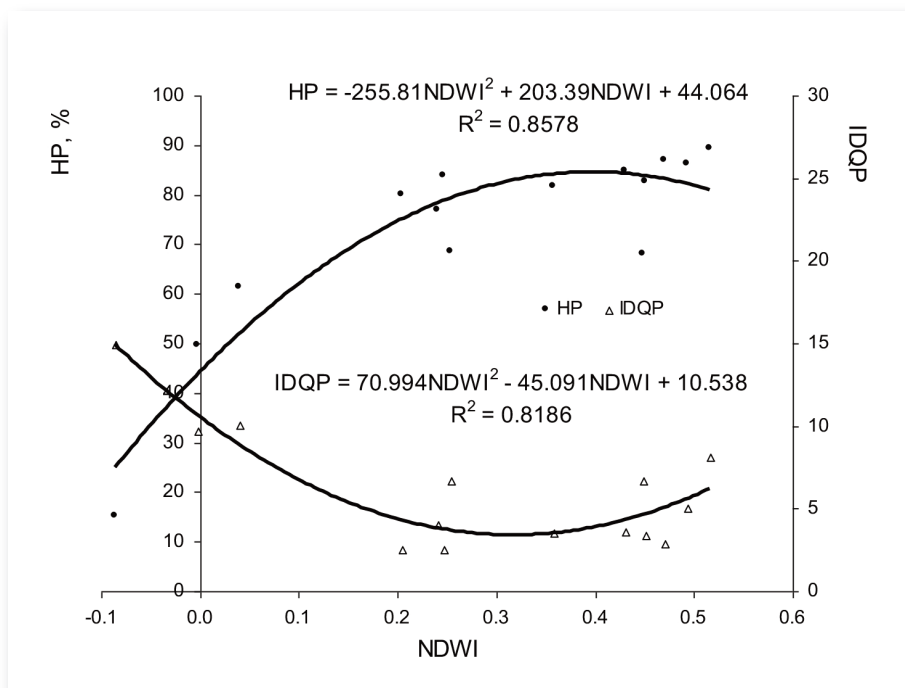


Figura 123 - Relação entre o “Normalized Difference Water Index” (NDWI), a humidade (HP) e o índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP).

A forte correlação entre estes dois índices (NDVI e NDWI) foi também demonstrada neste estudo (Figura 124), encontrando justificação no facto do NDVI se correlacionar com os teores de clorofila das plantas e o NDWI se correlacionar com a HP, ambos parâmetros indicadores de qualidade.

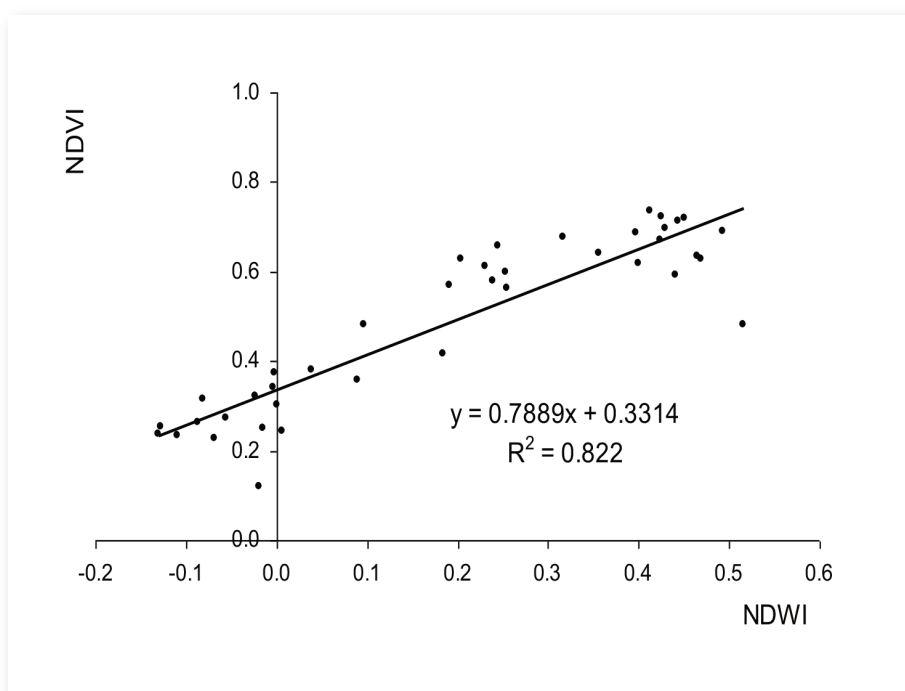


Figura 124 - Relação entre o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) e o “Normalized Difference Water Index” (NDWI).

A Figura 125 ilustra a correlação significativa entre o NDWI e a humidade do solo (HS), o que está em linha com o princípio de obtenção deste “Water Index” e representa uma possibilidade importante, especialmente no apoio à gestão de sistemas que permitam a introdução de equipamentos móveis de rega com vista a alargar o período de maior vigor vegetativo das pastagens.

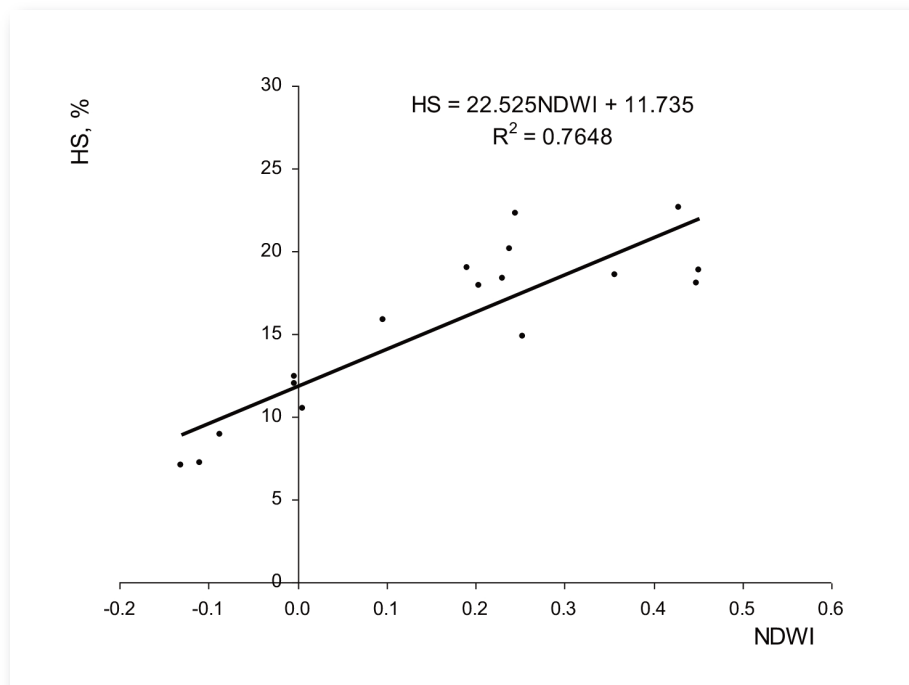


Figura 125 - Relação entre o “Normalized Difference Water Index” (NDWI) e a humidade na camada superficial do solo (HS).

#### IV.4.3.4. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS

As pastagens são a base da alimentação animal nos sistemas de produção extensivos integrados no ecossistema Montado. A sazonalidade e a variabilidade climática inter-anual da região Mediterrânica levam a que cada ano seja diferente em termos de evolução do ciclo vegetativo das pastagens de sequeiro. Aspeto acentuado pela complexidade resultante das interações entre o solo, a pastagem, as árvores e os animais. É neste contexto, altamente imprevisível, que o gestor agrícola tem que tomar decisões de gestão da pastagem e do pastoreio.

Este estudo demonstrou o interesse dos índices NDVI e NDWI obtidos a partir de imagens de satélite (Sentinel-2). Estes índices apresentaram correlações significativas com indicadores de qualidade da pastagem (HP, PB, NDF e IDQP). Os resultados obtidos, por um lado, abrem boas perspetivas para empresas de base tecnológica fornecerem um serviço de apoio ao agricultor em termos de oportunidade/necessidade de suplementação alimentar dos animais com base na monitorização da qualidade da pastagem e, por outro lado, reforçam o impacto positivo que regas pontuais e inteligentes realizadas na fase crítica entre o final da primavera e o início do verão podem ter na manutenção do valor nutritivo das pastagens. Para este efeito, é importante conduzir estudos de avaliação custo-benefício numa perspetiva holística para melhoria da pastagem, seguindo a tendência atual resultante da utilização de pastagens biodiversas, da aplicação diferenciada de fertilizantes e de corretivos ou do pastoreio dinâmico.



## IV.5. Olival

### IV.5.1. MODELAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO OLIVAL COM UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE

**Falcão, J.<sup>3</sup>; Marques da Silva, José Rafael<sup>1,2</sup>; Oliveira, C.<sup>3</sup>; Marques, Francisco<sup>2</sup>; Palma, J.<sup>4</sup>; Patanita, M.<sup>4</sup>**

#### IV.5.1.1. INTRODUÇÃO À CULTURA

O Olival é a cultura oleaginosa, produtora de óleo com qualidade alimentar, típica da região mediterrânica aonde encontra condições ótimas para o seu cultivo. Também em Portugal, particularmente no Alentejo interior, a oliveira encontra condições edafo-climáticas apropriadas para o seu cultivo, a que se junta uma ampla disponibilidade de água para regar e um notável progresso nas técnicas de cultivo, que permitem obter, nos olivais mais modernos, um elevado rendimento em azeitona e uma excelente qualidade dos azeites. Portugal é atualmente o 8.º maior produtor mundial de azeitona, e prevê-se que, a manter-se a evolução registada nos últimos anos, o nosso país daqui a 10 anos seja o 5.º maior produtor de azeitona. A nível mundial, tem-se observado um aumento constante da produção e do consumo, e embora continue concentrado nos países da bacia do mediterrâneo, nota-se uma tendência para o seu aumento em países fora desta região.

A oliveira (*Olea Europaea* L. ssp *sativa*) é uma espécie que se adapta e produz em quantidade e qualidade sob condições climáticas bastante específicas, razão pela qual a sua dispersão geográfica é bastante limitada, estando o seu cultivo quase circunscrito às regiões de clima mediterrânico. É uma espécie bastante tolerante ao frio, desde que este não seja excessivo (até -10°C), e suporta bem as temperaturas elevadas de verão (+40°C) típicas do clima mediterrânico, em especial se não estiver cumulativamente sujeita a *stress* hídrico. A oliveira necessita ainda de algum frio invernal para satisfazer as suas necessidades de vernalização, o que no nosso país não constitui, em geral, um problema. Ambientes com elevada precipitação e elevada humidade atmosférica são desfavoráveis pois contribuem para uma maior incidência de problemas fitossanitários. Do ponto de vista edáfico, a oliveira, embora seja possível adaptar o seu cultivo a uma variada gama de solos, prefere os solos profundos, com uma textura franca, boa capacidade de retenção de água e bem drenados pois tolera mal o encharcamento. Solos com textura ligeira são também apropriados para os olivais de regadio. Prefere, ainda, os solos neutros ou ligeiramente alcalinos, embora também consiga suportar a acidez, desde que moderada.

