

# **MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN ENOLOGÍA INNOVADORA**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

### **UTILIZACIÓN DE LAS IMÁGENES ESPECTRALES Y TÉRMICAS PARA LA DETECCIÓN DE DÉFICIT HÍDRICO. INTERÉS DEL RATIO ISOTÓPICO DEL CARBONO ( $\delta^{13}C$ ) COMO MEDIDA COMPLEMENTARIA PARA LA EVALUACIÓN DE DAÑOS EN SEGURO AGRARIO EN VIÑEDO**

**Autor: ROLANDO ALBEIRO PARRA GRANADOS**

**Tutor: GONZAGA SANTESTEBAN**

Índice

Agradecimientos: ..... 5

Abstract ..... 6

Résumen ..... 6

Introducción: ..... 7

Objetivos: ..... 8

Antecedentes: ..... 8

Materiales y Métodos ..... 10

    Caracterización del viñedo ..... 10

    Recopilación de la información y procesamiento ..... 12

    Campaña de vuelo ..... 15

    Procesamiento de datos de imagen ..... 16

    Evaluación de la relación entre el CWSI y el estado hídrico de la planta ..... 16

    El sistema de teledetección ..... 17

    Reflectancia: definiciones y firma espectral de la vegetación ..... 18

    Imágenes térmicas del infrarrojo ..... 20

    El Ratio Isotópico del Carbono ..... 22

Resultados y discusión ..... 24

Bibliografía ..... 35

Anexos ..... 38

Índice de tabla

Tabla 1:  $\delta$  13-Junio /17 .....25

Tabla 2:  $\delta$  13-Julio /17.....26

Tabla 3:  $\delta$  13-Agosto /17 .....26

Tabla 4:  $\delta$  13-Septiembre /17 .....27

Tabla 5:  $\delta$  13-Junio /19.....27

Tabla 6:  $\delta$  13-Julio /19.....28

Tabla 7:  $\delta$  13-Agosto /19.....28

Tabla 8:  $\delta$  13-Septiembre /19 .....28

Tabla 9:  $\delta$  13-Junio /20.....29

Tabla 10:  $\delta$  13-Julio /20.....30

Tabla 11:  $\delta$  13-Agosto /20.....30

Tabla 12:  $\delta$  13-Septiembre /20 .....30

Tabla 13: Valores de correlación finales de R2 .....31

Tabla 14:  $\delta$  13-(julio-junio) 2017 .....42

Tabla 15:  $\delta$  13-(agosto-julio) 2017.....42

Tabla 16:  $\delta$  13-(agosto-julio) 2017.....42

Tabla 17:  $\delta$  13-(sept-agosto) 2017.....42

Tabla 18:  $\delta$  13-(julio-junio) 2019 .....43

Tabla 19:  $\delta$  13-(agosto-julio) 2019.....43

Tabla 20:  $\delta$  13-(septiembre-agosto) 2019.....43

Tabla 21:  $\delta$  13-(julio-junio) 2020 .....44

Tabla 22:  $\delta$  13-(agosto-julio) 2020.....44

Tabla 23:  $\delta$  13-(septiembre-agosto) 2020.....44

---

## Índice de imágenes

Ilustración 1: Ortomosaico en 3D de viñedo objeto de estudio. ....	10
Ilustración 2: Imagen espacial color real RGB área parcelar de estudio.....	12
Ilustración 3: Polígono (RGB) enmascarando el área de estudio.....	13
Ilustración 4: Imagen pseudocolor en 4 gamas representando los puntos del R13.....	14
Ilustración 5: A) Mikrokopter junto a B) cámara espectral y C) térmica . ....	15
Ilustración 6: Regiones del espectro electromagnético . ....	18
Ilustración 7: Definiciones de reflectancia.....	19
Ilustración 8: Firmas típicas del espectro (Desde la parte visible hasta el medio infrarrojo) de la vegetación y el suelo. ....	20
Ilustración 9: Ubicación geomática de puntos de R 13 sobre la parcela de estudio.....	23
Ilustración 10: Variación en el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en el viñedo 'Tempranillo' de 7,5 ha . ....	33
Ilustración 11: A) Termografía que indica los valores del ratio isotópico de carbono 2015. B) Mapa independiente de los puntos de valores del ratio isotópico de carbono 2015. ....	33
Ilustración 12: NVDI y puntos del R13 junio 2017. ....	38
Ilustración 13: NVDI y puntos del R13 julio 2017. ....	38
Ilustración 14: NVDI y puntos del R13 agosto 2017. ....	38
Ilustración 15: NVDI y puntos del R13 septiembre 2017. ....	39
Ilustración 16: NVDI y puntos del R13 junio 2019. ....	39
Ilustración 17: NVDI y puntos del R13 julio 2019. ....	39
Ilustración 18: NVDI y puntos del R13 agosto 2019. ....	40
Ilustración 19: NVDI y puntos del R13 septiembre 2019. ....	40
Ilustración 20: NVDI y puntos del R13 junio 2020. ....	40
Ilustración 21: NVDI y puntos del R13 julio 2020. ....	41
Ilustración 22: NVDI y puntos del R13 agosto 2020. ....	41
Ilustración 23: NVDI y puntos del R13 septiembre 2020. ....	41

