

Tesis doctoral

Tecnologías emergentes y agricultura de precisión en cultivos tridimensionales. Implementación y mejora de las técnicas de aplicación de fitosanitarios en viña.

Javier Campos Tobajas



Julio de 2021



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Tecnologías emergentes y agricultura de precisión en cultivos tridimensionales:

Implementación y mejora de las técnicas de aplicación de fitosanitarios en viña

Javier Campos Tobajas

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Tecnología Agroalimentaria y Biotecnología

Tesis por compendio de publicaciones

**Tecnologías emergentes y agricultura de
precisión en cultivos tridimensionales.
Implementación y mejora de las técnicas
de aplicación de fitosanitarios en viña.**

Autor: Javier Campos Tobajas

Director: Dr. Emilio Gil Moya

Castelldefels, julio de 2021

Eeehh...



**Disculpa, no puedo atenderte.
¡Estoy demasiado ocupado!**



Agradecimientos

Ha sido un largo e intenso camino, pero ya ha llegado el final. Este duro proceso no lo hubiera superado sin el apoyo y el conocimiento de todas las personas que me han acompañado en estos últimos 4 años, y con las siguientes líneas me gustaría reconocérselo.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director Emilio Gil toda la ayuda prestada durante este largo recorrido que ha supuesto la consecución de esta tesis doctoral. Su ayuda, consejos, motivación e incluso reprimendas han sido claves para mi desarrollo como investigador y docente. Además, ir de su mano me ha permitido trabajar con multitud de profesionales del sector agrícola que me han proporcionado grandes perspectivas y oportunidades en mi desarrollo personal y profesional. No sé si es porque compartimos procedencia, equipo de fútbol y/o por ser tocayo y coetáneo de tu hijo, en muchas ocasiones he percibido una relación paternofilial.

Trabajar tantos años en la Unidad de Mecanización Agraria de la UPC me ha permitido formar parte de un gran equipo, de profesionales, compañeros y amigos a los que nos une la pasión por la investigación y la mejora de los procesos agrícolas. Cabe destacar a Jordi Llop, a Montse Gallart y a Fran García, que me han visto crecer personal y profesionalmente todos estos años, y por su inestimable ayuda siempre que lo he necesitado. Sin vosotros no sé si lo hubiera conseguido.

También quiero agradecer a Enric Armengol, Paula Ortega, Bernat Salas, Elena Sanchez, Jordi Biscamps, Lu Xun, Adriana Ángel, Ramón Salcedo y Marcel Valera, actuales y antiguos integrantes de la UMA por su colaboración y tiempo compartido. Con vosotros se hace más llevadero el duro trabajo de investigación que realizamos.

No me puedo olvidar de Miquel Masip, por su inestimable ayuda e implicación, tanto técnica como personal en todos los proyectos que desarrollamos en la UMA. ¡No sabes lo que me has llegado a enseñar dentro de un taller!

También acordarme de María Julià y Sheila Alcalà por su ayuda durante los ensayos y su apoyo desde el laboratorio.

A los estudiantes de TFG, TFM y prácticas que en estos últimos años habéis pasado por la UMA contagiando vuestra motivación y ganas de trabajar y aprender, pero en especial me gustaría agradecer a Tomás Zaragoza y Pau Pons por las horas pasadas midiendo vegetación a pleno sol y los madrugones que soportaron para ayudarme, no habrá suficientes desayunos que los paguen.

Esta tesis doctoral nunca habría tenido lugar sin el apoyo del sector privado, que ha sido fundamental para su desarrollo y la obtención de estos resultados. Quiero agradecer a Topcon Positioning Spain S.L.U. y Estel Grup S.L. por cedernos los equipos necesarios para incorporar la tecnología de aplicación variable en base a mapas de prescripción al cultivo de la vid. También agradecer a Ilemo-Hardi, S.A.U. por la cesión de equipos de aplicación de fitosanitarios adecuados para la viña, lo que ha permitido a la UMA desarrollar infinidad de proyectos de investigación. Además, también quiero agradecer a Miguel Torres S.A. y a su finca Jean Leon, por su decisión de incorporar la aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción en sus fincas y permitimos utilizar sus parcelas y equipos para la realización de los ensayos de campo.

Una mención especial a mis viticultores preferidos Andreu Pinyol y Josep Bruna, muchas gracias por enseñarme a ver los tratamientos fitosanitarios en viña desde una perspectiva distinta a la que conocía. Además, os quiero agradecer las ganas, la paciencia y la voluntad que habéis tenido para que esta tesis doctoral haya salido adelante. No es fácil adaptarse a las nuevas tecnologías y cambiar algo que lleváis haciendo desde incluso antes de que yo hubiera nacido.

Por último, me gustaría agradecer a mi familia y amigos, y en especial a Júlia, por vuestra paciencia y apoyo durante todo este tiempo. A pesar de que todos me conocéis como el que está siempre trabajando, siempre hemos tenido tiempo para disfrutar de la compañía y así hacer más llevadero todo este enorme trabajo. Sin todos vosotros este largo camino nunca hubiera tenido fin. ¡Os quiero mucho!

Resumen

El uso de productos fitosanitarios se ha convertido en una herramienta esencial en la agricultura para lograr los requisitos mínimos de calidad y cantidad de alimentos demandados por los consumidores. Además, debido a su reiterado uso durante toda la campaña, lo convierten en una de las estrategias más complejas de la agricultura actual, debido a la preocupación por conseguir productos libres de plagas y enfermedades, libres de residuos, y evitando los posibles riesgos medioambientales.

A partir de la recientemente publicada Estrategia de la Granja a la Mesa, que tiene como objetivo la difícil tarea de reducir el 50 % la cantidad de plaguicidas peligrosos utilizados antes del año 2030, cobra cada vez mayor importancia la implementación de mejoras en las técnicas de aplicación que permitan aumentar la eficacia y la eficiencia de los tratamientos y, consecuentemente, la potencial reducción de la cantidad de plaguicidas utilizados. Esta estrategia es especialmente importante en los cultivos especiales como los frutales o la viña, donde el uso de productos fitosanitarios es muy elevado, en comparación con lo que sucede en el caso de cultivos herbáceos. Además, este tipo de cultivos se caracterizan por presentar un alto grado de variabilidad espacial en cuanto a las características estructurales de la vegetación, lo que dificulta lograr una aplicación segura y eficaz de los productos fitosanitarios.

En este sentido, la tecnología de aplicación variable es capaz de reducir el efecto de la variabilidad intraparcularia ajustando el volumen de caldo a las características de la vegetación en cada punto, consiguiendo de esta forma una distribución del producto fitosanitario mucho más racional y más ajustada a la vegetación que los realizados de manera homogénea. Actualmente, se conocen tres tipos de tecnología de aplicación variable: 1) basada en la aplicación en tiempo real a partir de información obtenida por sensores, 2) fundamentada en mapas de prescripción, y 3) una combinación de las dos anteriores.

Aunque los sistemas de aplicación variable en base a sensores en tiempo real eliminan la necesidad del conocimiento previo del cultivo, esta tecnología no se ha implementado de forma práctica en el sector vitícola. Esto contrasta con la adopción de los mapas de vegetación obtenidos con sensores remotos, que por el contrario llevan más de diez años utilizándose comercialmente para la gestión del viñedo. Entre las operaciones de manejo en las que los mapas de vegetación pueden tener un mayor impacto, está la de la aplicación de fitosanitarios que se encuentra en estos momentos en un nivel de implementación incipiente. Por este motivo, el objetivo principal de esta tesis doctoral, estructurada en tres artículos científicos, es adecuar e incorporar tecnologías de aplicación variable en base a mapas de prescripción para la mejora de la eficacia y la eficiencia de los tratamientos en el cultivo de la viña.

El primer artículo de la tesis se fundamenta en el diseño, puesta a punto y validación en campo de un prototipo de aplicación variable en base a mapas de prescripción para el cultivo de la vid. En el artículo se incluye todo el proceso de pulverización variable en base a mapas, desde la creación del mapa de prescripción hasta la obtención del mapa de aplicación real. Los resultados obtenidos muestran la posibilidad de ahorrar hasta un 47.3 % de la cantidad de producto fitosanitario respecto a un tratamiento convencional, demostrando que es posible adaptar, con los correspondientes cambios y ajustes, la tecnología disponible al caso específico del cultivo de la viña.

El objetivo principal del segundo artículo científico es la evaluación de la calidad de la distribución del producto fitosanitario sobre la planta y la evaluación de la eficacia biológica de las aplicaciones durante

una campaña completa de tratamientos. Durante la investigación se evaluó el grado de adopción del sistema de aplicación variable en una finca comercial y la posibilidad de instaurar esta tecnología en su programa anual de tratamientos. Se realizaron un total de 28 tratamientos empleando la tecnología de aplicación variable en base a mapas, obteniéndose en todos los tratamientos y zonas de vigor un recubrimiento entre el 20 y el 40 %, considerándose valores adecuados para garantizar el control de plagas/enfermedades en cualquier proceso de pulverización. En cuanto a la eficacia biológica, se mantuvieron los mismos niveles de control que los tratamientos convencionales, no encontrándose diferencias significativas entre ambos. Aunque se demostró que el sistema de aplicación variable permitió ajustar el volumen de aplicación en todo momento a las características de la vegetación, no ocurriendo lo mismo en la aplicación convencional, donde en algún momento de la campaña se tuvo que doblar el volumen de aplicación para conseguir controlar la plaga.

La metodología de trabajo utilizada durante el primer y segundo artículo de esta tesis se fundamentó en la determinación de la variabilidad de la viña mediante imágenes aéreas obtenidas con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y la posterior caracterización de la vegetación de manera manual como método para su validación. La determinación de las características estructurales de la vegetación permitió, en ambos casos, determinar el volumen óptimo para cada una de las zonas de vigor identificadas, a partir del empleo de la aplicación Dosaviña®. Teniendo en cuenta que esta parte del proceso de caracterización de la vegetación y su posterior comprobación manual, puede ser una limitación para la introducción de la tecnología en el sector vitícola, se investigó la posibilidad de evaluar las características de la vegetación de forma automática, a partir de la obtención y análisis de sus datos espectrales. Por este motivo, el tercer artículo de esta tesis se centra en obtener modelos de regresión lineal capaces de relacionar la información obtenida a partir de la caracterización manual de la vegetación con información espectral obtenida por diferentes plataformas aéreas (UAV y satélite). Para ello, se caracterizaron manualmente 1,400 cepas, determinando en cada uno de los casos la altura, la anchura, el Tree Row Volume (TRV) y el Leaf Wall Area (LWA). Además, se obtuvo el valor de NDVI a partir de los datos obtenidos con las diferentes plataformas aéreas empeladas. Las relaciones entre la caracterización manual de la vegetación y los datos obtenidos con el UAV arrojaron coeficientes de determinación entre 0.84 y 0.94, mientras que los obtenidos con el satélite (PlanetScope) fueron en torno a 0.5. Estos resultados indicaron que es posible obtener mapas de prescripción a partir de los datos obtenidos con el UAV y que existe una cierta tendencia positiva que invita a seguir investigando la potencialidad de los satélites para caracterizar la vegetación.

Los resultados obtenidos en esta tesis indican que el uso de la teledetección con imágenes obtenidas mediante UAV o satélites permite determinar la variabilidad de las parcelas y predecir las características de la vegetación. Además, se ha demostrado que la aplicación variable en base a mapas de prescripción en cultivos especiales como la viña ha permitido mejorar la calidad de las aplicaciones y el uso los productos fitosanitarios.

Palabras clave: Viña · aplicación de fitosanitarios · aplicación variable · mapa de prescripción · Dosaviña® · vehículos aéreos no tripulados (UAV) · satélites

Resum

L'ús dels productes fitosanitaris s'ha convertit en una eina essencial de l'agricultura per aconseguir els requisits mínims de qualitat i quantitat d'aliments exigits pels consumidors. A més, a causa del seu reiterat ús durant tota la campanya, ho converteixen en una de les estratègies més complexes de l'agricultura actual a causa de la preocupació per aconseguir productes lliures de plagues i malalties, lliures de residus i evitant els possibles riscos mediambientals.

A partir de la recentment publicada “Estratègia de la Granja a la Taula”, que té com a objectiu la difícil tasca de reduir el 50 % la quantitat de plaguicides perillosos utilitzats abans de l'any 2030, cobra cada vegada major importància la implementació de millores en les tècniques d'aplicació que permetin augmentar l'eficàcia i l'eficiència dels tractaments i, consegüentment la potencial reducció de la quantitat de plaguicides utilitzats. Aquesta estratègia és especialment important en els anomenats “cultius especials” com són els fruiters o la vinya, on l'ús de productes fitosanitaris és molt elevat, en comparació amb el que succeeix en el cas de cultius herbacis. A més, aquests tipus de cultius es caracteritzen per presentar una gran variabilitat pel que fa a les característiques estructurals de la vegetació al llarg de la parcel·la, cosa que dificulta realitzar una aplicació segura i eficaç dels productes fitosanitaris.

En aquest sentit, la tecnologia d'aplicació variable és capaç de reduir l'efecte de la variabilitat intraparcèl·laria, ajustant el volum d'aplicació a les característiques de la vegetació a cada punt, aconseguint d'aquesta manera una distribució del producte fitosanitari molt més racional i més ajustada a la vegetació que els realitzats de manera homogènia. Actualment, es coneixen tres tipus de tecnologia d'aplicació variable: 1) basada en l'aplicació en temps real a partir d'informació obtinguda per sensors, 2) fonamentada en mapes de prescripció, i 3) una combinació de les dues anteriors.

Encara que els sistemes d'aplicació variable basats en sensors en temps real eliminen la necessitat del coneixement previ del cultiu, aquesta tecnologia no s'ha implementat de manera pràctica en el sector vitícola. Això contrasta amb l'adopció dels mapes de vegetació obtinguts amb sensors remots, que fa més de deu anys que s'utilitzen comercialment per a la gestió de la vinya. Entre les operacions de maneig, en les quals els mapes de vegetació poden tenir un major impacte, està la de l'aplicació de fitosanitaris, que es troba en aquests moments en un nivell d'implementació incipient. Per aquest motiu, l'objectiu principal d'aquesta tesi doctoral, estructurada en tres articles científics, és adequar i incorporar tecnologies d'aplicació variable basada en mapes de prescripció per a la millora de l'eficàcia i l'eficiència dels tractaments en el cultiu de la vinya.

El primer article de la tesi es va centrar en el disseny, posada a punt i validació a camp d'un prototip d'aplicació variable sobre la base de mapes de prescripció per al cultiu de la vinya. En aquest article s'inclou tot el procés de polvorització variable en base a mapes, des de la creació del mapa de prescripció fins a l'obtenció del mapa d'aplicació real. Els resultats obtinguts mostren la possibilitat d'estalviar fins a un 47.3 % la quantitat de producte fitosanitari respecte a un tractament convencional, demostrant que és possible adaptar, amb els corresponents canvis, la tecnologia disponible al cas específic del cultiu de la vinya.

L'objectiu principal del segon article científic és l'avaluació de la qualitat de la distribució del producte fitosanitari sobre la planta i l'avaluació de l'eficàcia biològica de les aplicacions durant una campanya completa de tractaments. Durant l'estudi es va avaluar el grau d'adopció del sistema d'aplicació variable

en una finca comercial i la possibilitat d'instaurar la tecnologia en el seu programa anual de tractaments. Es van realitzar un total de 28 tractaments utilitzant la tecnologia d'aplicació variable basada en mapes, obtenint en tots els tractaments i zones de vigor un recobriment entre el 20 i el 40 %, considerant-se valors adequats per a garantir el control de plagues/malalties en qualsevol procés de polvorització.

Pel que fa a l'eficàcia biològica, es van mantenir els mateixos nivells de control que els tractaments convencionals, no trobant-se diferències significatives entre tots dos. Encara que es va demostrar que el sistema d'aplicació variable va permetre l'ajust dels volums d'aplicació en tot moment a les característiques de la vegetació, no ocorrent el mateix en l'aplicació convencional, on en algun moment de la campanya es va haver de doblar el volum d'aplicació per a aconseguir controlar la plaga.

La metodologia de treball utilitzada durant el primer i segon article d'aquesta tesi es va fonamentar en la determinació de la variabilitat de la vinya mitjançant imatges aèries obtingudes amb vehicles aeris no tripulats (UAV) i la posterior caracterització de la vegetació de manera manual com a mètode per a la seva validació. La determinació de les característiques estructurals de la vegetació van permetre, en tots dos casos, determinar el volum òptim per a cadascuna de les zones de vigor identificades, a partir de l'ús de l'aplicació Dosaviña®. Tenint en compte que aquesta última part del procés de caracterització de la vegetació i la posterior comprovació manual, pot ser una limitació per a la introducció de la tecnologia en el sector vitícola, es va investigar la possibilitat d'avaluar les característiques de la vegetació de manera automàtica, a partir de l'obtenció i anàlisi de les seves dades espectrals. Per aquest motiu, el tercer article d'aquesta tesi es va centrar a obtenir models de regressió lineal per relacionar la informació obtinguda manualment de la vegetació amb la informació espectral obtinguda per diferents plataformes aèries (UAV i satèl·lit). Per a això, es van caracteritzar manualment 1,400 ceps, determinant en cada cas l'alçada, l'amplada, el Tree Row Volume (TRV) i el Leaf Wall Area (LWA). A més, es va obtenir el valor de NDVI a partir de les dades obtingudes amb les diferents plataformes aèries utilitzades. Les relacions entre la caracterització manual de la vegetació i les dades obtingudes amb el UAV van mostrar coeficients de determinació entre 0.84 i 0.94, mentre que els obtinguts amb el satèl·lit (PlanetScope) van ser pròxims a 0.5. Aquests resultats van indicar que és possible obtenir mapes de prescripció a partir de les dades obtingudes amb el UAV i que existeix una certa tendència positiva que convida a continuar investigant la potencialitat dels satèl·lits per a caracteritzar la vegetació.

Els resultats obtinguts en aquesta tesi indiquen que l'ús de la teledetecció amb imatges obtingudes mitjançant UAV o satèl·lits permet determinar la variabilitat de les parcel·les i predir les característiques de la vegetació. A més, s'ha demostrat que l'aplicació variable basada en mapes de prescripció a cultius especials com la vinya ha permès millorar la qualitat de les aplicacions i l'ús de productes fitosanitaris.

Paraules clau: Vinya · aplicació de fitosanitaris · aplicació variable · mapa de prescripció · Dosaviña® · vehicles aeris no tripulats (UAV) · satèl·lits

Abstract

The use of plant protection products (PPP) has become an essential tool in agriculture to achieve the minimum requirements of quality and quantity of food demanded by consumers. Moreover, due to its repeated use throughout the campaign, it is one of the most complex strategies in agriculture, due to the concern for achieving products free of pests and diseases, free of residues, and avoiding environmental risks.

The recently published Farm to Fork Strategy aims at the difficult task of reducing the amount of hazardous pesticides used by 50 % by 2030. From the moment this strategy was published, it gained importance the implementation of improvements in application techniques to increase the effectiveness and efficiency of treatments. This is especially relevant in specialty crops such as orchards or vineyards, where the use of PPP is very high, compared with the case of field crops. In addition, this type of crops is characterised by a high degree of spatial variability in terms of the canopy structural characteristics, which makes it difficult to achieve a safe and effective application of pesticides.

In this sense, variable rate application technology can reduce the effect of intra-plot variability, adjusting the volume rate to the canopy characteristics at each point, achieving a much more rational distribution of the plant protection product and more adjusted to the canopy than those carried out homogeneously. Currently, three types of variable rate application technology are known: 1) based on real-time sensors, 2) based on prescription maps, and 3) a combination of the two previous ones.

Although variable rate application systems based on real-time sensors eliminate the need for prior knowledge of the crop, this technology has not been practically implemented in the viticulture sector. This contrasts with the adoption of vegetation maps acquired using remote sensing, which has been in commercial use for vineyard management for more than ten years. Among the management operations in which vegetation maps can have a greater impact is that of plant protection application, which is currently at an incipient level of implementation. For this reason, the main objective of this doctoral thesis, structured in three research publications, is to adapt and incorporate variable application technologies based on prescription maps to improve the efficacy and efficiency of treatments in the vineyard.

The first research publication of the thesis was focused on the design, fine-tuning and field validation of a prototype of variable rate application based on prescription maps for vineyards. The article includes the whole process of variable map-based spraying, from the creation of the prescription map to obtaining the actual application map. The obtained results showed the possibility of saving up to 47.3 % of the amount of PPP concerning conventional treatment, demonstrating that it is possible to adapt, with the corresponding changes and adjustments, the available technology to the specific case of the vineyard.

The main objective of the second research publication was the evaluation of the quality of the distribution of PPP on the vines and the evaluation of the biological efficacy of the applications during a complete campaign of treatments. During the research, the degree of adoption of the variable rate application system on a commercial farm and the possibility of implementing the technology in its annual treatment program were evaluated. A total of 28 treatments were carried out using the map based variable rate technology, obtaining in all treatments and vigour zones a coverage between 20 and 40 %, considered adequate values to guarantee pest/disease control in any spraying process. In terms of biological efficacy, the same levels of control were maintained as in the conventional treatments, and

no significant differences were found between them. Although it was demonstrated that the variable rate application system allowed adjusting the volume rate to the canopy characteristics, did not occur the same in the conventional application, where at some moment during the campaign the volume rate had to be doubled to control the pest.

The work methodology used during the first and second research papers of this thesis was based on determining the variability of the vineyard using aerial images obtained with Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and the manual canopy characterization as a method for its validation.

The determination of the structural canopy characteristics made it possible, in both cases, to determine the optimum volume rate for each vigour zone identified, using the APP Dosaviña®. Considering that this part of the process could be a limitation for the introduction of the technology in the vineyard sector, the possibility of evaluating vegetation characteristics automatically, based on spectral data, was investigated.

For this reason, the third research publication of this thesis was focused on obtaining linear regression models capable of relating the information obtained from the manual canopy characterization with spectral information obtained by different aerial platforms (UAV and satellite). For this purpose, 1,400 vines were manually characterised, determining in each case the height, width, Tree Row Volume (TRV) and Leaf Wall Area (LWA). In addition, the NDVI value was obtained from the spectral data obtained with the aerial platforms used. The relationships between the manual canopy characterization and the data obtained with the UAV yielded coefficients of determination between 0.84 and 0.94, while those obtained with the satellite (PlanetScope) were around 0.5. These results indicated that it is possible to obtain prescription maps from the data obtained with the UAV and that there is a certain positive trend that invites further research on the potential use of satellites for canopy characterization purposes.

The results obtained in this thesis indicate that the use of remote sensing with UAV or satellite imagery allows determining plot variability and predicting vegetation characteristics. In addition, it has been demonstrated that variable rate application based on prescription maps in specialty crops such as vineyards has improved the quality of treatments and the use of plant protection products.

Key words: Vineyard · pesticide application · variable rate application · prescription map · Dosaviña® · Unmanned Aerial Vehicles (UAV) · satellites.

Índice

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Resum	IX
Abstract	XI
Introducción	1
1. Importancia de la viticultura y de la producción del vino	1
2. Importancia del control de plagas y enfermedades: cómo asegurar una alta calidad del producto	4
3. Normativa Europea relacionada con el uso de los productos fitosanitarios	6
4. Expresión de la dosis	9
5. Viticultura de precisión	10
5.1 <i>Adquisición de datos</i>	10
5.2 <i>Extracción de información</i>	12
5.3 <i>Toma de decisiones</i>	13
5.4 <i>Actuación en campo</i>	14
6. Formación y transferencia	16
Objetivos	19
Resultados	23
<i>Capítulo 1</i> Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process	23
<i>Capítulo 2</i> On-farm evaluation of prescription map-based variable rate application of pesticides in vineyards	47
<i>Capítulo 3</i> Assessment of vineyard canopy characteristics from vigour maps obtained using UAV and satellite imagery	71
Discusión general	93
Conclusiones	97
Referencias bibliográficas	99
Acrónimos	109
Tablas y Figuras	111

Introducción

1. Importancia de la viticultura y de la producción del vino

A lo largo de nuestra historia reciente, el cultivo de la vid y la consiguiente producción vinícola, se han convertido en una actividad esencial en la agricultura global. Esto es debido a su gran impacto económico, social, medioambiental y cultural, desarrollado en gran parte de las regiones del mundo.

Aunque no se tenga la absoluta certeza, hay evidencias de la existencia de vid silvestre en nuestro planeta que se remonta a la época del Cretácico, hace unos cien millones de años. La vid silvestre era una liana dioica que crecía apoyada sobre los árboles de los bosques de zonas templadas del hemisferio norte (Martínez de Toda y Sancha, 1997).

La viticultura, es decir, el proceso del cultivo de la vid, se remonta a los inicios del neolítico en la zona del Cáucaso y se desarrolla en Mesopotamia entre 6.000 y 4.000 años a.C., época en la cual el hombre se inicia en la agricultura.

El proceso de la elaboración del vino, comenzó antes del inicio de la viticultura, partiendo de racimos provenientes de vides silvestres, posiblemente fruto de la casualidad al almacenar bayas en vasijas de barro para su conservación.

Con el inicio de la viticultura, posiblemente, los egipcios comenzaron la elaboración del vino utilizando recipientes de barro para su conservación, de lo cual se han encontrado evidencias en arqueología faraónica (El-Khouli et al., 1993; Guasch-Jané et al., 2006). Desde aquí se trasladaría a oriente próximo y desde allí a todo el entorno Mediterráneo, a las actuales Grecia, Italia, España y norte de África, desde donde se transfirió al resto de Europa.

En un primer momento, el cultivo de la viña y la producción de vino se estableció cerca de la costa y de los ríos, ya que de esta manera se facilitaba su transporte y su transferencia a otros territorios. Esto devino en una actividad vitivinícola que con el paso del tiempo se fue tecnificando y estableciéndose modelos de producción similares a los conocidos en la actualidad y que se convirtieron en un factor clave en la economía y forma de vida de muchos países europeos, especialmente en Italia, Francia y España.

En la actualidad, estos tres países son los mayores productores de vino y son tres de los cuatro territorios con mayor superficie dedicada al cultivo de la vid en todo el mundo (OIV, 2020), convirtiendo a Europa en un referente mundial del sector vitivinícola.

En el año 2020, la superficie mundial dedicada al cultivo de la vid fue de 7.3 millones de hectáreas, contemplándose todos sus usos (vinificación, uva de mesa y uva pasa), valores similares a los registrados desde 2016 (OIV, 2020). Según los datos de la Organización Internacional de la Viticultura (OIV), 5 países en conjunto, España, Francia, China, Italia y Turquía, representan más de la mitad (50.4 %) de la totalidad de los viñedos plantados en el mundo (Figura 1).

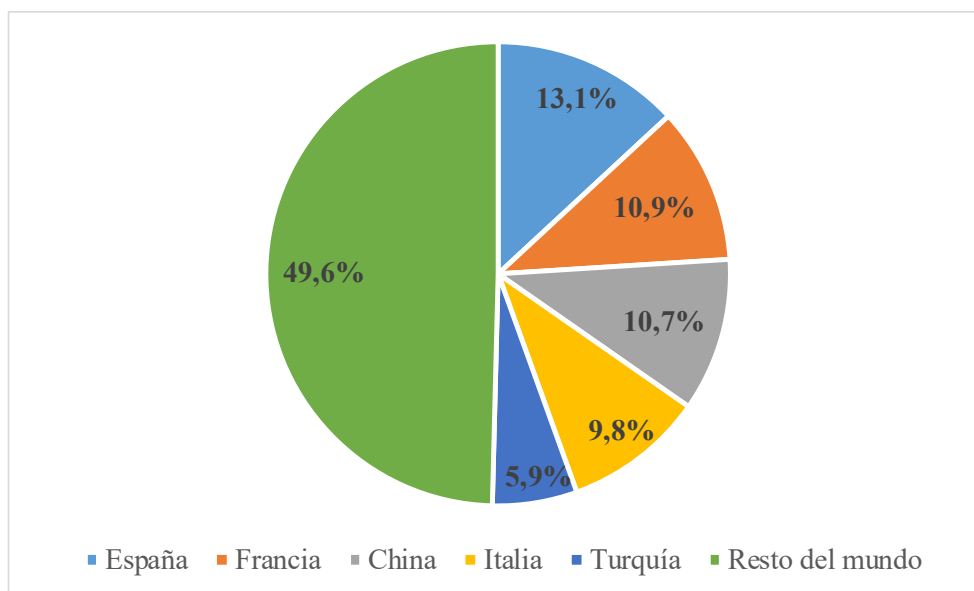


Figura 1. Distribución de la superficie mundial de viñedo en el año 2019. Fuente: “*State of the world vitivinicultural sector in 2020*”. OIV 2020. Statistical Book (OIV, 2020).

Cabe destacar el importante papel que supone la Unión Europea en el sector, con una superficie dedicada de 3.3 millones de hectáreas (45.2 % de la superficie total mundial), situando a España como el país con mayor superficie plantada de viña en el mundo (961,000 ha), y a Francia e Italia como segundo y cuarto país (797,000 y 719,000 ha respectivamente). En los últimos años la superficie dedicada al cultivo de la vid en la UE se ha estabilizado debido al equilibrio experimentado entre el arranque y las nuevas plantaciones, impulsadas por El Reglamento (UE) n.º 1308/2013, que permite a los estados miembros autorizar una plantación que genere un crecimiento de hasta un 1 % del viñedo ya plantado. Por otro lado, China se sitúa en tercer lugar, lográndolo desde el año 2016, con una superficie plantada de 785,000 ha.

En términos de producción mundial de vino, excluyéndose zumos y mostos, en 2020 el volumen se sitúa en 260 millones de hL (OIV, 2020). Esto significa un pequeño aumento de apenas 3 millones de hL respecto al año 2019. Sin embargo, contrasta con el valor registrado en 2018 que fue 35 millones superior (295 millones de hL). A pesar de esta notable disminución con respecto a los valores del 2018, los volúmenes registrados en 2019 y en 2020 han vuelto a los niveles medios de producción de los últimos años.

La producción de vino en la Unión Europea supone un 63 % de la producción mundial, alcanzando los 165 millones de hL (OIV, 2020). Hay que remarcar la importancia de la producción de Italia (49.1 millones de hL), Francia (46.6 millones de hL) y España (40.7 millones de hL), que acumulan entre ellos el 52 % de la producción global siendo los principales productores mundiales.

En España, el sector vitivinícola tiene una gran importancia, no sólo en términos económicos sino también por lo que significa para la sociedad y la cultura del país.

El sector del vino supone la base de la economía de muchos pueblos y ciudades del país, se produce vino en 4,300 bodegas distribuidas en las 17 Comunidades Autónomas (CCAA), fijando la población al territorio y disminuyendo el despoblamiento de las zonas rurales. Genera y mantiene 427,7000 puestos de trabajo (2.4 % del total en España), incluyendo empleos directos, empleos en la industria auxiliar, en la hostelería y en el turismo (FEV, 2020)

En 2020 España fue el segundo mayor exportador mundial en volumen, con 20.2 millones de hL, lo que han supuesto 2,626 millones de euros, cifra que coloca al país como el tercer mayor exportador en valor económico (OIV, 2020). La facturación de las bodegas españolas asciende a 5,381 millones de euros al año y la actividad de la cadena de valor vitivinícola supone el 2,2 % del Valor Añadido Bruto (VAB) en España (FEV, 2020)

El vino forma parte de la dieta mediterránea y de los usos y costumbres de la población, siendo protagonista en gran parte de sus fiestas y celebraciones, aspecto este que atrae al turismo tanto nacional como internacional. Casi 3 millones de personas visitan las bodegas y las Rutas del Vino de España, suponiendo un gasto cercano a 80 millones de euros al año (FEV, 2020).

España cuenta con una amplia red de figuras de calidad reconocidas, que aseguran que se produzca vino de calidad, así como que todos los procesos que intervienen en su elaboración sigan unos parámetros establecidos previamente por los organismos de control. Esta red de figuras de calidad se compone de las Denominaciones de Origen Protegidas (DOP), las Indicaciones Geográficas Protegidas (IGP), y los sellos de Agricultura Ecológica (AE).

Según el Reglamento (CE) 1151/2012 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de noviembre de 2012, sobre los regímenes de calidad de los productos agrícolas y alimenticios, una DOP es “Un nombre que identifica un producto originario de un lugar determinado, una región o, excepcionalmente, un país, cuya calidad o características se deben fundamental o exclusivamente a un medio geográfico particular, con los factores naturales y humanos inherentes a él, y cuyas fases de producción tengan lugar en su totalidad en la zona geográfica definida.”

La Denominación de Origen Protegida (DOP) es la marca colectiva de calidad europea que unifica a todos los países miembros bajo un único sello. No obstante, cada país de la UE tiene sus propias categorías de calidad que se incluyen dentro de la DOP.

Las categorías incluidas en la DOP vinícola española, ordenadas de mayor a menor en exigencia de calidad, son: Vinos de Pago, Denominación de Origen Calificada (DOCa), Denominación de Origen, y Vinos de Calidad con indicación geográfica (VC). En la actualidad, en España, existen un total de 95 DOPs clasificadas como:

- 18 vinos de pago
- 70 denominaciones de origen (DO), dos de ellas calificadas (DOCa).
- 7 vinos de calidad (VC)

Por otro lado, el Reglamento (CE) 1151/2012 define las IGP como “Un nombre que identifica un producto originario de un lugar determinado, una región o un país, que posea una cualidad determinada, una reputación u otra característica que pueda esencialmente atribuirse a su origen geográfico, y de cuyas fases de producción, una al menos tenga lugar en la zona geográfica definida”.

Las IGP españolas vinícolas se agrupan bajo la figura de "Vinos de la Tierra" y actualmente se cuenta con un total de 42.

El Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos define la producción ecológica como un sistema general de gestión agrícola y producción de alimentos que combina las mejores prácticas en materia de medio ambiente y clima, un elevado nivel de biodiversidad, la conservación de los recursos

naturales y la aplicación de normas exigentes sobre bienestar animal y sobre producción que responden a la demanda, expresada por un creciente número de consumidores, de productos obtenidos a partir de sustancias y procesos naturales.

En España, actualmente, hay una superficie de 121,200 hectáreas dedicadas al cultivo de la vid en producción ecológica, siendo el país con mayor superficie utilizada para este propósito. De esta superficie se producen más de 400 mil toneladas de uva de vinificación (FEV, 2020).

Otro aspecto a remarcar en cuanto a la calidad de todos los procesos que intervienen en el cultivo de la viña y la consiguiente producción de vino es la implementación de I+D+I que otorga a empresas y viticultores la posibilidad de interactuar cada vez más con Universidades y Centros de Investigación para implementar los desarrollos tecnológicos que estos llevan a cabo. El sector del vino en España es puntero en innovación e investigación, invirtiendo de media, en los últimos 5 años, entre 170 y 180 millones de euros al año (FEV, 2020).

Alguno de los numerosos requisitos que imponen los organismos de control de las diferentes figuras de calidad tiene relación con la aplicación de fitosanitarios, como son:

- 1) Uva libre de enfermedades. La presencia enfermedades en la uva, como mildiu, oídio y botritis, implica una reducción de la calidad del mosto y como consecuencia del vino elaborado (Vaquero Fernández, 2010).
- 2) Cumplimentación óptima del cuaderno de campo.
- 3) Restricción del uso de determinados productos fitosanitarios que afectan negativamente a la calidad de la uva y/o al proceso de vinificación.

2. Importancia del control de plagas y enfermedades: cómo asegurar una alta calidad del producto

Una de las estrategias más utilizadas en la actualidad para el correcto control de plagas, enfermedades y malas hierbas es el uso de productos fitosanitarios, principalmente herbicidas, fungicidas e insecticidas. La aplicación de estos productos se ha convertido en herramienta esencial para lograr los requisitos mínimos de calidad y cantidad de alimentos que se demandan por la sociedad. Sin embargo, la aplicación de productos fitosanitarios, se ha convertido en una de las actividades más complejas de la agricultura actual debido a la preocupación por conseguir productos libres de plagas y enfermedades, libres de residuos fitosanitarios y evitando los posibles riesgos medioambientales. Esto es especialmente importante en cultivos especiales como las hortalizas, los frutales y la viña, donde muchos de los productos que se consumen se hacen en fresco, sin transformación alguna y cuya producción requiere una mayor cantidad de productos fitosanitarios para su correcto desarrollo.

La siguiente tabla (Tabla 1) muestra las dosis de materias activas empleadas en los diferentes cultivos en la Unión Europea desde el año 1992 hasta el año 2003, año hasta el cual se dispone de datos estadísticos.

Tabla 1. Dosis de aplicación (kgMA ha⁻¹) de productos fitosanitarios en diferentes cultivos en la Unión Europea desde el año 1992 al 2003. Fuente: “*The use of plant protection products in the European Union*” Data 1992-2003. EUROSTAT 2007. Statistical Books (EUROSTAT, 2007).