Nos últimos anos a olivicultura passou por uma evolução notável que se traduziu numa grande intensificação dos sistemas de produção. Nas plantações modernas as densidades de plantação variam entre 300-500 árvores/ha nos sistemas intensivos e 1500-2500 árvores/ha nos sistemas super-intensivos. Observou-se também a adoção generalizada de sistemas de rega gota-a-gota e uma intensificação do uso de fatores de produção, em especial adubos e produtos fitofarmacêuticos. Conseguem assim obter-se elevados rendimentos em azeitona que podem atingir e ultrapassar as 10 t/ha.

Do ponto de vista da técnica de cultivo, são especialmente importantes a escolha da variedade, a fertilização, a rega e a proteção fitossanitária. As variedades devem ser escolhidas de acordo vários critérios, como sejam os de adaptação às condições edafo-climáticas de cada local e ao sistema de produção (intensivo ou super-intensivo), o seu potencial produtivo, o rendimento em azeite e a sua qualidade e a sua suscetibilidade às principais pragas e doenças. Em termos de rega, o cultivo da oliveira não requer um consumo muito elevado de água, variando, consoante o sistema de produção adotado e a disponibilidade de água, entre 3000 e 5000 m<sup>3</sup>/ha. Dos pontos de vista da nutrição e das necessidades de fertilização é de notar que a

<sup>1</sup> Universidade de Évora y/o Agroinsider, Lda; <sup>3</sup> Instituto Superior de Agronomia; <sup>4</sup> Escola Superior Agrária de Beja.

oliveira é especialmente exigente em azoto, potássio e cálcio. A adubação deve ser realizada de forma repartida ao longo do ciclo, se possível por fertirrigação, ajustando as quantidades de nutrientes aplicadas em função da fase do ciclo vegetativo em que as plantas se encontram. O olival adapta-se bastante bem a sistemas de rega deficitária, tirando partido da adaptação da espécie a condições de menor conforto hídrico. Nos olivais modernos o sistema de rega adotado é o de gota-a-gota, o que permite obter valores mais elevados de eficiência do uso da água. As pragas e doenças chave do olival são a mosca da azeitona e a traça da oliveira e a gafa e o olho de pavão, respetivamente. O seu eficaz controlo em muito contribui para a elevada qualidade dos azeites obtidos.

#### **IV.5.1.2. METODOLOGIA**

Como objetivo geral, foi proposto o desenvolvimento de um modelo de relação entre a produtividade do olival (variedade Arbosana i-43) e o índice NDVI obtido a partir do satélite Sentinel 2. Foram escolhidas duas zonas de gestão de uma parcela: i) uma com maior vigor vegetativo; e ii) outra com menor vigor vegetativo. Em cada zona de gestão foi colhida a azeitona e o rendimento em azeite de 20 árvores. Os resultados foram convertidos para hectare considerando que a densidade de plantas deste talhão de olival era de 1111 árvores/ha. A área total da parcela em estudo é de 15.56 ha. Toda a informação relevante e processamento das imagens de satélite foi fornecida pela empresa AgrolInsider, parceira do projeto.

#### **IV.5.1.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE CASOS DE ESTUDO**

Se olharmos para a Figura 126d damos-nos conta de que a parcela apresenta claramente duas zonas de gestão nítidas tendo em consideração os intervalos de valores de NDVI, apresentados na Tabela 14. O mais impressionante em termos de resultados obtidos tem a ver com a diferença de produtividade de uma zona para a outra (Figura 126a) e consequente produção de azeite (Figura 126b).

Apesar do rendimento de azeite ser mais elevado na zona 1, de menor produtividade, quando comparado com a zona 2, de maior produtividade (Tabela 14) a diferença de produção da zona 2 quando comparada com a zona 1 compensa sobejamente essa diferença de rendimento ao nível do azeite. Em suma, é melhor produzir

**Tabela 14 - Dados económicos e de produtividade da parcela em estudo. (Falcão, J. 2019)**

NDVI (01/10/2017)	Zonas de gestão	Rendimento de azeite (%)	Produção de azeitona (kg/ha)	Produção de azeite (kg/ha)	Rendimento bruto (€/ha)	Rendimento líquido (€/ha)
0.13-0.26	1	19.70	5499.45	1083.39	3087.67	2126.67
0.26-0.34	2	17.88	7921.43	1416.35	4036.60	3075.60

Notas: i) Preço do kg de azeite = 2.85 €; ii) custos variáveis por hectare = 961 €



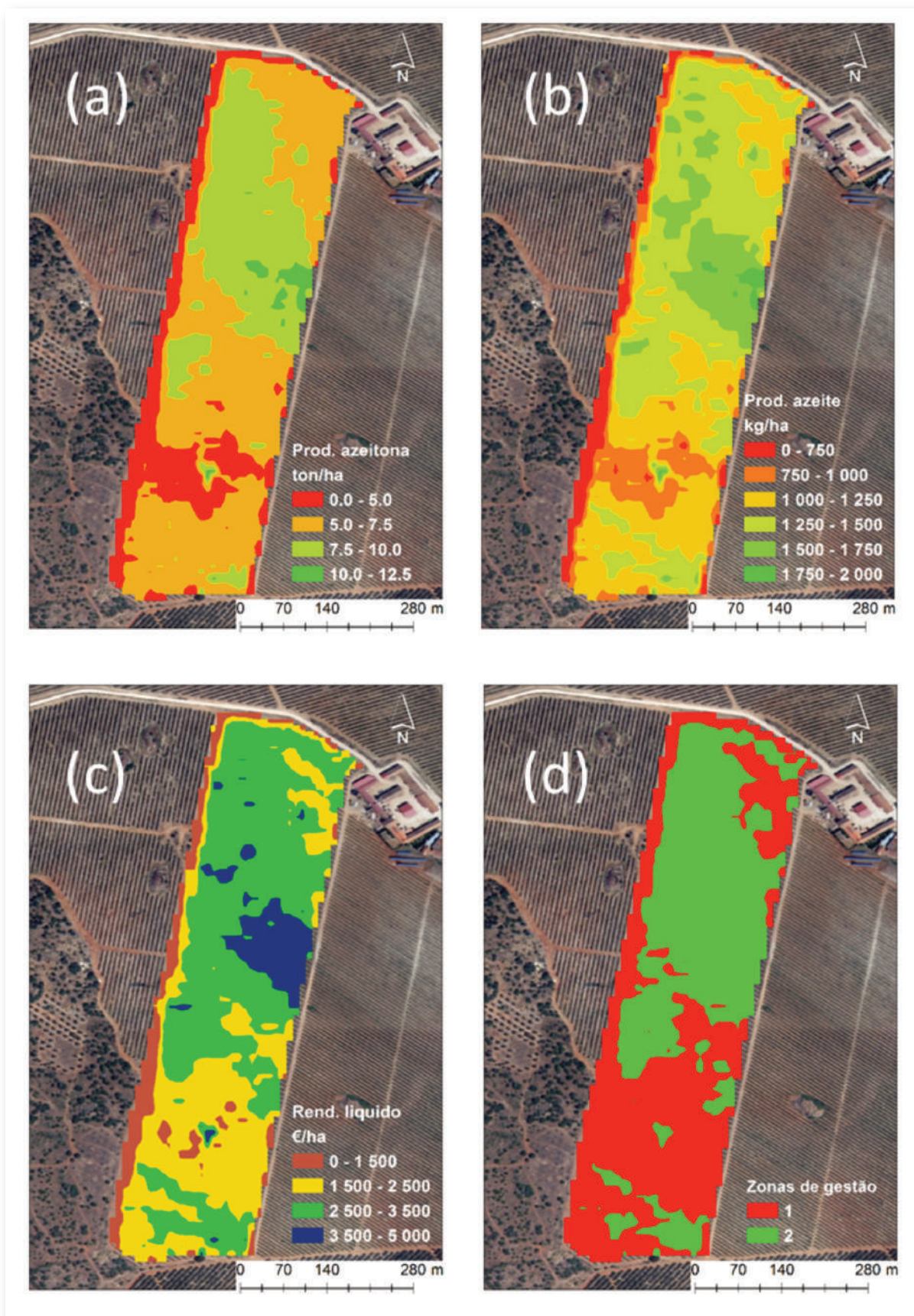


Figura 126 - (a) Produção de azeitona; (b) Produção de azeite; (c) Rendimento líquido; (d) Zonas de gestão da parcela

mais com menor rendimento de azeite do que produzir menos com maiores rendimentos de azeite.

Se a diferença de produtividade de azeitona e azeite (Tabela 14, Figuras 126a e 126b) impressiona bastante, pois estamos a falar de uma parcela que é tratada de forma uniforme em toda a área, a diferença de rendimento líquido da parcela (Tabela 14, Figura 126c) impressiona ainda muito mais. Podemos encontrar diferenças, dentro da mesma parcela, de cerca de 1000 €/ha (Figura 126c) e tais diferenças evidenciam que o sistema de produção terá que ser repensado por forma a otimizar os processos e a reduzir os impactos ambientais associados.

Só existem duas formas de otimizar o sistema, ou aumentar a produtividade ou reduzir os custos. Neste caso concreto, o aumento de produtividade teria que passar por uma rega diferenciada, pois os fatores limitantes neste caso específico são a água/solo. Contudo, o fator água nesta herdade é um fator escasso, como tal, a perspetiva de aumento de produtividade pela via do aumento da dotação parece não ser uma opção. Nesse sentido, há que pensar na redução dos custos associados à zona de produção 1 (Figura 126d) por forma a aumentarmos o rendimento líquido nesta zona e aumentarmos o resultado global da atividade, reduzindo os impactos ambientais associados.

#### **IV.5.1.4. CONCLUSÕES**

Pequenas diferenças de NDVI ao nível de uma parcela podem significar grandes diferenças de rendimento líquido associadas à mesma. O exemplo apresentado neste artigo revela que, dentro da mesma parcela, poderemos ter 2000 €/ha de diferença no que toca ao rendimento líquido da atividade. Como tal, há que fazer essa avaliação para todas as parcelas por forma a perceber como otimizar o processo produtivo pela diferenciação no tratamento, seja ele pelo aumento da produtividade, seja ele pela redução dos custos.