**Agradecimientos:**

Este trabajo no hubiera podido ser posible sin la colaboración generosa y continua del profesor Gonzaga Santesteban y del grupo de investigación de viticultura de la UPNA quienes me permitieron tener acceso a los estudios realizados por el grupo. Agradezco también a mi compañera Lorie Hébert por su infinita paciencia para conmigo.

Este trabajo ha contado con el apoyo del Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales (CEIGRAM) en su convocatoria de ayudas a jóvenes investigadores de 2020”.

### Abstract

Remote sensing techniques have become the newest and most versatile tools for precision viticulture, characterized by high precision and accuracy, flexibility, and low operating costs. Multispectral and thermal infrared images acquired from satellites and an unmanned aerial vehicle (UAV) can become a key master tool to solve problems linked to crop agricultural water management, giving a quick determination of canopy surface temperature, its relationship with transpiration and the relative degree of plant water stress. However the use of these useful tools in an independent way tend to be limited in technical practical applications. That's the reason this work wants to evaluate the combination's performance of these remote sensing techniques accompanied with the Isotopic ratio of carbon. After processing the satellite information and the statistical analysis between the values of NVDI and those of ( $\delta^{13}C$ ) between the months of June and September between the years 2017, 2019 and 2020, positive correlations were obtained that suggest that the satellite images provided by Sentinel II may have a high potential to identify areas with water stress and the use of the carbon isotopic ratio is recommended in the samples taken in that area to verify the stress situation.

### Résumen

Las técnicas de teledetección se han convertido en las herramientas más nuevas y versátiles para la viticultura de precisión, caracterizadas por su alta precisión y exactitud, flexibilidad y bajos costos operativos. Las imágenes termográficas y multiespectrales adquiridas de los satélites o de un vehículo aéreo no tripulado (UAV), pueden convertirse en una herramienta clave para resolver problemas relacionados con la gestión del agua de los cultivos, proporcionando una determinación rápida de la temperatura de la superficie de la canopi, su relación con la transpiración y el relativo grado de estrés hídrico de la planta, sin embargo, el uso de estas útiles herramientas de manera independiente tiende a ser limitado en las aplicaciones técnicas y prácticas. Esa es la razón por la que este trabajo quiere evaluar el rendimiento de la combinación de estas técnicas de teledetección acompañadas del ratio isotópico de carbono. Tras procesar la información satelital y hacer el análisis estadístico entre los valores de NVDI y los de ( $\delta^{13}C$ ) entre los meses de junio y septiembre entre los años 2017, 2019 y 2020, se obtuvieron correlaciones positivas que sugieren que las imágenes satelitales proporcionadas por el Sentinel II pueden tener un alto potencial para identificar áreas con estrés hídrico y se recomienda el uso de la relación isotópica de carbono en las muestras tomadas en esa área para verificar la situación de estrés.