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Cereales	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.3	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.3
Maíz	1.5	1.3	1.4	1.6	1.5	2.0	2.1	2.1	1.6	1.5	1.5	1.3
Leguminosas	0.6	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
Patatas	5.1	5.3	5.8	5.7	5.7	6.7	9.0	7.5	5.1	5.3	6.3	6.3
Remolacha	3.8	3.7	3.6	3.9	4.0	4.3	4.4	3.7	3.5	3.5	3.7	3.1
Cultivos bajos (total)	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	1.1	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1
Cítricos	5.3	4.9	7.3	6.8	6.3	4.8	4.4	4.6	4.8	6.5	7.1	7.2
Vid	25.0	30.8	28.9	32.4	33.7	35.3	32.5	31.9	27.2	27.0	26.5	21.4
Frutales	6.8	7.4	7.5	9.3	8.3	8.7	8.5	7.8	6.7	7.1	7.9	6.9
Brasicas	2.8	3.1	3.3	4.2	4.4	2.0	1.8	2.6	0.9	1.2	1.4	1.6
Cucurbitáceas	1.8	7.1	6.4	6.8	6.1	10.1	7.0	10.4	4.5	5.2	4.8	6.2
Tomates	15.3	15.6	11.5	12.6	12.7	6.0	6.2	7.1	2.7	5.1	3.2	3.7
Otras hortalizas	16.2	13.1	13.2	14.5	16.4	39.2	44.2	48.1	47.0	45.9	50.4	61.7
Cultivos especiales (total)	16.1	19.0	18.1	20.8	21.1	22.4	21.0	20.7	17.2	17.3	17.7	15.0

Como se puede ver en la Tabla 1 el consumo de materias activas en los cultivos especiales, como hortalizas, frutales o viña, es muy superior al de los cultivos bajos, como trigo, cebada o maíz.

Teniendo en cuenta los datos estadísticos del año 2003, en los cultivos especiales, a pesar de sólo representar el 7 % de la superficie agrícola de la Unión Europea, el consumo de productos fitosanitarios representó un 55 % del total de los fitosanitarios utilizados.

Poniendo el foco en los datos específicos del cultivo de la vid, se aplicó un 34 % del total de los productos fitosanitarios utilizados, representando este cultivo tan solo un 2.9 % de la superficie agrícola de la Unión Europea.

Estos datos refrendan, sin duda alguna, la importancia de un uso sostenible de los productos fitosanitarios en los cultivos especiales dada la elevada presión que implica su utilización.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones y centrándonos en el cultivo de la vid, la preocupación del sector por conseguir la máxima calidad del producto final junto a un proceso de elaboración respetuoso con el medio ambiente focaliza los máximos esfuerzos en conseguir un viñedo libre de enfermedades (Vaquero Fernández, 2010), libre de residuos (Navarro et al., 1999; Cabras y Angioni, 2000) y libre de contaminación medioambiental (Gil y González, 2014).

Esta creciente preocupación ha llevado en los últimos años a un cambio sustancial del marco legislativo europeo relacionado con la protección de cultivos en general y la aplicación de productos fitosanitarios, en particular. Importantes cambios que han derivado en la publicación de un considerable número de Directivas, Reglamentos, Ordenes y otros tipos de medidas legislativas de obligado cumplimiento, a la vez que se han puesto en marcha infinidad de acciones encaminadas hacia un uso seguro y sostenible de los productos fitosanitarios.

3. Normativa Europea relacionada con el uso de los productos fitosanitarios

La primera referencia normativa relativa a la prohibición de todos los productos fitosanitarios que contengan sustancias activas capaces de tener efectos nocivos para la salud humana o animal, o para el medio ambiente, la encontramos en la Directiva del Consejo 79/117/CEE de 21 de diciembre de 1978 relativa a la prohibición de salida al mercado y de utilización de productos fitosanitarios que contengan determinadas sustancias activas. Dicho texto, junto con la Directiva del Consejo de 15 de julio de 1991 relativa a la comercialización de productos fitosanitarios (91/414/CEE) conformaron el marco normativo europeo previo al Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente, que supuso un punto de inflexión en la regulación europea en materia de fitosanitarios y que implicó profundas modificaciones legislativas.

La aprobación de la Decisión nº1600/2002/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de julio de 2002 por la que se establece el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente (considerando veintiséis de dicho texto), estableció entre sus metas la de contribuir a un alto nivel de calidad de vida y bienestar social para los ciudadanos, proveyendo un medio ambiente en el que los niveles de contaminación no tuvieran efectos perjudiciales sobre la salud humana y el medio ambiente, recogiendo en su artículo 7 los objetivos y ámbitos de actuación sobre dichas materias.

De esta manera, se pretendió superar el enfoque estrictamente legislativo, y sustituirlo por otro estratégico, incluyendo políticas encaminadas a:

- i. reducir al mínimo los riesgos y peligros para la salud y medio ambiente derivados del uso de plaguicidas,
- ii. mejorar los controles sobre el uso y distribución de plaguicidas,
- iii. reducir los niveles de sustancias activas nocivas utilizadas, entre otras cosas mediante la sustitución de las más peligrosas por alternativas más seguras, incluidas alternativas no químicas,
- iv. fomentar prácticas agrícolas que impliquen un uso reducido de plaguicidas o que no los utilicen,
- v. establecer un sistema de supervisión de los avances logrados en el cumplimiento de los objetivos de la estrategia e informar al respecto, incluido el establecimiento de indicadores apropiados.

Dichos objetivos se llevaron a cabo con la aprobación de tres importantes textos normativos: a) el Reglamento (CE) nº. 1107/2009, del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a la comercialización de productos fitosanitarios, por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo; b) la Directiva 2009/127/CE, por la que se modifica la Directiva 2006/42/CE en lo que respecta a las máquinas para la aplicación de plaguicidas; y c) la Directiva 2009/128/CE, por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas, todos ellos publicados en el Boletín Oficial de la Unión Europea el 21 de octubre de 2009. Dichos textos, con sus modificaciones posteriores en algunos de sus aspectos, conforman la base del régimen jurídico actual.

En cumplimiento del mandato europeo, España traspuso al ordenamiento jurídico interno la Directiva 2009/128/CE, entre otros textos europeos, mediante la aprobación del Real Decreto 555/2019, de 27 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios, que modifica el Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, y del Real

Decreto 1702/2011, de 18 de noviembre, de inspecciones periódicas de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios.

Para la consecución de los objetivos de la citada Directiva de Uso Sostenible (DUS) y cumpliendo con lo dispuesto en el Real Decreto 1311/2012, se desarrolló la Orden AAA/2809/2012, de 13 de diciembre, por la que se aprueba el primer Plan de Acción Nacional (2013 – 2017) para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios, de acuerdo con el mandato comunitario. Este Plan de Acción Nacional finalizó el 31 de diciembre de 2017. Como consecuencia de su revisión y teniendo en cuenta los informes anuales de ejecución, se aprobó un Nuevo Plan de Acción, en diciembre de 2017, cuyo período de vigencia está comprendido entre el 1 de enero de 2018 y el 31 de diciembre de 2022.

En línea con lo anterior, España traspuso al ordenamiento jurídico interno la Directiva 127/2009/CE, mediante la aprobación del Real Decreto 494/2012, de 9 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas, para incluir los riesgos de aplicación de plaguicidas, cerrando así el complejo marco normativo de la aplicación de productos fitosanitarios.

A pesar de las políticas implementadas por la Unión Europea en materia del Medio Ambiente, que han derivado en complejos marcos normativos en ámbitos como el cambio climático, la biodiversidad, el medio ambiente y la salud y la gestión sostenible de los recursos y de los residuos continúa creciendo la preocupación en La Unión Europea por algunos de los problemas más importantes relacionados con el medio ambiente y el clima, como por ejemplo el cambio climático. Por este motivo, la Unión Europea ha visto necesaria la implementación del Green Deal (COM, 2019) con el fin que Europa sea el primer continente climáticamente neutro en 2050.

El Green Deal europeo, lanzado el 11 de diciembre de 2019 por la Comisión Europea, está diseñado para hacer frente a los desafíos relacionados con el clima y el medio ambiente, intentando desarrollar respuestas sostenibles en diversos ámbitos de actuación interconectados. Los principales objetivos establecidos por el Green Deal son la transición a una economía circular y limpia a través del impulso del uso eficiente de los recursos, paralizar el cambio climático, reducir la contaminación mediante una política de polución cero, así como revertir la pérdida de biodiversidad.

Para poder cumplir con los exigentes objetivos establecidos por el Green Deal, la Comisión ha anunciado iniciativas que abarcan distintos ámbitos de actuación, como el clima, el medio ambiente, la energía, el transporte, la industria, la agricultura o las finanzas sostenibles, todos ellos estrechamente interconectados. Las iniciativas anunciadas en el texto implican la adopción de políticas profundamente transformadoras, tales como: i) un mayor nivel de ambición climática; ii) el suministro de energía limpia, asequible y segura; iii) la movilización de la industria en pro de una economía limpia y circular; iv) el uso eficiente de la energía y los recursos en la construcción y renovación de edificios; v) acelerar la transición a una movilidad sostenible e inteligente; vi) «Farm to Fork»: idear un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medioambiente; vii) preservación y restablecimiento de los ecosistemas y la biodiversidad; y viii) aspirar a una contaminación cero para un entorno sin sustancias tóxicas (Figura 2).



Figura 2. Iniciativas del Green Deal en los diferentes ámbitos de actuación. Fuente: European Green Deal (COM, 2019).

Entre los diversos ámbitos de actuación incluidos en el Green Deal, las actividades agrícolas y todos los aspectos relacionados con la producción de alimentos se abordan en la estrategia europea “De la Granja a la Mesa” (COM, 2020) (sexta iniciativa anunciada por el Green Deal) para garantizar un sistema alimentario razonable, saludable y respetuoso con el medio ambiente. Esta estrategia incluye las medidas de impacto relacionadas con el uso de productos fitosanitarios, dados sus efectos negativos sobre la calidad del aire y del agua, la degradación del suelo, la seguridad alimentaria y la salud humana.

Uno de los retos más importantes considerados en la Estrategia de la Granja a la Mesa es el objetivo de reducir el uso global y el riesgo de los plaguicidas químicos en un 50 % y el uso de los plaguicidas más peligrosos en un 50 % para 2030.

Alcanzar los ambiciosos objetivos marcados en la Estrategia de la Granja a la Mesa supone un esfuerzo considerable por parte de todos los agentes involucrados. Un esfuerzo que deberá apoyarse en dos grandes elementos: la formación y la transferencia del conocimiento y la adopción de nuevas tecnologías. Además, considerando la importancia que los cultivos arbóreos tienen en cuanto a la cantidad de productos fitosanitarios empleados en relación con las zonas de producción agrícola extensiva, un aspecto fundamental deberá incluirse en el proceso de mejora: la expresión de la dosis y la determinación de la cantidad óptima de materia activa adecuándose a las características estructurales de la vegetación.

4. Expresión de la dosis

Como se ha explicado anteriormente, la aplicación de productos fitosanitarios, se ha convertido en una de las actividades más complejas de la agricultura, especialmente en cultivos especiales en los que el consumo de fitosanitarios es muy elevado. Uno de los mayores retos de la anteriormente citada Estrategia de la Granja a la Mesa es la reducción del uso de plaguicidas.

Un pilar fundamental para un correcto proceso de aplicación de estos productos es la determinación de la dosis a utilizar. En la actualidad, este proceso genera dudas e incertidumbre entre los agricultores, sobre todo a los que se dedican a los cultivos arbóreos.

A nivel europeo, las recomendaciones de dosis que figuran en las etiquetas, presentan mucha variabilidad (Wohlhauser, 2009, 2012; Garcerá, 2021). Actualmente los métodos más utilizados son los siguientes: por concentración (%), L o kg hL⁻¹_{caldo}), por superficie (L o kg ha⁻¹), por altura de vegetación (L o kg ha⁻¹ m⁻¹), por Leaf Wall Area (L o kg 10,000 m⁻²_{LWA}), por Tree Row Volume (L o kg 10,000 m⁻³_{TRV}) y por Plant Row Distance (L o kg 100 m⁻¹_{PRD}). Esta falta de armonización en los métodos de expresión de dosis entre los diferentes países de la Unión Europea puede generar dudas entre los agricultores e inducirlos a un uso inadecuado de los productos fitosanitarios, pudiendo causar efectos negativos de su uso (Weisser y Koch, 2002).

En la mayor parte de los casos, en cultivos bajos, la determinación de la dosis se realiza mediante recomendaciones por superficie (L o kg ha⁻¹) (Rüegg et al., 2001). Estas recomendaciones no generan dudas entre los agricultores ya que se asume que la superficie a tratar es similar a la superficie del suelo. Sin embargo, en cultivos especiales, este tipo de recomendaciones no son adecuadas para la determinación de la dosis ya que la cantidad de vegetación presente en una superficie de terreno puede variar en función de las propias características del cultivo (distancia entre hileras, altura, anchura y densidad de vegetación).

Tradicionalmente, las recomendaciones de dosis en cultivos especiales se han basado principalmente en la concentración del producto en el caldo (L o kg hL⁻¹_{caldo}) (Gil et al., 2021). Esto relaciona la cantidad de producto fitosanitario con el volumen de caldo a aplicar. En este sentido, las etiquetas de los productos ofrecen recomendaciones de volumen de aplicación que son muy superiores a los volúmenes óptimos de aplicación. Esto es debido a que la tecnología de aplicación utilizada por los agricultores es más eficiente que las que se utilizan en los ensayos de certificación de los productos (Gil et al., 2021)

Los métodos expuestos hasta el momento (concentración y superficie) no tienen en cuenta las características de la vegetación, siendo estas fundamentales para un correcto ajuste de la dosis. En este sentido, diversos estudios (Walklate et al., 2003 y 2006; Koch, 2007; Pergher y Petris, 2008; Walklate y Cross, 2013; Langer, 2018; Gil et al., 2021) han propuesto métodos alternativos al sistema tradicional de expresión de dosis por superficie de cultivo o por concentración. Los más estudiados son el método Leaf Wall Area (LWA) o el método Tree Row Volume (TRV). Ambos métodos, incorporan las características de la vegetación en su metodología de cálculo.

El método LWA calcula la superficie de pared vegetal a tratar a partir de la altura de la vegetación y la distancia entre hileras del cultivo (Wohlhauser, 2009). Este método se adapta bien a las plantaciones de cultivos verticales con sistema de formación tipo espaldera o emparrado, como por ejemplo los frutales y la viña (Gil et al., 2014a). Es importante remarcar que este método ha sido aceptado por la European Plant Protection Organization (EPPO) como método de expresión de dosis en los ensayos de registro

de productos fitosanitarios en cultivos con sistemas de formación de paredes de vegetación estrechas (EPPO, 2021). Sin embargo, este método se considera limitado en cultivos globulares como los cítricos, los olivos o la viña en vaso, donde la anchura de la vegetación es un parámetro no despreciable. Para este tipo de cultivos, se considera que el método TRV es el más adecuado (Garcerá et al., 2020). El TRV determina el volumen de vegetación a partir de la altura, la anchura y la distancia entre hileras (Byers et al., 1971; Byers, 1987).

Llegados a este punto, se pone de manifiesto que la caracterización de la vegetación es fundamental para determinar la dosis y el volumen de aplicación óptimo. Consecuentemente, obtener correctamente los principales parámetros que definen la vegetación, se convierte en un aspecto primordial. De esta forma, cuando la vegetación se distribuye uniformemente a lo largo de la parcela, la caracterización de la vegetación es simple, puesto que no es necesario muestrear todas las plantas de la parcela. Sin embargo, si consideramos que los cultivos tienen una gran variabilidad intraparcelsaria la caracterización de la vegetación necesita respaldarse en herramientas que permitan determinar la variabilidad. La Agricultura de Precisión, precisamente, es una forma de manejo agronómico que pretende determinar la variabilidad existente en el cultivo y diseñar estrategias de gestión adaptadas a dicha variabilidad espacial para manejarla de forma diferenciada (Arnó, 2008; ISPA, 2021). Cuando se aplica en el campo de la viticultura es comúnmente conocido como Viticultura de Precisión (VP).

5. Viticultura de precisión

Los cultivos especiales, como los frutales o la viña, son cultivos muy heterogéneos. El alto grado de variabilidad en las características de la vegetación ha aumentado la dificultad de obtener soluciones generales bien adaptadas a todos los cultivos y situaciones. Para poder realizar una gestión diferenciada del cultivo, es importante conocer los factores que influyen en la variabilidad en una parcela. Según Hatfield (2000), esta variabilidad se produce por la combinación de fuentes de variación que pueden agruparse en tres tipos: 1) natural, como el suelo o la topografía; 2) aleatoria, como la lluvia; y 3) manejada, como la aplicación de fertilizantes.

La viticultura de precisión se divide en cuatro procesos bien diferenciados, que completan el ciclo de VP, tales como: 1) adquisición de datos masivos, 2) análisis de estos datos, 3) interpretación agronómica y propuesta de acciones de manejo específico, y 4) actuación en campo de forma localizada y precisa. Este diagrama de gestión es cíclico, y la acumulación de conocimiento histórico sirve de base para el inicio de un nuevo ciclo (Arnó, 2008). Así la experiencia alcanzada en anteriores ciclos puede ser incorporada en las siguientes campañas (Sudduth, 1999). Esto supone la base de un sistema de mejora continua que permita un mejor rendimiento del cultivo.

5.1 Adquisición de datos

A pesar de que las técnicas de observación visual empleadas de forma común por los viticultores han dado buenos resultados y se puede afirmar que es una buena técnica de adquisición de datos, hay que dotar a los viticultores de herramientas que les permitan identificar y analizar la variabilidad de sus parcelas de manera rápida y confiable. Se requieren procedimientos no sesgados, totalmente objetivos y que ofrezcan medidas a partir de variables que el ojo humano no puede detectar, con una capacidad

de analizar el cultivo parcela por parcela, pero también de una forma más global a nivel de finca (agrupación de parcelas diferentes).

Los sensores permiten dotar de información al viticultor de variables no detectables mediante observación visual. En el mercado se encuentran dos grandes tipos de sensores: 1) sensores remotos, y 2) sensores próximos.

Los sensores remotos son aquellos que adquieren información sobre objetos o fenómenos sin contacto físico (Martínez-Casasnovas et al., 2017). En el entorno de la Viticultura de Precisión, estos sensores se utilizan para detectar, analizar y clasificar la vegetación a partir de la radiación electromagnética emitida y/o reflejada por fuentes de energía activa o pasiva, técnica comúnmente denominada como teledetección. Generalmente, estos sensores se embarcan en plataformas satélites, aviones tripulados o vehículos aéreos no tripulados (UAV) lo que permite observar los cultivos con una visión global. Cada una de estas plataformas aéreas proporcionan distintas capacidades de trabajo y versatilidad en cuanto a la altura de vuelo (Matese et al., 2015). La viticultura ha sido tradicionalmente un sector propenso a la incorporación de nuevos desarrollos con el objetivo de optimizar las operaciones de manejo del cultivo. En este sentido, la teledetección se introdujo para caracterizar la vegetación y agruparla en zonas de distinto vigor. Inicialmente, esta técnica se realizaba a partir de la información obtenida con satélites y aviones tripulados. Durante la última década se ha introducido, de forma muy importante, el uso de UAV.

Los satélites ofrecen una gran cobertura y son particularmente interesantes para mapear grandes superficies, esto ha hecho posible una expansión de la adopción de la teledetección en general en todos los cultivos y particularmente importante en la viticultura. El desarrollo ha ido encaminado a la monitorización del vigor vegetativo, en la definición de la variabilidad intraparcularia y las diferentes zonas de crecimiento homogéneo y a partir de ese punto poder determinar acciones de manejo agronómico adaptadas a cada una de las particularidades del cultivo. Una de las principales ventajas de estos sistemas, además de la gratuidad de las imágenes, es la capacidad de monitorización continua que permite un seguimiento temporal del cultivo haciendo visibles las variaciones del estado del viñedo a lo largo de su ciclo vegetativo. A pesar de ello, la imposibilidad de segmentar la vegetación de interés debido su resolución espacial decamétrica los hace poco precisos en cultivos arbóreos y en parcelas pequeñas (Matese et al., 2015; Sun et al., 2017). Esto ha hecho que se exploren distintas vías con plataformas que, a pesar de disponer de una capacidad de trabajo menor, permiten volar más bajo e incrementar la resolución de las imágenes obtenidas hasta valores centimétricos.

Los aviones tripulados fueron ampliamente usados, inicialmente en Australia y posteriormente en otras zonas vitivinícolas de Europa y Estados Unidos (Johnson et al., 1996; Bramley y Lamb, 2003; Hall, 2003; Lamb et al., 2004; Acevedo Opazo et al., 2008). Con ellos se llegó a resoluciones espaciales de entre 25 y 50 cm por píxel, reduciéndose luego a menos de 20 cm pixel^{-1} . Esto permitió mejorar la fiabilidad de los datos al abrir la posibilidad de eliminar los píxeles que no forman parte del cultivo (sombras, suelo, u otros elementos no deseados). La mejora significativa en este aspecto ha llegado en la última década con la utilización de los UAV que permiten realizar vuelos a baja altura (por debajo de los 120 m) ofreciendo resoluciones espaciales de entre 5 y 10 cm pixel^{-1} . Estos equipos son especialmente interesantes para pequeñas parcelas muy fragmentadas, en las que el riesgo de introducir errores por efectos borde se incrementa considerablemente si no se trabaja con sistemas de alta resolución espacial. Estas mejoras han hecho que se abran nuevas posibilidades en cuanto a la caracterización de la vegetación en el viñedo (Mathews and Jensen, 2013; Ballesteros et al., 2015; Weiss and Baret, 2017; de Castro et al., 2018; López-Granados et al., 2020), unido al desarrollo de nuevos

sensores multiespectrales ligeros y con ópticas mejoradas para una monitorización más fiable del estado del viñedo y su variabilidad (Santesteban, et al., 2017; Matese et al., 2019; Pádua et al., 2019).

Por otro lado, los sensores próximos son aquellos que se operan desde el suelo adquiriendo información de la vegetación sin contacto físico, pero a corta distancia. Estos sensores proporcionan información del cultivo con mayor grado de detalle que los sensores remotos (Martínez-Casasnovas et al., 2017). Estos sensores han evolucionado rápidamente en los últimos años, lo que ha permitido que ya se encuentren soluciones comerciales que mejoran la implementación y robustez de estos sistemas. En el campo de la Viticultura de Precisión, estos sensores se utilizan para detectar y caracterizar la vegetación a partir de diferentes técnicas de medida, entre las más utilizadas están los ultrasonidos, el LiDAR, la fotogrametría y la visión artificial. Generalmente, estos sensores se embarcan en plataformas terrestres lo que permite poder monitorizar el cultivo con un mayor grado de detalle.

Los sensores de ultrasonidos permiten determinar la distancia entre el propio sensor y un objeto. En viticultura se han utilizado ampliamente para determinar las características estructurales de la vegetación (Gil et al., 2007 y 2013; Llorens et al., 2011a; Pallejà y Landers, 2015 y 2017). Todos estos estudios concluyeron que los sensores de ultrasonido fueron un buen sistema para la obtención de las características de la vegetación, pero teniendo en cuenta que la resolución en altura estaba limitada al número de sensores utilizados. En este sentido, existen otros sensores próximos que permiten caracterizar la vegetación con una mayor resolución en altura como, por ejemplo, los sensores LiDAR o las cámaras RGB.

Los sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) utilizan luz infrarroja para detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentran del sensor. Estos sensores emiten rayos infrarrojos muy pequeños, lo que permite poder tomar medidas con una alta resolución y frecuencia de muestreo. En viticultura, estos sensores se han utilizado embarcados en vehículos terrestres permitiendo extraer información sobre la altura, anchura y volumen de la vegetación con una alta precisión (Llorens et al., 2011a; Chakraborty et al., 2019; Cheraïet et al., 2020). Además, permite detectar la densidad de la vegetación y el índice foliar (LAI) (Rinaldi et al., 2013; Arnó et al., 2013; Sanz et al., 2018). A partir de las medidas de estos sensores se pueden obtener mapas de vegetación (Llorens et al., 2011b) pero requieren un alto nivel de procesado, lo que lo convierte en una solución poco adoptada por los viticultores.

Recientemente, diversos autores (Berenstein et al., 2010; Diago et al., 2012; Nuske et al., 2014) han dotado equipos terrestres con cámaras RGB con el objetivo de monitorizar el cultivo mediante fotogrametría y visión artificial. Estas técnicas de obtención de datos permiten obtener reconstrucciones del cultivo con muy buena resolución, lo que permiten determinar las características del cultivo y ofrecer información de calidad a los usuarios.

5.2 Extracción de información

Los sensores y tecnologías de adquisición de datos mostrados hasta el momento, generan información que necesita ser procesada para tomar decisiones adecuadas a las necesidades del cultivo. Los sensores toman datos discretos que tienen que ser tratados mediante métodos geoestadísticos para obtener datos continuos y poder tener una visión global del cultivo. La geoestadística es una técnica imprescindible para analizar patrones de distribución espacial y elaborar modelos de predicción (Benito, 2012). El método geoestadístico más utilizado para convertir datos discretos en continuos es la interpolación. Se

conocen muchos métodos de interpolación, pero los más utilizados son el Inverse Distance Weight (IDW) y el Kriging. A partir de los datos interpolados, se obtienen mapas continuos que pueden ser utilizados para el manejo diferencial del cultivo. El uso de estos mapas continuos no está muy extendido ya que es muy complejo conseguir prescripciones para este tipo de mapas. Además, los sistemas de aplicación variable no están preparados para realizar aplicaciones que estén modificando los parámetros de trabajo en continuo. Por este motivo, a los mapas continuos se les aplica un proceso de zonificación, que consiste en generar clusters relativamente homogéneos y que facilita el manejo diferencial. Los agricultores, normalmente prefieren trabajar con dos o tres clases diferenciadas. Esta opinión se ve refrendada por Fraisse et al. (2001) y Bramley y Hamilton (2004) que demostraron que el número óptimo de clases para realizar manejo diferencial fue entre dos y cinco en función de la variabilidad observada en la parcela.

5.3 Toma de decisiones

Actualmente, se genera un gran volumen de datos con los que los usuarios, mediante diagnósticos rápidos y eficaces, deben tomar decisiones de manejo de sus cultivos. Por este motivo necesitan que los datos obtenidos tengan la fiabilidad necesaria para que la posterior toma de decisiones sea la adecuada a las necesidades del cultivo (Taylor et al., 2019).

Es importante remarcar que no todas las parcelas de viña presentan variabilidad o tienen variabilidad suficiente y/o no tienen una variabilidad espacial estructurada de forma idónea para aplicar las técnicas de VP (Monsó et al., 2013). Por este motivo, no es solo importante evaluar la variabilidad de la parcela, sino que hay que evaluar la posibilidad de aplicar las técnicas de VP en la parcela. Por este motivo, el uso de índices de oportunidad es fundamental para decidir si aplicar o no las técnicas de Viticultura de Precisión (Marínez-Casasnovas y Arnó, 2014)

Una vez evaluada la idoneidad de las parcelas para aplicar las técnicas de Viticultura de Precisión, existen diferentes métodos que ayudan a los usuarios a obtener decisiones de manejo del cultivo. Los principales son la experiencia propia de los agricultores o técnicos de campo sobre el manejo diferenciado del cultivo, los DSS y los modelos agronómicos.

En el mercado se encuentran disponibles muchos DSS específicos para el cultivo de la viña. Los DSS son sistemas informáticos que ayudan al usuario final en la resolución de problemas y/o en la toma de decisiones. Existen diferentes DSS para distintas utilidades, desde los que ofrecen soluciones específicas a un proceso concreto, como por ejemplo la determinación de los requerimientos hídricos del cultivo (Vintel), el cálculo del volumen óptimo de aplicación (Dosaviña®), o la determinación de la dosis de producto fitosanitario (Optidose), hasta DSS que ofrecen un amplio abanico de soluciones y aplicaciones como por ejemplo Vite.net® que proporciona información sobre el desarrollo del cultivo y el riesgo de enfermedad que este sufre o VISCA DSS que proporciona información sobre la fisiología de la planta y las condiciones climáticas.

El DSS Dosaviña® (Gil et al., 2019) es una herramienta útil y de fácil utilización para el profesional de la viticultura, que le permita la determinación del volumen óptimo de aplicación en tratamientos fitosanitarios en viñas en espaldera, aunque en estos momentos se está adaptando a otros sistemas de formación muy utilizados como son el vaso y la pérgola. Para la determinación del volumen de

aplicación óptimo, Dosaviña® se basa en el método del LWA. Además, incorpora las variables anchura de vegetación, densidad del cultivo y equipo de tratamiento en el cálculo del volumen de aplicación.

Esta herramienta ha sido ampliamente contrastada en campo (Gil 2003; Gil y Escolá, 2009; Gil et al., 2011a; Gil et al., 2011b; Gil et al., 2012; Gil et al., 2014b; Gil et al., 2019), mediante ensayos de evaluación tanto de distribución de líquido en la vegetación como de eficacia biológica. Estas evaluaciones de campo se han llevado a cabo en zonas tan dispares como las DO Penedès, DO Costers del Segre, DO La Mancha, DO Rioja, en la zona vitícola de Finger Lakes (NY, USA) y en Cerdeña (Italia). Además, es un actor importante en el desarrollo de la presente tesis doctoral, utilizándose para determinar los volúmenes óptimos de aplicación en función del desarrollo vegetativo.

Por otro lado, el DSS ofrece a los usuarios una herramienta de calibración de equipos de pulverización que permite determinar los parámetros de trabajo del equipo (presión, número y tipo de boquillas). Actualmente el DSS está disponible en formato web (<https://dosavina.upc.edu>) y en formato APP para dispositivos móviles con sistema operativo Android e IOS. Por otro lado, Dosaviña® está disponible en seis idiomas y dos sistemas de unidades (Sistema Internacional y US-Imperial), facilitando de esta manera su utilización en las zonas de producción vitícola más importantes del mundo.

Los resultados obtenidos hasta el momento con el DSS Dosaviña® demuestran que es posible reducir el volumen de aplicación y, consecuentemente, la cantidad de producto fitosanitario manteniendo un perfecto control de la plaga/enfermedad.

5.4 Actuación en campo

Todos los procesos de AP requieren un manejo diferenciado del cultivo, no uniforme. Para alcanzar este objetivo, los equipos utilizados deben ser capaces de ajustar sus parámetros de trabajo acorde a la variabilidad espacial del cultivo. Cuando la variabilidad de la parcela está bien estructurada y se observan patrones espaciales claros y sencillos, se pueden ajustar los parámetros de trabajo de la maquinaria convencional de manera manual. En cambio, cuando la variabilidad espacial es alta y no se observan patrones espaciales simples, es necesario utilizar sistemas de aplicación variable que son capaces de ajustarse de forma automática en función de la variabilidad espacial de la parcela (Escolà et al., 2018)

Actualmente, se pueden diferenciar tres tipos de tecnología de aplicación variable: unas basadas en la aplicación en tiempo real a partir de información obtenida por sensores, otras fundamentadas en mapas de prescripción, y otras basadas en la combinación de las dos anteriores.

En el ámbito de la investigación en viticultura de precisión, se ha trabajado en distintas acciones de manejo agronómico de manera variable, hay varios ejemplos a destacar, como: la poda (Proffit et al., 2006), la aplicación de fitosanitarios (Gil et al., 2007 y 2013; Landers, 2008; Campos et al., 2019 y 2020; Román et al., 2020) o la cosecha (Arnó et al., 2009; Sarri et al., 2016). Aunque en sus inicios, la viticultura centró sus esfuerzos en poder determinar zonas de calidad diferenciada, con los años se ha visto que uno de los puntos más importantes y repetitivos en la gestión del viñedo es la aplicación de fitosanitarios.

La aplicación variable de productos fitosanitarios en viña ha sido ampliamente estudiada durante los últimos años. Diversos autores estudiaron el uso de sensores de ultrasonido para determinar la anchura

de la vegetación y ajustar las condiciones de trabajo en continuo en función de lo detectado por los sensores. Gil et al. (2007) equiparon un pulverizador hidroneumático con tres sensores de ultrasonido y tres electroválvulas variables para modificar el caudal de las boquillas en función de la anchura de vegetación detectada por los sensores de ultrasonido manteniendo una ratio de aplicación de 0.095 L m^{-3} . Los resultados obtenidos con el sistema de aplicación variable se compararon contra los resultados obtenidos con una pulverización convencional de 300 L ha^{-1} y se obtuvieron unos ahorros del orden del 58 % manteniendo el nivel de deposición del líquido en la planta.

Landers (2008) equipó un pulverizador hidroneumático con sensores de ultrasonido con el objetivo de evaluar una aplicación variable frente a una aplicación convencional en manzanos y en viña. El uso del prototipo de aplicación variable ofreció un ahorro potencial del 19 % del uso de productos fitosanitarios.

De la misma manera, Gil et al. (2013) equiparon un pulverizador hidroneumático con sensores de ultrasonido y electroválvulas variables para modificar los parámetros de trabajo del pulverizador en función del TRV calculado mediante los sensores de ultrasonido. Se alcanzaron ahorros del 21.9 % comparando el pulverizador equipado con los sensores con un pulverizador convencional, siempre manteniendo el nivel de deposición y recubrimiento del producto en la planta.

Por otro lado, la aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción en viña es un concepto novedoso que hasta el día de hoy no había sido estudiado. En este sentido, Román et al. (2020) realizaron una aplicación variable en base a mapas de prescripción. Debido a que la variabilidad de la parcela estaba bien estructurada, modificaron los parámetros de trabajo del equipo de forma manual cuando el pulverizador cambiaba de zona de manejo. Sin embargo, Campos et al. (2019 y 2020) equiparon un pulverizador hidroneumático con un sistema de aplicación variable completamente autónomo que ajustaba de forma automática las condiciones de trabajo al volumen prescrito por el mapa.

Las distintas tecnologías expuestas hasta el momento, han demostrado ser muy útiles para disponer de un conocimiento exhaustivo del cultivo y poder tomar decisiones de manejo adecuadas en todo momento. Todo este desarrollo tecnológico debe aunarse con la transmisión a los usuarios de las mejores técnicas para la adopción de estas nuevas tecnologías. Por ello la formación y la transferencia a los usuarios se convierte en un pilar fundamental para el logro de los objetivos propuestos por la agricultura de precisión.

6. Formación y transferencia

En todas las actividades profesionales desarrolladas por el hombre, la formación juega un papel fundamental para conseguir la competitividad necesaria para garantizar la consecución de los objetivos marcados. En el sector agrícola esto es de vital importancia, ya que esta formación permite a los usuarios adaptarse a una actividad cada vez más cambiante, tanto en aspectos técnicos de producción como de gestión económica y de mercado.

La agricultura tiene un componente tradicional muy arraigado y los conocimientos son transferidos entre generaciones. Los agricultores otorgan mayor importancia a la experiencia propia y al conocimiento heredado de sus predecesores que a la formación profesional reglada (González y Gómez Benito 2000).

De este hecho se deriva la pobre formación del sector agrario, lo que conlleva a problemas de baja productividad y no adopción de las mejoras necesarias para garantizar la supervivencia del sector productivo agrícola (Llopis y Vidal, 2006).

La oficina de estadística de la Unión Europea, Eurostat, para establecer las estadísticas de nivel de formación en el sector agrario define tres niveles distintos de formación:

- **Experiencia agrícola práctica:** experiencia adquirida mediante el trabajo práctico en campo.
- **Formación agrícola básica:** cualquier curso realizado en una escuela de capacitación agraria o en una institución especializada en materias específicas.
- **Formación agrícola completa:** cualquier curso de una duración de al menos dos años a tiempo completo después del final de la educación obligatoria, realizado en una escuela de capacitación agraria o en la universidad.

Considerando los datos estadísticos del año 2016, se extrae que la mayoría de los responsables de las explotaciones agrarias europeas (68.3 %) tenían experiencia agrícola práctica, mientras que el 9.1 % de los responsables tenían formación agrícola completa y el 22.6 % tenía una formación agrícola básica.

En algunos Estados Miembros (EMs), el nivel de formación agrícola entre los responsables de las explotaciones agrarias fue especialmente bajo; en Rumanía y Grecia, solo el 0.4 % y el 0.6 %, de los responsables de las explotaciones, tenían una formación agrícola completa, y la inmensa mayoría (el 96.7 % y el 93.2 %, respectivamente) sólo tenían experiencia práctica. Unos pocos EMs tienen proporciones relativamente altas de responsables de explotaciones con formación agrícola completa; se trata de Luxemburgo (52.5 %), República Checa (38.7 %), Francia (34.9 %) y Letonia (31.3 %) (EUROSTAT, 2018).

La Figura 3 muestra el número de responsables de las explotaciones agrarias europeas con formación agrícola completa durante el año 2016.