#### **Referências**

FALCÃO, J. (2019). Utilização de imagens de satélite no estudo da otimização produtiva do olival superintensivo





## IV.6. Sensores e redes de comunicação em agricultura

### IV.6.1. DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UNA INFRAESTRUCTURA PARA SENSORIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE PARÁMETROS AGRONÓMICOS

**Blazquez, Gabriel<sup>1</sup>**

#### IV.6.1.1. ANTECEDENTES

FEVAL-Institución Ferial de Extremadura a través de su Centro Tecnológico participa en distintas iniciativas encaminadas a la difusión e introducción del uso de las TIC en distintos sectores de actividad, siendo el sector agrícola y ganadero uno de los principales donde la aplicación de las TIC puede suponer una mejora significativa en los procesos productivos del mismo.

Así, el Centro Tecnológico de FEVAL participa en este proyecto aportando sus recursos, experiencia y conocimientos, tanto desde el punto de vista de la tecnología, como expertos conocedores de la misma, como del conocimiento de las necesidades del sector agrícola, a través de su relación con el sector corroborado por ser el principal referente del sector de todo el suroeste ibérico a través de su certamen AGROEXPO.

Por todo ello, el Centro Tecnológico de FEVAL se postula como el socio ideal para desarrollar una iniciativa que aúne, por un lado, el conocimiento de los parámetros agronómico de los distintos cultivos y su correlación las imágenes satelitales aportados por los otros socios del partenariado con el conocimiento de las TIC y sus herramientas utilizadas tanto para la recogida como para el tratamiento de grandes cantidades de datos aportado por FEVAL.

#### IV.6.1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo desarrollado por el Centro Tecnológico de FEVAL es corroborar los datos obtenidos mediante imágenes satelitales, usando para ello sensorización a nivel de suelo que permitan establecer una correlación directa entre los valores medidos por el satélite y los obtenidos por una medición directa en terreno.

Para alcanzar este objetivo, se deberá desplegar una red de sensores suficientemente extensa en número y superficie, como para tener una muestra significativa que permita extrapolar los resultados aportados por el satélite con los medidos a nivel de suelo, para esto se creará una red de dispositivos, que mediante una serie de sensores recojan diferentes parámetros del terreno, como la humedad, radiación solar, temperatura, NVDI... estos datos se utilizarán para nutrir una aplicación desplegada en un servidor informático que permitirá visualizar dichos datos en diferentes periodos de tiempo, pudiéndose ver la evolución de las distintas zonas medidas y compararlas con las mismas medidas hechas por el satélite.

#### IV.6.1.3. NECESIDADES DEL PROYECTO

Para desarrollar el proyecto deben salvarse una serie de barreras que permitan su correcto desarrollo. Todas estas barreras o limitaciones vienen impuestas por la propia tipología del proyecto y su aplicación en entornos agrícolas, ya que el despliegue de sensorización en este tipo de entornos conlleva adaptarse a una

<sup>1</sup> FEVAL - Institución Ferial de Extremadura.



serie de limitaciones impuestas como son:

- Imposibilidad de disponer de una fuente de energía constante para la alimentación de los dispositivos;
- Red de comunicación limitada, con zonas donde no hay disponible ningún tipo de comunicación;
- Necesidad de desplegar una red de sensores numerosa (para tener una muestra de datos grande) conteniendo el gasto económico.

Debido a las limitaciones anteriormente mencionadas, se ha determinado que la única solución viable para el desarrollo de este proyecto conlleva el despliegue de una red de comunicación propia. Esto nos permitirá dar cobertura a una amplia zona donde desplegaremos toda la sensórica del proyecto y al mismo tiempo posibilitará el optimizar al mínimo el gasto energético de los dispositivos, ya que la tecnología de comunicación elegida (LoRaWAN) se encuentra enmarcada dentro de redes de comunicación [LPWAN](#). Este tipo de redes se caracteriza por cubrir amplias áreas con muy bajo coste energético, algo que está alineado perfectamente con el proyecto que se pretende desarrollar.

En cuanto a la limitación de crear una red suficientemente amplia (en número y extensión) conteniendo el coste por dispositivo, se ha determinado crear una placa propia que emplee el número mínimo de componentes para optimizar el coste, ya que las placas electrónicas que se pueden encontrar en el mercado, además de no estar optimizadas para esta tarea, tienen circuitería extra que graban el coste por dispositivo. Esto hace que no sea viable el despliegue de cientos de dispositivos por el coste global que esto supondría, por ello, la creación de un dispositivo propio para este proyecto es algo prioritario.

#### **IV.6.1.4. ACCIONES**

En el proyecto, se han evaluado las distintas alternativas para llevar a alcanzar los objetivos propuestos, estudiando todas las opciones que se tenían disponibles y descartando aquellas soluciones que no ofrecían una forma viable de ejecutar el proyecto, en este sentido, se ha trabajado en profundidad en el uso de redes de comunicación LoRaWAN, uso de sensores de aplicación directa en entornos agrícolas, pruebas de dispositivos registrando sus consumos e implementación de distintas plataformas para la recolecta de los datos medidos.

De entre todas las opciones de comunicación estudiadas y validadas, GPRS, Xbee, Bluetooth, WiFi... la que mejor se ajustaba a las necesidades y limitaciones del proyecto era [LoRaWAN](#), debido a que permite establecer comunicaciones a muy gran alcance con un número muy elevado de dispositivos (hasta 10.000), todo ello utilizando un canal libre que no supone un coste adicional por mensaje o por dispositivo conectado. Así mismo, esta tecnología usa potencias de emisión muy bajas (20mW), que supone tener dispositivos cuya batería va a tener una autonomía de años.

Las pruebas realizadas en las instalaciones de FEVAL han marcado un área de trabajo eficaz muy amplia, donde sería posible desplegar cualquier dispositivo que instantáneamente volcaría los datos leídos a Internet y de ahí al servidor *i-site* que se va encargar del proceso de datos.

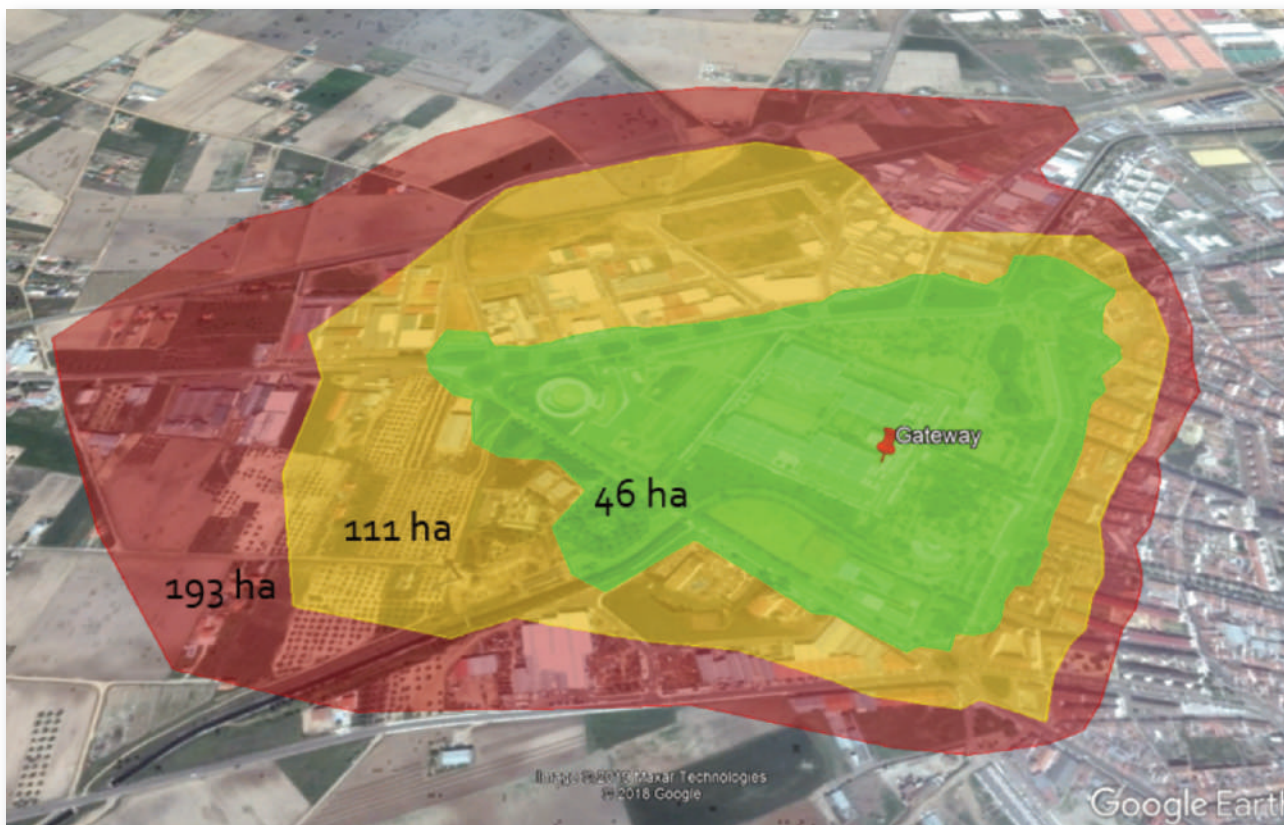


Figura 127 - Cobertura obtenida con la antena desplegada.

Como se aprecia en la Figura 127, el área verde (46 hectáreas) permitiría conectar dispositivos usando SF6 (modo de comunicación muy rápido y optimizado) y el área marcada en roja (193 hectáreas) sería accesible usando SF12. De esta forma, con una sola antena se es capaz de cubrir una amplia extensión de terreno donde



Figura 128 - Antena desplegada en FEVAL.

se puede desplegar cualquier dispositivo para la sensorización de diferentes parámetros.

Hay que tener en cuenta que la red de comunicación desplegada está muy influenciada por la orografía, es por ello que buscar una buena ubicación es esencial, en este sentido se ha establecido una alianza con la Comunidad de Regantes del canal del Zújar. Esto nos permita el despliegue de nuestras antenas en sus torres de bombeo que disponen de una altura considerable y con visión directa sobre una gran superficie de terreno, algo que nos da la posibilidad de instalar la red de sensores en una amplia zona.

El *hardware* aplicado al proyecto es una parte fundamental, de esta parte depende en gran medida el éxito del proyecto, ya que las comunicaciones, durabilidad de la batería y resistencia en el entorno, etc., son algo esencial. Por ello se ha dedicado una gran cantidad de tiempo al estudio de diferentes plataformas *hardware* y sensores comerciales para determinar cuál es la mejor para aplicar en el proyecto.