---

## Introducción:

Las características geográficas de la península ibérica y sus territorios insulares presentan una variabilidad en precipitaciones y temperatura. Estos factores, sumados al cambio climático, hacen que la producción de la vid presente unos desafíos considerables para los productores españoles. En los últimos años, el número de días secos por año ha aumentado en el sur de Europa (Luterbacher et al., 2006), y es probable que esta tendencia aumente en el futuro, según escenarios de cambio global (Petit et al., 1999; Miranda et al., 2006). Esto tendrá un impacto en la viticultura. (Schultz, 2000). Una gran proporción de viñedos se encuentran en regiones con sequía estacional (por ejemplo, clima de tipo mediterráneo) donde el suelo y los déficits de agua atmosférica, junto con altas temperaturas, ejercen grandes limitaciones en el rendimiento y calidad. En las últimas décadas, el número de días secos por año ha aumentado en el sur de Europa (Luterbacher et al., 2006). Las características climáticas de buena parte del territorio hacen que, en muchas ocasiones, se produzcan golpes de calor intensos o sequías prolongadas, incluso plurianuales, que pueden causar mermas o pérdidas importantes en la producción de la vid. Para el Seguro Agrario Español, existe la **necesidad de contar con unos métodos prácticos y eficaces** que permitan realizar el peritaje de los daños reales por sequía en los viñedos. Sin embargo, existe una gran dificultad para realizar estas evaluaciones en campo, debido principalmente, a la gran superficie de viñedo, el gran número de personal necesario para efectuar las valoraciones de daños, los costos de desplazamiento que genera dicha peritación, entre otros. Es por ello por lo que las tecnologías de teledetección; que incluyan la adquisición de **imágenes multiespectrales** y de **imágenes térmicas**; pueden jugar un papel preponderante en la evaluación de las áreas afectadas por sequía; aumentando la eficacia de los datos generados y una reducción de costos considerable. En cualquier caso, los trabajos realizados hasta la fecha ponen en evidencia **las limitaciones de las imágenes espectrales y térmicas para determinar por sí solas si los daños son consecuencia del estrés hídrico**. Así, las imágenes multiespectrales reflejan el desarrollo vegetativo de las cepas y pueden dar idea de si existe una degradación de la clorofila, pero un bajo crecimiento, o una degradación temprana de las hojas, **pueden obedecer a causas diferentes de la sequía**. En cuanto a las termografías, para ser útiles, han de realizarse en el momento en el que se está produciendo el déficit, por lo que su utilidad práctica resulta limitada. En base a lo anterior, en este trabajo se plantea el potencial del

uso combinado de las tecnologías de teledetección y del indicador del ratio isotópico del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) en uvas o mostos, para estimar sus posibles aplicaciones en los cultivos de la vid.

### Objetivos:

En este trabajo de maestría se desea evaluar el potencial de las imágenes satelitales del NVDI, para la detección del estado hídrico de la planta; A su vez, se busca encontrar una correlación del estado hídrico del viñedo a nivel parcelar utilizando el Ratio isotópico de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) como indicador subrogado del estrés hídrico. También se quiere observar si el uso de la termografía puede mejorar las predicciones de dicho estrés hídrico en situaciones concretas.

### Antecedentes:

La agricultura de precisión se refiere al uso de múltiples tecnologías para gestionar el espacio y variabilidad temporal asociada con la producción agrícola, mejorando el rendimiento de los cultivos, beneficios económicos y calidad ambiental al limitar el uso de contaminantes (Pierce et al., 1999). En viticultura, se utilizan técnicas de agricultura de precisión para mejorar el uso eficiente de insumos (por ejemplo, fertilizantes y productos químicos), pronóstico de rendimiento, cosecha selectiva de la calidad de la uva, y estar de acuerdo con las necesidades reales (por ejemplo, nutrientes y agua) de cada parcela dentro del viñedo (Arnó et al., 2009). Se han desarrollado nuevas tecnologías para la gestión, seguimiento y control de viñedos. Los sensores remotos y proximales se convierten en instrumentos fiables para mostrar el estado general del viñedo, esencial para describir la variabilidad espacial de los viñedos en alta resolución y dar recomendaciones para mejorar la eficiencia de la gestión (Matese et al., 2015).