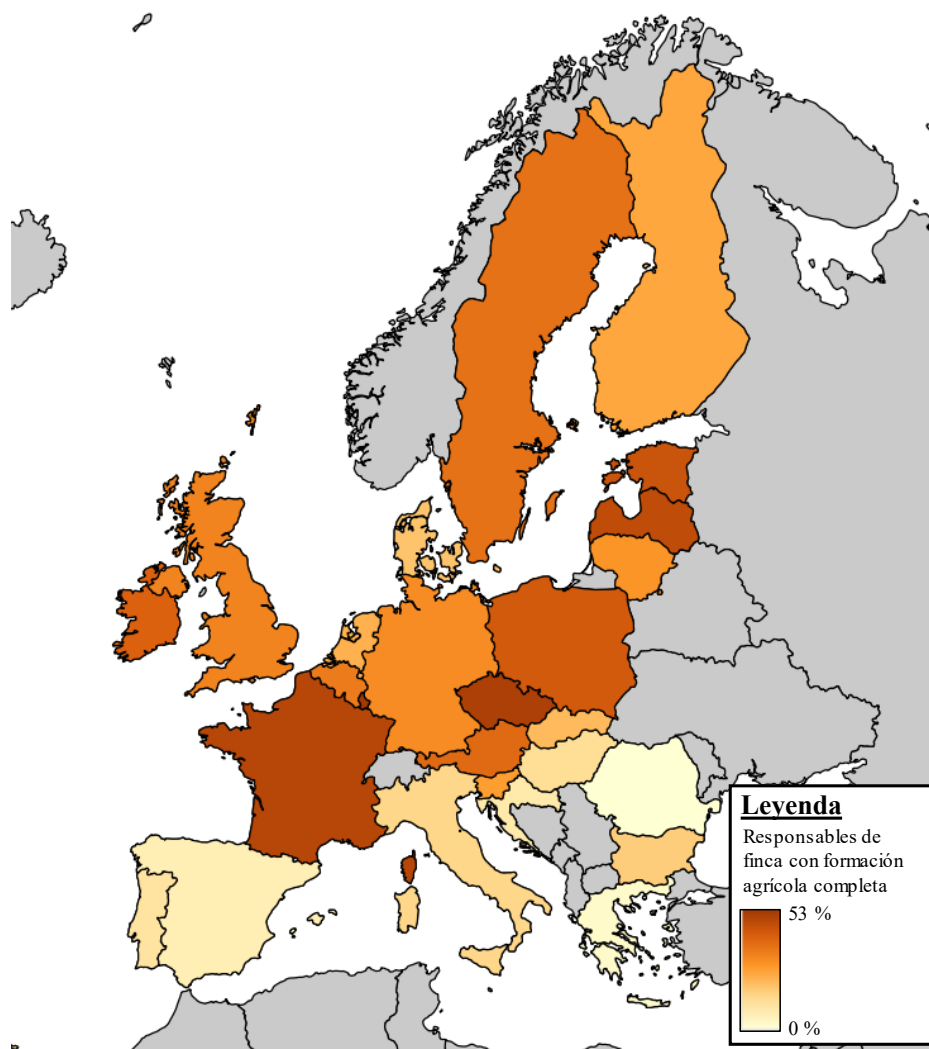


Figura 3. Nivel de formación de los responsables de las explotaciones agrarias europeas del año 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos extraídos de “*Agriculture, forestry and fishery statistics 2018*”. EUROSTAT 2018. Statistical Books (EUROSTAT, 2018).

Como se observa en la Figura 3, existen grandes diferencias en el nivel formativo de los agricultores europeos entre los diferentes países. Se observan importantes diferencias no solo entre países y zonas (norte de Europa frente al sur de Europa).

Estos resultados destilan la necesidad de establecer programas de formación en el sector agrícola para garantizar un sector novedoso y global. En este sentido, el Parlamento Europeo ha remarcado la importancia de la educación y la formación de los agricultores, como medida para garantizar su capacidad para trabajar en un mundo globalizado y tecnificado.

Así lo entienden los propios profesionales del sector, tal como se desprende de los resultados del “*Cuestionario sobre la protección de las aguas*” elaborado en el seno del proyecto TOPPS-PROWADIS, en el que participaron más de 1000 profesionales de ámbito europeo involucrados en la aplicación de productos fitosanitarios en 2016, donde se concluyó que la sensibilización en la aplicación del producto (información, consejo y formación) es una buena inversión para la reducción de la contaminación por productos fitosanitarios de las aguas superficiales, sólo por debajo de la inversión en mejoras técnicas del equipamiento (ECPA, 2016).

En este sentido, y de acuerdo con su carácter preventivo, la Directiva 2009/128/CE, por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas, prioriza los planes formativos obligando a los estados miembros a que establezcan programas de formación dirigidos a los distribuidores, asesores y usuarios profesionales de plaguicidas, así como al establecimiento de sistemas de certificación que registren dicha formación (art. 5), de tal forma que quienes utilicen o vayan a utilizar plaguicidas sean plenamente conscientes de los posibles riesgos y sean conocedores de las medidas apropiadas para reducirlos.

En línea con lo anterior, desde hace unos años, diversas empresas y centros de investigación del sector han centrado sus esfuerzos en proyectos relacionados con la educación y la formación, financiados por el sector público o privado con el objetivo de alcanzar al mayor número de actores implicados.

Algunos de los proyectos más relevantes de difusión y formación ejecutados por la Unidad de Mecanización Agraria de la Universidad Politècnica de Catalunya (UMA-UPC), en la que participo, se describen a continuación:

El año 2005 se inició el proyecto de ámbito europeo TOPPS (de las siglas en inglés *Train Operators and Promote best Practices & Sustainability*), que dio lugar a la definición y consenso de unas Buenas Prácticas Agrícolas para evitar las fuentes de contaminación puntual del uso de productos fitosanitarios, (Gil et al., 2008). Posteriormente, le siguió el proyecto también de ámbito europeo TOPPS-PROWADIS en este caso centrado sobre todo en las fuentes de contaminación difusa (básicamente deriva y escorrentía) (Gil y González, 2014). Todo el material y las herramientas desarrolladas en el marco de los diferentes proyectos TOPPS constituyen material de especial interés en los planes formativos y una herramienta didáctica capaz de llegar a los profesionales y al público en general.

El proyecto INNOSETA (de las siglas en inglés *Accelerating INNOvative practices for Spray Equipment, Training and Advising in European agriculture through the mobilization of agricultural knowledge and innovation systems*), financiado por el programa H2020 de la Unión Europea (Nº 773864), pretende cerrar la brecha existente entre el desarrollo tecnológico en la investigación y el sector agrícola (www.innoseta.eu), fundamentalmente el agricultor. Para lograr este objetivo, se ha desarrollado una plataforma on-line (<https://platform.innoseta.eu/>) que agrupa toda la información y materiales disponibles, ya sea creada por entidades públicas o privadas, que esté directamente relacionada con la gestión sostenible y la aplicación de los productos fitosanitarios.

El proyecto AgriCT (2018-1-ES01-KA202-050709) está incluido dentro del programa europeo Erasmus+ y está centrado en aumentar los conocimientos, habilidades y aptitudes de estudiantes recién graduados o asesores agrícolas que trabajen para o en pequeñas y medianas explotaciones en términos de cómo utilizar las herramientas TIC (Tecnologías de Información y de la Comunicación) para la correcta implementación de la agricultura de precisión (AP), a través de un programa de formación innovador.

Por último, hay que remarcar que grandes empresas del sector como son Syngenta o Bayer ofrecen programas de formación a nivel estatal en colaboración con la UMA-UPC. En estos programas de formación, se muestra a los agricultores cómo calibrar los equipos de pulverización, y las tecnologías más novedosas para conseguir un uso adecuado de los productos fitosanitarios, alcanzando su mayor efectividad, ahorro de costes y respeto con el medio ambiente.

Objetivos

El objetivo general de la tesis doctoral es adecuar e incorporar las tecnologías emergentes en la mejora de la efectividad del proceso de aplicación de fitosanitarios en el cultivo de la viña, incorporando la variabilidad intraparceldaria y las características específicas de la vegetación en el modelo de cálculo de la cantidad de producto fitosanitario a aplicar.

Para alcanzar este objetivo se han definido los siguientes objetivos específicos:

- a) Diseñar y poner a punto un prototipo de aplicación variable de fitosanitarios en base a mapas para el cultivo de la vid.
- b) Establecer una metodología para determinar la variabilidad intraparceldaria mediante la generación de mapas de vigor.
- c) Validar la metodología de generación de mapas de vigor mediante medidas manuales para verificar que la vegetación presenta diferencias entre las distintas zonas determinadas.
- d) Establecer una metodología para la obtención de mapas de prescripción de volumen de aplicación a partir de medidas manuales de la vegetación.
- e) Establecer una metodología para cuantificar la precisión de los tratamientos realizados con el sistema de aplicación variable en base a mapas de prescripción.
- f) Evaluar la calidad de los tratamientos variables mediante la evaluación del recubrimiento del cultivo en las diferentes zonas determinadas.
- g) Evaluar la eficacia biológica de los tratamientos de productos fitosanitarios realizados de forma variable con el sistema de aplicación variable en base a mapas de prescripción.
- h) Establecer una metodología para automatizar la obtención de mapas de prescripción sin la necesidad de realizar medidas manuales de la vegetación, consiguiendo de esta manera la automatización completa del proceso de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción.

La presente tesis doctoral propone completar un ciclo de Viticultura de Precisión, desde la determinación de la variabilidad del cultivo a partir de imágenes espectrales tomadas con sensores remotos embarcados en plataformas aéreas, hasta la aplicación diferenciada de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción, y las comprobaciones realizadas para determinar la calidad de distribución y precisión del sistema de aplicación variable. La Figura 4, muestra el proceso completo llevado a cabo durante esta tesis doctoral, dividiendo el trabajo realizado en cada una de las publicaciones de este compendio.

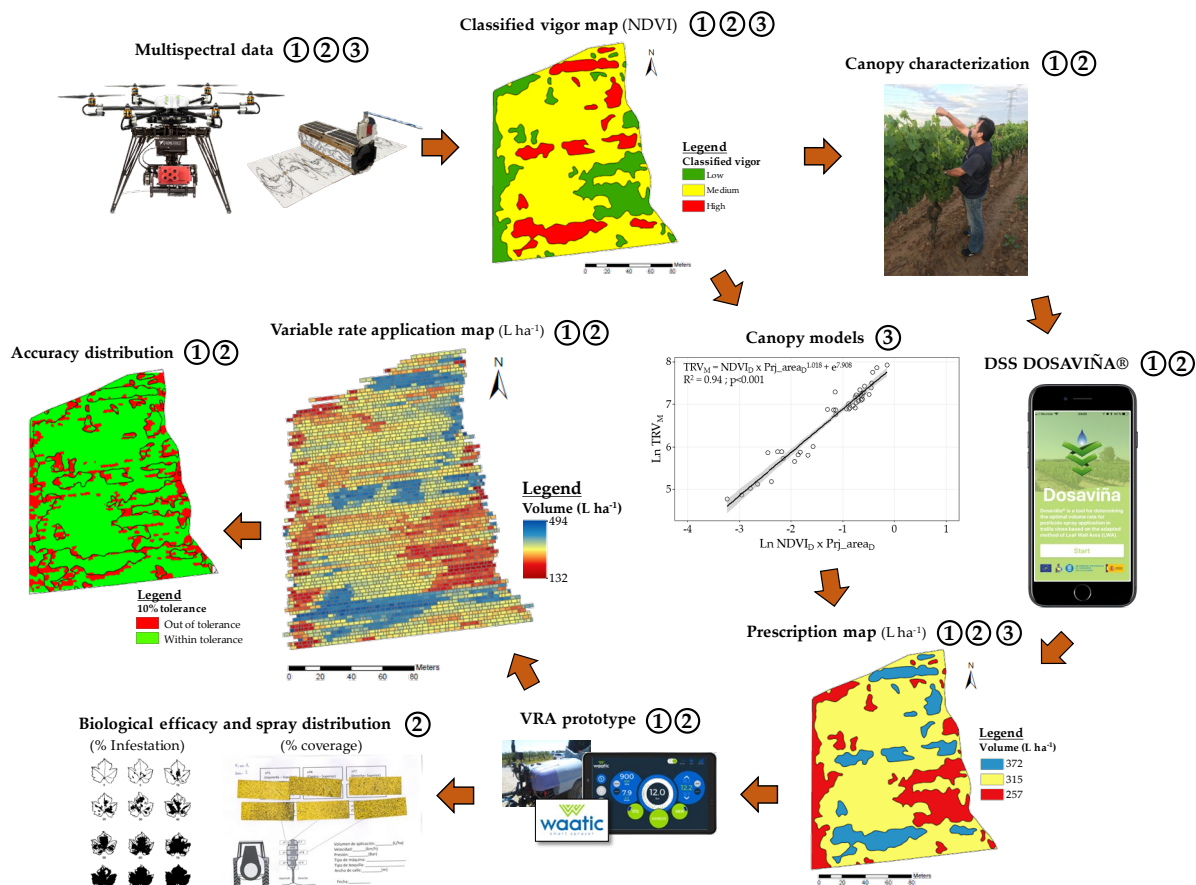


Figura 4. Proceso completo de VP realizado en la presente tesis doctoral. La numeración (1,2,3) indica los artículos que comprenden cada uno de los procesos llevados a cabo en la presente tesis doctoral.

Cada uno de los objetivos específicos de esta tesis doctoral están relacionados con alguno de los artículos de este compendio. A continuación, se expone la relación entre los objetivos específicos y cada uno de los artículos presentados,

Capítulo 1. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process.

En este artículo, publicado en *Precision Agriculture*, se diseñó y evaluó un prototipo de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción. Además, se estableció una metodología para la obtención de mapas de vigor y su posterior conversión en mapas de prescripción a partir de medidas manuales del cultivo y una metodología para cuantificar la precisión de los tratamientos realizados con el sistema de aplicación variable en base a mapas de prescripción. Todo esto está relacionado con los objetivos específicos **a, b, c, d** y **e**.

Capítulo 2. On-Farm Evaluation of Prescription Map-Based Variable Rate Application of Pesticides in Vineyards.

En el segundo artículo de este compendio, publicado en la revista *Agronomy*, se utilizó la metodología desarrollada durante el primer artículo para realizar una campaña completa de tratamientos fitosanitarios de manera variable en base a mapas de prescripción. En este segundo artículo se sustituyó el prototipo de aplicación variable diseñado en el capítulo uno por un sistema comercial para cultivos arbóreos. Durante el desarrollo del segundo capítulo, se evaluó la calidad de la distribución de producto fitosanitario en la planta y se evaluó la eficacia biológica de los tratamientos variables. Los objetivos

específicos relacionados con este capítulo son: **f** y **g**. Si bien, además se cumplieron los objetivos específicos **a**, **b**, **c**, **d** y **e** descritos anteriormente.

Capítulo 3. Assessment of Vineyard Canopy Characteristics from Vigour Maps Obtained Using UAV and Satellite Imagery.

A partir de los resultados obtenidos en los artículos anteriores, en los que se demostró que el proceso de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción en el cultivo de la vid es una realidad. En este tercer artículo, publicado en la revista *Sensors*, se trabajó en la obtención de modelos lineales para la determinación de las características de la vegetación a partir de imágenes espectrales obtenidas mediante diferentes plataformas aéreas. De esta manera, obtener mapas de prescripción de forma automática sin necesidad de caracterizar la vegetación manualmente. El objetivo específico **h** está relacionado con este capítulo.

Resultados

Capítulo 1

Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process



PRECISION AGRICULTURE

Abstract

Site-specific management of crops represents an important improvement in terms of efficiency and efficacy of the different labours, and its implementation has experienced a large development in the last decades, especially for field crops. The particular case of the spray application process for what are called “specialty crops” (vineyard, orchard fruits, citrus, olive trees, etc.) represents one of the most controversial and influential actions directly related with economical, technical, and environmental aspects. This study was conducted with the main objective to find possible correlations between data obtained from remote sensing technology and the actual canopy characteristics. The potential correlation will be the starting point to develop a variable rate application technology based on prescription maps previously developed. An unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a hyperspectral camera was used to obtain data to build a canopy vigour map of an entire parcel. By applying the specific software DOSAVIÑA®, the canopy map was then transformed into a practical prescription map, which was uploaded into the dedicated software embedded in the sprayer. Adding to this information precise georeferenced placement of the sprayer, the system was able to modify the working parameters (pressure) in real time in order to follow the prescription map. The results indicate that site-specific management for spray application in vineyards result in a 45 % reduction of application rate when compared with conventional spray application. This fact leads to an equivalent reduction of the amount of pesticide when concentration is maintained constant, showing once more that new technologies can help to achieve the goal of the European legislative network of safe use of pesticides.

Keywords: Unmanned aerial vehicle (UAV) · Canopy map · Variable rate application · DOSAVIÑA · Spray map

Quartile: Q1
Impact factor: 4.454
DOI: 10.1007/s11119-019-09643-z

¡ATENCIÓN!

Las páginas 25 a 45 de la tesis contienen el artículo

Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process

publicado en la revista *Precision Agriculture* (2019) 20:1136–1156
<https://doi.org/10.1007/s11119-019-09643-z>

deben consultarse en la página web del editor

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-019-09643-z>

Capítulo 2

On-farm evaluation of prescription map-based variable rate application of pesticides in vineyards



agronomy

Abstract

Canopy characteristics are crucial for accurately and safely determining the pesticide quantity and volume of water used for spray applications in vineyards. The inevitably high degree of intra-plot variability makes it difficult to develop a global solution for the optimal volume application rate. Here, the design procedure of, and the results obtained from, a variable rate application (VRA) sprayer are presented. Prescription maps were generated after detailed canopy characterization, using a multispectral camera embedded on an unmanned aerial vehicle, throughout the entire growing season in Torrelavit (Barcelona) in four vineyard plots of Chardonnay (2.35 ha), Merlot (2.97 ha), and Cabernet Sauvignon (4.67 ha). The maps were obtained by merging multispectral images with information provided by DOSAVIÑA®, a decision support system, to determine the optimal volume rate. They were then uploaded to the VRA prototype, obtaining actual variable application maps after the application processes were complete. The prototype had an adequate spray distribution quality and exhibited similar results in terms of biological efficacy on powdery mildew compared to conventional (and constant) application volumes. The VRA results demonstrated an accurate and reasonable pesticide distribution, with potential for reduced disease damage even in cases with reduced amounts of plant protection products and water.

Keywords: Vineyard · pesticide application · variable rate application · unmanned aerial vehicle

Quartile: Q1
Impact factor: 2.603
DOI: 10.3390/agronomy10010102

Article

On-Farm Evaluation of Prescription Map-Based Variable Rate Application of Pesticides in Vineyards

Javier Campos, Montserrat Gallart, Jordi Llop, Paula Ortega , Ramón Salcedo and Emilio Gil * 

Department of Agro Food Engineering and Biotechnology, Universitat Politècnica de Catalunya, Esteve Terradas, 8, 08860 Castelldefels, Spain; javier.campos@upc.edu (J.C.); montserrat.gallart@upc.edu (M.G.); jordi.llop-casamada@upc.edu (J.L.); paula.ortega@upc.edu (P.O.); ramon.salcedo@upc.edu (R.S.)

* Correspondence: emilio.gil@upc.edu; Tel.: +34-93-5521099

Received: 1 December 2019; Accepted: 8 January 2020; Published: 10 January 2020



Abstract: Canopy characteristics are crucial for accurately and safely determining the pesticide quantity and volume of water used for spray applications in vineyards. The inevitably high degree of intraplot variability makes it difficult to develop a global solution for the optimal volume application rate. Here, the design procedure of, and the results obtained from, a variable rate application (VRA) sprayer are presented. Prescription maps were generated after detailed canopy characterization, using a multispectral camera embedded on an unmanned aerial vehicle, throughout the entire growing season in Torrelavit (Barcelona) in four vineyard plots of Chardonnay (2.35 ha), Merlot (2.97 ha), and Cabernet Sauvignon (4.67 ha). The maps were obtained by merging multispectral images with information provided by DOSAVIÑA[®], a decision support system, to determine the optimal volume rate. They were then uploaded to the VRA prototype, obtaining actual variable application maps after the application processes were complete. The prototype had an adequate spray distribution quality, with coverage values in the range of 20–40% and exhibited similar results in terms of biological efficacy on powdery mildew compared to conventional (and constant) application volumes. The VRA results demonstrated an accurate and reasonable pesticide distribution, with potential for reduced disease damage even in cases with reduced amounts of plant protection products and water.

Keywords: vineyard; pesticide application; variable rate application; unmanned aerial vehicle

1. Introduction

Pesticide spray application is one of the most important factors that influences all economic, environmental, and quality-related aspects of worldwide vineyard operations. Vineyards, with their grape-bearing vines and their relationship with wine production, are one of the crop-types of focus among the recently named “specialty crops” [1]. Several challenges exist when considering improvements in the application process. The Mediterranean zone in particular requires further training and education, taking into account its specific characteristics.

The application of pesticides requires accuracy, as imprecise or excessive use can lead to serious problems such as environmental pollution, traces of pesticides in food, and health issues in humans; both workers and bystanders [2]. During the application process, risk, as a function of pesticide dose and harm to sensitive non-target areas, is related to (a) the spraying efficiency and (b) the amount of plant protection products (PPPs) used during the distribution process across the entire canopy. For orchard and vineyard applications, however, the various methods used to determine the most suitable amount of PPP and the corresponding application volume rate are often difficult to understand [3].

It is suggested that accurately determining the spray rate based on the canopy structure can improve the quality of pesticide application, resulting in better pest/disease control and reduced risk of

contamination. This could also lead to reduced amounts of pesticide used, which brings consequential economic, environmental, and social benefits. However, not all trees and bush crops have the same structure and uniformity, and in some cases, it is difficult to characterize the geometric parameters of the intended target. Moreover, canopy characterization could vary from very simple measurements of the main structural parameters (e.g., canopy height, canopy width) down to the most sophisticated, detailed aspects (e.g., leaf area density, porosity, leaf area index). A significant amount of previous research has demonstrated the clear influence of the canopy structure and dimensions on the success of the spray application process [4–10]. These studies have established a clear necessity to determine the optimal amount of pesticide to be used based on the canopy characteristics, as opposed to determining the amount by simply quantifying the ground surface area.

Accurate canopy characterization is often linked with the promising concept of variable rate pesticide application. Assuming that the objective is to maintain a constant application rate per unit of canopy, developments regarding canopy measurement methods have been linked with research into modified sprayers. Using these, various spray parameters (working pressure, nozzle flow rate, number of nozzles, etc.) can be modified according to the canopy characteristics, while maintaining a constant application rate per unit of canopy [11–13].

Canopy characterization then becomes a crucial aspect within site-specific management strategies. In particular, when georeferenced information regarding the canopy structure and variability at the field scale is required [14], the use of non-destructive remote sensing technologies becomes a promising option. These technologies make rapid assessment of large areas possible [15,16]. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been widely utilized to carry remote sensing devices due their versatility, flexibility regarding flight scheduling and affordable management. Using this technology, spatial information linked, both directly and indirectly, with canopy characteristics or information about designed areas can be recorded in a practical and efficient way. Examples of this information include water status [17], disease detection [18] and canopy characterization [19–22]. De Castro et al. developed a fully automatic process for vineyard canopy characterization [14], which self-adapts to varying crop conditions. This represents an important improvement in the canopy characterization process, generating a time efficient, reliable, and accurate method, in addition to avoiding potential errors inherent to the manual process.

Recent research has demonstrated interest in the use of UAVs for canopy characterization and the potential improvements to the application process considering the intra-parcel variability [14,23]. This inherent variability, especially in large parcel situations, has led to increased interest in the development of advanced sprayers that could modify the spray application parameters in order to adapt the amount of PPP to the canopy structure. The European Directive on Sustainable Use of Pesticides highlighted this as an important step in reducing the risk of pesticide use [24], through facilitating a reduction in the applied dose per hectare, improving the deposition quality and controlling the environmental contamination risk.

Benefits of the implementation of variable application rate based on the intra-parcel variability have been demonstrated, not only by the potential reduction of applied PPP, but also for the more rational and logical distribution of the required dose, considering the pest/disease pressure and its negative effects on the crop development [15].

Vogel et al. evaluated a modified conventional boom sprayer for variable application of herbicide based on prescription maps [25]. The system was capable of combating weeds of corn and soybean crops. Furthermore, Michaud and coworkers developed a variable application prototype based on maps [26], obtained from aerial spectral images, to combat weeds in a cranberry crop. While variable rate application technology based on prescription maps is widely used in field crops, it is not used in 3D crops. For this reason, this research aims to develop a variable rate application (VRA) system, for vineyard sprayers, based on canopy vigor maps obtained with remote sensors.

Applying the latest technologies in crop protection process improvements to vineyards, arguably one of the most specialty crops in the Mediterranean zone, could massively benefit from this

important and specific agriculture. Vineyards have been identified as agricultures with one of the lowest rates of adoption or implementation of precision farming, with a primary reason being the low educational level of their farmers [27,28]. Research progress in this topic, and increased use of new technologies, will lead to a more uniform educational level across all EU zones. A similar trend has been witnessed in recent years in field crop spraying [29].

The main objective of this research was to develop, and evaluate, a holistic and automatic process for large-scale variable rate application in commercial parcels of vineyard, considering the intra-parcel variability. The specific objectives of this work were as follows:

- Development of canopy variable maps using information acquired by specific remote sensing.
- Establishment of a protocol to transform canopy maps into PPP prescription maps;
- Implementation of the corresponding hardware and software on a commercial sprayer to enable georeferenced variable spray application according the developed prescription maps;
- Quantification of the benefits of the developed prototype in the global context of spray application.

2. Materials and Methods

This section presents the entire process carried out to implement the variable application rate in real conditions. This process follows the method of Campos et al. [23] and is summarized in Figure 1. The following steps can be distinguished: (1) Generation of canopy vigor map from UAV data; (2) generation of prescription maps for variable spray application based on canopy maps; (3) development of software and hardware to adapt a conventional sprayer into a Variable Rate Application (VRA) sprayer; and (4) generation of actual application rate map and monitoring of the results.

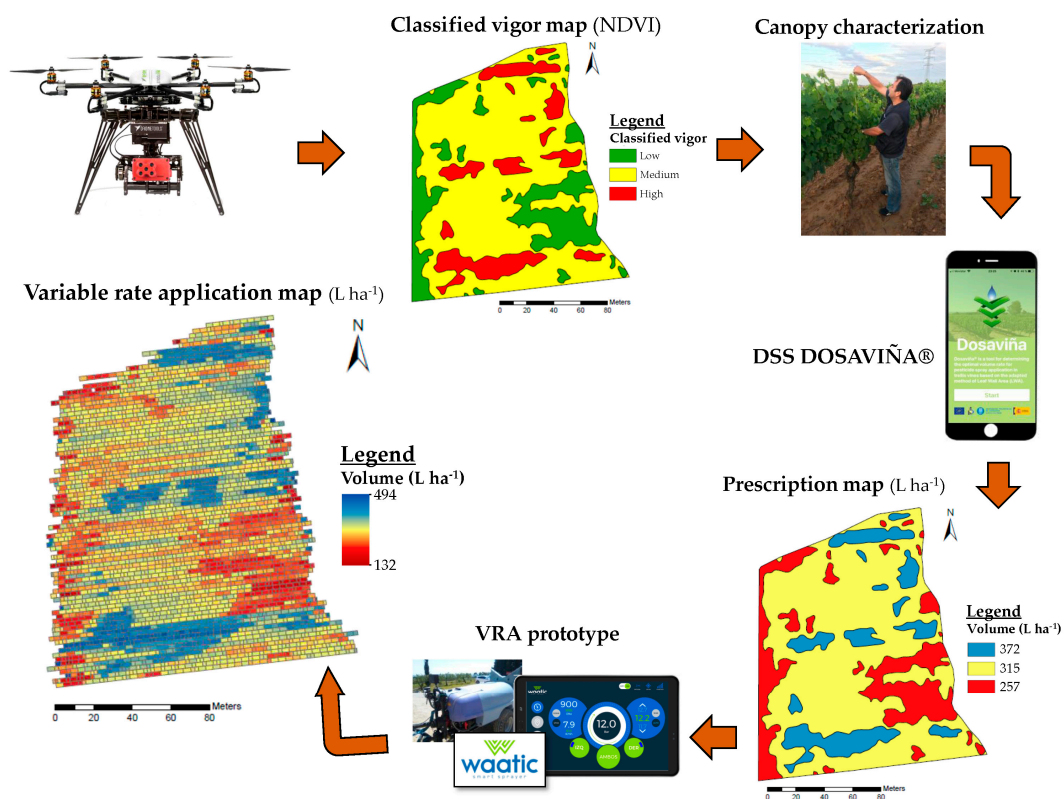


Figure 1. Overview of the entire process used to implement the variable application rate in the field tests.

In order to assess the suitability of the developed VRA, parcels with conventional—and therefore constant—rate application were also included in this research and used as a reference.

2.1. Experimental Site

The trials were carried out on the Alt Penedès region (Torrelavid, Barcelona); an important wine production zone in the northeast of Spain. Seven different vineyards were selected, containing three representative varieties: Chardonnay, Merlot and Cabernet Sauvignon (Figure 2).

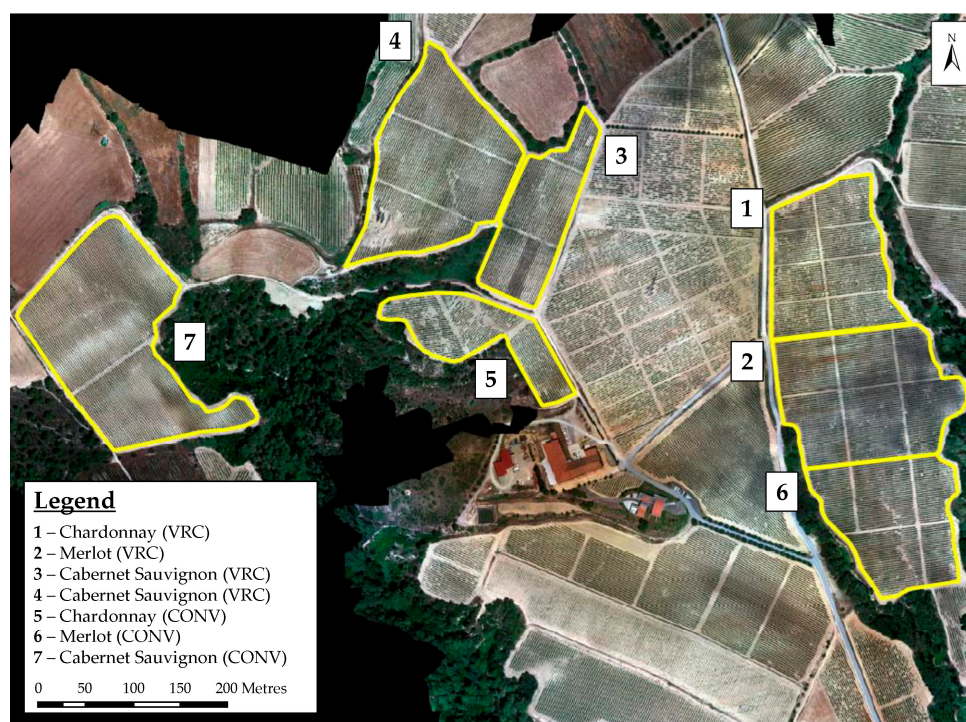


Figure 2. Orthophoto map of the experimental vineyard parcels.

All of the selected vineyards were trained in a trellis system; Double Royat with 1.2 m on the row and 2.2 m between rows. Four of the selected parcels were sprayed with VRA system and the remaining three were sprayed using a conventional sprayer (CONV). The main characteristics of the selected vineyards are shown in Table 1.

Table 1. Main characteristics of the vineyard parcels.

Parcel	Variety	Treatment	Area (ha)	X coord. (m)	Y coord. (m)	Reference System
1	Chardonnay	VRA	2.35	392,194	4,587,999	ETRS 89 UTM31
2	Merlot	VRA	2.97	392,234	4,587,843	
3	C. Sauvignon	VRA	1.53	391,856	4,588,055	
4	C. Sauvignon	VRA	3.14	391,744	4,588,107	
5	Chardonnay	CONV	1.33	391,794	4,587,929	
6	Merlot	CONV	2.49	392,269	4,587,700	
7	C. Sauvignon	CONV	3.84	391,361	4,587,908	

2.2. Generation of Canopy Vigor Maps

In order to obtain a complete range of data across the entire season, the vineyards were overflown with an unmanned aerial vehicle (UAV) at three different canopy stages. The first flight was scheduled on May 9th 2018, at BBCH around 57–60 [30]; the second flight was executed on June 11st (BBCH 69–75); and the third flight was performed on July 2nd (BBCH 77–79). A DroneHEXA (Dronetools

SL, Sevilla, Spain) was used for the data acquisition. The UAV was equipped with two batteries of 6000 mAh (88.8 Wh), with a maximum autonomy of 25 min. The drone was loaded with a multispectral camera (RedEDGE, Micasense, Seattle, WA, USA) equipped with five spectral bands: 668 nm for Red with a bandwidth of 10 nm; 560 nm for Green with a bandwidth of 20 nm; 475 nm for Blue with a bandwidth of 20 nm; 717 nm for RedEdge with a bandwidth of 10 nm; and 840 nm for NIR with a bandwidth of 40 nm. Flights were conducted 95 m above ground level (AGL) at a cruise flight speed of 6 m s⁻¹. Overlapping zones were adjusted at 80% in the sense of flight and 60% in the transverse sense.

In order to build the vigor map at each canopy stage, an orthophoto map with a ground sample distance (GSD) of 6.33 cm pixel⁻¹ was obtained from spectral images acquired with the camera. The orthophoto map was radiometrically calibrated using four grayscale standards (22, 32, 44 and 51% grayscale reflectance), placed in the field during the flight, to transform grayscale 12-bit digital numbers to reflectance values. This new data were used to calculate the normalized differential vegetation index (NDVI) [31] (Equation (1)).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (1)$$

where NDVI is normalized difference vegetation index; NIR is reflection in the near-infrared spectrum; and RED is reflection in the red range of the spectrum.

As the vineyards were planted out in rows, the image was segmented by an NDVI threshold in order to eliminate weeds, shadows and soil occurring between rows. In each vigor map building process, different NDVI thresholds were established depending on the response of the not desired pixels (soil, shadows, weeds, etc.). The pixels above the set threshold were considered vineyard pixels and coded as “1”, whereas pixels below the set threshold were considered noise and set to “0”. Once the NDVI threshold was applied, an inverse distance weighting interpolation (IDW) was performed to generate a continuous NDVI map. Final processing consisted of value clustering in three NDVI levels, except in one case, where the clustering process only differentiated two NDVI levels due to the low intra-plot variability (Figure 3). In the case of three NDVI levels, the population were divided in quintiles (P20, P40, P60 and P80). The NDVI values lower than P20 were categorized as low vigor, values between P20 and P80 correspond to medium vigor and values higher than P80 were clustered into high vigor. P20 and P80 were selected as border lines to differentiate low and high vigor canopy zones, avoiding excessive weight to extreme zones. When only two NDVI levels were distinguished, the population were divided with the median (2-quantiles, P50). The NDVI values lower or equal than P50 corresponded to low vigor and those values higher than P50 were categorized as high vigor.

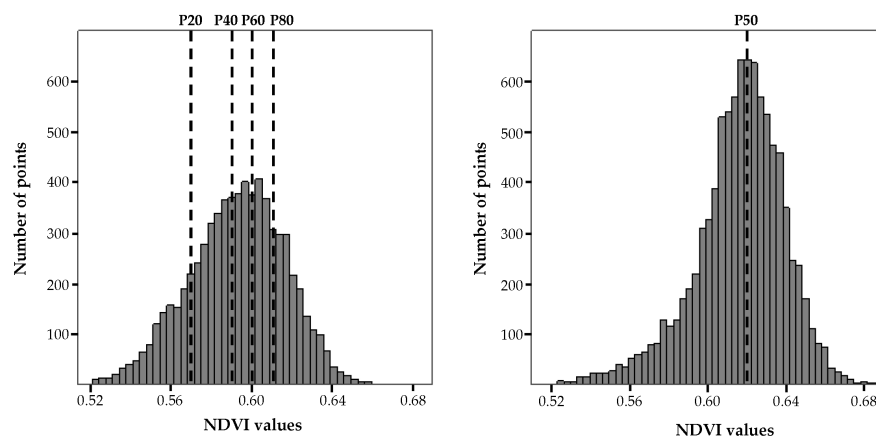


Figure 3. Examples of histogram of the NDVI values for clustering in 3 (left) and 2 (right) vigor zones.

Finally, the latter data were smoothed by performing neighbor median filtering to produce the classified vigor map. The process was executed using QGIS software (OSGeo, Beaverton, OR, USA) [32].

2.3. Generation of Prescription Maps for Variable Spray Application

Once the vigor map was created, taking into account the different zones identified, it was located in the field using a GNSS receiver. In each determined vigor zone, 15 manual measurements of canopy height and width were randomly taken following EPPO standard [33]. After that, adjusted volume rates for every zone were determined using the decision support system (DSS) DOSAVIÑA[®] [3]. The values obtained using DOSAVIÑA[®] were introduced into the classified vigor map using QGIS software [32], in order to obtain the prescription map. This procedure was carried out for each pesticide application. Throughout the season, a total of seven pesticide applications were performed. This followed the experience and advice of the farmers' experience, who recommended the adequate time taking into account the risk of pest/damage.

2.4. Adapted Sprayer for Variable Rate Application

A conventional trailed cross-flow air sprayer (Saher Maquinaria Agrícola S.L., Barcelona, Spain), with a 1000 L tank and an axial fan of 800 mm diameter, commonly used in vineyard regions, was adapted for variable pesticide application based on the prescription maps (VRA). To achieve this, the sprayer was equipped with: a) one pressure sensor—GEMS 1200 series (Gems Sensors & Controls, Plainville, CT, USA)—to allow working pressure to be monitored during the work; and b) an electronic controller—WAATIC (Estel Grup S.L., Barcelona, Spain)—including a GNSS receiver with a frequency of 1 Hz, a touchscreen and an automatic section controller. The purpose of the system was, firstly, to determine the position of the sprayer in the field as detected by the GNSS receiver. The system would then read the desired volume rate, based on the previously uploaded prescription map, and modify the working pressure using the electronic valve available in the conventional sprayer. This will then obtain the adjusted nozzle flow rate that is required to obtain the desired volume rate following Equation (2):

$$q = \frac{V \times a \times v}{600} \quad (2)$$

where q is the intended nozzle flow rate ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$); a is working width (m); v is forward speed ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)

Working pressure was automatically adjusted in the sprayer following Equation (3), established for every type of nozzle selected during the spray application process:

$$p = \left(\frac{q}{a \times b} \right)^2 \quad (3)$$

where p is the intended pressure (bar); q is the intended nozzle flow rate ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$); a and b are dimensionless coefficients depending on nozzle type and size.