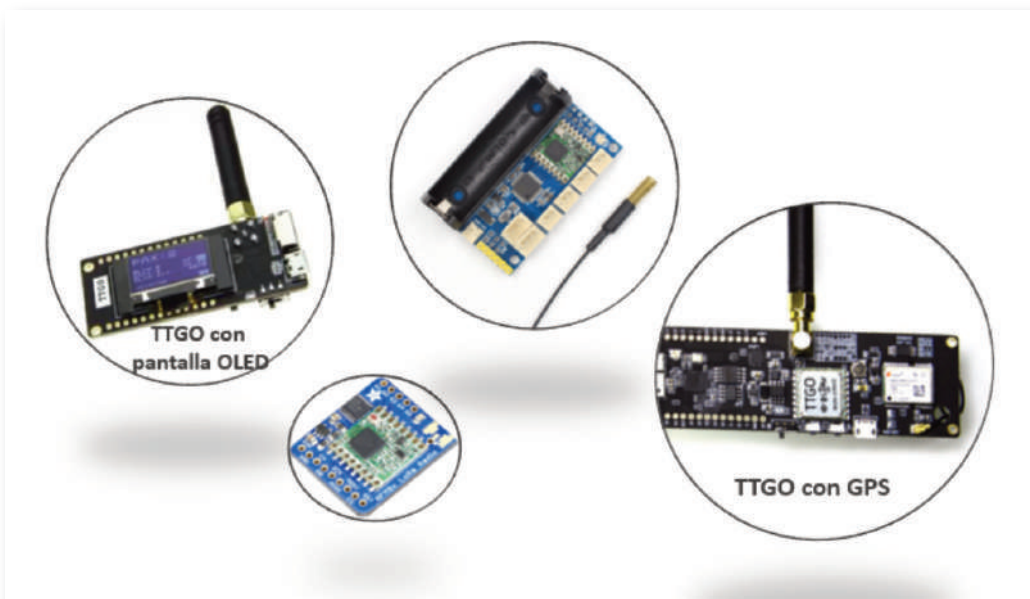


Figura 129 - Plataforma Hardware que se han testado.



Figura 130 - Sensores que se han testado.

Estos son algunos de los dispositivos que se han testeado:

El uso de diferentes plataformas *hardware* y sensores ha proporcionado un conocimiento suficientemente extenso como para determinar cuáles son los sensores más adecuados en términos de durabilidad en terreno y resolución, así mismo ha llevado a determinar que debemos desarrollar nuestra propia plataforma *hardware* adaptada a las necesidades del proyecto y sus limitaciones, algo que optimizará el diseño, coste y permitirá tener un producto a medida.

Así, se ha desarrollado un *hardware* específico que se amolde perfectamente a las necesidades, para ello se han marcado como objetivos la creación de al menos 2 prototipos que ayuden a la recolección de datos para el posterior análisis y toma de decisiones. En este sentido, nos hemos propuesto la creación de una “pica” con la capacidad de medición de parámetros del suelo, así como una estación meteorológica que tome todos los datos de parámetros ambientales que son de interés en nuestro estudio. Con estos 2 dispositivos se puede crear un mapa que muestre las condiciones a las que se ven expuestos los cultivos y relacionarlo directamente con la producción.

En ambos casos, y teniendo en cuenta el ámbito de implantación de los dispositivos, se tendrá siempre presente el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- Los dispositivos deben ser energéticamente suficientes o tener una autonomía que permita el funcionamiento del dispositivo durante años sin la intervención de personas;
- Debe asegurarse la conectividad del dispositivo en zonas aisladas;
- El coste por dispositivo debe ser lo más bajo posible para que sean accesibles;
- Las envolventes o elementos externos deben garantizar la estanqueidad y durabilidad en entornos al aire libre;
- Los dispositivos deben ser re-programables para adaptarlos a cualquier circunstancia;
- Se reducirá su tamaño lo máximo posible para que no sean elementos muy invasivos.

Las acciones que se han realizado se han centrado en el desarrollo y construcción de *hardware* a medida para la toma de datos así como su estudio en terreno para conocer el desempeño de los dispositivos en un entorno real. Se han desarrollado 2 prototipos para la captación de datos.

### Pica de terreno

La pica de terreno es un elemento diseñado para la toma de datos de suelo, como puede ser la humedad de terreno. Este dispositivo tiene la capacidad de tomar medidas y mandarlas utilizando un módulo RFM95 a una frecuencia de 868Mhz.

Con las pruebas llevadas a cabo hasta el momento, hay que decir que este sensor es bastante sensible a los cambios de humedad sin afectarle los cambios en la conductividad que se producen al diluir nutrientes en el terreno, algo que le da una ventaja considerable frente a los sensores que miden la conductividad por cambios en la resistencia eléctrica del terreno. Así mismo, el no tener partes metálicas expuestas hace que el sensor no se

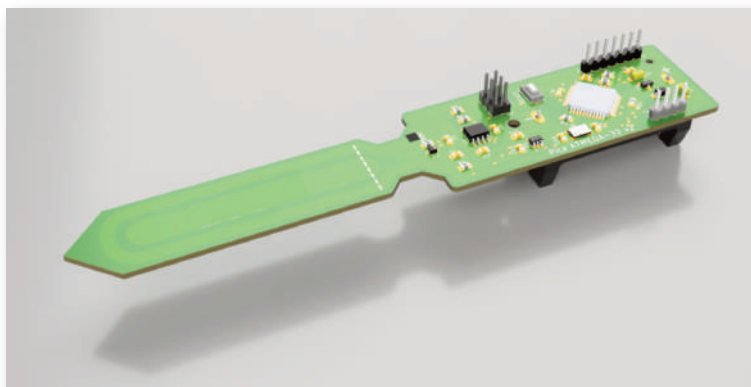


Figura 131 - Representación 3D de la pica.

degrade ante la corrosión.

### **Funcionamiento**

El funcionamiento de la pica es muy sencillo, esta hará una lectura de datos cada cierto tiempo y mandará estos datos encapsulados utilizando el módulo de radio que incorpora. Una vez enviados los datos, el dispositivo pasa a modo de hibernación para reducir el consumo al mínimo hasta que deba volver a realizar una nueva lectura.

### *Consumos y autonomía*

El consumo y la autonomía han sido unas de las cuestiones más relevantes a la hora del desarrollo. Se ha intentado, desde un primer momento, hacer que el dispositivo tuviera una autonomía de varios años con una batería de pequeño tamaño. Para ello, se han seleccionado muy bien los componentes que integran el dispositivo y se han utilizado técnicas de programación para dejar en estado de hibernación al sistema cuando no sea utilizado.

Para alimentar el sistema estamos usando una batería TR16340 (CR123) con 2500mAh, se trata de una batería de Li-ion con un voltaje de 3.7v que es ideal para nuestro sistema, ya que todos los elementos funcionan a un voltaje de 3.3v. Se han incorporado varios reguladores LDO (muy bajo consumo), que permitirán mantener el nivel de voltaje estable. Estos reguladores tienen una caída de tensión muy baja, por ello el sistema funcionará sin problemas hasta que la batería tenga un nivel de unos 3.4v, o lo que es lo mismo, quede en torno a un 15% de batería. Una vez alcanzado este nivel, el sistema comenzará a demandar más corriente y caerá la duración de la batería.

Para optimizar el uso de la batería se han creado dos modos de funcionamiento, el normal y el de hibernación. El modo normal tan solo estará activo durante unos segundos (cuando tenga que tomar medidas y enviarlas), en este modo el dispositivo consume una media de **10mA**, mientras que al entrar en hibernación pasa a consumir unos **100uA** o lo que es lo mismo 0.1mA, 100 veces menos que en el funcionamiento normal.

Teniendo en cuenta la capacidad de la batería, y que el dispositivo mandará datos de forma horaria, necesitando tan solo 3 segundos para realizar las lecturas de datos y su envío, se estima un consumo medio de 108.24uA, lo que deja una autonomía de unos 962,33 días. Si tomamos el modelo de descarga real de la batería, esta duración se reduce hasta unos **817 días** (2,2 años).

### *Conectividad*

La conectividad ha sido otro de los grandes retos. Es muy importante elegir un tipo de comunicación que se adapte a la zona donde se integrarán los dispositivos y que no entre en conflicto con los otros requerimientos establecidos. Para conectar las picas que se distribuirán en zonas agrícolas, tan solo se podía optar por un par de tecnologías, sacar los datos usando las redes de comunicación móvil o utilizar redes de comunicación LPWAN. Las primeras tienen el inconveniente de tener un alto consumo a la hora de transmitir datos, así como depender de tener una tarjeta SIM por cada dispositivo, algo que lo hace totalmente inviable, es por ello que nos decantamos por la tecnología LPWAN, una tecnología en pleno desarrollo que está especialmente indicada para interactuar con dispositivos IoT, disponiendo de un consumo muy reducido, un gran alcance y un ancho de banda suficiente para la transmisión de datos.

En nuestro caso nos hemos decantado por usar **LoRaWAN** y la plataforma *The Things Networks* (<https://www.thethingsnetwork.org/>) para interconectar nuestros dispositivos al servidor donde tenemos



desplegada la plataforma WEB.