Prior to each spray application, the prescription map, in GeoJSON format, was loaded via USB to the touch screen that was installed in the sprayer. Working parameters, such as the number and type of nozzles, as well as the working width, were also introduced into the system.

2.5. Generation of Actual Variable Rate Application Maps

Once spraying had commenced, the system recorded information concerning the sprayer position in the field, the applied volume rate and the adjusted working pressure, each second throughout operation. When spraying had finished, the system generated the actual variable rate application map, which was downloaded from the touch screen via USB. This methodology was repeated for every selected parcel and for every pesticide application process throughout the entire season.

2.6. Evaluation of the System Accuracy

In order to evaluate the accuracy of the system, the prescription maps and the actual variable rate application maps were compared following the methodology developed by Campos et al. [23], using QGIS software [32]. Within these comparison processes, a random net of 2 points m^{-2} was

created, and each georeferenced random point was assigned with a prescript value “r” and an actual value “p”. For each prescript value “r”, 11 intervals of tolerance were assigned (from 0% to 50% deviation, increasing in steps of 5%). It was then determined if the actual value “p” was within the calculated range $[r-i, r+i]$. Once all the points were compared, the percentage of coincidence between the assigned and actual values was calculated. Finally, to visualize the level of accuracy of the actual spray application map, a specific interpolation process, based on the inverse distance weighted (IDW) method, was applied [34].

2.7. Evaluation of Spray Distribution Quality

In order to evaluate the spray distribution quality—in all the three different identified vigor zones and in every selected parcel—a detailed quantification of coverage analysis was carried out using Water Sensitive Papers (WSP) (Syngenta, Basel, Switzerland). Three replicates were arranged in each vigor zone for each pesticide application and parcel. Each sampling point consisted of nine WSP. These were located in the canopy, covering both the internal and external layouts of the canopy, and at three varying heights (Figure 4). This process followed the methodology of both Gil et al. and Miranda-Fuentes et al. [35,36]. In the first two pesticide applications, however, only six WSP were located throughout the canopy, due to its low canopy height.

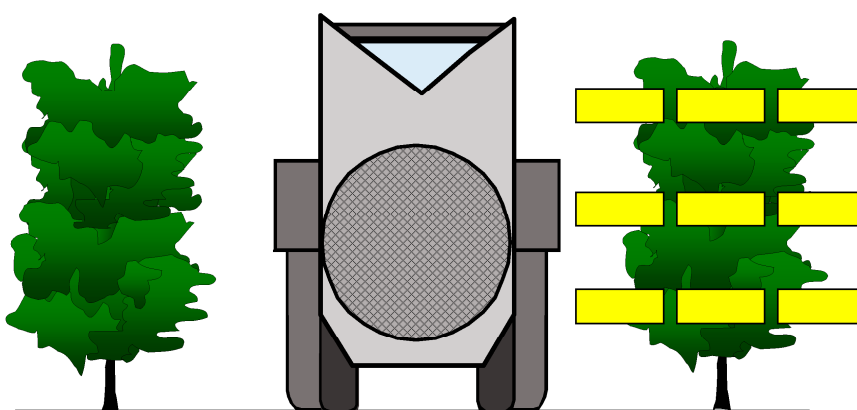


Figure 4. Scheme of the water sensitive papers located in each vine for assessing the spraying coverage.

After each spray application, the WSP were collected, digitized using a scanner at a resolution of 600 dpi, 24 bits (color images), and processed with ImageJ[®] software (NIH, Bethesda, MD, USA), as established by Llop [37], in order to obtain the percentage of coverage.

2.8. Evaluation of the Biological Efficacy

Evaluation of the biological efficacy was carried out by comparing the presence of powdery mildew (*Uncinula necator*) in both the parcels treated with variable rate application (VRA), and in the parcels sprayed with conventional application (CONV). To achieve this process comparison, systematic sampling of 20 points ha^{-1} was implemented. Each sampling point (composed of three successive vines) was marked with a flag to maintain its location throughout the season. Two leaves were picked at random from each vine, and the percentage of infection was determined following the EPPO guideline [38].

In order to evaluate the efficacy, two different indexes were calculated for each studied parcel: (a) Incidence of powdery mildew (Equation (4)); and (b) degree of powdery mildew infestation (Equation (5)). The incidence refers to the number of leaves affected by powdery mildew independently of the severity of their infection.

$$\text{Incidence of mildew (\%)} = \frac{\text{no infested leaves}}{\text{no total leaves}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Degree of mildew infestation (\%)} = \frac{\sum \text{category} \times \text{no leaves}}{\text{maximum category} \times \text{no total leaves}} \times 100 \quad (5)$$

The degree of infestation relates to the quantity of infested leaves and was classified based on the categories defined in Table 2.

Table 2. Affectation categories based on the percentage of leaves affected, according to the EPPO guideline [34].

LEAF AFFECTATION (%)	CATEGORY
0	1
<5	2
5–10	3
10–25	4
25–50	5
50–75	6
>75	7

Two sampling processes were used throughout. The first sampling was arranged on July 5th (BBCH: Chardonnay 79; Merlot and Cabernet Sauvignon 77) and the second on July 31st (BBCH: Chardonnay 85; Merlot and Cabernet Sauvignon 83).

2.9. Statistical Analyses

For the evaluation of the water sensitive papers' (WSP) coverage, one-way analysis of variance (ANOVA) was performed in order to evaluate the differences between vigor zones.

To evaluate the biological efficacy, the impact of the pesticide application type (conventional and variable rate application) was evaluated using one-way ANOVA for both incidence and infestation, considering vine variety as a covariate.

In all cases, previous to the analysis, the data were transforming using the *arcsin* function to obtain a normal distribution of residues. Statistical analyses were performed using SPSS 25.0 software [39].

3. Results and Discussion

3.1. Canopy Vigor Maps, Prescription Maps and Actual Variable Rate Application Maps

Three raw vigor maps were obtained throughout the duration of the season. These were obtained for each of the selected parcels from the spectral images taken from the multispectral camera that was mounted on the UAV. The raw vigor maps have a resolution of approximately 6 cm pxl⁻¹ and allow for evaluation of the vegetation condition along the plot. This is the first step in determining the intra-plot variability. From this raw data, three classified canopy vigor maps were obtained for each plot during the growing season. Other previous works focused on using NDVI as an indicator for yield prediction and vineyard structural characteristics has also obtained satisfactory results distinguishing two or three different management zones according to NDVI [40–42].

Figure 5 indicates the 12 canopy vigor maps that were generated across the duration of the season. It was noted that these maps changed throughout the vineyard season. This result disagrees with the research of Kazmierski [43] that highlighted an intra-annual stability within vineyard season of NDVI patterns. However, this study used an airborne imagery with a resolution of 3 m pxl⁻¹ and only the last vineyard stages (85 days before harvest).

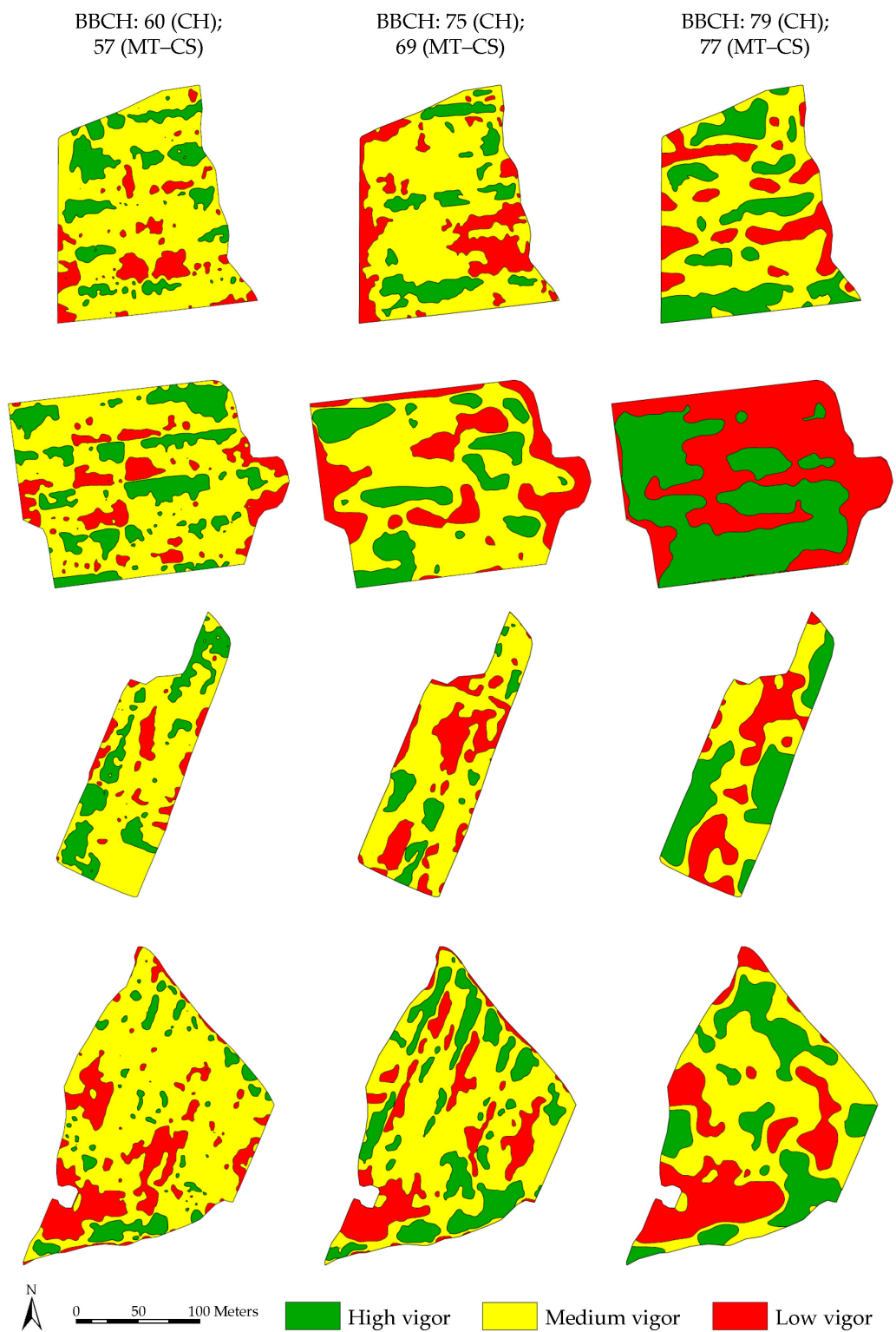


Figure 5. Vigor maps for each parcel in the evaluated BBCH stages.

Table 3 presents the percentage of area corresponding to each vigor category for each generated canopy vigor map. It can be seen that the majority of the area corresponds to the medium vigor category, since this category includes quintiles 2, 3 and 4.

Table 3. Percentage of area in each distinguished vigor map category (low—L, medium—M, high—H) in each parcel.

Flight Date	1 (Chardonnay)			2 (Merlot)			3 (C. Sauvignon)			4 (C. Sauvignon)		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
May 9th	11.8	71.0	17.2	13.9	63.9	22.2	8.7	68.1	23.2	20.7	71.1	8.2
June 11st	20.4	66.0	13.6	24.2	56.2	19.6	24.6	65.2	10.2	18.5	59.8	21.7
July 2nd	18.1	55.2	26.7	50.9	-	49.1	24.6	45.7	29.7	27.4	48.0	24.6

These results show the evolution of the intra-plot variability along the season, which was different for the three selected varieties. Cabernet Sauvignon (parcel 4) increased three times the percentage of high vigor zones, while in Merlot (plot 2) was multiplied by two. In all the varieties it was detected a decrease of surface corresponding to medium vigor zone. For the evaluation of these values shall be considered the influence of canopy management conducted during the period.

During the spraying season, a total of 28 spray applications were carried out (7 applications per plot studied). In each of these cases, the vegetation in each area of vigor was measured in order to determine the optimum volume of application using DOSAVIÑA[®] (Table 4) and thus create the prescription map. It is worth noting that canopy characterization follows the same tendency of vigor zones, finding the lowest high and width values in low vigor zones and the highest in the high vigor zones (Table 4) suggesting that NDVI has a good relationship with these two parameters. These results are consistency with those found in [16] where a significant relationship was obtained between LAI and NDVI ($p < 0.001$, $R^2 = 0.73$) and [44] where was also describe a good correlation between LAI and NDVI ($R^2 = 0.92$) and height and NDVI ($R^2 = 0.79$).

Two of the prescription maps are shown as examples in Figure 6. The left side of the figure presents the prescription map built on June 20th, which corresponds to the 4th spray application of the season on parcel one. In this application, three different volumes of vegetation were determined. In red areas (low vigor), an optimum volume of 257 L ha⁻¹ was determined. In the yellow areas (medium vigor) an optimum volume of 315 L ha⁻¹ was determined, and in the blue areas (high vigor) an application volume of 372 L ha⁻¹. Figure 6 right shows the prescription map built on July 12th, which corresponds to the 6th spray application of the season on parcel two. In this case, only two different vigor categories were differentiated. In green areas (low vigor), the volume rate was 230 L ha⁻¹ and in the blue areas (high vigor), the volume rate was 370 L ha⁻¹.

In total, 28 actual application maps were downloaded from the touch screen of the prototype after the spray application processes. The actual application maps corresponding to the two examples previously referenced are presented in Figure 7. These maps present the real information about the application volume in these cases.

Table 4. Canopy characterization. Volume rate (L ha⁻¹) calculated with Dosaviña® for each variety and canopy vigor (low, medium and high). Selected working conditions (color, number of nozzles and working pressure) for each pesticide application process (a for 1 to 4, b for 5 to 7).

Application Date	Parameters	1 (Chardonnay)			2 (Merlot)			3 (C. Sauvignon)			4 (C. Sauvignon)		
		Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
(a)													
May 24th	High (m)	0.65	0.76	1.01	0.50	0.63	0.74	0.45	0.68	0.85	0.71	0.73	0.79
	Width (m)	0.37	0.44	0.51	0.31	0.38	0.43	0.28	0.39	0.38	0.55	0.55	0.65
	Volume (L ha ⁻¹)	185 *	250 *	310 *	137	160	190	154 *	185 *	220 *	216 *	254 *	291 *
BBCH 61 (CH) 60 (CS-MT)	Nozzles (Color & n°)	Brown (6)			Brown (6)			Brown (6)			Brown (6)		
	Pressure (bar)	5.7	10.3	15.9	6.7	9.1	12.8	7.0	10.1	14.2	7.7	10.7	14.0
June 1st	High (m)	0.94	0.99	1.22	0.73	0.82	0.83	0.82	0.98	1.09	0.96	0.99	1.11
	Width (m)	0.45	0.45	0.47	0.38	0.38	0.42	0.35	0.43	0.43	0.48	0.49	0.51
	Volume (L ha ⁻¹)	278	309	371	216	247	278	247	309	340	278	309	340
BBCH 69 (CH) 61 (CS-MT)	Nozzles (Color & n°)	Yellow (6)			Yellow (6)			Brown (4) Orange (4)			Yellow (8)		
	Pressure (bar)	7.1	8.8	12.8	7.6	10.0	12.7	8.3	13.1	15.9	7.1	8.8	10.7
June 6th	High (m)	0.92	1.08	1.10	0.79	0.73	0.87	0.85	1.13	1.14	1.06	1.04	1.29
	Width (m)	0.50	0.45	0.57	0.47	0.50	0.87	0.41	0.48	0.51	0.52	0.49	0.53
	Volume (L ha ⁻¹)	309	377	444	206	247	278	206	283	315	286	336	437
BBCH 75 (CH) 69 (CS-MT)	Nozzles (Color & n°)	Yellow (6) Orange (2)			Yellow (6)			Brown (4) Yellow (4)			Yellow (6) Orange (2)		
	Pressure (bar)	7.4	11.2	15.6	6.9	10.0	12.7	5.7	10.9	13.6	6.3	8.8	15.1
June 20th	High (m)	0.92	1.11	1.27	0.76	0.88	1.07	0.88	1.03	1.35	0.92	1.08	1.26
	Width (m)	0.37	0.44	0.48	0.35	0.35	0.42	0.34	0.4	0.54	0.37	0.38	0.45
	Volume (L ha ⁻¹)	257	315	372	229	257	315	257	315	372	257	286	437
BBCH 77 (CH) 75 (CS-MT)	Nozzles (Color & n°)	Yellow (8)			Brown (4) Yellow (4)			Yellow (8)			Yellow (6) Orange (2)		
	Pressure (bar)	6.0	9.2	12.8	7.1	9.0	13.6	6.0	9.2	12.8	5.1	6.3	15.1

Table 4. Cont.

Application Date	Parameters	1 (Chardonnay)			2 (Merlot)			3 (C. Sauvignon)			4 (C. Sauvignon)		
		Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
(b)													
July 2nd	High (m)	0.94	1.01	1.16	0.86	0.98	1.07	0.94	1.11	1.31	1.06	1.20	1.31
	Width (m)	0.36	0.41	0.45	0.40	0.42	0.48	0.38	0.39	0.42	0.33	0.34	0.38
	Volume (L ha ⁻¹)	257	286	343	257	286	315	257	315	372	315	343	372
BBCH 79 (CH) 77 (CS-MT)	Nozzles (Color & n°)	Brown (2) Yellow (6)			Brown (2) Yellow (6)			Yellow (8)			Yellow (8)		
	Pressure (bar)	7.4	9.2	13.3	7.4	9.2	11.2	6.0	9.2	12.8	9.2	10.9	12.8
	High (m)	0.89	1.01	1.10	0.79	-	1.06	0.88	1.09	1.29	0.92	1.11	1.25
July 12th	Width (m)	0.38	0.43	0.52	0.43	-	0.53	0.36	0.39	0.47	0.34	0.36	0.42
	Volume (L ha ⁻¹)	257	286	372	230	-	370	257	286	372	257	315	343
	Nozzles (Color & n°)	Yellow (8)			Brown (2) Yellow (6)			Yellow (8)			Yellow (8)		
BBCH 81 (CH) 79 (CS-MT)	Pressure (bar)	6.0	7.5	12.8	5.8	-	15.6	6.0	7.5	12.8	6.0	9.2	10.9
	High (m)	0.83	0.99	1.06	0.79	-	1.03	0.87	1.03	1.26	0.89	1.09	1.20
	Width (m)	0.37	0.44	0.46	0.40	-	0.52	0.37	0.41	0.53	0.33	0.36	0.43
July 20th	Volume (L ha ⁻¹)	229	286	315	229	-	336	257	286	400	257	315	343
	Nozzles (Color & n°)	Brown (4) Yellow (4)			Brown (2) Yellow (6)			Yellow (8)			Yellow (8)		
	Pressure (bar)	7.1	11.2	13.6	5.8	-	12.8	6.0	7.5	14.9	6.0	9.2	10.9

All nozzles used were hollow cone Albus ATR models (Albus Saint-Gobain Desmarquest, Evraux, France). Forward speed during all the treatments was 6.8 km h⁻¹ except for those marked (*) where forward speed was 6.0 km h⁻¹. CH: Chardonnay; MT: Merlot; CS: Cabernet Sauvignon.

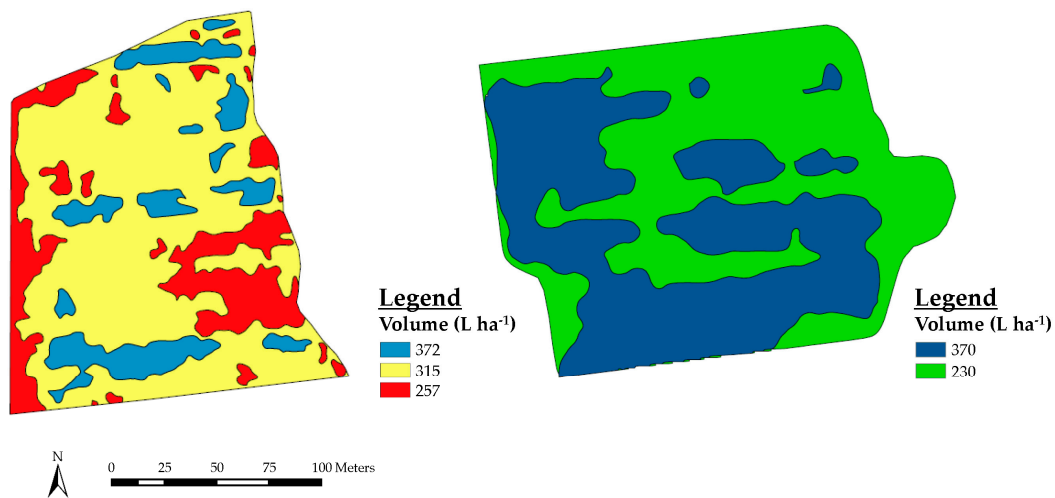


Figure 6. Examples of prescription maps used in the field tests. Left: June 20th of parcel 1 (Chardonnay). Right: July 12th parcel 2 (Merlot).

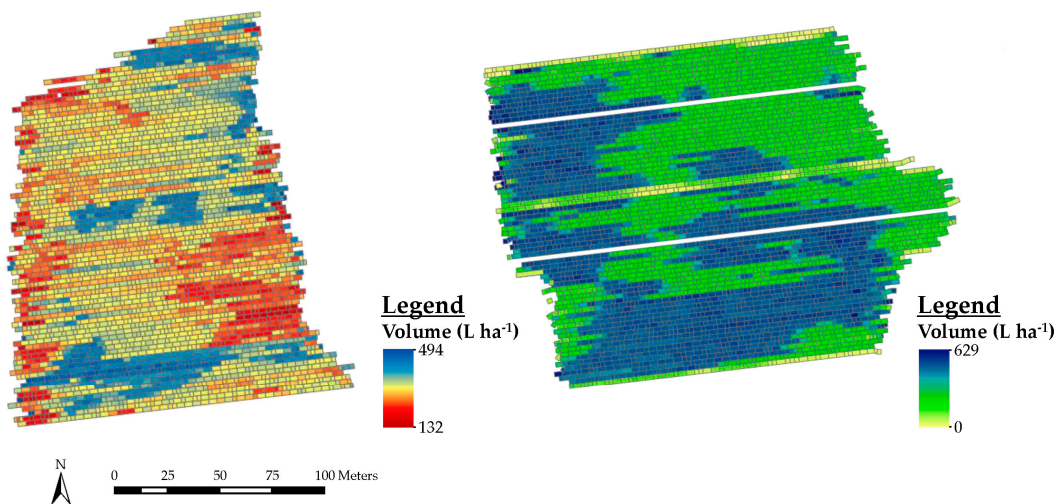


Figure 7. Examples of actual application maps obtained in the field's tests. Left: June 20th of parcel 1 (Chardonnay). Right: July 12th parcel 2 (Merlot).

3.2. Accuracy of the System

In order to quantify the correspondence between the prescription maps and the actual variable rate application maps, a range of eleven different thresholds were established, from 0% to 50% tolerance. The most restrictive threshold (0%) measured the percentage of points in which there was no difference between the intended and actual application rate. Conversely, the highest tolerance (50%) quantified the percentage of points where variations of $\pm 50\%$ of applied volume were detected.

In the case of the spray application on June 20th, previously presented as an example, only 1.3% of points were classified as successful points at the 0% threshold, while 99.8% of points were classified at the 50% threshold. Assuming a theoretical tolerance of $\pm 10\%$, the system was able to classify 77.4% of the points as successful points. Figure 8 presents the distributed accuracy, classified according to the established threshold level. The red zones marked on the maps indicate the areas where the accuracy of the system exceeded the established thresholds. The majority of these red zones correspond to transition zones, these being zones where the sprayer was ordered to modify the working pressure. As can be seen by the results, the variable rate application method was capable of generate actual application maps with a good degree of accuracy when compared with prescription maps. Table 5 presents the percentage of points that were classified as successful points, assuming a $\pm 10\%$ tolerance

across all parcels and spraying applications. Taking the average value of the data obtained, 77.0% of the points were classified as successful points. Similar results were obtained in other previous work [23] where a comparable variable rate system used in vineyard obtained an accuracy of 83% at ±10% tolerance. However, this last system was able to obtain a good accuracy (39%) at 0% tolerance. In case of field crops, where these types of systems are widely commercialized, Hørfarter [45] found a very good accuracy but using 1000 times less number of points for the comparison and calculating through a linear model between the intended and the actual application rate ($R^2 = 0.95$).

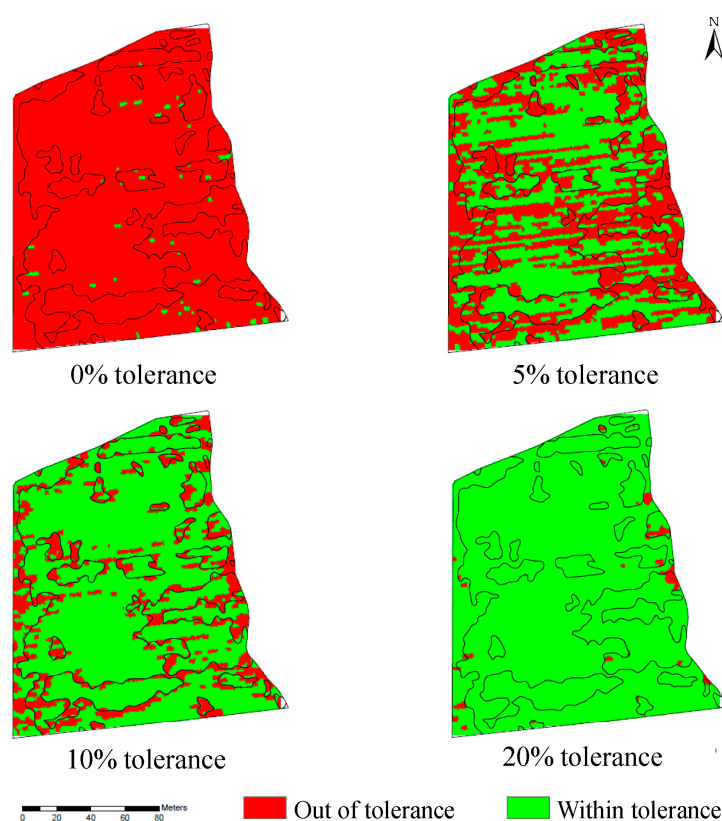


Figure 8. Example of accuracy distribution classified according to 0, 5, 10 and 20% threshold.

Table 5. Percentage of points classified as successful points, assuming a ±10% tolerance.

Application Date	1 (Chardonnay)	2 (Merlot)	3 (C. Sauvignon)	4 (C. Sauvignon)
May 24th	53.8	69.3	70.7	78.8
June 1st	75.2	81.8	78.7	82.2
June 6th	87.4	82.0	84.6	71.7
June 20th	77.4	81.5	74.4	68.2
July 2nd	75.0	84.3	56.6	75.2
July 12th	79.0	78.9	80.4	84.8
July 20th	83.5	78.0	79.3	81.9

Observing the tendency in the accuracy values, it is clear that the precision of the system increases along the season. This fact can be observed for all the selected varieties. A potential explanation of this fact can be observed in Figure 5, where, in lines, it can be evaluated the changes of the distribution of the vigor zones on each parcel. A deep analysis of Figure 5 indicates high variability in the parcels at early stages. This fact generates more changes in the canopy vigor zones inside the parcel, which requires higher number of changes in the adjustment of working parameters of the sprayer. This fact reduces the accuracy value due to the fact that the pressure circuit in the sprayer requires certain time to re-adjust the pressure and stabilize the functioning. So, as larger is the number of transition points

between zones of different canopy vigor, as reduced the accuracy of the system. These results are consistence with those found in [46,47] where was also determined that VRA technology operate more efficiently were the quantity of transitions zones decrease, due to the reduction of changes on working parameters in the sprayer (working pressure mainly).

3.3. Evaluation of Spray Distribution Quality

Coverage analysis, as displayed in Figure 9, indicates that promising results were obtained in all of the studied cases. Taking into account the average data, a coverage value of $35.1 \pm 0.6\%$ was observed. Despite changing the volume rate, no significant differences ($p > 0.05$) occurred in the coverage percentage across the vigor zones. In general, the coverage values seen during the spray applications ranged from 20 to 40%; it has been reported that this coverage is adequate to ensure pest/disease control in any spray application process [48]. These results support the case for adaptation of these applied volume rates to canopy characteristics, allowing for adjustment of the optimal amount of water while maintaining the coverage and spray distribution quality. Table 6 shows the detailed results obtained, both in terms of coverage (%) and of uniformity of distribution over the whole canopy, measured through the standard error of the mean (SEM). In general, the data did not indicate differences between the conventional and VRA systems, even if, in some cases, the volume rate was reduced according the canopy structure and dimensions. Similar results were obtained in other previous researches on variable application based on canopy characterization with on-board sensors [49–51].

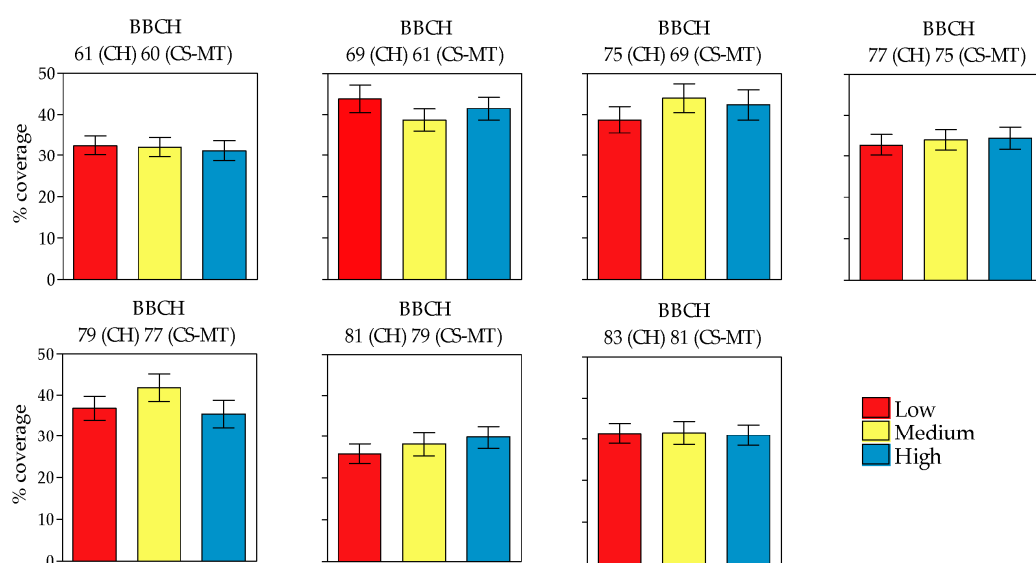


Figure 9. Percentage of water sensitive papers coverage obtained each vigor. Mean of the parcels \pm SEM.

Similar results were obtained at early crop stages with low canopy density, with high risk of overdosing. A deep analysis of coverage values (Table 6) indicates that the highest value of coverage (47.3%) was obtained for Chardonnay variety at medium canopy vigor level. In the opposite, the lowest value of coverage (27.8%) was obtained at Merlot variety, in this case at the low canopy density zones. Even if the statistical analysis demonstrated that grape variety had no influence in the obtained results, it is interesting to remark that, in terms of coverage, the highest average values of coverage were obtained at Chardonnay variety (42.9%), while the lowest were detected in Merlot variety (28.5%). Coverage values measured at the two plots of Cabernet Sauvignon were similar (34.3% for plot 3 and 34.2% for plot 4) and located between the other two varieties.

Figure 10 shows the improvement in coverage distribution in the whole canopy obtained when the applied volume was defined according the canopy structure (VRA) in comparison with the one obtained with the conventional spray application. It is clearly observed the improvements on spray uniformity.

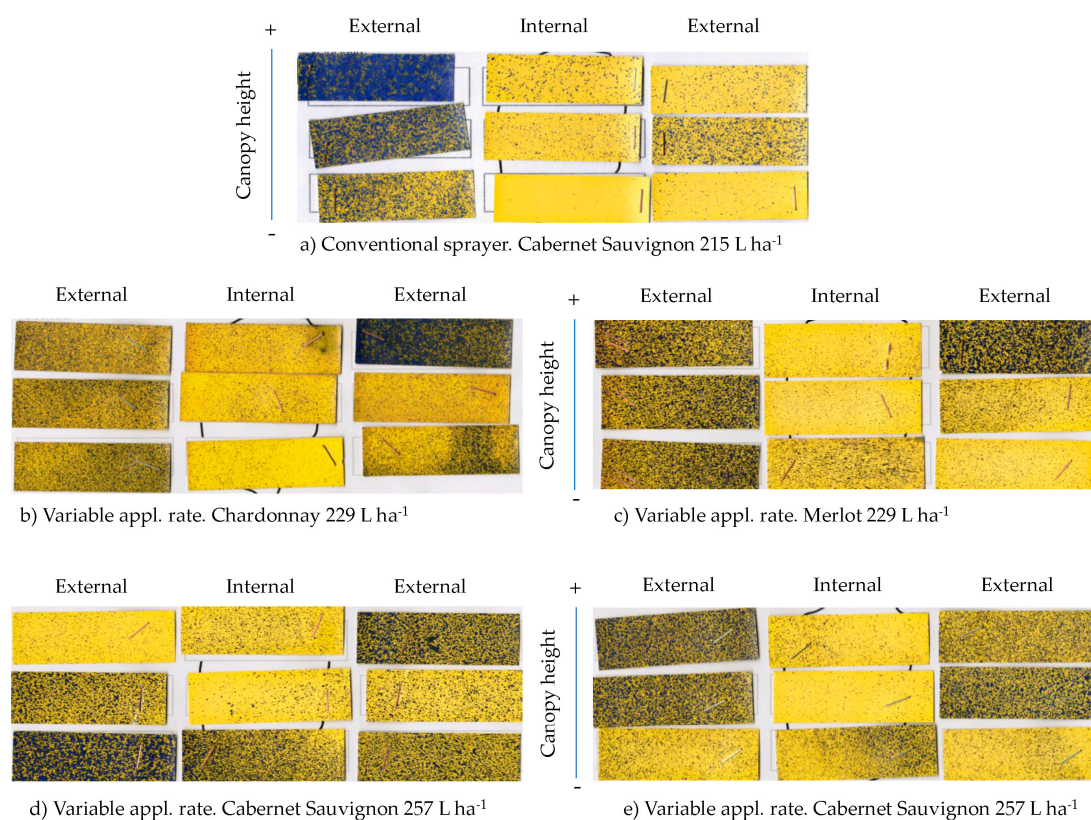


Figure 10. Coverage (WSP) obtained with conventional spray application (CONV) (a), in comparison with coverage obtained at the four selected varieties when using variable rate application (VRA) (b–e).

3.4. Evaluation of the Biological Efficacy

Table 7 presents the results obtained for powdery mildew incidence and infestation in both types of pesticide application (conventional and variable rate application) within the two sampling periods. Generally, the incidences after the variable rate pesticide application parcels on July 5th were significantly lower than those obtained for the conventional spray process (8.4% vs. 23.1%, respectively). No significant differences were obtained, however, in the July 31st sampling (12.7% vs. 15.4%, respectively). In both cases, the statistical analysis shows that the covariate vine variety was not significant ($p > 0.05$). Regarding the degree of powdery mildew infestation, no significant differences were witnessed between the conventional and variable rate treatments (15.8% vs 19.3% on July 5th, and 16.5% vs. 17.2% on July 31st). In case of variable application rate based on prescription maps applied in field crops, which are mainly focused in weed control, have also proven to be effective [52].

Table 6. Percentage of coverage (mean \pm SE of the mean) for each vigor zone in each studied parcel.

Application Date	1 (Chardonnay)			2 (Merlot)			3 (C. Sauvignon)			4 (C. Sauvignon)		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
May 24th	23 \pm 2.2	14 \pm 1.3	12 \pm 2.4	32 \pm 3.9	26 \pm 5.8	20 \pm 4.4	35 \pm 2.0	38 \pm 6.4	48 \pm 5.6	38 \pm 3.9	43 \pm 5.8	42 \pm 3.1
June 1st	29 \pm 2.1	42 \pm 2.7	39 \pm 4.7	-	29 \pm 6.6	37 \pm 6.9	61 \pm 6.6	42 \pm 8.2	41 \pm 4.5	41 \pm 4.7	43 \pm 4.7	47 \pm 3.3
June 6th	64 \pm 5.5	95 \pm 1.8	71 \pm 5.4	30 \pm 1.2	30 \pm 3.7	25 \pm 4.1	33 \pm 2.0	37 \pm 3.2	28 \pm 2.7	30 \pm 5.3	31 \pm 6.3	50 \pm 1.8
June 20th	42 \pm 7.1	37 \pm 6.6	40 \pm 3.9	30 \pm 2.5	30 \pm 8.6	33 \pm 4.9	31 \pm 2.3	34 \pm 4.2	25 \pm 2.4	28 \pm 5.0	35 \pm 2.3	40 \pm 4.0
July 2nd	52 \pm 4.5	80 \pm 7.3	67 \pm 2.7	29 \pm 3.4	31 \pm 6.0	27 \pm 4.0	36 \pm 9.8	29 \pm 2.3	19 \pm 4.0	30 \pm 7.7	27 \pm 2.8	32 \pm 4.6
July 12th	29 \pm 4.5	31 \pm 1.5	38 \pm 5.2	23 \pm 1.1	-	31 \pm 1.3	27 \pm 5.5	25 \pm 5.1	24 \pm 9.0	25 \pm 2.0	29 \pm 1.1	26 \pm 3.4
July 20th	28 \pm 1.9	32 \pm 1.4	35 \pm 4.9	23 \pm 3.7	-	27 \pm 3.3	39 \pm 3.3	33 \pm 6.1	35 \pm 4.8	35 \pm 2.8	29 \pm 1.7	27 \pm 4.9

Table 7. Percentage of incidence and degree infestation of powdery mildew at two sampling dates for conventional (CONV) and variable rate application (VRA) parcels.

Sampling Date	Indexes	1 (CH)	5 (CH)	2 (MT)	6 (MT)	3 (CS)	4 (CS)	7 (CS)
		VRA	CONV	VRA	CONV	VRA	VRA	CONV
July 5th	Incidence	11.6	30.8	10.0	12.5	7.6	4.5	26.1
BBCH: 79 (CH); 77 (CS-MT)	Degree infestation	17.3	20.3	15.7	16.1	15.4	14.9	18.5
July 31st	Incidence	11.3	17.3	23.0	13.6	12.1	4.5	15.2
BBCH: 85 (CH-CS-MT)	Degree infestation	16.4	17.0	18.7	17.2	16.0	14.9	17.4

CH: Chardonnay; MT: Merlot; CS: Cabernet Sauvignon.

Figure 11 presents the applied volume rates for the conventional and variable rate application systems throughout the whole growing season. In the case of variable rate application, the volume rate was always related to the canopy characteristics. It followed the canopy development and other changes throughout the period, also accounting for vineyard management (pruning and stripping). In contrast, in conventional applications, the volume rate was largely invariable for all spray applications, with the exception being when the farmer detected any disease symptom. In these cases, the applied volume (and consequently the PPP dose) was doubled. This consequently risked losses to the soil, drift and led to difficulties with residue management. A specific example of this was with the Cabernet Sauvignon variety at BBCH 77, where the volume rate was upgraded from 200 to 400 L ha⁻¹. Additionally, the arbitrary increase of volume application rate in conventional mode results in a very poor spray distribution, as it has been shown in Figure 10.

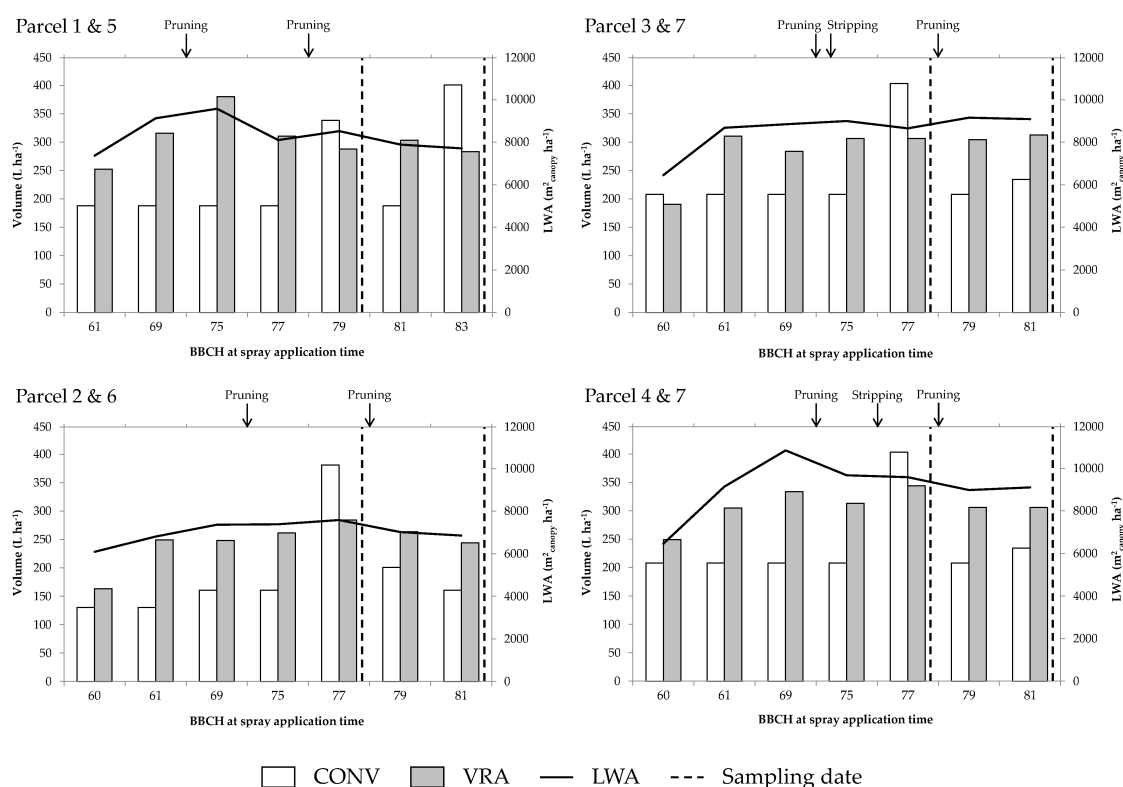


Figure 11. Volume rate applied in conventional and variable rate parcels in each spray application. Time of the evaluation of the biological efficacy (sampling time) as well as pruning and stripping task are marked.

The biological efficacy results indicate that the incidence of powdery mildew at the first sampling date was significantly higher in the conventional parcels than in the variable rate application parcels. By using a volume rate that was not well adapted to the characteristics of the canopy, incidence of the disease increased, which, as described previously, forced the farmer to increase the volume rate application. Results corroborated the conclusions established by Balan [53] where demonstrated the great effect of spray application volume rate and working characteristics in the quality of the spray distribution and on risk of contamination.

4. Conclusions

In this study, a prototype variable rate application system, based on prescription maps, was tested throughout the duration of an entire vineyard growth season. The major findings were found to be:

- The classified vigor maps were simply transformed into prescription maps by taking into account the structural canopy characteristics;
- The system was able to read a prescription map and appropriately modify the working parameters (working pressure) depending on the position of the sprayer in the field;
- A system accuracy of approximately 80% was obtained, assuming a tolerance of 10% deviation;
- Despite changing the working pressure and volume rate between the vigor zones, the coverage values that were obtained during the spray applications can be considered similar in all cases. The coverage was also deemed adequate in minimum terms to ensure pest/disease control in all cases;
- The variable rate application process, based on the combination of vigor maps with the DSS Dosaviña[®] to determine the optimal volume rate, can obtain equivalent results regarding biological efficacy as a conventional pest application process;

The variable rate application process allows an improved and more reasonable use of PPP, by taking into considering the specific characteristics of the intended target (canopy), when compared with a conventional spraying process. This results in a safer, and more sustainable, use of pesticides throughout the entire growing season.

Author Contributions: Methodology, J.C., M.G., J.L., R.S. and E.G.; investigation, J.C., M.G., J.L., P.O., R.S. and E.G.; data curation, J.C. and M.G.; writing—original draft preparation, J.C., M.G. and E.G.; writing—review and editing, E.G.; project administration, E.G. and J.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was developed with partial funding from the FI-AGAUR grant from the Generalitat de Catalunya (2017 FI_B 00893).

Acknowledgments: The authors would like to thank to Miguel Torres and Jean Leon for their support in the field trials and Estel Grup S.L. for providing the electronic controller WAATIC and for the technical monitoring of the system during the whole season.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Giles, D.; Billing, R. Deployment and performance of a uav for crop spraying. *Chem. Eng. Trans.* **2015**, *44*, 307–312. [[CrossRef](#)]
2. Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Rodriguez-Lizana, A.; Cuenca, A.; Gil, E.; Blanco-Roldán, G.L.; Gil-Ribes, J. Assessing the optimal liquid volume to be sprayed on isolated olive trees according to their canopy volumes. *Sci. Total Environ.* **2016**, *568*, 269–305. [[CrossRef](#)]
3. Gil, E.; Campos, J.; Ortega, P.; Llop, J.; Gras, A.; Armengol, E.; Salcedo, R.; Gallart, M. Dosaviña: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. *Comput. Electron. Agric.* **2019**, *160*, 117–130. [[CrossRef](#)]
4. Siegfried, W.; Viret, O.; Huber, B.; Wohlhauser, R. Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop Prot.* **2007**, *26*, 73–82. [[CrossRef](#)]
5. Furness, G.O.; Thompson, A.J. Using point of first run-off and spray volume in litres per 100 metres per metre of canopy height for setting pesticide dose. *Agric. Eng. Int. Gigr. Ejournal* **2008**, *10*, 08006.
6. Walklate, P.J.; Cross, J.V.; Pergher, G. Support system for efficient dosage of orchard and vineyard spraying products. *Comput. Electron. Agric.* **2011**, *75*, 355–362. [[CrossRef](#)]
7. Chen, Y.; Zhu, H.; Ozkan, H.E. Development of a variable-rate-sprayer with laser scanning sensor to synchronize sprayer outputs to tree structures. *Trans. ASABE* **2012**, *55*, 773–781. [[CrossRef](#)]
8. Codis, S.; Douzals, J.P. Comparaison des systèmes d'expression des doses de produits de protection de la vigne dans 5 pays européens et les besoins d'une harmonisation. In Proceedings of the AFPP-CIETAP-Conference Sur Les Techniques D'application de Produits de Protection des Plantes, Lyon, France, 15–16 March 2012; p. 10.

9. Gil, E.; Gallart, M.; Llorens, J.; Llop, J.; Bayer, T.; Carvalho, C. Spray adjustments based on LWA concept in vineyard. Relationship between canopy and coverage for different application settings. In Proceedings of the Aspects of Applied Biology 122, International Advances in Pesticide Application, Oxford, UK, 8–10 January 2014; pp. 25–32.
10. Garcerá, C.; Fonte, A.; Moltó, E.; Chueca, P. Sustainable use of pesticide applications in citrus: A support tool for volume rate adjustment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2017**, *14*, 715–728. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. Du, Q.; Chang, N.B.; Yang, C.; Srilakshmi, K.R. Combination of multispectral remote sensing, variable rate technology and environmental modeling for citrus pest management. *J. Environ. Manag.* **2008**, *86*, 14–26. [[CrossRef](#)]
12. Escolà, A.; Rosell-Polo, J.R.; Planas, S.; Gil, E.; Pomar, J.; Camp, F.; Llorens, J.; Solanelles, F. Variable rate sprayer Part 1—Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *95*, 122–135. [[CrossRef](#)]
13. Gil, E.; Llorens, J.; Llop, J.; Escolà, A.; Rosell-Polo, J.R. Variable rate sprayer. Part 2—Vineyard 1 prototype: Design, implementation and validation. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *95*, 136–150. [[CrossRef](#)]
14. De Castro, A.I.; Jiménez-Brenes, F.M.; Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; Borra-Serrano, I.; López-Granados, F. 3-D characterization of vineyards using a novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 584. [[CrossRef](#)]
15. Hall, A.; Lamb, D.W.; Holzapfel, B.; Louis, J. Optical remote sensing applications in viticulture—A review. *Aust. J. Grape Wine Res.* **2002**, *8*, 36–47. [[CrossRef](#)]
16. Johnson, L.F.; Roczen, D.E.; Youkhana, S.K.; Nemani, R.R.; Bosch, D.F. Mapping Vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Comput. Electron. Agric.* **2003**, *38*, 37–48. [[CrossRef](#)]
17. Baluja, J.; Diago, M.P.; Balda, P.; Zorer, R.; Meggio, F.; Morales, F.; Tardaguila, J. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Irrig. Sci.* **2012**, *30*, 511–522. [[CrossRef](#)]
18. Albetis, J.; Duthoit, S.; Guttler, F.; Jacquin, A.; Goulard, M.; Poilvé, H.; Féret, J.-B.; Dedieu, G. Detection of Flavescence dorée grapevine disease using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) multispectral imagery. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 308. [[CrossRef](#)]
19. Mathews, A.J.; Jensen, J.L.R. Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) collected high density structure from motion point cloud. *Remote Sens.* **2013**, *5*, 2164–2183. [[CrossRef](#)]
20. Ballesteros, R.; Ortega, J.F.; Hernández, D.; Moreno, M.Á. Characterization of *Vitis vinifera* L. canopy using unmanned aerial vehicle-based remote sensing and photogrammetry techniques. *Am. J. Enol. Vitic.* **2015**, *66*, 120–129. [[CrossRef](#)]
21. Poblete-Echeverría, C.; Olmedo, G.F.; Ingram, B.; Bardeen, M. Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution rgb imagery obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A case study in a commercial vineyard. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 268. [[CrossRef](#)]
22. Weiss, M.; Baret, F. Using 3D point clouds derived from UAV RGB imagery to describe vineyard 3D macro-structure. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 111. [[CrossRef](#)]
23. Campos, J.; Llop, J.; Gallart, M.; García-Ruiz, F.; Gras, A.; Salcedo, R.; Gil, E. Development of canopy vigor maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. *Precis. Agric.* **2019**, *20*, 1136–1156. [[CrossRef](#)]
24. EU. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for Community Action to Achieve the Sustainable Use of Pesticides. *Off. J. Eur. Union* **2009**, *309*, 71–86.
25. Vogel, J.W.; Wolf, R.E.; Dille, A. Evaluation of a Variable Rate Application System for Site-Specific Weed Management. In *Proceedings of the 2005 ASAE Annual Meeting (p. 1)*; American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2005; Paper No. 051120.
26. Michaud, M.; Watts, K.C.; Percival, D.C.; Wilkie, K.I. Precision pesticide delivery based on aerial spectral imaging. *Can. J. Biosyst. Eng.* **2008**, *50*, 2.9–2.15.
27. D’Amico, M.; Coppola, A.; Chinnici, G.; Di Vita, G.; Pappalardo, G. Agricultural systems in the European Union: An analysis of regional differences. *New Medit.* **2013**, *12*, 28–34.
28. European Commission. *Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers—Potential Support with the CAP 2014–2020*; European Commission Agriculture and Rural Development: Brussels, Belgium, 2014.

29. European Commission. Structure and Dynamics of EU Farms: Changes, Trends and Policy Relevance. In *EU Agricultural Economics Briefs*, 9; European Commission Agriculture and Rural Development: Brussels, Belgium, 2013.
30. Meier, U. BBCH-Monograph. In *Growth Stages of Plants—Entwicklungsstadien von Pflanzen—Estadios de Las Plantas—Développement des Plantes*; Blackwell Wissenschaftsverlag: Berlin, Germany; Wien, Austria, 1977; p. 622.
31. Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Proceedings of the Third ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington, DC, USA, 10–14 December 1973; pp. 309–317.
32. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. Available online: <http://qgis.osgeo.org> (accessed on 12 May 2018).
33. EPPO. Standard Measurement Procedure in High Growing Crop Trials. Available online: https://www.eppo.int/media/uploaded_images/ACTIVITIES/plant_protect_products/Dose_exp_measure_procedure.pdf (accessed on 20 May 2018).
34. Bartier, P.M.; Keller, C.P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Comput. Geosci.* **1996**, *22*, 795–799. [[CrossRef](#)]
35. Gil, E.; Escolà, A. Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. *Appl. Eng. Agric.* **2009**, *25*, 145–151. [[CrossRef](#)]
36. Miranda-Fuentes, A.; Rodríguez-Lizana, A.; Gil, E.; Agüera-Vega, J.; Gil-Ribes, J. Influence of liquid-volume and air flow rates on spray application quality and homogeneity in super-intensive olive tree canopies. *Sci. Total Environ.* **2015**, *537*, 250–259. [[CrossRef](#)]
37. Llop, J.; Gil, E.; Gallart, M.; Contador, F.; Ercilla, M. Spray distribution evaluation of different setting of a hand-held trolley sprayer used in green house tomato crops. *Pest Manag.* **2015**, *72*, 505–516. [[CrossRef](#)]
38. OEPP/EPPO. Guidelines for the Biological Evaluation of Fungicides: *Plasmopara viticola*. *Bulletin OEPP/EPPO* **2002**, *31*, 315–318.
39. IBM Corp. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0*; IBM Corp: Armonk, NY, USA, 2017.
40. Acevedo-Opazo, C.; Tisseyre, B.; Guillaume, S.; Ojeda, H. The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precis. Agric.* **2008**, *9*, 285–302. [[CrossRef](#)]
41. Martínez-Casasnovas, J.; Agelet-Fernandez, J.; Arno, J.; Ramos, M. Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality. *Span. J. Agric. Res.* **2012**, *10*, 326–337. [[CrossRef](#)]
42. Bonilla, I.; Martínez de Toda, F.; Martínez-Casasnovas, J.A. Vine vigor, yield and grape quality assessment by airborne remote sensing over three years: Analysis of unexpected relationships in cv. Tempranillo. *Span. J. Agric. Res.* **2015**, *13*. [[CrossRef](#)]
43. Kazmierski, M.; Glemas, P.; Rousseau, J.; Tisseyre, B. Temporal stability of within-field patterns of NDVI in non-irrigated Mediterranean vineyards. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **2011**, *45*, 61–73. [[CrossRef](#)]
44. Montero, F.J.; Meliá, J.; Brasa, A.; Segarra, D.; Cuesta, A.; Lanjeri, S. Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in La Mancha, Spain. *Agric. Water Manag.* **1999**, *40*, 363–375. [[CrossRef](#)]
45. Hørfarter, R.; Thorsted, M.D.; Stougård, K.; Poulsen, H.V. Precision spraying by combining a variable rate application map with an on/off map. Precision agriculture '19. In Proceedings of the 12th European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France, 8–11 July 2019; pp. 53–59. [[CrossRef](#)]
46. Zhang, N.; Wang, M.; Wang, N. Precision agriculture—A worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* **2002**, *6*, 113–132. [[CrossRef](#)]
47. Arnó, J.; Martínez-Casasnovas, J.A.; Ribes-Dasi, M.; Rosell, J.R. Review. Precision Viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Span. J. Agric. Res.* **2009**, *7*, 779–790.
48. Chen, Y.; Ozkan, H.E.; Zhu, H.; Derksen, R.C.; Krause, C.R. Spray de position in side tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Trans. ASABE* **2013**, *56*, 1263–1272.
49. Solanelles, F.; Escolà, A.; Planas, S.; Rosell, J.; Camp, F.; Gràcia, F. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosyst. Eng.* **2006**, *95*, 473–481. [[CrossRef](#)]
50. Gil, E.; Escolà, A.; Rosell, J.; Planas, S.; Val, L. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Prot.* **2007**, *26*, 1287–1297. [[CrossRef](#)]

51. Balsari, P.; Doruchowski, G.; Marucco, P.; Tamagnone, M.; Van De Zande, J.; Wenneker, M. A system for adjusting the spray application to the target characteristics. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* **2008**, *10*, 1–11.
52. Carrara, M.; Comparetti, A.; Febo, P.; Orlando, S. Spatially variable rate herbicide application on Durum wheat in Sicily. *Biosyst. Eng.* **2004**, *87*, 387–392. [[CrossRef](#)]
53. Balan, M.G.; Saab, O.J.G.A.; Ecker, A.E.A.; Migliorini, G.O. Description of the Application Method in Technical and Scientific Work on Insecticides. *Acta Sci. Agron.* **2016**, *38*, 9–17. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Capítulo 3

Assessment of vineyard canopy characteristics from vigour maps obtained using UAV and satellite imagery



Abstract

Canopy characterisation is a key factor for the success and efficiency of the pesticide application process in vineyards. Canopy measurements to determine the optimal volume rate are currently conducted manually, which is time-consuming and limits the adoption of precise methods for volume rate selection. Therefore, automated methods for canopy characterisation must be established using a rapid and reliable technology capable of providing precise information about crop structure. This research provided regression models for obtaining canopy characteristics of vineyards from unmanned aerial vehicle (UAV) and satellite images collected in three significant growth stages. Between 2018 and 2019, a total of 1400 vines were characterised manually and remotely using a UAV and a satellite-based technology. The information collected from the sampled vines was analysed by two different procedures. First, a linear relationship between the manual and remote sensing data was investigated considering every single vine as a data point. Second, the vines were clustered based on three vigour levels in the parcel, and regression models were fitted to the average values of the ground-based and remote sensing-estimated canopy parameters. Remote sensing could detect the changes in canopy characteristics associated with vegetation growth. The combination of normalised differential vegetation index (NDVI) and projected area extracted from the UAV images is correlated with the tree row volume (TRV) when raw point data were used. This relationship was improved and extended to canopy height, width, leaf wall area, and TRV when the data were clustered. Similarly, satellite-based NDVI yielded moderate coefficients of determination for canopy width with raw point data, and for canopy width, height, and TRV when the vines were clustered according to the vigour. The proposed approach should facilitate the estimation of canopy characteristics in each area of a field using a cost-effective, simple, and reliable technology, allowing variable rate application in vineyards.

Keywords: vineyard · pesticide application · variable rate application · unmanned aerial vehicle · Satellite · nanosatellite

Quartile: Q1
Impact factor: 3.275
DOI: 10.3390/s21072363

Article

Assessment of Vineyard Canopy Characteristics from Vigour Maps Obtained Using UAV and Satellite Imagery

Javier Campos, Francisco García-Ruiz and Emilio Gil * 

Department of Agro Food Engineering and Biotechnology, Universitat Politècnica de Catalunya, Esteve Terradas, 8, 08860 Castelldefels, Spain; javier.campos@upc.edu (J.C.); fco.jose.garcia@upc.edu (F.G.-R.)

* Correspondence: emilio.gil@upc.edu; Tel.: +34-93-5521099

Abstract: Canopy characterisation is a key factor for the success and efficiency of the pesticide application process in vineyards. Canopy measurements to determine the optimal volume rate are currently conducted manually, which is time-consuming and limits the adoption of precise methods for volume rate selection. Therefore, automated methods for canopy characterisation must be established using a rapid and reliable technology capable of providing precise information about crop structure. This research provided regression models for obtaining canopy characteristics of vineyards from unmanned aerial vehicle (UAV) and satellite images collected in three significant growth stages. Between 2018 and 2019, a total of 1400 vines were characterised manually and remotely using a UAV and a satellite-based technology. The information collected from the sampled vines was analysed by two different procedures. First, a linear relationship between the manual and remote sensing data was investigated considering every single vine as a data point. Second, the vines were clustered based on three vigour levels in the parcel, and regression models were fitted to the average values of the ground-based and remote sensing-estimated canopy parameters. Remote sensing could detect the changes in canopy characteristics associated with vegetation growth. The combination of normalised differential vegetation index (NDVI) and projected area extracted from the UAV images is correlated with the tree row volume (TRV) when raw point data were used. This relationship was improved and extended to canopy height, width, leaf wall area, and TRV when the data were clustered. Similarly, satellite-based NDVI yielded moderate coefficients of determination for canopy width with raw point data, and for canopy width, height, and TRV when the vines were clustered according to the vigour. The proposed approach should facilitate the estimation of canopy characteristics in each area of a field using a cost-effective, simple, and reliable technology, allowing variable rate application in vineyards.



Citation: Campos, J.; García-Ruiz, F.; Gil, E. Assessment of Vineyard Canopy Characteristics from Vigour Maps Obtained Using UAV and Satellite Imagery. *Sensors* **2021**, *21*, 2363. <https://doi.org/10.3390/s21072363>

Academic Editor: Jiyul Chang

Received: 9 March 2021

Accepted: 26 March 2021

Published: 29 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: vineyard; pesticide application; variable rate application; unmanned aerial vehicle; satellite; nanosatellite

1. Introduction

The European Green Deal, recently launched by the European Commission [1], is designed to deal with climate and environment-related challenges, attempting to develop sustainable responses. Among the several topics included in the Green Deal, agricultural activities and all aspects related to food production are addressed in the European Farm to Fork Strategy to ensure a reasonable, healthy, and environment-friendly food system. This strategy includes the impacting measures linked with the use of a plant protection product (PPP), given its negative effects on air and water quality, soil degradation, food safety, and human health.

One of the most important challenges considered in the Farm to Fork strategy is the objective to reduce the overall use and risk of chemical pesticides by 50% and the use of more hazardous pesticides by 50% by 2030. This objective is particularly important for orchard fruits and vineyards. Vineyards, while accounting for only 7% of the agricultural

land area in the European Union consume 48% of the total active ingredients [2]. The crops at fruit orchards and vineyards, similar to all 'three-dimensional' (3D) crops, are characterised by the variation in their canopy characteristics and the heterogeneity in a parcel [3], making it difficult to achieve safe and optimal pesticide application.

The latest improvements in the available technology and its adaptation to these types of crops have resulted in remarkable achievements in both the reduction in the total amount of PPP and an increased control of the losses and, consequently, in the reduction in environmental contamination. These advancements involved the use of an accurate method to identify, characterise, and quantify the amount of pesticide to be sprayed, which is considered as the most important factor related to the success of the pesticide application process. Miranda-Fuentes et al. [4] demonstrated the effects of different methods for crown characterisation in isolated olive trees on the obtained results, concluding that irrespective of the selected method for canopy evaluation, some minimum requirements in terms of accuracy must be ensured to apply the most suitable amount of pesticide. Pesticide dose and dose expression were demonstrated as two factors affected by the canopy characteristics of citrus plantations [5], showing that a large vegetation implies major differences in the canopy deposition and coverage. Drift values in spray application in apple plantations were also directly related to crop foliage characteristics [6], with a fully foliated canopy resulting in a 25-times less drift than the one obtained in a dormant canopy stage. A similar conclusion was drawn by Grella et al. [7], who showed that the crop canopy structure plays a role in determining the drift values at both apple and vineyard plantations, particularly focusing on the crop type, training system, and growth stage.

Canopy characterisation at fruit and vineyard plantations has been commonly discussed in recent years, with numerous proposed methodologies ranging from simple manual processes [8,9] to those using sophisticated devices, such as LiDAR [4,10,11], ultrasonic sensors [12–14], unmanned aerial vehicles (UAVs) [15–17], and satellites [18–20]. The advantages and disadvantages of all methodologies have been probed, making it difficult to select the most accurate one.

UAVs and satellite imagery, classified as remote sensing methodologies, have been promoted in the last few years [21,22] as remarkable techniques for canopy characterisation. Differences in their management, accuracy, economical cost, and other important factors have been extensively discussed, yielding various advantages and disadvantages—directly related to the targeted crop and conditions—of both methods. Although satellite image acquisition of large areas saves considerable time, it has a low and inadequate resolution for precision viticulture [23,24]. The effectiveness of Sentinel-2 imagery and high-resolution UAV aerial images was evaluated [25], concluding that the resolution of the satellite imagery was insufficient for their direct use for describing vineyard variability. In contrast, Di Gennaro et al. [26] demonstrated the effectiveness and high resolution of Sentinel-2 imagery in the canopy characterisation process at vineyard plantations. Recent advancements in UAV-related research have led to a wide range of UAV applications for monitoring vineyard performance, such as rate of canopy development, canopy structure spatial variability, and disease incidence [27–31]. Similar to manned aircraft and satellite-based remote sensing, UAVs are convenient in terms of simple flight preparation and flexible operations [25], independently of their technical specifications (fixed-wing or multirotor); however, they are more effective for small and medium-sized vineyards [32,33]. According to Ouyang et al. [34], the operational flexibility of UAVs allows the timely assessment of canopy management outcomes, compared with manned aircraft and satellite remote sensing.

The variable rate application (VRA) of a PPP in 3D crops represents an important step forward in the sustainable use of pesticides, allowing accurate spray deposition and reduction in the drift loss by adjusting the optimal amount of the PPP applied to the canopy structure. This technology can be implemented using two different methods. The first one is adjusting the working parameters of the spray process based on the canopy characteristics measured 'on the go' using electronic devices [35–38]. The second is using

previously generated canopy maps by manual or remote sensing measurements and their transformation into prescription maps using dedicated tools [39–41]. The second option based on canopy maps requires the implementation of an accurate process for canopy characterisation, and its extension and implementation on a large scale in commercial parcels are directly related to the degree of automation and ease of the process [42], being the development of canopy maps the most influencing process.

There is a need to develop an automated method for canopy characterisation that can consequently promote the implementation of the VRA process for sustainable PPP management in vineyards. Other studies on canopy characterisation in orchards and fruit crops have been conducted based on the use of the normalised differential vegetation index (NDVI) as the main parameter obtained utilising remote sensing platforms and its relationship with principal canopy dimensions [43].

The general objective of this research was to investigate the potential relationships among manual field measurements and remote-sensing-based methods (UAVs and satellite imagery) for canopy characterisation at commercial vineyard parcels. The following specific objectives were addressed:

- To compare the fitting results of linear regression models between manual canopy characterisation and both aerial platforms, considering different spatial and spectral resolutions.
- To investigate the effect of plant-by-plant versus clustered data on the precision and accuracy of canopy characteristics determination.
- To propose the most successful method for obtaining reliable prescription maps to be implemented in the VRA process.

2. Materials and Methods

2.1. Study Site

The research was conducted in the Alt Penedès region, one of the most important wine production areas in Catalonia, Spain. A total of five commercial vineyards (Table 1 and Figure 1) of four different varieties (Chardonnay, Merlot, Cabernet Sauvignon, and Macabeu) were included in the study. Four plots (A–D) were located in Torrelavit (Barcelona, Spain), and experiments were conducted in 2018 and 2019; the fifth plot (E) was located in El Plà del Penedès (Barcelona, Spain) and was only used for data collection in 2018. All selected vineyards were trained in a double cordon spur pruning system with green pruning when the shoot length exceeded 10 cm. All vines were in full production, non-irrigated, and with ages ranging from 21 to 31 years. The terrain slope was 5–10% for plots A–D and 0% for plot E. Furthermore, the soil was regularly harrowed to control weeds in rows and under vines.

Table 1. Main characteristics of selected vineyard plots.

Plot	Variety	Row Spacing (m)	Vine Spacing (m)	Area (ha)	X Coord. (m)	Y Coord. (m)	Ref. System
A	Chardonnay	2.2	1.2	2.35	392,194	4,587,999	ETRS 89 UTM31
B	Merlot	2.2	1.2	2.97	392,234	4,587,843	
C	C. Sauvignon	2.2	1.2	1.53	391,856	4,588,055	
D	C. Sauvignon	2.2	1.2	3.14	391,744	4,588,107	
E	Macabeu	2.8	1.2	4.90	391,265	4,584,841	

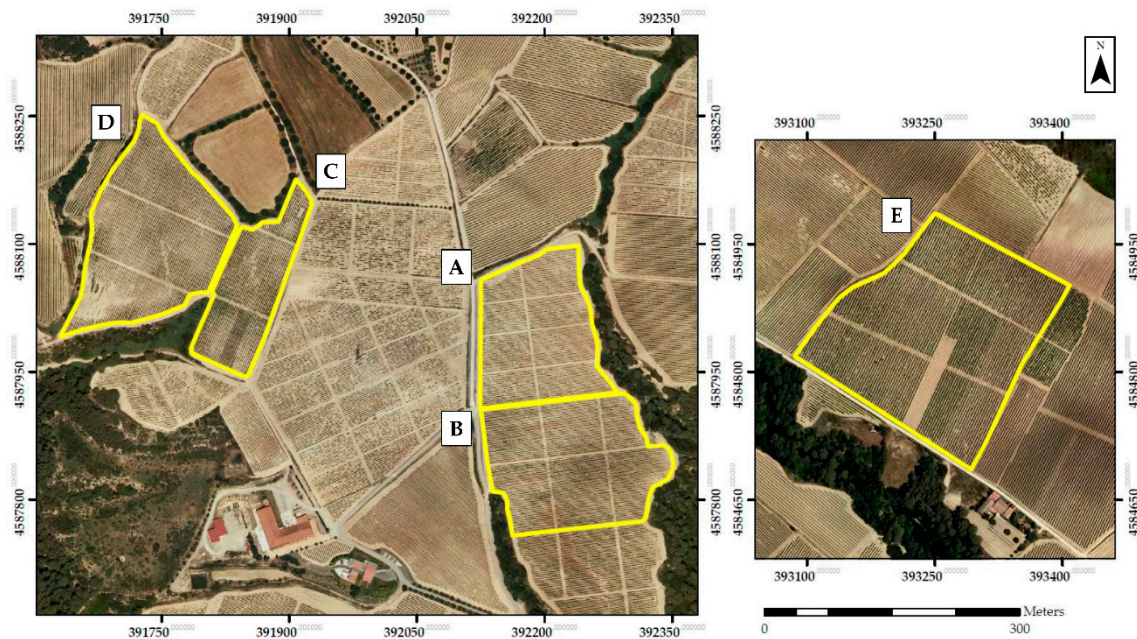


Figure 1. Orthophotomaps of studied vineyard plots.

2.2. Field Sampling Design

To select a representative and unbiased subset of vines and conduct the field measurements (sampling vines), a multi-stage (nested) systematic uniform random (SUR) sampling design was established. This type of sampling is more efficient than simple random sampling (with or without replacement), easy to implement, and particularly appropriate when the population is heterogeneous [44,45]. SUR sampling allows distributing the sampling locations uniformly over the entire surface of a plot, thus ensuring a known probability of selection for the entire population [46,47]. To implement multi-stage SUR sampling in each vineyard, a predefined set of sampling periods (m) was used to divide the entire population based on its structure. In this study, vine period refers to the number of plants between sampling vines, and row period is defined as the number of plants between the rows sampled. At each level, every m -th unit in the population is selected, and the position of the first sampling vine is chosen with a random start [44,46]. A random start is an integer between 1 and m (Figure 2). The number of sampling vines per plot was selected based on the characteristics of the plot (shape, area, length, orientation of rows, and vine spacing). The characteristics of the SUR sampling for each plot are listed in Table 2.

Table 2. Characteristics of SUR sampling for each vineyard plot in 2018 and 2019.

Plot	2018					2019				
	Rnd. Starting Row	Rnd. Starting Vine	Row Period	Vine Period	Total Samp. Vines	Rnd. Starting Row	Rnd. Starting Vine	Row Period	Vine Period	Total Samp. Vines
A	3	6	5	30	70	2	10	5	30	72
B	2	17	7	35	50	3	7	7	35	52
C	3	6	4	35	34	2	10	5	30	32
D	5	20	7	25	56	3	4	7	25	58
E	3	8	9	23	68	-	-	-	-	-

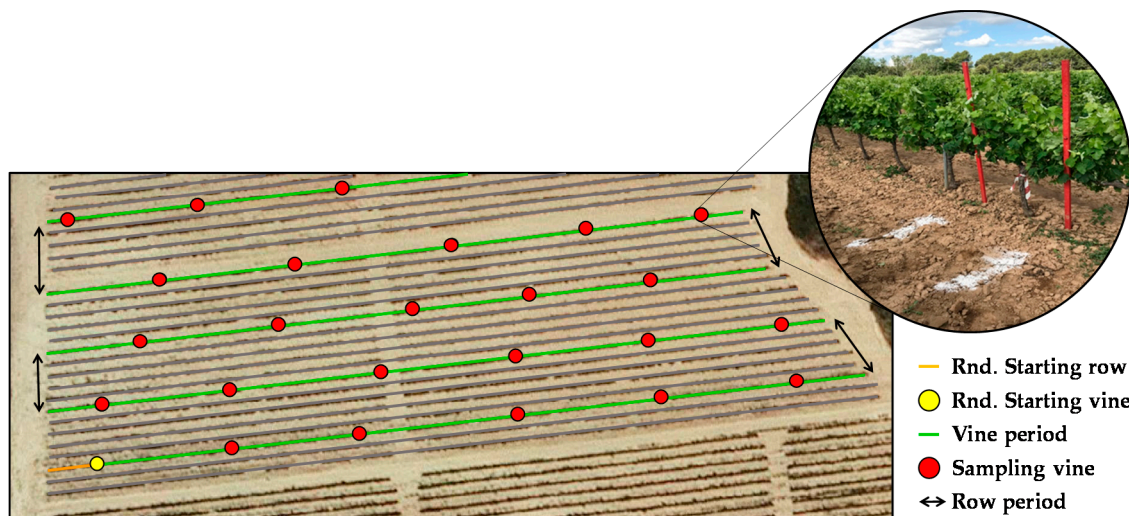


Figure 2. Scheme of SUR sampling used in plot A in 2018. Identification system for sampling vines in field.

Each sampling location consisted of a single vine (1.2 m canopy row assigned) and was appropriately identified in each plot with a coloured tape to allow easy identification in the field during the various seasons to maintain the sampling vines at the different measurement dates. Furthermore, to identify the sampling locations subsequently from aerial images, the selected vines were physically marked on the ground (between crop rows) with two white lime marks (Figure 2) to identify the start and end of each sampled vine.

2.3. Manual Canopy Characterisation

Manual field measurements were conducted coincident with three different canopy stages—*beginning of flowering* (BBCH 59), *berries pea size* (BBCH 75), and *beginning of ripening* (BBCH 81)—according to the BBCH monograph. The BBCH scale is a system for a uniform coding of phenologically similar growth stages of all mono- and dicotyledonous plant species [48].

Canopy characterisation for each of the sampling vines consisted of measuring the most representative parameters (canopy height and width). Manual measurements were conducted using a regular measuring tape following the EPPO standard [49]. Each measurement included 95% of the canopy, excluding protruding branches [50]. In each sampling vine, three measurements were performed by two different surveyors. The final value was calculated from the average of the corresponding six measurements per vine. Subsequently, the leaf wall area (LWA) [51] and tree row volume (TRV) [50,52,53] were calculated, being the officially recognised parameters for pesticide dose expression [49].

2.4. Aerial Platforms and Multispectral Sensors Used

2.4.1. UAV-Based Image Acquisition

This section presents the methodology for collecting and processing the images captured using a UAV as proposed by Campos et al. [17,42]. A UAV hexacopter (model: CondorBeta, Dronetools SL, Sevilla, Spain) loaded with a multispectral camera (model: RedEdge, Micasense, Seattle, WA, USA) flew over the vineyards. The camera was equipped with five spectral bands: red (R) centred at 668 nm with a bandwidth of 10 nm, green (G) centred at 560 nm with a bandwidth of 20 nm, blue (B) centred at 475 nm with a bandwidth of 20 nm, red edge (RE) centred at 717 nm with a bandwidth of 10 nm, and near-infrared (NIR) centred at 840 nm with a bandwidth of 40 nm. Focal length was 5.5 mm and sensor resolution 1280 × 960 pixels (width × height).