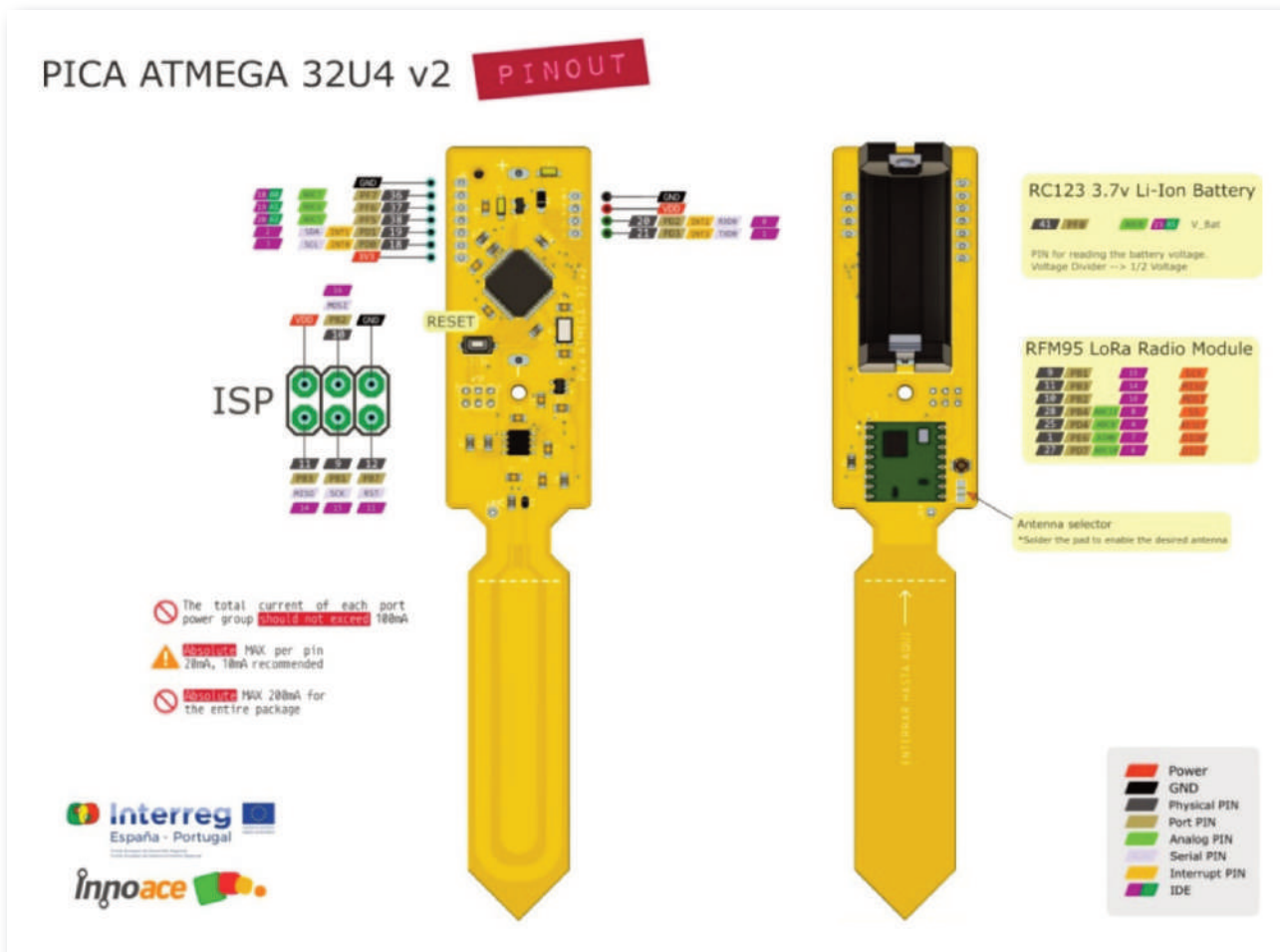


Figura 132 - PINOUT de la pica con especificaciones.

*PinOUT*  
*Carcasa*

Para la carcasa se ha diseñado un modelo estanco fabricado con materiales no biodegradables que resiste sin problemas la intemperie y el paso del tiempo.

Para ello se han utilizado herramientas de diseño asistido por ordenador CAD/CAM y fabricación digital, utilizando impresoras de resina DLP para conseguir un acabado perfecto.

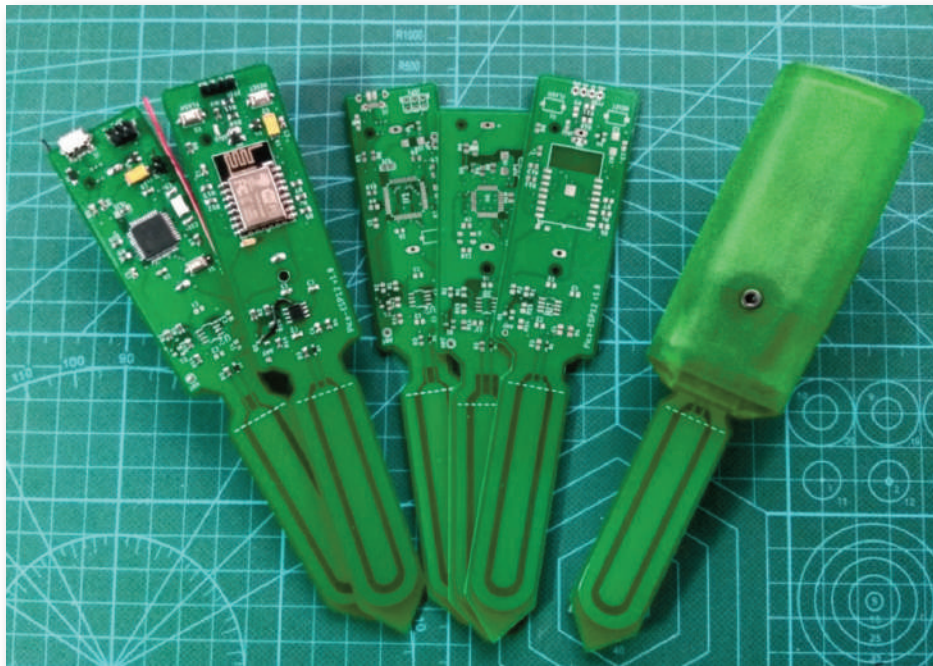


Figura 133 - Diversos diseños realizados de la pica y su carcasa.

Se han realizado diferentes carcasas para todos los modelos de pica probados.

### **Estación meteorológica**

La estación meteorológica es un elemento clave para conocer las condiciones climáticas a las que están expuestos los cultivos, es por ello que hemos desarrollado un dispositivo capaz de medir los parámetros más relevantes, como pueden ser la temperatura, humedad, precipitaciones, velocidad y dirección del viento, radiación solar, luz ultravioleta...

Todos estos parámetros afectan, en mayor o menor medida, al rendimiento de los cultivos, por ello, su monitorización puede aportarnos una valiosa información de cara a la gestión de los cultivos y su optimización

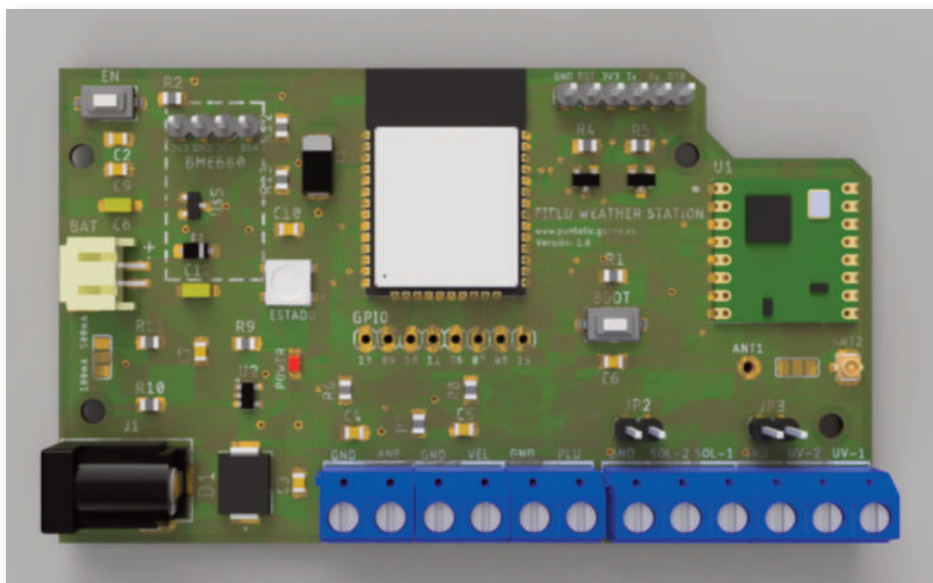


Figura 134 - Modelo 3D de la Estación meteorológica diseñada.

en función a las características que ofrece una determinada zona con respecto a otra.

#### *Fuente de alimentación y autonomía*

Debido a la gran cantidad de sensores que incorpora la estación meteorológica y la imposibilidad de alimentar este dispositivo por largos periodos de tiempo con una batería, se decidió incorporarle un panel solar para hacer a la estación meteorológica totalmente independiente energéticamente.

La estación meteorológica incorpora un panel solar de 3.5W y una batería con una capacidad de 2500mA, esto le brinda una autonomía de unas 28 horas a plena potencia y sin ningún aporte de luz solar.

#### *Sensórica incluida*

Los sensores que incluye la estación meteorológica son los típicos en este tipo de dispositivo, pluviómetro, anemómetro, veleta, temperatura, humedad, presión barométrica... pero se han incluido dos sensores que son de gran utilidad para el estudio que estamos llevando a cabo como son un sensor de radiación solar y otro de luz ultravioleta. Estos sensores nos darán una referencia de la cantidad de radiación solar y luz ultravioleta que está incidiendo sobre el terreno, algo que puede ayudarnos a corregir las mediciones del NDVI que hagamos sobre el terreno.

#### **SQ 110 (Radiación Solar)**

Se trata de un sensor de radiación solar que se centra en la medición de longitudes de onda que van de los 380 a los 670 nanómetros.

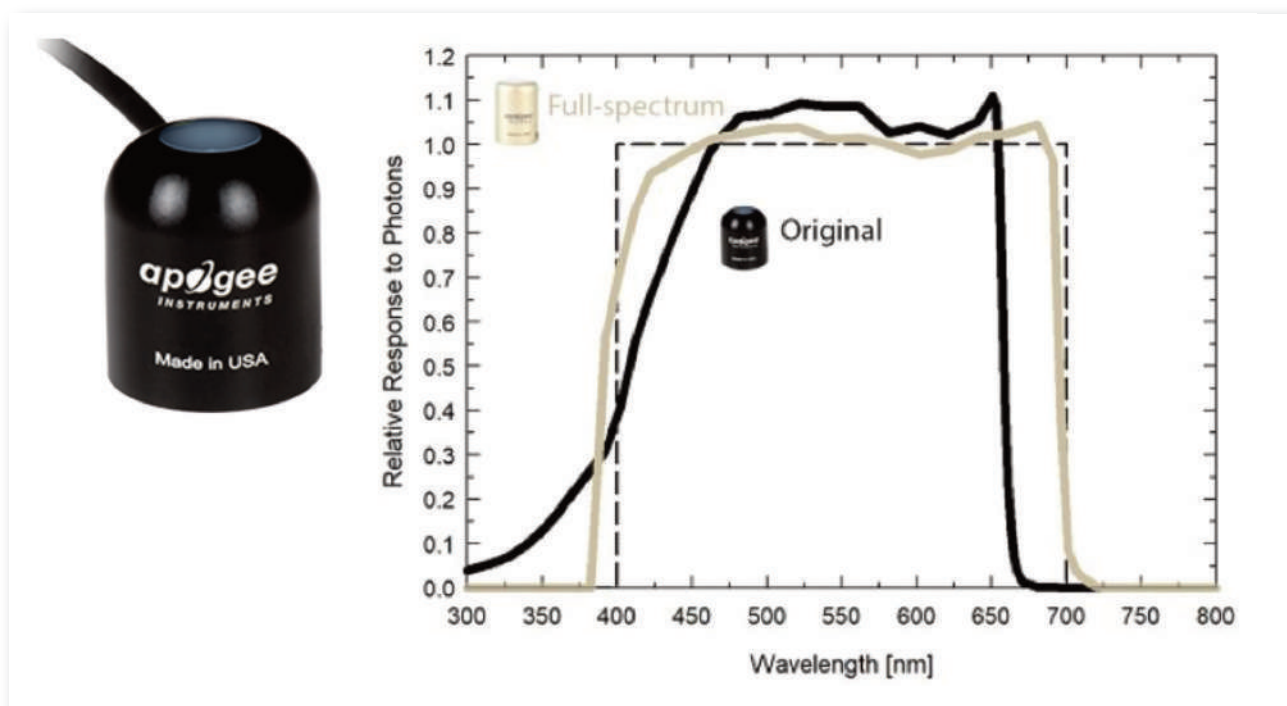


Figura 135 - Sensor SQ110 de radiación solar y su gráfica de respuesta - [www.apogeeinstruments.com](http://www.apogeeinstruments.com)