Flights were conducted 95 m above ground level at a cruise flight speed of 6 m s⁻¹. Overlapping zones were adjusted to 80% in the flight sense and 60% in the transverse

sense. Flights were executed on the same dates and crop stages as described for manual canopy characterisation.

From the spectral images obtained using the Micasense RedEdge, an orthophotomap with a ground sample distance of $6.48 \text{ cm pixel}^{-1}$ was obtained. Agisoft Metashape (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) was the software used for photogrammetric processes. Each orthophotomap was radiometrically calibrated using calibration plates as greyscale standards (22%, 32%, 44%, and 51% reflectance), which were placed close to the area where the UAV took off and landed. These plates were placed on the ground inside the vineyard with the objective of ensuring several frames in which the both the vine canopy and the reflectance standards are present together as the UAV flies over the defined area. From each spectral band, the 12-bit digital value in each calibration panel was extracted. A power function was used to transform each pixel in the image to its corresponding reflectance value for each of the orthophotomaps. Georeferencing of the five mosaics resulting from each spectral band of the multispectral sensor was performed using fixed ground control points in the study area. The position of the natural ground control points was accurately recorded using a global navigation satellite system with real-time kinematic (RTK) correction (model: GPS1200+, Leica Geosystems AG., Heerbrugg, Switzerland). This georeferencing process was conducted only during the first flight (BBCH 65) in each season. For the remaining flights (BBCH 75 and 81), the same ground control points were maintained. The photogrammetric calculation process yielded an RMSE of 18.62 cm.

2.4.2. Satellite-Based Image Acquisition

Satellite-based images were obtained from PlanetScope (PS), a commercial constellation of nanosatellites consisting of more than 130 triple CubeSat miniature satellites (<5 kg) called as Dove (Planet Labs Inc., San Francisco, CA, USA). Although PS operates under a commercial license, many of its products are open-access for research purposes. Dove satellites are equipped with a line scanner imaging sensor with four spectral bands in the blue (455–515 nm), green (500–590 nm), red (590–670 nm), and NIR (780–860 nm) regions, providing high-resolution imagery (3 m spatial resolution) with an approximately daily revisit time. Cloud-free, orthorectified, and scaled top of atmosphere radiance level 3B images [54] were acquired from the study areas in 2018 and 2019 to maximally match the dates of manual canopy characterisation to allow comparison of the two methods. Each image from PS covered approximately 192 km^2 , and one single frame captured the entire study area on each acquisition date.

2.5. Image Analysis

2.5.1. Canopy Vigour Map Generation

For the UAV-based imagery, the process followed by Campos et al. was utilised [17,42]. The first step for image analysis was the calculation of a vegetation index that expresses the vigour of the vines at each stage of the growth season. Several indices were considered, but given its extensive knowledge among viticulturists, and the considerable literature existing characterizing vineyards by the NDVI [17–19,22,25], it was finally chosen for this research. The NDVI [55] has been proven to be closely correlated to biomass development and crop stress [56–58]. The NDVI was calculated as a combination of the R and NIR bands (Equation (1)) (Figure 3b):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (1)$$

As the vineyards were planted in rows, vineyard-only pixels were segmented from an image by applying an NDVI threshold to eliminate the undesired elements, such as weeds, shadows, and soil. In all flights, the NDVI threshold was changed and established manually based on a visual inspection of the image. The pixels below and above the selected threshold were considered noise and classified as a '0' and considered vineyard pixels and coded as '1', respectively. The result was a binary mask image containing vineyard-only pixels (Figure 3c).

Combining the original NDVI images and the vineyard-only masks, the vineyard rows were masked out. In the corresponding newly created images, the non-canopy pixels became '0', whereas the vineyard canopy pixels retained their original NDVI value (Figure 3d). Subsequently, an inverse distance weighting interpolation was performed to generate a continuous NDVI map (Figure 3e), which was finally classified into homogeneous vigour areas.

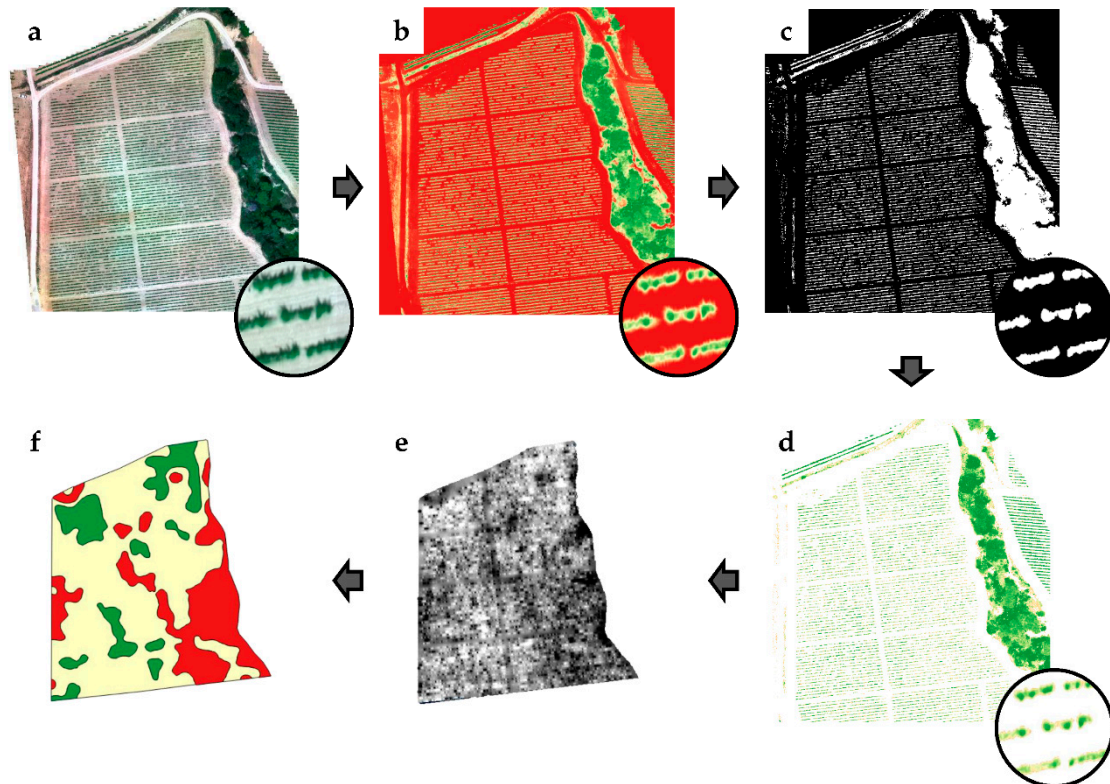


Figure 3. Analysis of workflow to obtain clustered vigour maps: (a) radiometrically calibrated multiband image, (b) NDVI image, (c) binary mask of vineyard-only pixels, (d) NDVI vineyard-only pixels, (e) continuous NDVI map, (f) clustered vigour map (red: low vigour, yellow: medium vigour, green: high vigour).

Finally, for classification purposes, the interpolated NDVI images were divided into quintiles (P20, P40, P60, and P80). NDVI values lower than P20, between P20 and P80, and higher than P80 were categorised as low, medium, and high vigour, respectively. This resulted in a three-class vigour level (high, medium, and low) (Figure 3f). The above-mentioned entire process is illustrated in Figure 3.

A similar approach was followed in the case of satellite imagery, where the NDVI was calculated using bands 3 (red) and 4 (NIR) from the four-band product delivered by PS (Equation (1)). Because of the low spatial resolution (pixel size was larger than the distance between the vineyard rows), segmentation between the canopy and the background elements (weeds, shadows, and soil) was not possible. The raw NDVI images were classified into three vigour levels (high, medium, and low) following the quintile rules previously explained.

2.5.2. Extraction of Information of Sampling Vines

The manually measured vines had to be identified in each orthophotomap. Therefore, a multiband RGB image was generated for each plot and flying date to enhance the visualisation of the white lime marks defining the beginning and ending of each sampling vine. A rectangular polygon guided by both lime marks (Figure 4a) was manually generated using QGIS software [59]. Combining the only-vineyard pixel mask (Figure 4b) with the

polygon layer of each sampling vine, the mask was clipped, keeping only the pixels (logic 0 and 1) within the rectangles of interest (Figure 4c). Finally, a polygonisation process was performed to obtain the sampling vine-only polygon contours (Figure 4d).

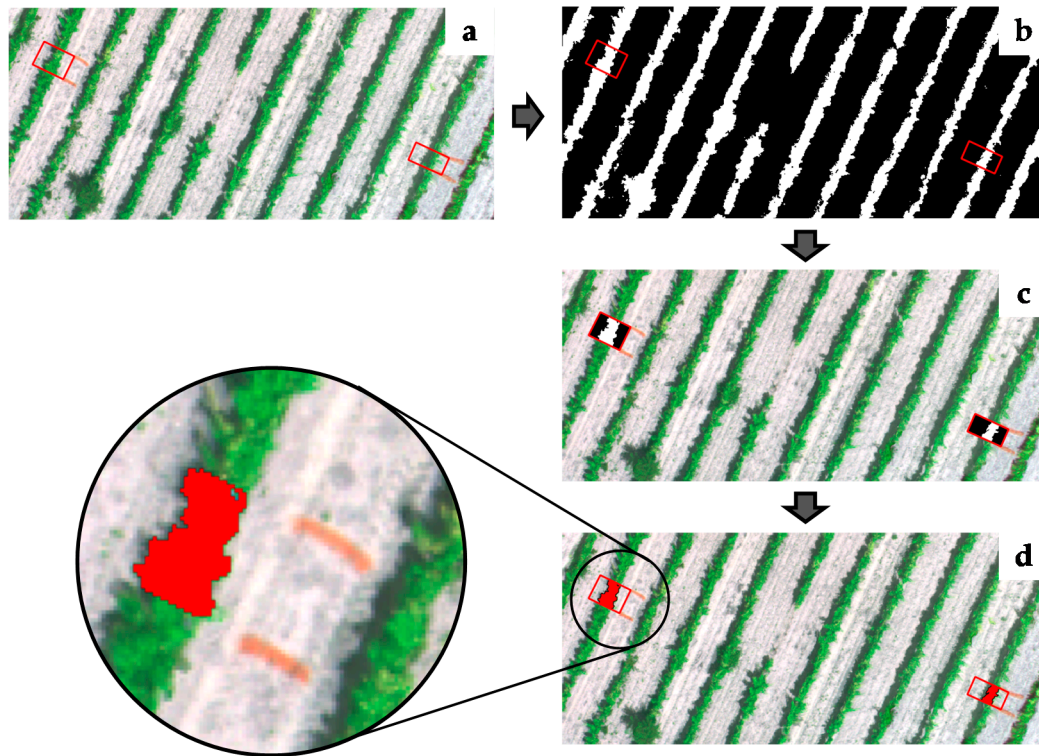


Figure 4. Overview of entire process from lime marks in ground to obtain sampling vine-only polygon contours: (a) polygons defining sampling vines, (b) binary mask, (c) sampling vine binary mask, (d) sampling vine-only polygon contours.

From each sampling vine, the following information was obtained:

- Raw NDVI mean: It was calculated as the mean of all pixels contained inside the sampling vine-only polygon contour. It was obtained for the UAV-based imagery ($NDVI_D$) and satellite-based imagery ($NDVI_S$).
- Clustered vigour: Each sampling vine was assigned to a vigour class (high, medium, and low vigour) based on the three zones previously defined. This information was obtained as a categorical variable. It was determined for UAV-based imagery (C_vigour_D) and satellite-based imagery (C_vigour_S).
- Polygon-projected area (Prj_area_D): To calculate the projected area of each sampling vine, the area of each polygon contour defining the vines was calculated using the field calculator tool in QGIS software [59]. This variable was calculated only for UAV-based imagery because the canopy and background in satellite-based imagery could not be segmented.
- Sampling category ($Edge_pnt$): Based on the geographic coordinates (ETRS89 UTM31), each sampling vine was classified as an edge point depending on its position in the plot. The sampling vines located within the inner buffer of 3 m from the plot border were considered as edge points. This information was obtained as a categorical variable (YES/NO).

2.6. Data Management

To conduct the planned comparisons of the different methods, an organised database was generated. Additionally, following Campos et al. [17], a new variable ($NDVI_D \times Prj_area_D$) was introduced in the database, which was obtained by combining the $NDVI_D$ and the Prj_area_D . Table 3 lists the variables included in the database.

Table 3. Database fields.

Database Variables	Units	Type of Acquisition	Type of Data	Example of Data
Plot		-	Categorical	A
Vineyard variety		-	Categorical	Chardonnay
Year		-	Categorical	2019
BBCH		-	Categorical	75
Sampling vine		-	Numerical	35
NDVI _D		UAV	Numerical	0.72
C_vigor _D		UAV	Categorical	Medium
Prj_area _D	m ²	UAV	Numerical	0.17
NDVI _D × Prj_area _D		UAV	Numerical	0.12
H _M	m	Manual	Numerical	0.78
W _M	m	Manual	Numerical	0.33
LWA _M	m ² ha ⁻¹	Manual	Numerical	7090.91
TRV _M	m ³ ha ⁻¹	Manual	Numerical	1170.00
NDVI _S		Satellite	Numerical	0.54
C_vigor _S		Satellite	Categorical	Medium
Edje_pnt		Satellite	Categorical	NO

Following the database generation, Spearman's rank correlation [60] analysis was executed to determine the relationship between remote sensing-based information and canopy structural measurements performed in the field. The remote-sensing-based variable that correlated (higher Spearman's ρ) the most with any of the canopy characteristics manually obtained was further selected for a deeper analysis. It is important to note that in the case of satellite imagery data, the statistical analysis was performed considering two different scenarios. In the first scenario, all the points were included regardless of their classification as edge points. The second scenario only considered data points that were not at the edge of the field plots. In the case of UAV-based imagery, where single vines can be clearly detected, the above process was not required.

The datasets of both remote sensing platforms were analysed following two different scenarios: considering every single data point as an individual value and using an aggregation (clusters) mode. The first evaluation of the obtained data was conducted considering the raw values for all single data points generated by the three different measurement procedures (UAV, satellite, and manual measurements), hereafter referred as single point data (SPD) analysis. For every single point identified, the ground-measured and remote-sensing-estimated canopy parameters were evaluated, and the potential relationships were analysed. This first proposed evaluation method allowed to a pixel-based conversion of the NDVI to any canopy parameter measured for every evaluated canopy stage and every single parcel. The remarkable discontinuity in the contiguous pixels in the maps generated from the raw pixel values (Figure 3e) is a technical limitation for the VRA of the inputs. A common technique used to solve this problem is to classify the raw values into a determined number of zones or clusters, which are treated as homogeneous management areas (Figure 3f). Furthermore, the main purpose of this research was the development of practical and useful canopy maps for the VRA of pesticides. Considering the above, the relationships among the averages of the canopy height, width, TRV, and LWA and the average remote sensing-based vegetation indices for all three different zones in every parcel classified as low, medium, and high canopy vigour zones were analysed (Figure 3f). This analysis is referred as aggregated data (AD) analysis.

Statistical analysis of all involved parameters and both proposed methods was performed to determine the potential application of linear regression. In all cases, a detailed comparison of each pair of variables was performed to obtain the most suitable linear regression model. To ensure the normality assumption, the variables were Ln-transformed. If normality was not satisfied, the linear model was rejected. This process was executed using the RStudio software [61].

3. Results

3.1. General View of Measured Parameters

The main descriptive statistical parameters obtained in the canopy characterisation are shown in Figures 5 and 6. The results obtained after the manual measurements (canopy height and canopy width) and the corresponding calculated parameters (TRV and LWA) present a logical development process of the canopy with the season variation (Figure 5). Based on the data, compared to starting point BBCH 59, the canopy dimensions increased by 1.5 times up to BBCH 75. This increase was due to the rapid growth rate of the green structures occurring between bud burst and the end of flowering under normal climatic conditions. After BBCH 75, stabilisation of the canopy development was observed, and the main parameters were maintained at similar levels. The results obtained using the two aerial platforms (UAV and satellite) exhibit differences (Figure 6). At all canopy stages, the NDVI statistical ranges (difference between the maximum and minimum values) obtained with the UAV were wider than those obtained using the satellites. Amplitudes of 0.38, 0.35, and 0.61 were obtained using the UAV in the first, second, and third canopy stages, respectively, whereas the corresponding amplitudes determined using the satellites were 0.1, 0.34, and 0.27, respectively.

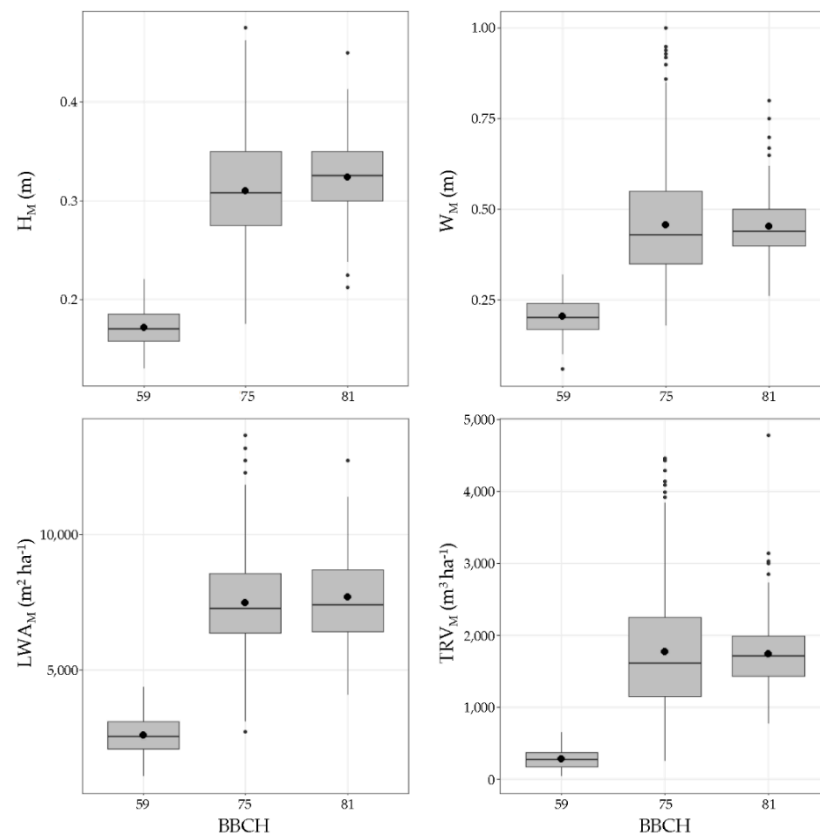


Figure 5. Box plots of principal descriptive statistical parameters for manual measurements. ● mean values.

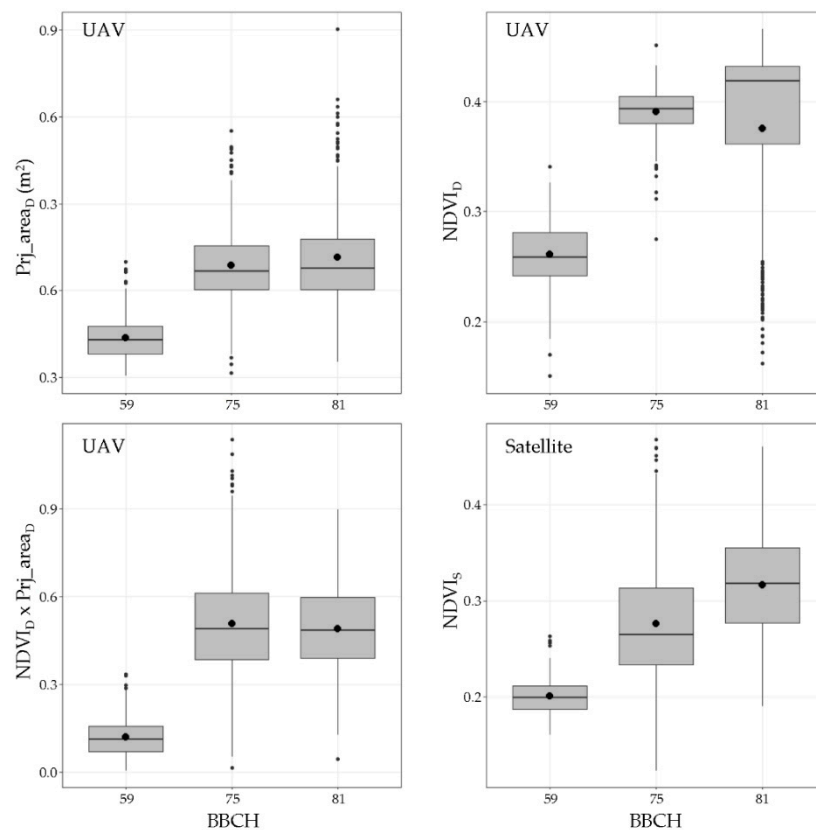


Figure 6. Box plots of principal descriptive statistical parameters for remote sensing variables. • mean values.

3.2. Manual Data vs. UAV Variables

3.2.1. Data Correlation

To determine the spectral parameter with the most suitable correlation with any vegetative parameter (canopy height, width, TRV, or LWA), Spearman rho values were analysed. Table 4 summarises Spearman's rho correlation matrix for the UAV variables.

Table 4. Spearman's rho correlation matrix for variables obtained using UAV.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1). $NDVI_D$	1						
(2). Prj_area_D	0.44	1					
(3). $NDVI_D \times Prj_area_D$	0.66	0.95	1				
(4). H_M	0.47	0.84	0.82	1			
(5). W_M	0.45	0.83	0.81	0.81	1		
(6). LWA_M	0.62	0.75	0.79	0.96	0.71	1	
(7). TRV_M	0.53	0.86	0.86	0.95	0.92	0.91	1

The correlation values of the four canopy parameters and the NDVI ranged from 0.45 to 0.62, and those of the projected area were larger, ranging from 0.75 to 0.86. Additionally, $NDVI_D \times Prj_Area_D$ was also compared with the canopy characteristics, and the obtained values ranged from 0.79 to 0.86.

An in-depth analysis of only the best correlated parameters in Table 4 indicates that the TRV is the most remarkable canopy parameter in terms of the correlation with the information obtained using the UAV. The projected area (Prj_Area_D) and the combination of the NDVI and the projected area ($NDVI_D \times Prj_Area_D$) are the two most remarkable parameters compared to the TRV, with a rho value of 0.86 in both cases, suggesting that both are strong correlations [62]. Additionally, the UAV-based extraction of the projected area

(Prj_Area_D) is very strongly correlated with the canopy width (rho value of 0.83). This can be expected because the projected area varies owing to the changes in the vegetation width while maintaining the canopy length equal to the plantation distance. However, this parameter still presents a very strong correlation [62] with the canopy height (rho value of 0.84). Similar results are obtained with NDVI_D × Prj_Area_D, exhibiting strong correlations with the canopy height and width (rho values of 0.82 and 0.81, respectively). The previous analysis and the main objective of this research, i.e., to determine the most remarkable relationships among the spectral parameters obtained using aerial platforms and canopy characterisation values, are considered. Accordingly, NDVI_D × Prj_Area_D is found as the most remarkable parameter. Therefore, in the following sections, detailed analysis and evaluation of this relationship are presented.

3.2.2. Linear Regression Model

Considering the SPD dataset, the linear regression models between NDVI_D × Prj_Area_D and all manually measured parameters describing the canopy characteristics (canopy height, canopy width, LWA, and TRV) were evaluated. The data were Ln-transformed to ensure the normality assumption for the residues. The only variable that followed this normality assumption and yielded suitable residual plots for the model ($p > 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test) was the TRV (Figure 7). Considering the results obtained after normality evaluation, for the remainder evaluated variables (canopy height, canopy width, and LWA), the intended linear regression models were rejected ($p < 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test).

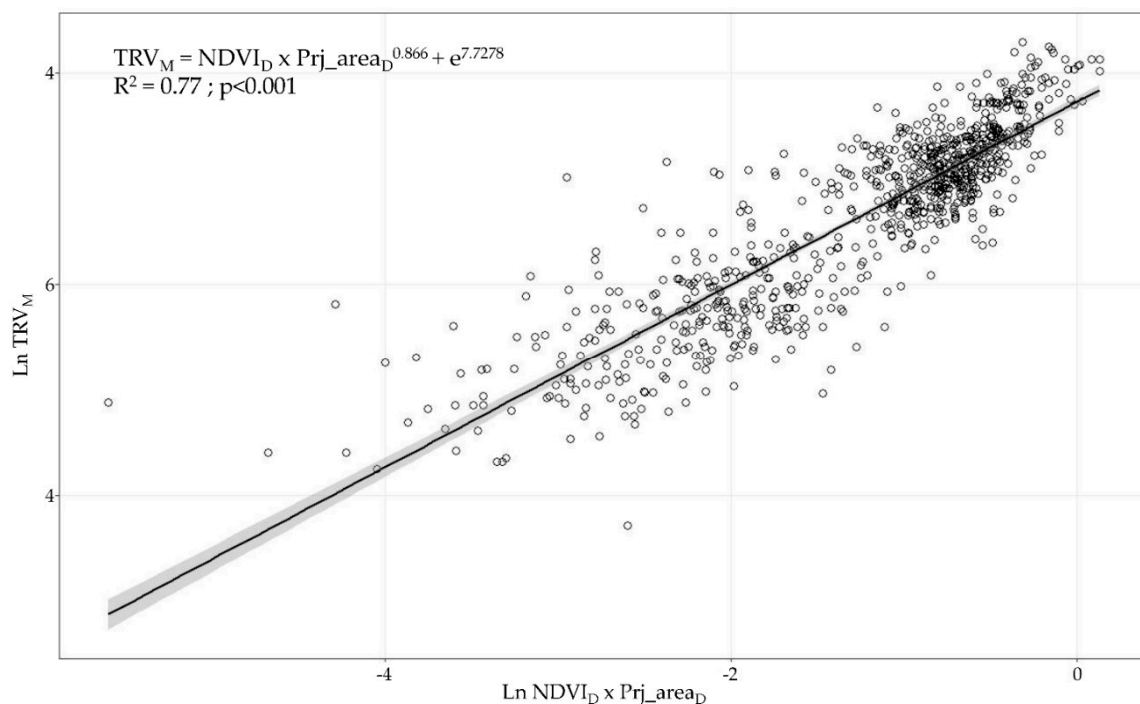


Figure 7. Linear regression model ($R^2 = 0.77$, $p < 0.001$) evaluating relationship between Ln TRV_M and Ln NDVI_D × Prj_area_D. Grey band shows 95% confidence interval.

When the normality evaluation was performed using the AD dataset, all studied variables (canopy height, canopy width, LWA, and TRV) followed the normality assumption of the residues ($p > 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test). The linear regression models built as combinations of NDVI_D × Prj_Area_D and all manually measured parameters describing the canopy characteristics yielded high coefficients of determination: R^2 of 0.93 for the canopy height, 0.84 for the canopy width, 0.91 for the LWA, and 0.94 for the TRV (Figure 8).

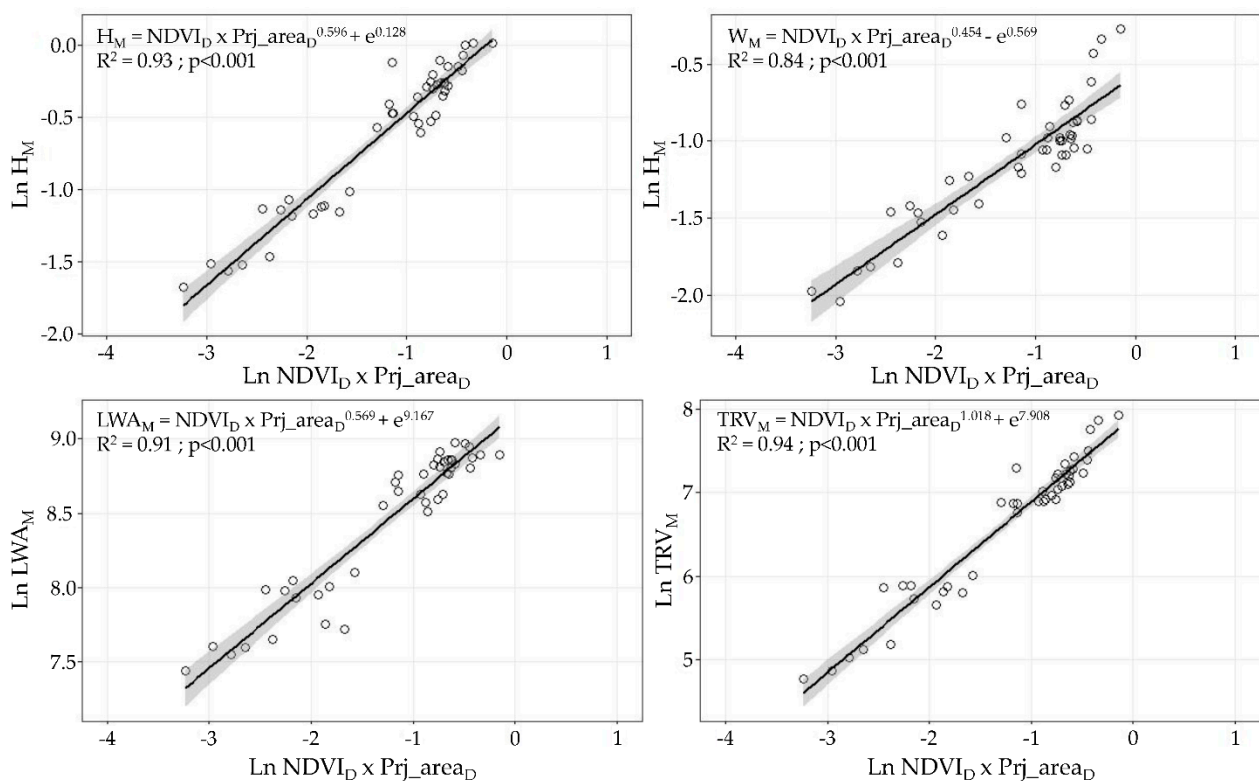


Figure 8. Linear regression models evaluating relationship among $\text{Ln NDVI}_D \times \text{Prj_area}_D$ and transformed canopy structural parameters ($\text{Ln } H_M$, $\text{Ln } W_M$, $\text{Ln } LWA_M$, and $\text{Ln } TRV_M$). Grey bands present 95% confidence interval.

As shown in Figure 8, when the data are grouped by vigour zones, the correlation values among all analysed variables are improved. Therefore, considering the potential use of this technique for the implementation of the VRA process, the model shown in Figure 8 seems the most appropriate for determining the optimal volume rate considering the canopy characteristics [8,41].

3.3. Manual Data vs. Satellite Variables

3.3.1. Data Correlation

To evaluate the correlations between the NDVI_S and all vegetative parameters manually obtained (canopy height, canopy width, LWA, or TRV), Spearman's rho correlation matrices were analysed in the case of the satellite dataset. The results of the Spearman's rho values of the satellite variables, considering or rejecting the edge points, are listed in Table 5.

Table 5. Spearman's rho values for variables obtained using satellite imagery considering and rejecting edge points.

	H_M	W_M	LWA_M	TRV_M
NDVI_S considering edge points	0.49	0.52	0.40	0.52
NDVI_S rejecting edge points	0.66	0.67	0.57	0.68

Based on the results summarised in Table 5, the spectral values are affected by the border effect. The pixels located close to the edge of a parcel seem to be contaminated by adjacent elements (mainly roads), reducing the spectral value of the pixels. However, the border effect did not impact the manually measured structural parameters of the canopy. Consequently, the spectral values obtained using the satellite imagery present a certain border effect; thus, an in-depth data analysis was conducted without edge points.

Considering similar relationships among the $NDVI_S$ and the evaluated structural parameters (Table 5), all variables were included in the following linear regression analysis.

3.3.2. Linear Regression Model

Considering the SPD dataset, the linear regression models between the $NDVI_S$ and all manually measured parameters describing the canopy characteristics were evaluated. The data were Ln-transformed to ensure the normality assumption of the residues. The only variable that followed this normality assumption and showed suitable residual plots for the model ($p > 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test) was the canopy width (Figure 9). Based on the results of the normality evaluation, for the remainder evaluated variables (canopy height, LWA, and TRV), the planned linear regression models were excluded ($p < 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test).

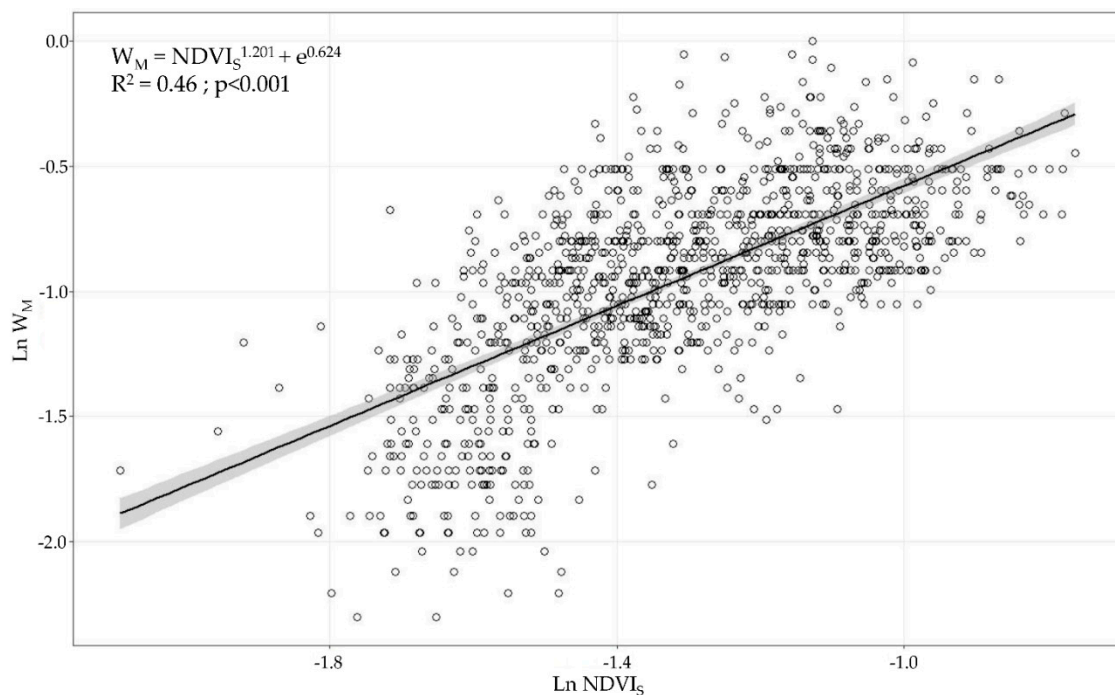


Figure 9. Linear regression model ($R^2 = 0.46$, $p < 0.001$) evaluating relationship between $\text{Ln } W_M$ and $\text{Ln } NDVI_S$. Grey band shows 95% confidence interval.

However, when the satellite data were clustered (i.e., ADA) and the same data analysis was performed, the variables following the normality assumption of the residues ($p > 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test) were the canopy height, canopy width, and TRV. For the LWA, the regression model was rejected because the normality assumption was not achieved ($p < 0.05$ in the Kolmogorov–Smirnov test). The linear regression models built as combinations of the $NDVI_S$ and height, width, and TRV yielded coefficients of determination R^2 of 0.48 for the canopy height, 0.51 for the canopy width, and 0.50 for the TRV (Figure 10).

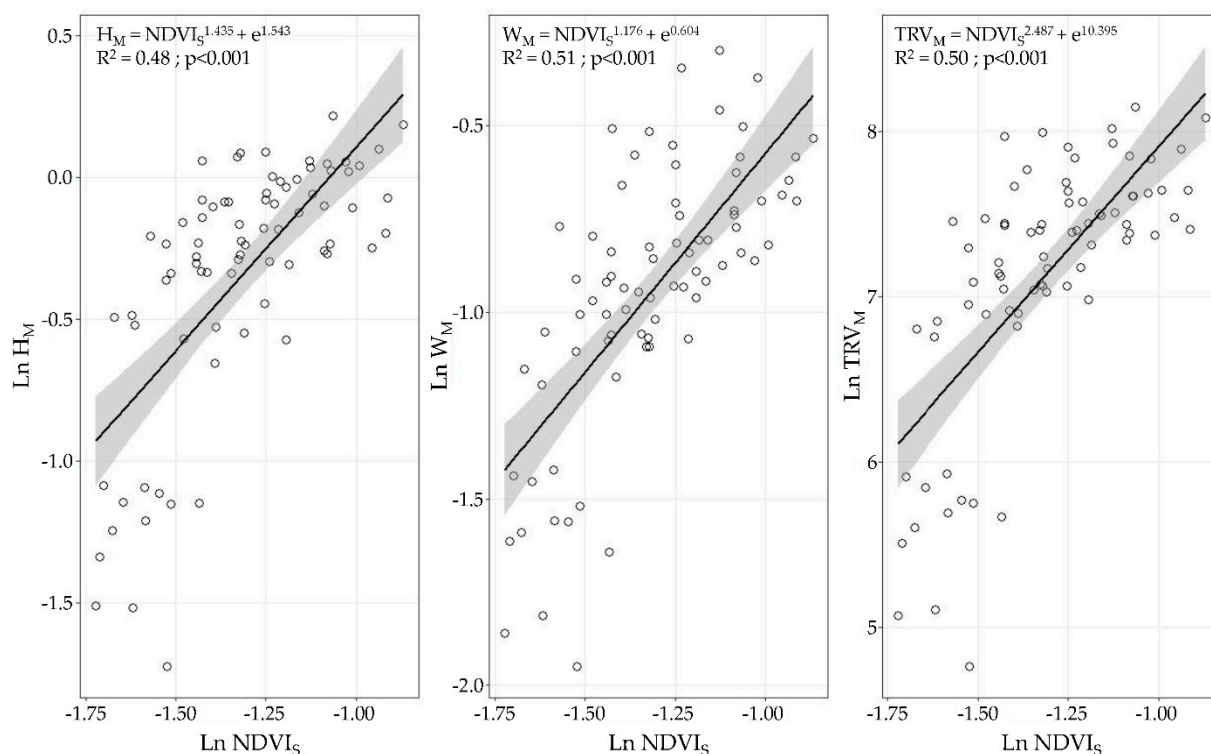


Figure 10. Linear regression models evaluating relationships among Ln NDVI_S and transformed canopy structural parameters (Ln H_M, Ln W_M, and Ln TRV_M). Grey bands present 95% confidence interval.