## SU100 (Ultravioleta)

Con el sensor de ultravioleta se pueden medir la intensidad con la que se emiten los UV C, UV B y los UV

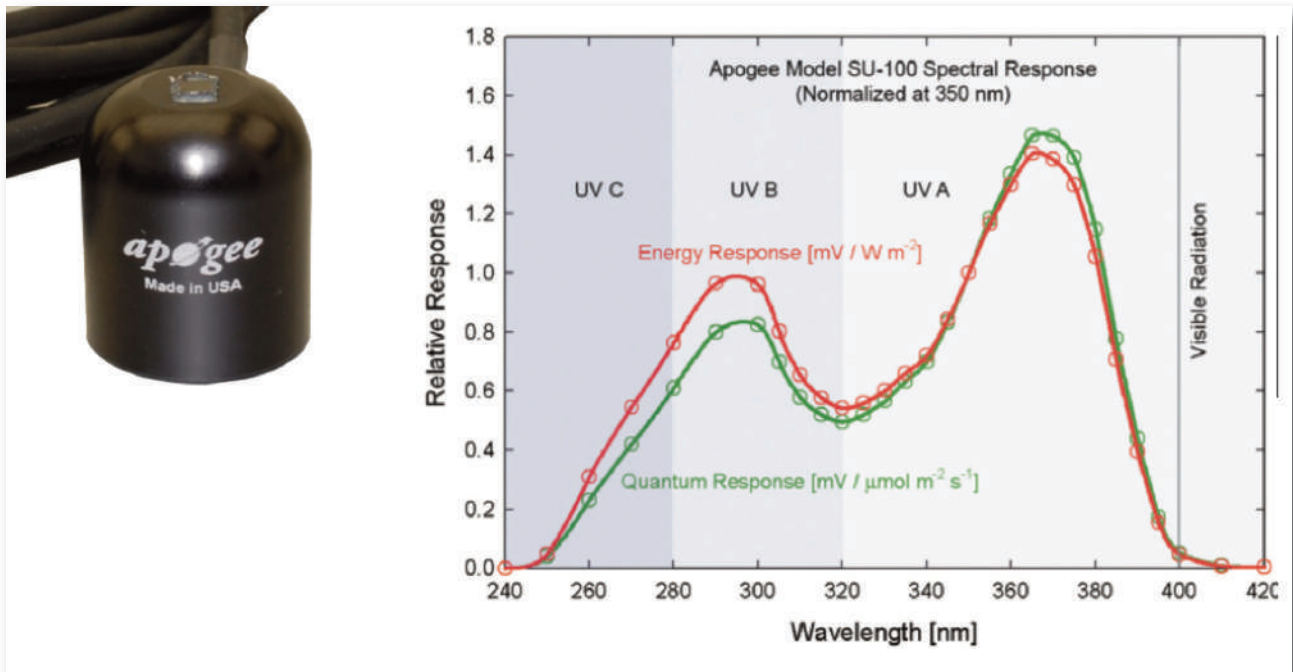


Figura 136 - Sensor SU100 Ultravioleta y su gráfica de respuesta - [www.apogeeinstruments.com](http://www.apogeeinstruments.com)

A. En la grafica puede verse la respuesta del sensor ante estas longitudes de onda determinadas.

### Conectividad

Para conectar el dispositivo hemos optado por la misma solución que, en el caso de la pica, se le ha incorporado un módulo de radio RFM95 que emite en 868MHz y con el que sacaremos la información mandándola a un Gateway usando para ello LoRaWAN.

Como particularidad, decir que el *chip* usado en este caso incorpora WiFi y Bluetooth, esto deja abierta la puerta a usar el dispositivo en otros entornos en los que se tenga disponible una red WiFi o incluso a crear APPs en las que se pueda descargar la información recogida mediante el teléfono móvil.

### Carcasa

En cuanto a la carcasa, se ha querido aglutinar en una sola envolvente todos los dispositivos, por lo que la batería, panel solar y electrónica forman un cuerpo único que se añadirá al mástil donde irán el resto de sensores.

Esta carcasa se ha diseñado con técnicas CAD/CAM y fabricado con impresora 3D, utilizando como material de base el PET, debido a su gran impermeabilidad y resistencia a factores climatológicos.

Por otra parte desde el IPN de Coimbra se ha desarrollado una infraestructura de sensores modular que permite igualmente medir distintos parámetros agronómicos que pueden complementar el despliegue y contraste de los mismos con los sensores comerciales desplegados por FEVAL junto con la red de antenas LoRaWAN en ubicaciones adecuadas para que den cobertura a los dispositivos en la zona elegida para el estudio, además de crear una plataforma *hardware* optimizada a las necesidades que se han encontrado y disponer de una muestra de datos suficiente para poder compararlo con los datos obtenidos con el satélite.

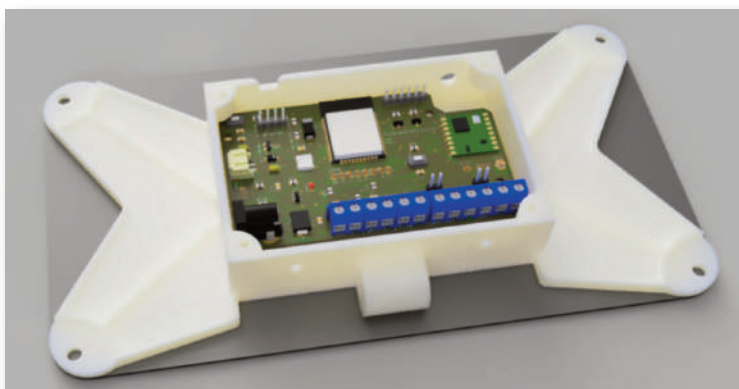


Figura 137 - Modelo 3D de la estación meteorológica con su estructura.

Para la captación y visualización de datos se ha optado por el uso de plataformas libres por ser gratuitas y no tener ningún coste de mantenimiento asociado, además de cubrir con las mismas todas las necesidades que el proyecto requiere.

Para el almacenamiento de datos se utiliza la plataforma [InfluxDB](#), una plataforma muy optimizada para el almacenamiento de grandes cantidades de datos, en cuanto a la monitorización se ha probado [Grafana](#), una plataforma muy sencilla que permite visualizar series de datos almacenados como histórico, así como filtrar resultados, sacar medias, tendencia, máximos, mínimos...

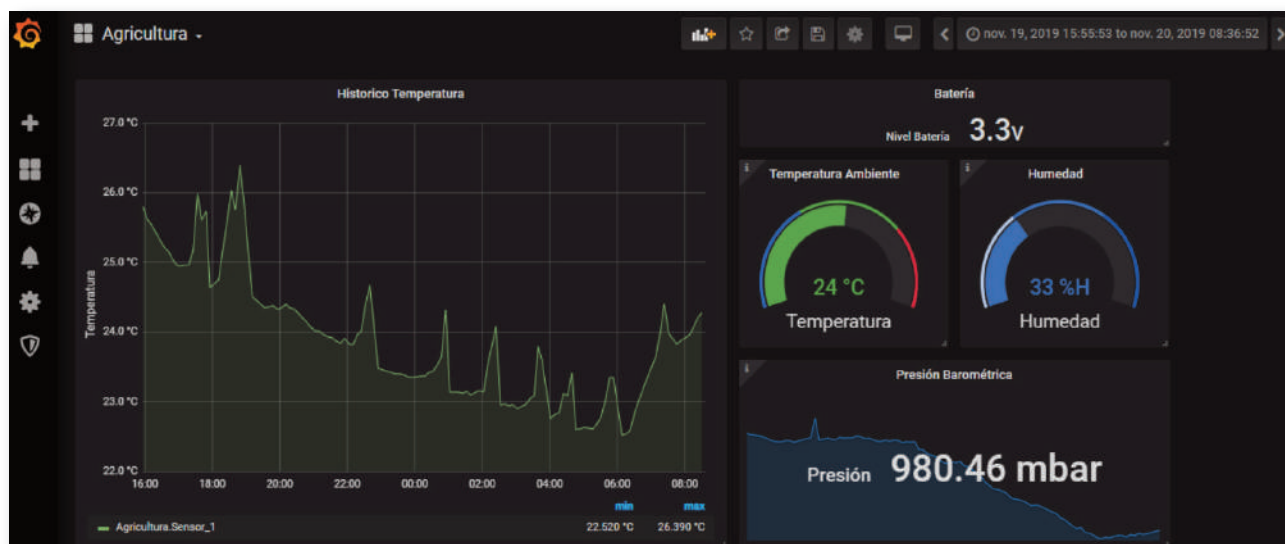


Figura 138 - Visualización de datos en Grafana.

## IV.6.2 TECNOLOGIA IWSense

Pardal, André<sup>1</sup>

### IV.6.2.1. OBJETIVOS

Os objetivos principais do projeto foram a customização e a aplicação da tecnologia *IWsense* a novas culturas, inicialmente desenvolvida para viticultura de precisão, tendo também sido explorado as potenciais mais-valias da integração desta tecnologia com imagens de satélite. Este último objetivo permite avaliar fatores como o *stress* hídrico, diferenças de vigor das plantas, entre outros, o que pode permitir melhorar as práticas atuais.

Durante este projeto desenvolveram-se protótipos com diferentes configurações e especificidades, por forma a avaliar a *performance* da tecnologia nas várias culturas em estudo.