4. Discussion

The three methods used to measure and characterise vine development during the season are proven to detect the different patterns associated with the vegetation growth, as observed in Figures 5 and 6. From BBCH 59 to BBCH 75, a relevant increase in the parameters is detected, coinciding with the rapid shoot growth of the vines in the first stages of development. This was also observed in other studies in various crops and using different spectral sensors, such as Sentinel 2, Landsat, and RapidEye [58,63–66]. Around BBCH 75, the vine structure and the canopy architecture are modified by several management operations (i.e., shoot positioning, trimming, hedging, and leaf thinning) to maintain vegetative and fruiting balance. Consequently, there are no observable differences between BBCH 75 and BBCH 81 in the parameters assessing the canopy structure. This suggests that an alternative time for data capture can be used to better describe the rapid changes in the vegetation in the first stages after the first leaves unfold. Starting from BBCH 59, a second measurement around the end of flowering (BBCH 69) can represent the evolution of the canopy structure more realistically. In comparison, a single measurement after BBCH 75 is sufficient to point out the characteristics of the vegetation until harvesting. The latter is also confirmed when the sample distribution around the regression lines is analysed (Figures 7 and 8), with a clear cluster of data points corresponding to advanced development stages (high values of the canopy height, width, LWA, and TRV). In comparison, there is a lack of points in the lower end of the x and y axes in all plots. The effect of the forcing canopy architecture in the vineyard was also observed in the temporal evolution of the LWA obtained from the field measurements in BBCH 60, 61, 69, 75, 77, 79, and 81 [42].

Remote sensing data acquired using UAV and satellite platforms were used to expedite the canopy characterisation process, which is a key procedure when determining rational PPP doses and application volumes adapted to the canopy status. However, the accuracy differed between the platforms as well as between the raw and clustered data point analysis.

First, when comparing the linear regression models, a better fitting (higher coefficient of determination) was obtained with the UAV-based data than when using the satellite

information. It is also remarkable to note that at least one of the four measured variables (canopy height, canopy width, LWA, and TRV) showed significant linear regression with the remotely sensed data of both aerial platforms. UAV-based $\text{NDVI} \times \text{ProjArea}_D$ yielded considerably high coefficients of determination above 0.84, which presents a new area of development for UAV technology as a tool for canopy characterisation to enable VRA principles. Other studies using high-resolution NDVI maps have found significant differences between vines belonging to different vigour classes [42,65,67]; however, none of them have related or modelled the structural characteristics of vines and the NDVI values in viticulture. Ampatzidis et al. [43] obtained a strong relationship ($R^2 = 0.65$) between the canopy height and the NDVI from a UAV survey of citrus groves, which have a more complex structure than vertical shoot positioned-trained vines. Satellite-based results presented significant relationships ($p < 0.001$) with the canopy height, canopy width, and TRV with coefficients of determination of approximately 0.45, reflecting the importance of ensuring sufficient spatial, spectral, and temporal resolution to reduce noise in the data. In line with this, when comparing the NDVI values from both platforms, a clear difference between the NDVI statistical ranges (difference between the highest and lowest values) was found when using UAV-based data (0.38, 0.35, and 0.61) and satellite-based data (0.1, 0.34, and 0.27, respectively). These differences were caused by the differences in the sensor spectral characteristics, spatial resolution (from a few centimetres to several meters per pixel), and spectral mixing. UAV-based imagery allows canopy segmentation and partially removes vegetation, soil, and shadow spectral mixing at the pixel level [33,58]. This discrimination is impossible when using imagery at $3 \text{ m} \times \text{pixel}^{-1}$, causing a diminishing effect on the NDVIs from vines as compared to the pure canopy spectral signals acquired from the high-resolution UAV-based images. Matese et al. [33] and Gatti et al. [65] found similar results using RapidEye satellite with a $5 \text{ m} \times \text{pixel}^{-1}$ spatial resolution (NDVI statistical ranges of 0.15 and 0.13, respectively) due to the important spectral mixing effects. Devaux et al. [66] used temporal NDVI information from Sentinel 2 satellite imagery to track vineyard growth during the season, which provided a methodology to determine the approximate dates for conducting vine structure management operations. Similarly, some consistency is found with other published results when comparing the maximum level reached by satellite-based NDVIs in the period of maximum vegetation development (July in the Northern Hemisphere). Based on the data in Figure 6, the average NDVI value for the satellite-based data is 0.27, with a maximum of 0.47. This is comparable with the per plot average NDVI reported by Devaux et al. [66] (0.4) and Gatti et al. [65] (0.44) in vineyards trained in vertical shoot positioning and grown without cover crop. Moreover, using Sentinel 2 imagery at $10 \text{ m} \times \text{pixel}^{-1}$ spatial resolution, NDVI values of 0.5 were reported by the above studies as well as by Johnson et al. [18,68]. Discrepancies between the NDVI values can be attributed to the differences in the technical specifications of the radiometric sensors used in the studies and the variation in the crop management and geographic area considered. Another important effect related to the spatial resolution of remote sensing platforms that must be considered is the ability to characterise crops in the early stages of a season when the shoot length ranges from 10 to 30 cm but the canopy density is minimal. Satellite-based imagery includes a higher proportion of unwanted elements per pixel than the area occupied by the vine canopy and require a minimum shoot and leaf development for remote assessment, as observed in the data point dispersion in Figures 9 and 10. The border effect on the spectral images was detected as another factor related to the spatial resolution of the platform. Pixels close to the border zones in a parcel are considerably affected by the adjacent pixels belonging to the intended zone (mainly roads), reducing the estimated NDVI values. This fact becomes more important as the spatial resolution of the platform is increased and thus is much more important in the case of satellites than in the case of UAVs [69].

Second, a comparison of the raw point data (SPD) and clustered data (AD) demonstrated that, in general, an improvement was achieved when the samples were analysed in terms of averages based on the vigour class in the field. Although this method limited the

possibility of converting a grid image into a canopy characteristic grid map (cell-by-cell), it was reliable for characterising classified maps into the three classes. From a practical perspective, this is in alignment with the method by which remote sensing companies offer canopy maps. Specifically, they perform post-processing of raw NDVI maps to yield management maps with filtered and homogeneous areas, which facilitates prescription management. Concurrently, when performing spraying applications in the variable rate mode, the machine has to change the pressure and the nozzle flow rate depending on the prescription area where it is located at each moment. Volume rate prescription areas should ensure a minimum size to avoid continuous changes in the sprayer's operational parameters, and this is well achieved when prescription maps are clustered into two or three categories.

5. Conclusions

This study focuses on the development of linear regression models to predict the structural characteristics of vegetation in vineyards using aerial remote sensing. Using a rapid and cost-effective technology to monitor a canopy on a high temporal and spatial basis is key to estimate the changes in the canopy volume and density and to adapt the PPP dose with increased rationality and sustainability.

The developed methodology achieved robust characterisation (R^2 higher than 0.84 in all cases) of the TRV, LWA, canopy height, and canopy width using the vegetation indices obtained from UAV images when the remote sensing data were classified into three vigour classes. This enables a reliable determination of the canopy characteristics, allowing the generation of PPP prescription maps defining the different vigour zones, which can be completely adapted for implementation of the VRA process [17,42]. The practical applicability of the proposed methodology is limited by the number of available maps along the season, encountered difficulties and long time required to generate the canopy vigour maps, and high price of UAV services in comparison with satellite-based options.

Satellite technology was investigated to overcome these limitations. Experiments yielded statistically significant linear relationships ($R^2 > 0.48$ in all cases) between the NDVI and the canopy parameters (TRV, canopy height, and canopy width). These results, together with the higher temporal resolution and lower prices compared to those of UAVs, suggested the potential benefits of using satellite-based imagery for the VRA process based on zonal vigour variability.

Irrespective of the aerial platform evaluated (UAV or satellite) and considering the final objective of a practical implementation of the VRA of a PPP, the benefits of AD management compared with SPD evaluation were demonstrated. Pesticide distribution based on canopy vigour zones [17,70] will allow significant reduction in the use of a PPP, which is in alignment with the recently published Farm to Fork strategy [71].

Thus, future studies should focus on improving canopy characterisation considering the pixel size of satellite imagery, adaptation of field measurements for validation, and full automation of the entire process.

Author Contributions: Methodology, J.C. and E.G.; Investigation, J.C.; Data Curation, J.C. and F.G.-R.; Writing—Original Draft Preparation, all members; Writing—Review and Editing, E.G.; Project Administration, E.G. and J.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was developed with partial funding from the FI-AGAUR grant from the Generalitat de Catalunya (2017 FI_B 00893).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors would like to thank to Miguel Torres, Jean Leon and Andreu Pinyol for their support in the field trials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. COM. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: European Green Deal COM/2019/640. 2019. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/DOC/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN> (accessed on 10 December 2020).
2. EUROSTAT. *The Use of Plant Protection Products in the European Union. Data 1992–1999*; Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 2002; p. 14.
3. Gil, E.; Arnó, J.; Llorens, J.; Sanz, R.; Llop, J.; Rosell-Polo, J.R.; Gallart, M.; Escolà, A. Advanced Technologies for the Improvement of Spray Application Techniques in Spanish Viticulture: An Overview. *Sensors* **2014**, *14*, 691–708. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Gamarra-Diezma, J.L.; Gil-Ribes, J.A.; Gil, E. Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement. *Sensors* **2015**, *15*, 3671–3687. [[CrossRef](#)]
5. Garcerá, C.; Fonte, A.; Salcedo, R.; Soler, A.; Chueca, P. Dose Expression for Pesticide Application in Citrus: Influence of Canopy Size and Sprayer. *Agronomy* **2020**, *10*, 1887. [[CrossRef](#)]
6. Praat, J.-P.; Maber, J.; Manktelow, D. The Effect of Canopy Development and Sprayer Position on Spray Drift from a Pipfruit Orchard. *NZPP* **2000**, *53*, 241–247. [[CrossRef](#)]
7. Grella, M.; Gallart, M.; Marucco, P.; Balsari, P.; Gil, E. Ground Deposition and Airborne Spray Drift Assessment in Vineyard and Orchard: The Influence of Environmental Variables and Sprayer Settings. *Sustainability* **2017**, *9*, 728. [[CrossRef](#)]
8. Pergher, G.; Petris, R. Canopy structure and deposition efficiency of vineyard sprayers. *J. Agric. Eng.* **2007**, *38*, 31–38. [[CrossRef](#)]
9. Gil, E.; Llorens, J.; Landers, A.; Llop, J.; Giralt, L. Field validation of DOSAVIÑA, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. *Eur. J. Agron.* **2011**, *35*, 33–46. [[CrossRef](#)]
10. Rosell, J.R.; Llorens, J.; Sanz, R.; Arnó, J.; Ribes-Dasi, M.; Masip, J.; Escolà, A.; Camp, F.; Solanelles, F.; Gràcia, F. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. *Agric. For. Meteorol.* **2009**, *149*, 1505–1515. [[CrossRef](#)]
11. Llorens, J.; Gil, E.; Llop, J.; Escolà, A. Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods. *Sensors* **2011**, *11*, 2177–2194. [[CrossRef](#)]
12. Escolà, A.; Planas, S.; Rosell, J.R.; Pomar, J.; Camp, F.; Solanelles, F.; Gracia, F.; Llorens, J.; Gil, E. Performance of an Ultrasonic Ranging Sensor in Apple Tree Canopies. *Sensors* **2011**, *11*, 2459–2477. [[CrossRef](#)]
13. Vitali, M.; Tamagnone, M.; La Iacona, T.; Lovisolo, C. Measurement of grapevine canopy leaf area by using an ultrasonic-based method. *OENO One* **2013**, *47*, 183–189. [[CrossRef](#)]
14. Gamarra-Diezma, J.L.; Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Cuenca, A.; Blanco-Roldán, G.L.; Rodríguez-Lizana, A. Testing Accuracy of Long-Range Ultrasonic Sensors for Olive Tree Canopy Measurements. *Sensors* **2015**, *15*, 2902–2919. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Mathews, A.J.; Jensen, J.L.R. Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collected High Density Structure from Motion Point Cloud. *Remote Sens.* **2013**, *5*, 2164–2183. [[CrossRef](#)]
16. Mathews, A.J. A Practical UAV Remote Sensing Methodology to Generate Multispectral Orthophotos for Vineyards: Estimation of Spectral Reflectance Using Compact Digital Cameras. *IJAGR* **2015**, *6*, 65–87. [[CrossRef](#)]
17. Campos, J.; Llop, J.; Gallart, M.; García-Ruiz, F.; Gras, A.; Salcedo, R.; Gil, E. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. *Precis. Agric.* **2019**, *20*, 1136–1156. [[CrossRef](#)]
18. Johnson, L.F.; Roczen, D.E.; Youkhana, S.K.; Nemani, R.R.; Bosch, D.F. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Comput. Electron. Agric.* **2003**, *38*, 33–44. [[CrossRef](#)]
19. Martínez-Casasnovas, J.; Agelet-Fernandez, J.; Arnó, J.; Ramos, M. Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality. *Span. J. Agric. Res.* **2012**, *10*, 326–337. [[CrossRef](#)]
20. Khan, A.; Khan, U.; Waleed, M.; Khan, A.; Kamal, T.; Marwat, S.N.K.; Maqsood, M.; Aadil, F. Remote Sensing: An Automated Methodology for Olive Tree Detection and Counting in Satellite Images. *IEEE Access* **2018**, *6*, 77816–77828. [[CrossRef](#)]
21. Karakizi, C.; Oikonomou, M.; Karantzalos, K. Spectral Discrimination and Reflectance Properties of Various Vine Varieties from Satellite, UAV and Proximate Sensors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2015**, *40*, 31–37. [[CrossRef](#)]
22. Borgogno-Mondino, E.; Lessio, A.; Tarricone, L.; Novello, V.; de Palma, L. A Comparison between Multispectral Aerial and Satellite Imagery in Precision Viticulture. *Precis. Agric.* **2018**, *19*, 195–217. [[CrossRef](#)]
23. Anastasiou, E.; Balafoutis, A.; Darra, N.; Psiroukis, V.; Biniari, A.; Xanthopoulos, G.; Fountas, S. Satellite and Proximate Sensing to Estimate the Yield and Quality of Table Grapes. *Agriculture* **2018**, *8*, 94. [[CrossRef](#)]
24. Sassu, A.; Gambella, F.; Ghiani, L.; Mercenaro, L.; Caria, M.; Pazzona, A.L. Advances in Unmanned Aerial System Remote Sensing for Precision Viticulture. *Sensors* **2021**, *21*, 956. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Khaliq, A.; Comba, L.; Biglia, A.; Ricauda Aimonino, D.; Chiaberge, M.; Gay, P. Comparison of Satellite and UAV-Based Multispectral Imagery for Vineyard Variability Assessment. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 436. [[CrossRef](#)]
26. Di Gennaro, S.F.; Dainelli, R.; Palliotti, A.; Toscano, P.; Matese, A. Sentinel-2 Validation for Spatial Variability Assessment in Overhead Trellis System Viticulture Versus UAV and Agronomic Data. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 2573. [[CrossRef](#)]
27. Albetis, J.; Jacquin, A.; Goulard, M.; Poilvé, H.; Rousseau, J.; Clenet, H.; Dedieu, G.; Duthoit, S. On the Potentiality of UAV Multispectral Imagery to Detect *Flavescence dorée* and Grapevine Trunk Diseases. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 23. [[CrossRef](#)]

28. De Castro, A.; Jiménez-Brenes, F.M.; Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; Borra-Serrano, I.; López-Granados, F. 3-D Characterization of Vineyards Using a Novel UAV Imagery-Based OBIA Procedure for Precision Viticulture Applications. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 584. [CrossRef]
29. Kerkech, M.; Hafiane, A.; Canals, R. Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. *Comput. Electron. Agric.* **2020**, *174*. [CrossRef]
30. Pádua, L.; Marques, P.; Hruška, J.; Adão, T.; Peres, E.; Morais, R.; Sousa, J.J. Multi-Temporal Vineyard Monitoring through UAV-Based RGB Imagery. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1907. [CrossRef]
31. Romero, M.; Luo, Y.C.; Su, B.F.; Fuentes, S. Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. *Comput. Electron. Agric.* **2018**, *147*, 109–117. [CrossRef]
32. Andújar, D.; Moreno, H.; Bengochea-Guevara, J.M.; de Castro, A.; Ribeiro, A. Aerial imagery or on-ground detection? An economic analysis for vineyard crops. *Comput. Electron. Agric.* **2019**, *157*, 351–358. [CrossRef]
33. Matese, A.; Toscano, P.; Di Gennaro, S.F.; Genesio, L.; Vaccari, F.P.; Primicerio, J.; Belli, C.; Zaldei, A.; Bianconi, R.; Gioli, B. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 2971–2990. [CrossRef]
34. Ouyang, J.; De Bei, R.; Fuentes, S.; Collins, C. UAV and Ground-Based Imagery Analysis Detects Canopy Structure Changes After Canopy Management Applications. *OENO One* **2020**, *54*, 1093–1103. [CrossRef]
35. Giles, D.K.; Delwiche, M.J.; Dodd, R.B. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: Orchard architecture and spray liquid savings. *J. Agric. Eng. Res.* **1989**, *43*, 271–289. [CrossRef]
36. Gil, E.; Escolà, A.; Rosell, J.R.; Planas, S.; Val, L. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Prot.* **2007**, *26*, 1287–1297. [CrossRef]
37. Jeon, H.Y.; Zhu, H.; Derksen, R.; Ozkan, E.; Krause, C. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications. *Comput. Electron. Agric.* **2011**, *75*, 213–221. [CrossRef]
38. Gil, E.; Llorens, J.; Llop, J.; Fàbregas, X.; Escolà, A.; Rosell, J.R. Variable rate sprayer. Part 2–Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *95*, 136–150. [CrossRef]
39. Siegfried, W.; Viret, O.; Huber, B.; Wohlhauser, R. Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop Prot.* **2007**, *26*, 73–82. [CrossRef]
40. Garcerá, C.; Fonte, A.; Moltó, E.; Chueca, P. Sustainable Use of Pesticide Applications in Citrus: A Support Tool for Volume Rate Adjustment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2017**, *14*, 715. [CrossRef]
41. Gil, E.; Campos, J.; Ortega, P.; Llop, J.; Gras, A.; Armengol, E.; Salcedo, R.; Gallart, M. DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. *Comput. Electron. Agric.* **2020**, *160*, 117–130. [CrossRef]
42. Campos, J.; Gallart, M.; Llop, J.; Ortega, P.; Salcedo, R.; Gil, E. On-Farm Evaluation of Prescription Map-Based Variable Rate Application of Pesticides in Vineyards. *Agronomy* **2020**, *10*, 102. [CrossRef]
43. Ampatzidis, Y.; Partel, V.; Meyering, B.; Albrecht, U. Citrus rootstock evaluation utilizing UAV-based remote sensing and artificial intelligence. *Comput. Electron. Agric.* **2019**, *164*, 104900. [CrossRef]
44. Wulfsohn, D. Sampling techniques for plants and soil. In *Advanced Engineering Systems for Specialty Crops: A Review of Precision Agriculture for Water, Chemical, and Nutrient Application, and Yield Monitoring*; Upadhyaya, S.K., Giles, D.K., Haneklaus, S., Schnug, E., Eds.; Johan Heinrich von Thunen-Institut: Braunschweig, Germany, 2010; Special Issue 340; pp. 3–30.
45. Wulfsohn, D.; Aravena Zamora, F.; Potin Téllez, C.; Zamora Lagos, I.; Garcia-Fiñana, M. Multilevel systematic sampling to estimate total fruit number for yield forecasts. *Precis. Agric.* **2012**, *13*, 256–275. [CrossRef]
46. Mayhew, T.M. Taking tissue samples from the placenta: An illustration of principles and strategies. *Placenta* **2008**, *29*, 1–14. [CrossRef]
47. Mayhew, T.M.; Lucocq, J.M. From gross anatomy to the nanomorphome: Stereological tools provide a paradigm for advancing research in quantitative morphomics. *J. Anat.* **2015**, *226*, 309–321. [CrossRef] [PubMed]
48. Meier, U. BBCH-Monograph. In *Growth Stages of Plants-Entwicklungsstadien von Pflanzen-Estadios de las Plantas-Développement des Plantes*; Blackwell Wissenschaftsverlag: Berlin, Germany; Vienna, Austria, 1997; p. 622.
49. EPPO. PP 1/239 (3) Dose Expression for Plant Protection Products. EPPO Bulletin. 2021. Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/epp.12704> (accessed on 10 December 2020).
50. Manktelow, D.W.L.; Praat, J.P. The Tree-Row-Volume Spraying System and its Potential use in New Zealand. In Proceedings of the NZ Plant Protection Conference, Lincoln, New Zealand, 18–21 August 1997; pp. 119–124.
51. Walklate, P.; Cross, J. An examination of Leaf-Wall-Area dose expression. *Crop. Prot.* **2012**, *35*, 132–134. [CrossRef]
52. Byers, R.E.; Hickey, K.D.; Hill, C.H. Base gallonage per acre. *Va. Fruit* **1971**, *60*, 19–23.
53. Byers, R.E.; Lyons, C.G., Jr.; Yoder, K.S.; Horsburgh, R.L.; Barden, J.A.; Donohue, S.J. Effect of apple tree size and canopy density on spray chemical deposit. *Hortscience* **1984**, *19*, 93–94.
54. Wilson, N.; Greenberg, J.; Jumpasut, A.; Collison, A.; Weichelt, H. *Absolute Radiometric Calibration of Planet Dove Satellites, Flocks 2p & 2e*; Planet: San Francisco, CA, USA, 2017.
55. Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351. *NASA Spec. Publ.* **1973**, *1*, 309–317.

56. Dobrowski, S.Z.; Ustin, S.L.; Wolpert, J.A. Remote estimation of vine canopy density in vertically shoot-positioned vineyards: Determining optimal vegetation indices. *Aust. J. Grape Wine Res.* **2002**, *8*, 117–125. [[CrossRef](#)]
57. Johnson, L.F. Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Aust. J. Grape Wine Res.* **2003**, *9*, 96–101. [[CrossRef](#)]
58. Sun, L.; Gao, F.; Anderson, M.C.; Kustas, W.P.; Alsina, M.M.; Sanchez, L.; Sams, B.; McKee, L.; Dulaney, W.; White, W.A.; et al. Daily mapping of 30 m LAI and NDVI for grape yield prediction in California vineyards. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 317. [[CrossRef](#)]
59. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. 2016. Available online: <http://qgis.osgeo.org> (accessed on 10 September 2020).
60. Dodge, Y. Spearman Rank Correlation Coefficient. In *The Concise Encyclopedia of Statistics*; Springer: New York, NY, USA, 2008. [[CrossRef](#)]
61. RStudio Team. *RStudio: Integrated Development for R*; RStudio, PBC: Boston, MA, USA, 2020. Available online: <http://www.rstudio.com/> (accessed on 10 September 2020).
62. Prions, S.; Haerling, K.A. Making sense of methods and measurement: Spearman-Rho ranked-ordered coefficient. *Clin. Simul. Nurs.* **2014**, *10*, 535–536. [[CrossRef](#)]
63. Montero, F.J.; Meliá, J.; Brasa, A.; Segarra, D.; Cuesta, A.; Lanjeri, S. Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in La Mancha, Spain. *Agric. Water Manag.* **1999**, *40*, 363–375. [[CrossRef](#)]
64. Cunha, M.; Marçal, A.R.S.; Rodrigues, A. A Comparative Study of Satellite and Ground-Based Vineyard Phenology. In *Imagin[e, G] Europe*; Manakos, I., Kalaitzidis, C., Eds.; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2010; pp. 68–77. [[CrossRef](#)]
65. Gatti, M.; Garavani, A.; Vercesi, A.; Poni, S. Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management. *Aust. J. Grape Wine Res.* **2017**, *23*, 399–408. [[CrossRef](#)]
66. Devaux, N.; Crestey, T.; Leroux, C.; Tisseyre, B. Potential of Sentinel-2 Satellite Images to Monitor Vine Fields Grown at a Territorial Scale. *OENO One* **2019**, *53*. [[CrossRef](#)]
67. Acevedo-Opazo, C.; Tisseyre, B.; Guillaume, S.; Ojeda, H. The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precis. Agric.* **2008**, *9*, 285–302. [[CrossRef](#)]
68. Johnson, L.F.; Bosch, D.F.; Williams, D.C.; Lobitz, B.M. Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Appl. Eng. Agric.* **2001**, *17*, 557–560. [[CrossRef](#)]
69. Sozzi, M.; Kayad, A.; Marinello, F.; Taylor, J.; Tisseyre, B. Comparing Vineyard Imagery Acquired from Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform. *OENO One* **2020**, *54*, 189–197. [[CrossRef](#)]
70. Michaud, M.; Watts, K.C.; Percival, D.C.; Wilkie, K.I. Precision pesticide delivery based on aerial spectral imaging. *Can. J. Biosyst. Eng.* **2008**, *50*, 9–15.
71. COM. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Farm to Fork Strategy for a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System COM/2020/381 Final. 2020. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381> (accessed on 10 December 2020).

Discusión general

Como se ha puesto de manifiesto durante la presente tesis doctoral, el alto grado de variabilidad intraparcular de los cultivos tridimensionales como los frutales o la viña, impide el establecimiento de soluciones homogéneas para todas las zonas de la parcela. En tareas como la aplicación de fitosanitarios, donde las características de la vegetación tienen una gran influencia, es esencial poder determinar las diferencias existentes en la vegetación para después ser trabajadas de manera diferenciada. En este sentido la aplicación variable en base a mapas de vigor permite ajustar los volúmenes de aplicación a la variabilidad espacial del cultivo, permitiendo obtener una aplicación ajustada y de calidad en todas las zonas de la parcela.

Al inicio de esta tesis doctoral, la tecnología de aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción era una práctica utilizada comercialmente en cultivos extensivos como el maíz y la soja. Por el contrario, estaba poco o nada desarrollada en cultivos arbóreos como la viña, lo que conformó la hipótesis de partida de los estudios publicados en este trabajo: utilizando tecnología ya disponible para cultivos extensivos, es posible desarrollar una metodología de aplicación variable en base a mapas adaptada al viñedo.

La primera de las publicaciones científicas se centró en aprovechar toda la tecnología desarrollada y centrada en los cultivos bajos y adaptarla para diseñar un sistema de aplicación variable en base a mapas de prescripción para el cultivo de la vid. Dado que esta era una experiencia pionera, se optó por trabajar con los sistemas de posicionamiento (Sistema Global de Navegación por Satélite – GNSS) que se utilizan comúnmente en cultivos extensivos para realizar el autoguiado y el control de secciones en pulverizadores para cultivos bajos. Estos sistemas GNSS ofrecen una precisión centimétrica que facilita parte del trabajo al poder eliminar de la ecuación problemas derivados de la posición del pulverizador en el momento de la aplicación. Además, se estableció una metodología para la obtención de mapas de vigor y su posterior conversión en mapas de prescripción a partir de la caracterización manual de la vegetación y una metodología para cuantificar la precisión del sistema de aplicación variable. La precisión del sistema se evaluó mediante la comparación entre el mapa de prescripción y el mapa de aplicación real, estableciendo distintos umbrales de tolerancia desde el 0 % hasta el 50 %. El umbral más restrictivo (0 %) determinó el porcentaje de superficie en los que no había diferencia entre el mapa de prescripción y el mapa de aplicación real, por ejemplo, si el valor prescrito por el mapa fuera 100 L ha⁻¹, el valor real tendría que estar entre 99.9 y 100.1 L ha⁻¹ para considerarse bien aplicado. En el extremo opuesto, la tolerancia más alta (50 %) cuantificó el porcentaje de superficie en la que se detectaron variaciones de ± 50 % del volumen aplicado, siguiendo el ejemplo anterior, si el valor prescrito fuera 100 L ha⁻¹, el valor real tendría que estar entre 50 y 150 L ha⁻¹ para considerarse dentro de la tolerancia. Por último, se cuantificaron los ahorros potenciales del uso del sistema de aplicación variable en base a mapas combinado con el uso del DSS Dosaviña® para determinar el volumen de aplicación óptimo en cada zona de vigor de la parcela. Se comparó una aplicación variable de 150 L ha⁻¹ en la zona de bajo vigor, 206 L ha⁻¹ en la zona de vigor medio y 260 L ha⁻¹ en la zona de alto vigor con una aplicación convencional de 325 L ha⁻¹, volumen seleccionado por el técnico de la finca y comúnmente utilizado por los agricultores de la zona. Además, se evaluaron los ahorros potenciales de instalar unos sensores de ultrasonido que controlan el pulverizador de forma encendido/apagado en función de la detección o no de la vegetación.

Los resultados obtenidos pusieron en relieve que es posible ensamblar elementos tecnológicos ya disponibles en el mercado que comprenden distintos eslabones de la cadena del proceso de viticultura

de precisión para obtener un sistema capaz de realizar una aplicación variable en viñedo basado en mapas de prescripción. La precisión del sistema implementado fue del 39 %, teniendo en cuenta que en cada uno de los puntos de la parcela se pedía un ajuste exacto del valor de volumen aplicado en comparación con el volumen establecido en el mapa de prescripción (umbral de tolerancia del 0 %). Desde un punto de vista práctico, donde en las operaciones agrícolas las resoluciones de trabajo suelen ser del orden de metros, litros u horas, al asumirse un umbral de tolerancia máximo del 10 %, en el 83.2 % de los casos el pulverizador aplicó un volumen de caldo correcto. La mayoría de los errores se establecieron en zonas de transición, donde el pulverizador estaba modificando la presión de trabajo para ajustarse al volumen de aplicación establecido en el mapa, así como en zonas con cambios repentinos de velocidad de avance (ej. finales de hilera).

Evaluando los ahorros potenciales del sistema de aplicación variable se determinó que el uso combinado de la aplicación variable junto con una caracterización de la vegetación por zona de vigor del cultivo mediante el DSS Dosaviña® para determinar el volumen de aplicación óptimo, permitieron una reducción del 44.3 % de líquido aplicado en una parcela de aproximadamente 5 ha. Si a esto le unimos el sistema encendido/apagado que aportan los sensores de ultrasonidos, esta reducción se elevó al 47.3 %. El ahorro potencial de materia activa con los sensores de ultrasonido activados y desactivados fue de 3.1 y 2.9 kg por tratamiento respectivamente. Por último, el ahorro correspondiente en términos de tiempo fue de aproximadamente 45 minutos para ambos casos, equivalente a unos 9 minutos por hectárea. Este diferencial de tiempo por hectárea permite disminuir el tiempo de aplicación, lo que permite aumentar las ventanas de tratamiento, aspecto fundamental en fincas de gran superficie donde las ventanas de tratamiento son pequeñas.

Esta experiencia permitió obtener, además, otros conocimientos e interpretaciones de las necesidades de los viticultores, de las posibilidades del sistema en el sentido estrictamente tecnológico, y de la viabilidad futura de implantación de forma generalizada por la industria vitícola. Sin entrar a valorar el coste del sistema, que al tratarse de un primer prototipo no era del todo representativo, una parte relevante del coste corresponde al sistema de navegación GNSS de precisión centimétrica. Para operaciones en las que no se pretende tratar de forma diferenciada árbol a árbol (sino que se determinan áreas de variabilidad) podría discutirse la idoneidad o no de este tipo de precisiones. Además, la experiencia con los usuarios puso en relieve la necesidad de disponer de un panel de control completamente adaptado al cultivo del viñedo y a los sistemas de pulverización utilizados en el sector vitícola.

Con este estudio, se demostró que la tecnología comercial especializada para los cultivos bajos estaba preparada trasladarse a los cultivos especiales. Para conseguir que esta tecnología fuera adoptada por el sector, era preciso conocer el comportamiento del sistema en condiciones reales de aplicación, la calidad de la distribución del producto fitosanitario en las diferentes zonas de aplicación y lo más importante, la eficacia biológica de los tratamientos realizados

A partir de esta primera experiencia en la que se demostró que la tecnología de aplicación variable en base a mapas de vigor desarrollada para cultivos bajos se podía trasladar al viñedo, se propuso realizar una campaña completa de aplicación de fitosanitarios de manera variable en 4 parcelas comerciales. En este caso se optó por un nuevo sistema de control con un receptor GNSS de resolución métrica (2-3 m) disponible en el mercado. El objetivo de este experimento fue evaluar la calidad de distribución de producto fitosanitario en la planta (para cada zona de vigor detectada en el mapa), la eficacia biológica de los tratamientos variables y la precisión del sistema de aplicación variable. Además de todo esto, al realizar una campaña completa de tratamientos fitosanitarios fue posible evaluar el grado de adopción

del sistema en una finca comercial y la posibilidad de instaurar el sistema de aplicación variable en su programa anual de tratamientos.

Durante esta segunda experiencia, se realizaron un total de 28 tratamientos de forma variable en base a mapas de prescripción (7 aplicaciones en 4 parcelas). Teniendo en cuenta los valores medios de las 28 aplicaciones, los resultados de la evaluación de la precisión del sistema de aplicación variable mostraron que teniendo en cuenta el umbral de tolerancia del 10 %, considerado el óptimo para evaluar los trabajos prácticos en campo, el 77 % de la superficie se aplicó correctamente. Resultados similares al obtenido durante la primera experiencia en campo con la aplicación variable en base a mapas (83.7 %). Sin embargo, estudiando el umbral de tolerancia más restrictivo (0 %) solo fue capaz de aplicar correctamente en torno al 2 % de la superficie. Este resultado difiere mucho del obtenido en el primer trabajo de investigación donde el sistema fue capaz de aplicar el 39 % de la superficie de manera correcta. Teniendo en cuenta estos valores, se podría concluir que el primer sistema de aplicación variable utilizado fue más preciso que el segundo. Si bien, todas las operaciones de manejo contempladas en esta tesis doctoral se han realizado por zonas de vigor, y no de forma individualizada planta por planta, como puede pasar en otro tipo de trabajos, y no se encontraron diferencias notables entre sistemas de posicionamiento centimétrico y métrico cuando se permitió un ± 10 % de tolerancia en el cálculo del volumen de aplicación. Este hecho permitiría reducir los costes del hardware del sistema de aplicación variable, favoreciendo la introducción de esta tecnología en el sector vitícola.

Los resultados obtenidos de la calidad de la distribución demostraron que, a pesar de modificar el volumen de prescripción entre zonas de distinto vigor vegetativo dentro de la parcela, y por ende la presión de trabajo, no se produjeron diferencias significativas en el porcentaje de recubrimiento evaluado mediante papel hidrosensible. Se mantuvo un nivel de recubrimiento entre el 20 y el 40 % en todas las aplicaciones y zonas de vigor estudiadas, considerándose estos valores de recubrimiento adecuados para garantizar el control de plagas y/o enfermedades en cualquier proceso de pulverización (Chen et al., 2013). Diversos autores, consiguieron resultados similares con sistemas de aplicación variable basados sensores embarcados en tiempo real (Solanelles et al., 2006; Gil et al., 2007).

Los resultados de incidencia de mildiu (*plasmopara viticola*) en los tratamientos de aplicación variable y en los tratamientos convencionales mostraron que en general la incidencia en los tratamientos variables, en la primera evaluación, fueron significativamente menores que en los convencionales (8.4 % frente a 23.1 % respectivamente). Sin embargo, no se obtuvieron diferencias significativas en el segundo muestreo (12.7 % frente a 15.4 % respectivamente). En cuanto al grado de infestación de mildiu, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de aplicación variable y los tratamientos convencionales (15,8 % frente a 19,3 % el 5 de julio, y 16,5 % frente a 17,2 % el 31 de julio).

Los resultados de la eficacia biológica indicaron que la incidencia de mildiu en la primera fecha de muestreo fue significativamente mayor en las parcelas de tratamiento convencional. Debido a esto, el técnico de campo duplicó el volumen de aplicación respecto al utilizado habitualmente, corriendo el riesgo de que se pudieran producir pérdidas en el suelo y por deriva. Doblando el volumen de caldo en las parcelas con el tratamiento convencional, se consiguió reducir la incidencia de mildiu hasta conseguir que los distintos tratamientos (aplicación variable y convencional) no presentasen diferencias significativas entre ellos.

El proceso de trabajo utilizado durante los dos primeros experimentos se fundamentó en la adquisición de mapas de variabilidad mediante imágenes aéreas obtenidas mediante UAV, la determinación de tres

zonas de vigor y la caracterización manual de la vegetación de cada una de las zonas de vigor detectadas. Teniendo en cuenta que esta última parte del proceso podría suponer un limitante para la introducción de la tecnología en el sector vitícola, se investigó la posibilidad de evaluar las características de la vegetación de forma automática a partir de los datos espectrales obtenidos con el UAV. De esta forma se pretendía determinar el mapa de prescripción asignando un volumen de aplicación para cada zona del campo de una forma más eficiente, sin la necesidad de realizar medidas manuales de la vegetación.

Paralelamente, y debido a que las imágenes satelitales son de uso cada vez más frecuente por los viticultores, se optó también por incluir este tipo de plataformas para obtener datos sobre el estado de desarrollo del cultivo y tratar de relacionarlo con la información obtenida a partir de la caracterización manual de la vegetación. Las imágenes seleccionadas fueron las de la constelación de nano-satélites (<5 kg) PlanetScope (Planet Labs Inc., San Francisco, CA, USA). Se trata de imágenes multiespectrales con una resolución espacial de 3 metros y una resolución temporal de aproximadamente 1 día, ofreciendo una mayor flexibilidad a la hora de obtener las imágenes espectrales, muy importante para facilitar la adopción del proceso de aplicación variable en el sector de la viticultura.

Para ello, se monitorizaron 1,400 cepas entre los años 2018 y 2019. Para cada una de ellas, se caracterizó manualmente la altura, la anchura, el TRV y el LWA. Además, se obtuvo el valor de NDVI mediante distintas plataformas aéreas (UAV y satélite). El objetivo de este trabajo de investigación, se centró en obtener modelos de regresión lineal capaces de relacionar la información obtenida manualmente de la vegetación con información espectral obtenida por las diferentes plataformas aéreas. Los parámetros espectrales estudiados fueron el NDVI (UAV y satélite) y el NDVI x Área proyectada (UAV). Al comparar los resultados obtenidos mediante UAV con los obtenidos mediante satélite, se obtuvo un mejor ajuste (mayor coeficiente de determinación) con los datos obtenidos con el UAV. El NDVI x Área proyectada, arrojó valores de coeficiente de determinación entre 0.84 y 0.94, lo que supuso una nueva área de desarrollo de la tecnología UAV como herramienta para la caracterización de la vegetación para permitir los principios de aplicación variable. Otros autores que utilizaron mapas de NDVI encontraron diferencias significativas entre las diferentes clases de vigor y la vegetación (Acevedo-Opazo et al., 2008; Gatti et al., 2017; Campos et al., 2020), pero ninguno de ellos relacionó u obtuvo modelos predictivos entre las características estructurales de la vegetación y los valores de NDVI en viticultura.

Los resultados obtenidos con la información obtenida con satélites presentaron relaciones significativas ($p < 0.001$) con la altura y anchura de la vegetación, y el TRV, arrojando coeficientes de determinación en torno a 0.5. Estos datos, a pesar de arrojar menores coeficientes de determinación que los obtenidos con el UAV, mostraron una tendencia interesante, lo que permitió abrir nuevas vías de estudio en el campo de la caracterización de la vegetación a partir de imágenes satelitales. Estos sistemas ofrecen una mayor flexibilidad y resolución temporal (número de imágenes por temporada). Además, su bajo coste supone un impacto notable sobre el coste del proceso de adquisición de datos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta tesis indican que el uso de la teledetección con imágenes obtenidas mediante UAV o satélites permite determinar la variabilidad de las parcelas y predecir las características de la vegetación. Además, la aplicación variable en base a mapas de prescripción en cultivos especiales como la viña permiten mejorar el uso de los productos fitosanitarios. Los resultados obtenidos pueden relacionarse directamente con los objetivos establecidos en la Directiva Europea de Uso Sostenible de Plaguicidas y con la recientemente publicada Estrategia de la Granja a la mesa (COM, 2020).

Teniendo en cuenta los resultados de los diferentes trabajos presentados, se pueden extraer las siguientes conclusiones generales:

- Es posible adaptar la tecnología de aplicación variable en base a mapas, disponible comercialmente para cultivos extensivos para utilizarla en cultivos tridimensionales.
- Los mapas de vigor clasificado se transformaron de manera fácil a mapas de prescripción teniendo en cuenta las características estructurales de la vegetación.
- El sistema de aplicación variable permite modificar los parámetros de trabajo del pulverizador según su posición en la parcela permitiendo el ajuste del volumen de aplicación a las características de la vegetación de cada una de las zonas de vigor diferenciadas en la parcela.
- El uso de tecnologías de aplicación variable en base a mapas de prescripción permite alcanzar ahorros potenciales interesantes de agua y producto fitosanitario siempre y cuando se mantenga la concentración indicada por la etiqueta del producto.
- A pesar de modificar la presión de trabajo y el volumen de aplicación entre las diferentes zonas de vigor, los valores de recubrimiento obtenidos durante las aplicaciones pueden considerarse similares en todos los casos. Además, en todas ellas, se consiguió un recubrimiento adecuado en términos mínimos para garantizar un control de plagas y/o enfermedades.
- La aplicación variable basada en mapas de prescripción obtenidos mediante la combinación de mapas de vigor y el DSS Dosaviña®, permite obtener resultados de eficacia biológica equivalentes a los obtenidos en una aplicación convencional de productos fitosanitarios.
- A partir de los modelos obtenidos es posible obtener mapas de prescripción de volumen de aplicación de manera automática a partir de mapas de vigor, sin la necesidad de caracterizar manualmente la vegetación.

Cabe destacar que, al inicio de esta tesis doctoral, la tecnología de aplicación variable en base a mapas de prescripción en cultivos arbóreos era un tema poco o nada desarrollado, y durante el transcurso de la misma se ha podido validar la metodología de trabajo que se ha probado en más de 40 ha de viñedo en diferentes bodegas situadas por toda la península ibérica y se ha implementado en 700 ha de arándano en Perú con resultados satisfactorios. Las conclusiones recogidas en esta tesis doctoral han servido, además, como precursores de distintas vías de investigación que actualmente se materializan en tres proyectos nacionales y europeos (NOVATERRA, COPPEREPLACE y PIVOS). En estos proyectos en los que la UMA-UPC tiene un papel relevante, se están implementando las líneas futuras de trabajo en materia de aplicación variable de fitosanitarios en viñedo y olivar mediante mapas de prescripción generados a partir de datos de teledetección. Estas líneas de trabajo se han enfocado en una correlación más estable de los parámetros de vegetación y su caracterización mediante sensores satelitales, el efecto de la orientación de las hileras en la respuesta espectral de los sensores y su influencia sobre la estimación de parámetros vegetativos, y el desarrollo de la metodología en nuevos sistemas de formación de viña como el vaso.

Referencias bibliográficas

- Acevedo-Opazo, C., Tisseyre, B., Guillaume, S., y Ojeda, H. (2008). The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precision Agriculture*, 9(5), 285–302. doi: 10.1007/s11119-008-9073-1
- Arnó, J. (2008). *Una investigación sobre la variabilidad intraparcelsaria en viña y el uso de sensores láser en viticultura de precisión*. [Tesis Doctoral]. Universitat de Lleida
- Arnó, J., Martínez-Casasnovas, J. A., Ribes-Dasi, M., y Rosell, J. R. (2009). Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(4), 779-790. doi:10.5424/sjar/2009074-1092
- Arnó, J., Escolà, A., Vallès, J.M., Llorens, J., Sanz, R., Masip, J., Palacín, J., y Rosell-Polo, J.R. (2013). Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner. *Precision Agriculture*, 14, 290–306. doi:10.1007/s11119-012-9295-0
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernández, D., y Moreno, M. Á. (2015). Characterization of *Vitis vinifera* L. canopy using unmanned aerial vehicle-based remote sensing and photogrammetry techniques. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(2), 120–129. doi:10.5344/ajev.2014.14070
- Benito, Á. C. (2012). *Modelización geoestadística para la predicción de actividad de cs-137 en suelo*. [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid.
- Berenstein, R., Edan, Y., Shahar, O. B., y Shapiro, A. (2010). Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer. *Intelligent Services Robotics*, 3, 233–243. doi:10.1007/s11370-010-0078-z
- Bramley, R.G.V., y Lamb, D.W. (2003). Making sense of vineyard variability in Australia. En: Proceedings of IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología. Santiago, Chile.
- Bramley, R.G.V., Hamilton, R.P. (2004). Understanding variability in winegrape production systems. 1. Withinvineyard variation in yield over several vintages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10, 32-45. doi:10.1111/j.1755-0238.2004.tb00006.x
- Byers, R.E., Hickey, K.D. y Hill, C.H. (1971). Base gallonage per acre. *Virginia Fruit*, 60, 19–23.
- Byers, R.E. (1987). Tree-row-volume spraying rate calculator for apples. *Hortscience*, 22, 506–507.
- Cabras, P., y Angioni, A. (2000). Pesticide Residues in Grapes, Wine, and Their Processing Products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(4), 967-972. doi:10.1021/jf990727
- Campos, J., Llop, J., Gallart, M., García-Ruiz, F., Gras, A., Salcedo, R., Gil, E. (2019). Development of canopy vigor maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. *Precision Agriculture*, 20, 1136-1156. doi: 10.1007/s11119-019-09643-z

- Campos, J., Gallart, M., Llop, J., Ortega, P., Salcedo, R., y Gil, E. (2020). On-Farm Evaluation of Prescription Map-Based Variable Rate Application of Pesticides in Vineyards. *Agronomy*, *10*(1), 102. doi:10.3390/agronomy10010102
- Chakraborty, M., Khot, L. R., Sankaran, S., y Jacoby, P. W. (2019). Evaluation of mobile 3D light detection and ranging based canopy mapping system for tree fruit crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, *158*, 284–293. doi: 10.1016/j.compag.2019.02.012
- Chen, Y., Ozkan, H.E., Zhu, H., Derksen, R.C., y Krause, C.R. (2013). Spray deposition in side tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, *56*, 1263–1272. doi:10.13031/trans.56.9839
- Cheraïet, A., Naud, O., Carra, M., Codis, S., Lebeau, F., y Taylor, J. (2020). An algorithm to automate the filtering and classifying of 2D LiDAR data for site-specific estimations of canopy height and width in vineyards. *Biosystems Engineering*, *200*, 450–465. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.10.016
- COM. (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: European Green Deal COM/2019/640. Disponible online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/DOC/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN> (acceso: 15 abril de 2021).
- COM. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system COM/2020/381. Disponible online: https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en (acceso: 15 de abril de 2021).
- de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., y López-Granados, F. (2018). 3-D characterization of vineyards using a novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications. *Remote Sensing*, *10*(4), 584. doi:10.3390/rs10040584.
- Decisión (UE) 1600/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de julio de 2002, por la que se establece el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente. Diario Oficial de la Unión Europea L242, Bruselas, Bélgica, 10 de septiembre de 2002, pp. 1-15.
- Diago, M.P., Correa, C., Millán, B., Barreiro, P., Valero, C., y Tardaguila, J. (2012). Grapevine yield and leaf area estimation using supervised classification methodology on RGB images taken under field conditions. *Sensors*, *12*(12), 16988–17006. doi:10.3390/s121216988
- Directiva (UE) 79/117 del Consejo, de 21 de diciembre de 1978, relativa a la prohibición de salida al mercado y de utilización de productos fitosanitarios que contengan determinadas sustancias activas. Diario Oficial de la Unión Europea L33, Bruselas, Bélgica, 8 de febrero de 1979, pp. 126 - 130.
- Directiva (UE) 91/414 del Consejo de 15 de julio de 1991 relativa a la comercialización de productos fitosanitarios. Diario Oficial de la Unión Europea L230, Bruselas, Bélgica, 19 de agosto de 1991, pp. 1-32.

Directiva (UE) 2009/127 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009 por la que se modifica la Directiva 2006/42/CE en lo que respecta a las máquinas para la aplicación de plaguicidas. Diario Oficial de la Unión Europea L310, Bruselas, Bélgica, 25 de noviembre de 2009, pp. 29 - 33.

Directiva (UE) 2009/128 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009 por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas. Diario Oficial de la Unión Europea L309, Bruselas, Bélgica, 25 de noviembre de 2009, pp. 71 - 86.

ECPA. (2016). Cuestionario sobre la protección de las aguas. Consultado en Agosto de 2016. Acceso: 20 abril de 2021 Disponible en: http://www.topps-life.org/uploads/8/0/0/3/8003583/stakeholder_survey-1.pdf

El-Khouli, A., Holtoer, R., Hope, C.A., y Kaper O.E. (1993). *Stone vessels, pottery and sealings from the tomb of Tutankhamun*. Oxford University Press. ISBN: 978-0900416637

EPPO (2021), PP 1/239 (3) Dose expression for plant protection products. *EPPO Bull*, 51. pp 10-33. doi: 10.1111/epp.12704

Escolà, A., Arnó, J. y Martínez-Casasnovas, J.A. (2018). Operation in the field: site-specific management using variable rate technologies. *New Ag International*, Sep/Oct, pp 28-35.

EUROSTAT. (2007). The use of plant protection products in the European Union. Data 1992-2003. Statistical Books. Acceso: 2 abril de 2021. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-statistical-books/-/KS-76-06-669>

EUROSTAT. (2018). Agriculture, forestry and fishery statistics 2018. Statistical Books. Acceso: 15 abril de 2021. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-statistical-books/-/KS-FK-18-001z>

FEV. (2020). *El sector en cifras*. <http://www.fev.es/sector-cifras/>

Fraisse, C.W., Sudduth, K.A., y Kitchen, N.R. (2001). Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 44(1), 155-166. doi:10.13031/2013.2296

Garcerá, C., Fonte, A., Salcedo, R., Soler, A. y Chueca, P. (2020). Dose expression for pesticide application in citrus: Influence of canopy size and sprayer. *Agronomy*, 10(12), 1887. doi:10.3390/agronomy10121887

Garcerá, C., Doruchowski, G., y Chueca, P. (2021). Harmonization of plant protection products dose expression and dose adjustment for high growing 3D crops: A review. *Crop Protection*, 140, 105417. doi:10.1016/j.cropro.2020.105417

Gatti, M., Garavani, A., Vercesi, A., y Poni, S. (2017). Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23, 399-408. doi:10.1111/ajgw.12286

- Gil, E. (2003). *Tratamientos en viña: equipos y técnicas de aplicación*. UPC. ISBN: 978-84-8301-691-6.
- Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S. y Val, L. (2007). Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, 26(8), 1287–1297. doi: 10.1016/j.cropro.2006.11.003
- Gil, E., Bernat, C., Escolà, A., Llop, J., Llorens, J., Queraltó, M. (2008). *Buenas prácticas fitosanitarias para una mejor calidad del agua*. Universitat Politècnica de Catalunya y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. NIPO: 251-08-015-1
- Gil, E. y Escolà, A. (2009). Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(2), 145-151. doi:10.13031/2013.26323
- Gil, E., Llorens, J. y Llop, J. (2011a). DOSAVIÑA: Five years of successful experiences in field tests. In: 13th Suprofruit - Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing. Bergerac, France.
- Gil, E., Llorens, J., Landers, A., Llop, J y Giralt, L. (2011b). Field validation of DOSAVIÑA, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. *European Journal of Agronomy*, 35(1), 33-46. doi:10.1016/j.eja.2011.03.005
- Gil, E., Llorens, J. y Llop, J. (2012). New technologies adapted to alternative dose expression concepts. En: International Advances in Pesticide Application. (p. 325-333). Wageningen, Netherlands.
- Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A. y Rosell-Polo, J. R. (2013). Variable rate sprayer. Part 2 - Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 95, 136–150. doi: 10.1016/j.compag.2013.02.010
- Gil, E., y González, E. (2014). *Buenas prácticas agrícolas para reducir la deriva, la escorrentía y la erosión*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. ISBN: 978-84-491-1408-3
- Gil, E., Gallart, M., Llorens, J., Llop, J., Bayer, T. y Carvalho, C. (2014a). Spray adjustments based on LWA concept in vineyard. Relationship between canopy and coverage for different application settings. *Aspects of Applied Biology*, 122, 25–32.
- Gil, E., Arnó, J., Llorens, J., Sanz, R., Llop, J., Rosell-Polo, J.R., Gallart, M. y Escolà, A. (2014b). Advanced technologies for the improvement of spray application techniques in Spanish viticulture: An overview. *Sensors*, 14, 691-708. doi:10.3390/s140100691
- Gil, E., Campos, J., Ortega, P., Llop, J., Gras, A., Armengol, E., Salcedo, R., y Gallart, M. (2019). DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 117-130. doi:10.1016/j.compag.2019.03.018
- Gil, E., Salcedo, R., Soler, A., Ortega, P., y Llop, J. (2021). Relative efficiencies of experimental and conventional foliar sprayers and assessment of optimal LWA spray volumes in trellised wine grapes. *Pest Management Science*, 77(5), 2462–2476. doi: 10.1002/ps.6276

- González J.J., y Gómez Benito, C. (2000). Profesión e identidad en la agricultura familiar española, *Revista Internacional de Sociología*, 27, 41-69. doi:10.3989/ris.2000.i27.809
- Guasch-Jané, M.R., Andrés-Lacueva, C., Jáuregui, O., y Lamuela-Raventós, R.M. (2006). The origin of the ancient Egyptian drink Shedeḥ revealed using LC/MS/MS. *Journal of Archaeological Science*, 33, 98-101. doi:10.1016/j.jas.2005.06.013
- Hall, A. (2003). *Defining grapevine and vineyard characteristics from high-spatial-resolution remotely-sensed optical imagery*. [Tesis doctoral], Charles Sturt University, 144 pp.
- Hatfield, J. (2000). *Precision Agriculture and Environmental Quality: Challenges for Research and Education*. National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service, USDA, Ames, IA.
- ISPA. (2021). Precision Agriculture Definition. <https://www.ispag.org/about/definition>
- Johnson, L., Lobitz, B., Armstrong, R., Baldy, R., Weber, E., DeBenedictis, J., y Bosch D. (1996). Airborne imaging aids vineyard canopy evaluation. *California Agriculture* 50, 14-18. doi:10.3733/ca.v050n04p14
- Koch, H. (2007). How to achieve conformity with the dose expression and sprayer function in high crops. *Bayer Crop Science Journal*, 60, 71-84.
- Lamb, D., Weedon, M., y Bramley, R. (2004). Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10, 46-54. doi:10.1111/j.1755-0238.2004.tb00007.x
- Landers, A.J. (2008). Innovative technologies for the precise application of pesticides in orchards and vineyards. *Aspects of Applied Biology*, 84, 411-416.
- Langer, I. (2018). Encountered Problems for Dose Expression Harmonisation. En: Association of Applied Biologist - Dose Expression Workshop. Barcelona, Spain.
- Llopis Goig, R. y Vidal González, M. (2006). Polaridades y ambivalencias ante el nuevo escenario agrario. Un estudio con estudiantes de Formación Profesional Agraria de la Comunidad Valenciana. *Revista de estudio Agrosociales y pesqueros*, 210, pp. 201-226
- Llorens, J., Gil, E., Llop, J., y Escolà, A. (2011a). Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: Advances to improve pesticide application methods. *Sensors*, 11(2), 2177-2194. doi:10.3390/s110202177
- Llorens, J., Gil, E., Llop, J., y Queraltó, M. (2011b). Georeferenced LiDAR 3D Vine Plantation Map Generation. *Sensors*, 11(6), 6237-6256. doi:10.3390/s110606237
- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Jiménez-Brenes, F. M., Oneka, O., Marín, D., Loidi, M., ... Santesteban, L. G. (2020). Monitoring vineyard canopy management operations using UAV-acquired photogrammetric point clouds. *Remote Sensing*, 12(14), 2331. doi:10.3390/rs12142331

- Marínez-Casasnovas, J.A. y Arnó, J. (2014). Viticultura de precisión de dónde venimos y hacia dónde vamos. *ACE: Revista de enología*, 143. ISSN-e: 1697-4123.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Arnó, J., y Escolà, A. (2017). What do sensors tell us about crops? *New Ag International*, Nov/Dec, pp 22-30.
- Martínez de Toda, F., y Sancha, J.C. (1997). Caractérisation ampélographique des cultivars rouges de *Vitis vinífera*, L. conservés en Rioja. *Bulletin de L'OIV*, 794, 221-234.
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S., Genesio, L., Vaccari, F., Primicerio, J., ... Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971–2990. doi:10.3390/rs70302971
- Matese, A., Di Gennaro, S. F., y Santesteban, L. G. (2019). Methods to compare the spatial variability of UAV-based spectral and geometric information with ground autocorrelated data. A case of study for precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 931–940. doi: 10.1016/j.compag.2019.05.038
- Mathews, A. J., y Jensen, J. L. R. (2013). Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) collected high density structure from motion point clouds. *Remote Sensing*, 5, 2164–2183. doi:10.3390/rs5052164
- Monsó, A., Arnó, J., y Martínez-Casasnovas, J.A. (2013). A simplified index to assess the opportunity for selective wine grape harvesting from vigour maps. En: 9th European Conference on Precision Agriculture. (p. 625-632). Lleida, Spain.
- Navarro, S., Barba, A., Oliva, J., Navarro, G., y Pardo, F. (1999). Evolution of residual levels of six pesticides during elaboration of red wines. Effect of wine-making procedures in their disappearance. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(1), 264–270. doi:10.1021/jf980801+
- Nuske, S., Wilshusen, K., Achar, S., Yoder, L., Narasimhan, S., y Singh, S. (2014), Automated visual yield estimation in vineyards. *Journal of Field Robotics*, 31, 837-860. doi:10.1002/rob.21541
- OIV. (2020). *State of the world vitivinicultural sector in 2020*. Statistical Book. Acceso: 28 mayo de 2021. Disponible en: <https://www.oiv.int/en/technical-standards-and-documents/statistical-analysis/state-of-vitiviniculture>
- Orden AAA/2809/2012, de 13 de diciembre, por la que se aprueba el Plan de Acción Nacional para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios, previsto en el Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 29 de diciembre de 2012, núm. 313, pp. 89476.
- Pádua, L., Marques, P., Adão, T., Guimarães, N., Sousa, A., Peres, E., y Sousa, J. J. (2019). Vineyard Variability Analysis through UAV-Based Vigour Maps to Assess Climate Change Impacts. *Agronomy*, 9(10), 581. doi:10.3390/agronomy9100581
- Palleja, T., y Landers, A. J. (2015). Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 108–117. doi: 10.1016/j.compag.2015.05.014

Palleja, T., y Landers, A. J. (2017). Real time canopy density validation using ultrasonic envelope signals and point quadrat analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 43–50. doi: 10.1016/j.compag.2017.01.012

Pergher, G., y Petris, R. (2008). Pesticide Dose Adjustment in Vineyard Spraying and Potential for Dose Reduction. En: *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript ALNARP 08 011. Vol. X. May, 2008.

Proffit, T., Bramley, R., Lamb, D., y Winter, E. (2006). *Precision Viticulture – A New Era in Vineyard Management and Wine Production*. Winetitles Pty Ltd., Ashford, South Australia; 1–90

Real Decreto 1702/2011 de 18 de noviembre, de inspecciones periódicas de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 09 de diciembre de 2011, núm. 296.

Real Decreto 494/2012 de 9 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas, para incluir los riesgos de aplicación de plaguicidas. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 17 de marzo de 2012, núm. 66, pp. 24383-24387.

Real Decreto 1311/2012 de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 15 de septiembre de 2012, núm. 223.

Real Decreto 555/2019, de 27 de septiembre, por el que se modifica el Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 28 de septiembre de 2019, núm. 234, pp. 106712 - 106718.

Reglamento (UE) 1107/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009 relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea L309, Bruselas, Bélgica, 24 de noviembre de 2009, pp. 1-50

Reglamento (UE) 1151/2012 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de noviembre de 2012, sobre los regímenes de calidad de los productos agrícolas y alimenticios. Diario Oficial de la Unión Europea L343, Bruselas, Bélgica, 14 de diciembre de 2012, pp. 1-29.

Reglamento (UE) 1308/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de diciembre de 2013, por el que se crea la organización común de mercados de los productos agrarios y por el que se derogan los Reglamentos (CEE) no 922/72, (CEE) no 234/79, (CE) no 1037/2001 y (CE) no 1234/2007. Diario Oficial de la Unión Europea L 347, Bruselas, Bélgica, 20 de diciembre de 2013, pp. 671 - 854.

Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018 sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.o 834/2007 del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea L150, Bruselas, Bélgica, 14 de junio de 2018, pp. 1 - 92.

- Rinaldi, M., Llorens, J., y Gil, E. (2013). Electronic characterization of the phenological stages of grapevine using a LIDAR sensor. *Precision Agriculture 2013 - Papers Presented at the 9th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2013*, 603–609.
- Román, C., llorens, J., Uribeetxebarria, A., Sanz, R., Planas, S., y Arnó, J. (2020). Spatially variable pesticide application in vineyards: Part II, field comparison of uniform and map-based variable dose treatments. *Biosystems Engineering*, 195, 42-53. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.04.013
- Ruegg, J., Siegfried, W., Raisigl, U., Viret, O., Steffek, R., Reisenzein, H., y Persen, U. (2001). Registration of plant protection products in EPPO countries: current status and possible approaches to harmonization. *OEPP/EPPO Bulletin* 31, pp. 143-152. doi:10.1111/j.1365-2338.2001.tb00983.x
- Santesteban, L. G., Di Gennaro, S. F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J. B., y Matese, A. (2017). High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agricultural Water Management*, 183, 49–59. doi: 10.1016/j.agwat.2016.08.026
- Sanz, R., Llorens, J., Escolà, A., Arnó, J., Planas, S., Román, C., y Rosell-Polo, J. R. (2018). LIDAR and non-LIDAR-based canopy parameters to estimate the leaf area in fruit trees and vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260–261(5), 229–239. doi:10.1016/j.agrformet.2018.06.017
- Sarri, D., Lisci, R., Rimediotti, M., Grandi, F., y Vieri, M. (2016). Introducing on the go selective harvest in wine grape vineyard: criticality and chance. En: CIGR-AgEng conference. Aarhus, Denmark.
- Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J. R., Camp, F., y Gràcia, F. (2006). An Electronic Control System for Pesticide Application Proportional to the Canopy Width of Tree Crops. *Biosystems Engineering*, 95(4), 473–481. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.08.004
- Sudduth, K.A. (1999). Engineering technologies for precision farming. En: International Seminar on Agricultural Mechanization Technology for Precision Farming. Suwon, Korea.
- Sun, L., Gao, F., Anderson, M., Kustas, W., Alsina, M., Sanchez, L., ... Post, K. (2017). Daily Mapping of 30 m LAI and NDVI for Grape Yield Prediction in California Vineyards. *Remote Sensing*, 9(4), 317. doi:10.3390/rs9040317
- Taylor, J.A., Tisseyre, B., y Leroux, C. (2019). A simple index to determine if within-field spatial production variation exhibits potential management effects: application in vineyards using yield monitor data. *Precision Agriculture*, 20(5), 880-895. doi:10.1007/s11119-018-9620-3
- Vaquero Fernandez, L. (2010). *Nuevas aportaciones al conocimiento y utilización de productos fitosanitarios para el control de enfermedades de la vid. Evaluación de posibles efectos sobre la fermentación y elaboración de vinos de calidad*. [Tesis doctoral]. Universidad de La Rioja.
- Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, B., Baker, D.E., y Murray, R.A. (2003). A generic method of pesticide dose expression: application to broadcast spraying of apple trees. *Annals of Applied Biology*, 143, 11–23. doi: 10.1111/j.1744-7348.2003.tb.00264.x

- Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., y Baker, D.E. (2006). Optimising the adjustment of label recommended dose rate for orchard spraying. *Crop Protection*, 25, 1080–1086. doi:10.1016/j.cropro.2006.02.011
- Walklate, P.J. y Cross, J.V. (2013). Regulated dose adjustment of commercial orchard spraying products. *Crop Protection*, 54, 65-73. doi:10.1016/j.cropro.2013.07.019
- Weiss, M., y Baret, F. (2017). Using 3D point clouds derived from UAV RGB imagery to describe vineyard 3D macro-structure. *Remote Sensing*, 9, 111. doi:10.3390/rs9020111
- Weisser, P., y Koch, H. (2002). Expression of dose rate with respect to orchard sprayer function. *Advances of Applied Biology*, 6, 353-358.
- Wohlhauser, R. (2009). Dose rate expression in tree fruits - the need for harmonization approach from a chemical producer industry perspective. En: Proceedings of the Tree Fruit Dose Adjustment Discussion Group Meeting, Wageningen, The Netherlands.
- Wohlhauser, R. (2012). Dose rate expression in tree fruits - the need for a harmonized approach from an industry perspective. An industry proposal of BASF, Bayer CS, Dow AS, DuPont AS, Makhteshim Agan and Syngenta. En: Proceedings of the Meeting of Agricultural Field Trials Working Group of the German Region of the International Biometric Society (IBS-DR). Dummersdorf, Germany.

Acrónimos

AE - Agricultura Ecológica

AP - Agricultura de Precisión

B - Banda azul. Del inglés *Blue*

DOP - Denominación de Origen Protegida

DSS - Sistemas de ayuda a la decisión. Del inglés *Decision Support System*

DUS - Directiva de Uso Sostenible

EPPO - European Plant Protection Organization

FEV - Federación Española del Vino

G - Banda del verde. Del inglés *Green*

GNSS - Sistema Global de Navegación por Satélite. Del inglés *Global Navigation Satellite System*

GPS - Sistema Global de Posicionamiento. Del inglés *Global Positioning System*

H - Altura de vegetación. Del inglés *canopy height*

IDW - Técnica distancia inversa ponderada. Del inglés *Inverse Distance Weight*

IGP - Indicación Geográfica Protegida

LAI - Índice de Área Foliar. Del inglés *Leaf Area Index* (Adimensional)

LiDAR - Tecnología *Light Detection and Ranging*

LWA - Concepto de pared de vegetación. Del inglés *Leaf Area Index* ($\text{m}^2_{\text{vegetación}} \text{ha}^{-1}$)

NDVI - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Del inglés *Normalized Difference Vegetation Index* (Adimensional)

NIR - Banda del Infrarojo cercano. Del inglés *Near infrared*

OIV - Organización Internacional de la Viticultura

PPP - Producto fitosanitario. Del inglés *Plant Protection Product*

PRD - En inglés *Plant Row Distance* ($100 \text{ m}_{\text{vegetación}}$)

PS - Planet Scope

R - Banda del rojo. Del inglés *Red*

RTK - En inglés *Real Time Kinematic*

SUR - Del inglés *Systematic Uniform Random*

TRV - Volumen de vegetación. Del inglés *Tree Row Volume* ($\text{m}^3_{\text{vegetación}} \text{ha}^{-1}$)

UAV - Vehículo Aéreo no tripulado. Del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*

US - Sensor de ultrasonidos. Del inglés *Ultrasonic Sensor*

VP - Viticultura de Precisión

VRA - Aplicación variable. Del inglés *Variable Rate Application*

W - Anchura de vegetación. Del inglés *canopy width*

WSP - Papel hidrosensible. Del inglés *Water Sensitive Paper*

Tablas y Figuras

Listado de Tablas

Introducción y Objetivos

Tabla 1. Dosis de aplicación (kgMA ha^{-1}) de productos fitosanitarios en diferentes cultivos en la Unión Europea desde el año 1992 al 2003. Fuente: “*The use of plant protection products in the European Union*” Data 1992-2003. EUROSTAT 2007. Statistical Books (EUROSTAT, 2007).

Resultados – Capítulo 1

Table 1. Specific working conditions for each vigour zone.

Table 2. Average values of NDVI and manual canopy characterization for the 69 defined measuring points at the three evaluated crop stages.

Table 3. Average values of NDVI and manual canopy characterization for the three identified zones in the parcel.

Table 4. Range of values (L ha^{-1}) applied for each established threshold used for the comparison between actual and intended spray application maps.

Table 5. Quantification of potential savings of the site-specific sprayer for conventional application, variable rate application (VRA) and variable rate application without ultrasonic sensors.

Resultados – Capítulo 2

Table 1. Main characteristics of the vineyard parcels.

Table 2. Affection categories based on the percentage of leaves affected, according to the EPPO guideline.

Table 3. Percentage of area in each distinguished vigor map category (low - L, medium - M, high - H) in each parcel.

Table 4. Canopy characterization. Volume rate (L ha^{-1}) calculated with Dosaviña® for each variety and canopy vigor (low, medium and high). Selected working conditions (color, number of nozzles and working pressure) for each pesticide application process (a for 1 to 4, b for 5 to 7).

Table 5. Percentage of points classified as successful points, assuming a $\pm 10\%$ tolerance.

Table 6. Percentage of coverage (mean \pm SE of the mean) for each vigor zone in each studied parcel.

Table 7. Percentage of incidence and degree infestation of powdery mildew at two sampling dates for conventional (CONV) and variable rate application (VRA) parcels.

Resultados – Capítulo 3

Table 1. Main characteristics of selected vineyard plots.

Table 2. Characteristics of SUR sampling for each vineyard plot in 2018 and 2019.

Table 3. Database fields.

Table 4. Spearman’s rho correlation matrix for variables obtained using UAV.

Table 5. Spearman's rho values for variables obtained using satellite imagery considering and rejecting edge points.

Listado de Figuras

Introducción y Objetivos

Figura 1. Distribución de la superficie mundial de viñedo en el año 2019. Fuente: “*State of the world vitivinicultural sector in 2020*”. OIV 2020. Statistical Book (OIV, 2020).

Figura 2. Iniciativas del Green Deal en los diferentes ámbitos de actuación. Fuente: European Green Deal (COM, 2019).

Figura 3. Nivel de formación de los responsables de las explotaciones agrarias europeas del año 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos extraídos de “*Agriculture, forestry and fishery statistics 2018*”. EUROSTAT 2018. Statistical Books (EUROSTAT, 2018).

Figura 4. Proceso completo de VP realizado en la presente tesis doctoral. La numeración (1,2,3) indica los artículos que comprenden cada uno de los procesos llevados a cabo en la presente tesis doctoral.

Resultados – Capítulo 1

Figure 1. Regular sampling points distributed over the parcel.

Figure 2. Variable rate application prototype.

Figure 3. Scheme of the whole process: from UAV vigour map to actual variable rate application map.

Figure 4. a Orthophotomap of the parcel, **b** Vineyard mask.

Figure 5. Randomized distribution of selected points for comparing actual and intended spray application maps.

Figure 6. Relationship between TRV (manual measurements) and NDVI*Projected area (remote sensing determination). Values obtained after measurements at three different crop stages (BBCH 61, 75 and 81) at the 69 defined measuring points.

Figure 7. Obtained maps: **a** raw only vegetation NDVI map superimposed on the false colour infrared image; **b** canopy vigour map; **c** prescription map; **d** actual variable application map.

Figure 8. Spatial distribution of accuracy for different degrees of tolerance (intended vs. actual application).

Figure 9. Percentage of points according to the tolerance (intended vs. actual application).

Resultados – Capítulo 2

Figure 1. Overview of the entire process used to implement the variable application rate in the field tests.

Figure 2. Orthophoto map of the experimental vineyard parcels.

Figure 3. Examples of histogram of the NDVI values for clustering in 3 (**left**) and 2 (**right**) vigor zones.

Figure 4. Scheme of the water sensitive papers located in each vine for assessing the spraying coverage.

Figure 5. Vigor maps for each parcel in the evaluated BBCH stages.

Figure 6. Examples of prescription maps used in the field tests. Left: June 20th of parcel 1 (Chardonnay). Right: July 12th parcel 2 (Merlot).

Figure 7. Examples of actual application maps obtained in the field's tests. Left: June 20th of parcel 1 (Chardonnay). Right: July 12th parcel 2 (Merlot).

Figure 8. Example of accuracy distribution classified according to 0, 5, 10 and 20% threshold.

Figure 9. Percentage of water sensitive papers coverage obtained each vigor. Mean of the parcels \pm SEM.

Figure 10. Coverage (WSP) obtained with conventional spray application (CONV) (a), in comparison with coverage obtained at the four selected varieties when using variable rate application (VRA) (b–e).

Figure 11. Volume rate applied in conventional and variable rate parcels in each spray application. Time of the evaluation of the biological efficacy (sampling time) as well as pruning and stripping task are marked.

Resultados – Capítulo 3

Figure 1. Orthophotomaps of studied vineyard plots.

Figure 2. Scheme of SUR sampling used in plot A in 2018. Identification system for sampling vines in field.

Figure 3. Analysis of workflow to obtain clustered vigour maps: (a) radiometrically calibrated multiband image, (b) NDVI image, (c) binary mask of vineyard-only pixels, (d) NDVI vineyard-only pixels, (e) continuous NDVI map, (f) clustered vigour map (red: low vigour, yellow: medium vigour, green: high vigour).

Figure 4. Overview of entire process from lime marks in ground to obtain sampling vine-only polygon contours: (a) polygons defining sampling vines, (b) binary mask, (c) sampling vine binary mask, (d) sampling vine-only polygon contours.

Figure 5. Box plots of principal descriptive statistical parameters for manual measurements. ● mean values.

Figure 6. Box plots of principal descriptive statistical parameters for remote sensing variables. ● mean values.

Figure 7. Linear regression model ($R^2 = 0.77$, $p < 0.001$) evaluating relationship between Ln TRV_M and $\text{Ln NDVI}_D \times \text{Prj_area}_D$. Grey band shows 95% confidence interval.

Figure 8. Linear regression models evaluating relationship among $\text{Ln NDVI}_D \times \text{Prj_area}_D$ and transformed canopy structural parameters (Ln H_M , Ln W_M , Ln LW_M , and Ln TRV_M). Grey bands present 95% confidence interval.

Figure 9. Linear regression model ($R^2 = 0.46$, $p < 0.001$) evaluating relationship between Ln W_M and Ln NDVI_S . Grey band shows 95% confidence interval.

Figure 10. Linear regression models evaluating relationships among Ln NDVI_S and transformed canopy structural parameters (Ln H_M , Ln W_M , and Ln TRV_M). Grey bands present 95% confidence interval.