### IV.6.2.2. DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA IWSense

O maior desafio deste projeto residiu nas especificidades de cada cultura, localização remota das plantações e na ausência de pontos de energia. Para se obter uma solução autónoma, e sem necessidade de intervenção humana, foram definidas as seguintes especificações:

- **Fonte de Energia:** solução com bateria interna, carregável por energia solar, e com autonomia suficiente para recolha/comunicação de dados em caso de luz solar insuficiente durante vários dias, prejudicando o carregamento eficaz das baterias;
- **Resistência a condições adversas:** a solução tem de ser resistente a condições meteorológicas adversas, tais como humidade, vento, chuva, altas e baixas temperaturas e exposição ao sol durante longos períodos de tempo;
- **Comunicação de dados recolhidos:** garantir a comunicação dos dados recolhidos, mesmo em condições de baixa cobertura de sinal da infraestrutura de comunicação de dados móvel. Implementação de rede de sensores sem fios segundo a tipologia de árvore, com *self-healing* de modo a garantir de forma otimizada uma vasta cobertura da rede sem descurar a robustez. Assim, foi desenvolvida uma rede de comunicação própria local que transmite os dados recolhidos a um concentrador de dados, designado de Coordenador, que por sua vez transmite periodicamente a totalidade da informação pela rede GSM;
- **Modularidade:** Esta solução tecnológica permite a configuração/reconfiguração de cada um dos nós da rede, permitindo adicionar e remover elementos sensoriais durante o funcionamento normal, sem necessidade reprogramar ou desligar o nó (*hot swapping*). Assim, é possível, por exemplo, adicionar um novo sensor no terreno após a deteção de um determinado evento através da análise das imagens de satélite.

O *IWsense* conta ainda como fator diferenciador, o elevado grau de otimização ao nível do consumo de energia alcançado através do desenvolvimento de soluções de eletrónica à medida para todos os seus módulos, nomeadamente, aquisição de dados dos sensores, processamento, comunicação e gestão de energia (fornecimento e recolha de energia).

<sup>1</sup>Instituto Pedro Nunes.

O *IWsense* é constituído por dois tipos de protótipos diferentes desenvolvidos, os Coordenadores e os *End-nodes*; uma rede assim será constituída por um Coordenador e vários *End-nodes* que comunicam entre si, estabelecendo rotas que permitem ao Coordenador agregar os dados de todos os nós da rede e enviá-los até ao servidor *web*. Para isso, o Coordenador conta com um módulo GPRS que tem a capacidade de estabelecer a ligação à Internet.

Cada protótipo possui um módulo de alimentação que fornece energia a todo o sistema (Coordenador/Nó e sensores), possuindo ainda um painel solar que permite aumentar a autonomia energética. O estado das baterias também é enviado para o servidor, para que possa haver uma melhor perceção da sua evolução ao longo do tempo.



Figura 139 - Sensores utilizados.

Na Figura 132 estão representados os vários sensores utilizados no desenvolvimento dos protótipos.

A estrutura final do sistema é do tipo “tubular” e é constituído por várias secções de tubo PVC, e cujas junções serão os diversos módulos desenvolvidos (Figura 133). Dentro desses módulos vão estar isoladas as PCBs (*Printed Circuit boards*) relativas a cada um dos seus módulos. A interligação entre módulos é feita por conectores estanques, desta forma é possível trocar a disposição dos diversos módulos. Estes módulos também têm um apêndice onde se podem instalar alguns dos sensores e o painel solar.



Figura 140 - Exemplo de um dos módulos impressos em 3D.

### IV.6.2.3. INSTALAÇÕES PILOTO

No âmbito deste projeto foram desenvolvidos 3 Coordenadores e 9 *End-Nodes* (um total de 11 protótipos) semelhantes ao representado na Figura 134, que foram aplicados em culturas como a vinha e o tomate.

Na Figura 135 é apresentado um dos protótipos desenvolvidos em testes no exterior. Este protótipo era constituído por sensores de humidade e temperatura do ar, direção e velocidade do vento, pluviosidade, radiação solar, humidade da folha e humidade do solo.

Na Figura 136 encontra-se ilustrado um dos protótipos instalado numa cultura de tomate. Este protótipo tem sensores de humidade e temperatura do ar, de humidade da folha e humidade do solo.

A partir das imagens anteriores pode verificar-se que a modularidade do sistema é uma mais-valia para adaptação e otimização da tecnologia nas diversas aplicações, visto que se pode modificar o sistema tanto ao nível dos sensores instalados, como da sua altura e disposição.



Figura 141 - Exemplo de um dos protótipos desenvolvidos.



Figura 142 – Exemplo de um dos protótipos desenvolvidos no terreno.



Figura 143 – Exemplo de um dos protótipos desenvolvidos numa plantação.





**V**



**Conclusões  
Principais**





Muita da informação aqui reunida demonstra que os satélites podem ser ferramentas muito poderosas na análise e deteção de anomalias em agricultura. Tais anomalias podem significar milhares de euros de diferença em termos de rendimento líquido da atividade agrícola. Contudo, verificamos pela prática que não são muitos os empresários agrícolas que se fazem valer deste tipo de ferramentas para, de forma sistemática, monitorizar, refletir e redirecionar os sistemas em que operam.

Estamos conscientes de que este tipo de agricultura é bem mais exigente do ponto de vista técnico, contudo, tal exigência pode proporcionar resultados bem interessantes, não só do ponto de vista económico, mas também do ponto de vista ambiental. Reconhecemos, igualmente, que mudar processos não é fácil e que em agricultura mudar sistemas de produção pode ser complicado. Todavia, também sabemos que muitas coisas estão ao alcance dos empresários mas, ainda assim, existe alguma inércia em repensar constantemente os sistemas.

Como conclusões finais deste trabalho e deste projeto podemos dizer-lhe que: i) os satélites são realmente uma ferramenta muito útil à gestão agrícola; ii) há que saber aproveitá-los e a forma de o fazer pode mudar de cultura para cultura; iii) ter a mente aberta à mudança ajuda muito na introdução destas novas tecnologias e atenção, nada tem que ver com a idade; iv) não interessa mudar rápido, interessa sim, mudar consistentemente e com segurança; v) não precisa de gastar muito dinheiro para começar a usar estas tecnologias; vi) não precisa de comprar grandes equipamentos para começar a ver resultados, pois mudar apenas a tecnologia do fertilizante poderá resolver o problema identificado; vii) existem coisas que parecem difíceis e que afinal se tornam fáceis e que o contrário também é verdade.

Da equipa de projecto/tarefa e dos que se somaram a ela gostaríamos de vos dizer que aprendemos muito, que a inovação técnica e científica é extremamente importante, contudo, a inovação social é decisiva para que as mudanças possam realmente concretizar-se. Face ao exposto, o INNOACE está à sua disposição para o ajudar a fazer mudanças, consulte-nos.

# VI

Índice de  
■ figuras e  
imágenes





Figura 1- Imágenes de la evolución de la Mecanización Agrícola.....	14
Figura 2- Plataforma de Sensores de CEa y pH VERIS-3150 .....	17
Figura 3- Esquema de distribución de electrodos de CEa en el VERIS 3150 .....	17
Figura 4- Esquema de funcionamiento y uso en campo del sensor DUALEM 1S.....	18
Figura 5- Equipo de muestreo de pH .....	18
Figura 6- Equipo de medición de M.O. VERIS Optic Mapper.....	19
Figura 7- Gráfica del Espectro electromagnético del satélite Sentinel 2 y esquema del efecto de la radiación solar sobre las plantas .....	19
Figura 8- Fórmula del cálculo del NDVI .....	20
Figura 9- Vehículo aéreo U.A.V.....	21
Figura 10- Equipo de pulverización de dosificación variable .....	22
Figura 11- Sensor de vegetación multiespectral activo.....	23
Figura 12- Componentes del Monitor de cosecha.....	24
Figura 13- Regiones del espectro electromagnético .....	32
Figura 14- Ejemplo de las diferentes bandas y el resultado de su combinación.....	33
Figura 15- Diferencia en la región del infrarrojo cercano en diferentes zonas .....	36
Figura 16- Imagen en falso color donde diferenciar Idiferentes tipos de vegetación .....	36
Figura 17- Anomalías térmicas detectadas utilizando el infrarrojo de onda corta.....	37
Figura 18- Bandas en la región de las microondas .....	38
Figura 19- Sistema SAR instalado en un satélite.....	38
Figura 20- Synthetic Aperture (B), objeto-objetivo (A); Polarizaciones horizontal (H) y vertical (V).....	39
Figura 21- Principales mecanismos de dispersión de energía microondas.....	39
Figura 22- Comparativa de firmas espectrales de los satélites Sentinel 2 y 3 en maíz.....	41
Figura 23- Firmas espectrales de diferentes tipos de ocupación del suelo fechas.....	41
Figura 24- El comportamiento entre diferentes regiones del espectro electromagnético es la base de los índices espectrales. Ejemplos de NDVI y NBR.....	42
Figura 25- Comparativa entre los niveles digitales de la banda 8 y banda 4 de Sentinel 2.....	43
Figura 26- Comparativa entre los niveles digitales de la banda 8A y banda 11. Sentinel 2 .....	44
Figura 27- Diferentes modos de adquisición de datos del satélite Sentinel 1.....	45
Figura 28- Satélite Sentinel 2 .....	46
Figura 29- Diferentes combinaciones de banda en Sentinel 2.....	47
Figura 30- Diferentes metodologías de diagnóstico da fertilidade do solo.....	51
Figura 31- Condutividade elétrica aparente do solo (CEa) medida a duas profundidades diferentes (30 cm e 80 cm) com o sensor geoelectrico VERIS.....	52
Figura 32- Condutividade elétrica aparente do solo medida com o sensor VERIS (do lado esquerdo) e condutividade elétrica aparente do solo estimada por satélite (lado direito).....	53

Figura 33- Valores de NDVI da parcela no arranque da cultura muito variáveis indicando relações solo-água-planta muito variáveis.....	53
Figura 34- Nutrição do solo: variação da fertilidade do solo de acordo com a CEa do mesmo e o local da amostragem .....	54
Figura 35- Localización de las parcelas de estudio .....	56
Figura 36- Análisis de la firma espectral mediante la herramienta Spectrum View .....	58
Figura 37- Correlación entre CEa y las banda 12 y banda 4 de Sentinel 2.....	59
Figura 38- Correlaciones entre la Cea y la PC1 de las bandas 12, 8, 4 de Sentinel 2.....	59
Figura 39- Clusterización en función d de clasificación supervisada y no supervisada.....	60
Figura 40- Clusterización realizada a partir de la herramienta gratuita Landviewer .....	61
Figura 41- Identificación de problemas de encharcamiento.....	61
Figura 42- Relación entre los mapas obtenidos a partir del satélite Sentinel 2 y los datos del muestreo de suelos (arcilla y CIC).....	62
Figura 43- Reducción de los datos de las 25 muestras a la zonificación propuesta a partir de la información obtenida del satélite Sentinel 2.....	63
Figura 44- Localización de las parcelas.....	65
Figura 45- Fórmula del cálculo del NDVI .....	67
Figura 46- El estudio de patrones en la secuencia de imágenes, permiten establecer zonas con características estructurales similares.....	67
Figura 47- Comparativa de imágenes en año hidrológicamente contrarios.....	68
Figura 48- Comparativa del eje temporal de tres parcelas en función de los días desde la siembra o la fecha .....	69
Figura 49- Comparativa de curvas NDVI en trigo a partir de los valores de 0,45 .....	69
Figura 50- La curva de NDVI permite identificar el periodo donde una imagen de satélite permite identificar la fecha idónea para realizar una zonificación.....	70
Figura 51- Relación lineal entre los valores medios de rendimiento de la zonificación establecida y los valores medios de NDVI para la misma superficie.....	70
Figura 52- Localización de las parcelas.....	72
Figura 53- Ejemplo de anomalía de datos en el mapeo de la cosecha.....	73
Figura 54- Limitaciones atmosféricas que afectan al NDVI por polvo o humo .....	74
Figura 55- Fórmula del cálculo del NDVI .....	74
Figura 56- Correlación entre producción y NDVI a la escala de parcela de las diferentes zonas identificadas.....	76
Figura 57- Correlación entre NDVI y producción en las fechas iniciales del cultivo.....	77
Figura 58- Correlación entre NDVI y producción en la senescencia del cultivo .....	77
Figura 59- Comportamiento similar entre el rendimiento del cultivo, el NDVI y la CEa .....	78
Figura 60- Los cambios significativos en la estructura condicionan el desarrollo y el rendimiento de los cultivos .....	78



Figura 61- Identificación de incidencias en el riego mediante NDVI .....	79
Figura 62- Identificación de incidencias en el riego mediante la curva NDVI.....	79
Figura 63- Utilización de series completas de NDVI para identificar características estructurales de una parcela .....	80
Figura 64- Componentes do rendimento e formación da produción de grão.....	82
Figura 65- Imagem NDVI de satélite da parcela de cevada dística com a localización dos puntos em que se realizaram as medicións com os sensores portáteis e a recolla de amostras de plantas para a determinación dos rendimentos em biomassa e em grão (Local 1 e Local 2).....	83
Figura 66- Imagens de Satélite NDVI referentes à evolução observada em três diferentes datas (11/08/2018; 30/04/2018 e 15/05/2018) no desenvolvemento da cevada dística com a localización dos puntos de amostragem (Local 1 e Local 2).....	84
Figura 67- Aspecto geral dos locais 1 e 2 .....	84
Figura 68- Conductividade eléctrica aparente (CEa) do solo a 30 cm. ....	86
Figura 69- NDVI em distintas fases do ciclo fenológico. (cores vermelhas e amarelas índice de NDVI baixo; cores verdes índices de NDVI intermédio; cores azuis-escuros índice de NDVI muito elevado) .....	88
Figura 70- NDVI em distintas fases do ciclo fenológico para os talhões 23 e 25.....	89
Figura 71- Produtividade de arroz nos diferentes talhões para os anos de 2017, 2018 e 2019.....	92
Figura 72- Rendimento líquido do arroz nos diferentes talhões para os anos de 2017, 2018 e 2019.....	92
Figura 73- Dados meteorológicos de temperatura e precipitação registados no INIAV Elvas e Normal climática para o período de setembro de 2018 a agosto de 2019 .....	95
Figura 74- Evolução dos valores de produção MV (kg ha <sup>-1</sup> ), NDVI e NDWI da forragem em cada momento de corte.....	96
Figura 75- Modelo linear de relação entre os valores de produtividade MV (kg ha <sup>-1</sup> ) e o NDVI médio para cada um dos momentos de corte da forragem.....	97
Figura 76- Modelo linear de relação entre os valores de produtividade MV (kg ha <sup>-1</sup> ) e o NDWI médio para cada um dos momentos de corte da forragem.....	97
Figura 77- Sequência de imagens do NDVI (coluna da esquerda) e NDWI (coluna da direita) da forragem (de cima para baixo): ao corte a dente, primeiro corte de feno silagem, segundo corte de feno silagem e corte para feno .....	98
Figura 78- Pontos de monitorização das 3 parcelas.....	101
Figura 79- Relação entre NDVI médio e VH médio para as 3 parcelas.....	101
Figura 80- Evolução temporal do NDVI médio para cada parcela .....	102
Figura 81- Relação entre diâmetro médio das inflorescências e acumulado de NDVI de 7 a 15 dias antes da colheita, para cada ponto de monitorização.....	103
Figura 82- Previsão de diâmetro médio de inflorescência para as 3 parcelas ao longo do mês de dezembro de 2017 .....	103
Figura 83- a) Vista geral das parcelas; b) NDVI absoluto no dia 2 de setembro de 2019 nas parcelas C3 e C2 .....	106

Figura 84- Puntos de amostragem escolhidos com base nos níveis NDVI .....	107
Figura 85- Correlação entre NDVI e Grau Brix .....	108
Figura 86- Amostragem recolhida no ponto 1 (6 de setembro de 2019) .....	109
Figura 87- Presença de infestantes no ponto 2 (6 de setembro de 2019) .....	109
Figura 88- Presença de infestantes no ponto 3 (6 de setembro de 2019) .....	110
Figura 89- Dessecação das plantas no ponto 7 (6 de setembro de 2019) .....	110
Figura 90- Evolução do NDWI médio em C3 e C2 .....	111
Figura 91- Plantas com maior vigor vegetativo no ponto 4 (6 de setembro de 2019) .....	111
Figura 92- Plantas do ponto 5 com sinais de déficit hídrico (6 de setembro de 2019) .....	112
Figura 93- Plantas no ponto 6 (6 de setembro de 2019) .....	112
Figura 94- Contraste do mapa NDVI com mapa relativo ao índice de solo (VV) .....	112
Figura 95- Teor provável de SST nos frutos de C3 e C2 .....	113
Figura 96- Vigor vegetativo médio da cultura do tomate (maio – setembro 2019) .....	114
Figura 97- Variabilidade entre plantas na cultura do tomate (CH4 – 06/06/2019) .....	115
Figura 98- Variabilidade entre plantas na cultura do tomate (CH2 – 30/05/2019) .....	115
Figura 99 a 102- Zonas de Gestão .....	116
Figura 103- Zonas de Gestão .....	117
Figura 104- Modelo linear de relação entre a produção (Kg/ha) e o NDVI médio para as parcelas de ervilha .....	119
Figura 105- Imagem NDVI, de uma parcela da campanha de 2018, a 100 dias após a sementeira .....	119
Figura 106- Gráfico de evolução temporal de NDVI para duas parcelas da campanha de 2018 .....	120
Figura 107- Mapas de lucro previsto para duas parcelas (P9 e P27) da campanha de 2018 .....	121
Figura 108- Localização dos povoamentos (A - Alcácer, B - Mora, C - Herdade da Mitra, D - Evoramonte e E - Torre de Coelhoiros) .....	123
Figura 109- Precipitação acumulada (mm) de outubro do ano anterior a julho do ano considerado, para as 5 áreas e para os 4 anos em estudo .....	124
Figura 110- Valores médios por parcela do NDVI por espécie, local e ano .....	125
Figura 111- Valores médios do NDWI por espécie, local e ano .....	126
Figura 112- Oscilación fenológica para el mes de abril de 2018 y 2019 en el Valle del Jerte (Cáceres-España) .....	129
Figura 113- Identificación de líneas de control y área quemada .....	129
Figura 114- Identificación de diferentes tipos de infraestructuras preventivas .....	130
Figura 115- Fórmula de los índices NDVI y NDWI (en algunas publicaciones NDMI) .....	131
Figura 116- Ejemplo del trabajo con GGE. Mapa de anomalía de los índices NDVI y NDWI para una zona de Sierra de San Pedro (Extremadura, España) .....	133
Figura 117- Evolución temporal (mayo-octubre) del índice NDWI .....	134





Figura 118- Incendio en zona de robledal el 23/07/2019 en Cilleros (Cáceres, España).....	135
Figura 119- Cálculo de severidad de incendio forestal calculado a partir de imágenes de Sentinel 2 en Villanueva de la Vera el 10/09/2019 (Cáceres, España) .....	135
Figura 120- Relação entre o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), a proteína bruta (PB) e a fibra (NDF) da pastagem .....	139
Figura 121- Relação entre o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), a humidade (HP) e o índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP) .....	140
Figura 122- Relação entre o “Normalized Difference Water Index” (NDWI), a proteína bruta (PB) e a fibra (NDF) da pastagem .....	140
Figura 123- Relação entre o “Normalized Difference Water Index” (NDWI), a humidade (HP) e o índice de degradação da qualidade da pastagem (IDQP) .....	141
Figura 124- Relação entre o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) e o “Normalized Difference Water Index” (NDWI).....	141
Figura 125- Relação entre o “Normalized Difference Water Index” (NDWI) e a humidade na camada superficial do solo (HS).....	142
Figura 126- (a) Produção de azeitona; (b) Produção de azeite; (c) Rendimento líquido; (d) Zonas de gestão da parcela.....	145
Figura 127- Cobertura obtenida con la antena desplegada .....	149
Figura 128- Antena desplegada en FEVAL .....	149
Figura 129- Plataforma Hardware que se han testeado.....	150
Figura 130- Sensores que se han testeado .....	150
Figura 131- Representación 3D de la pica .....	151
Figura 132- PINOUT de la pica con especificaciones.....	153
Figura 133- Diversos diseños realizados de la pica y su carcasa .....	154
Figura 134- Modelo 3D de la Estación meteorológica diseñada .....	154
Figura 135- Sensor SQ110 de radiación solar y su gráfica de respuesta - www.apogeeinstruments.com .....	155
Figura 136- Sensor SU100 Ultravioleta y su gráfica de respuesta - www.apogeeinstruments.com .....	156
Figura 137- Modelo 3D de la estación meteorológica con su estructura .....	157
Figura 138- Visualización de datos en Grafana.....	157
Figura 139- Sensores utilizados.....	159
Figura 140- Exemplo de um dos módulos impressos em 3D.....	159
Figura 141- Exemplo de um dos protótipos desenvolvidos.....	160
Figura 142- Exemplo de um dos protótipos desenvolvidos no terreno.....	160
Figura 143- Exemplo de um dos protótipos desenvolvidos numa plantação.....	160



**Interreg**  
España - Portugal

Fondo Europeo de Desarrollo Regional  
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



UNIÓN EUROPEA  
UNIÃO EUROPEIA

**Innoace**



INVESTIGACIÓN · INNOVACIÓN · TECNOLOGÍA · EMPRENDIMIENTO  
INVESTIGAÇÃO · INOVAÇÃO · TECNOLOGIA · EMPREENDEDORISMO