La agricultura de precisión (PA) es una disciplina relativamente nueva, la cual se inició a mediados de los 80s, y ha sido clasificada entre los diez más grandes desarrollos en la agricultura en las últimas décadas. (Crookston, 2006). Existen diferentes definiciones que se han dado a la agricultura de precisión, no es recomendable utilizar de manera aislada solamente una, pues su aplicación de forma sinérgica puede explicar mejor el verdadero significado de esta disciplina, la cual se desarrolló con más ahínco en la década de los 90s en Estados Unidos (Basso et al., 2006). En cuanto

a (Matese et al., 2015) la definen como el manejo de la heterogeneidad de los cultivos en cada zona específica, tanto a escala temporal como espacial, con el fin de aumentar la eficiencia de los insumos agrícolas para incrementar el rendimiento, la calidad y la sostenibilidad de las producciones. (McBratney y Whelan, 2001), explican que La AP intenta desarrollar sistemas agrícolas integrados basados en la información y la producción, diseñados para optimizar la productividad a largo plazo, de forma localizada y a nivel de toda la explotación, minimizando los impactos en el medio ambiente.

En una publicación de Santesteban en el 2019, la viticultura de precisión es definida como el área de la agricultura de precisión (AP) dedicada a la gestión de los viñedos. La implementación de técnicas de la AP en viticultura, es decir, el desarrollo de la Viticultura de precisión (PV,) ocurrió significativamente más tarde que en otros cultivos, y Solo después de mediados de la década del 2000 cuando comenzaron las aplicaciones comerciales y de investigación en la energía fotovoltaica. Este comienzo un poco tardío no sucedió por falta de interés de los viticultores, sino por las dificultades intrínsecamente asociadas a las características del viñedo, como lo son: el tener una canopi discontinua y organizada en hileras, la cual requiere una mayor resolución imágenes para discriminar esta misma del suelo, y una mayor capacidad de cálculo para gestionar la información espacial de los viñedos antes de su uso (Matese et al., 2015).

El aspecto técnico más estudiado en profundidad hasta la fecha la PV, es su utilidad potencial como base para segmentar la cosecha de uvas del mismo viñedo en diferentes lotes antes de la elaboración del vino (Bramley et al., 2011; Santos et al., 2012). Segmentar las uvas en lotes es particularmente relevante, ya que mezclar uvas de diferentes especificaciones de calidad, da como resultado un vino de "calidad media", ya que algunos caracteres encontrados en uvas de baja calidad (es decir: taninos inmaduros, herbáceos aromas) se sabe que prevalecen en el vino, incluso cuando solo una pequeña proporción de uva con esas características ha estado en contacto con el resto (Gambutí et al., 2007; Kontoudakis et al., 2011). La aplicación de una segmentación correcta de las uvas en el viñedo puede aportar un incremento en el beneficio final estimado entre el 10 y el 30% en experiencias prácticas en Australia (Bramley et al., 2011; Bramley et al., 2005).

Los esfuerzos de investigación en viticultura de precisión demuestran la viabilidad de la teledetección como un método consistente para estudiar la variabilidad espacial del viñedo (Hall et

all., 2007) y puede usarse para evaluar el estado hídrico del viñedo. El uso de la teledetección aerotransportada está aumentando actualmente debido a la flexibilidad temporal superior y la adquisición de imágenes de mayor resolución, en comparación con las plataformas satelitales. Recientemente, se han utilizado sensores digitales miniaturizados a bordo de vehículos aéreos no tripulados, que proporcionan resoluciones espectrales y espaciales muy altas. El trabajo de investigación realizado para detectar el estrés hídrico y nutricional en los cultivos se ha realizado con éxito utilizando UAVs (sistemas aéreos no tripulados) (Berni et al., 2009; Zarco-Tejada et al., 2008), lo que demuestra su viabilidad para aplicaciones de agricultura de precisión. Los UAVs han sido incorporados recientemente a la teledetección para monitorear los viñedos debido a su gran versatilidad y flexibilidad, sus bajos costos operativos y una alta resolución espacial (Matese et al., 2015). La viticultura ha mostrado los mayores avances tecnológicos entre todos los sectores agrícolas gracias al mayor margen de beneficio resultante de la producción de vino de alta calidad. En este escenario, los UAVs han demostrado ser rentables, reduciendo los insumos y el impacto ambiental de las actividades agrícolas. De los 395.000 UAVs europeos que se espera desplegar en 2035, se ha calculado que 150.000 se utilizarán exclusivamente en el sector agrícola. El uso de UAVs en agricultura está bien establecido, pero actualmente no hay un estado del arte enfocado únicamente en la aplicación específica de teledetección UAVs en la viticultura.

## Materiales y Métodos



*Ilustración 1: Ortomosaico en 3D de viñedo objeto de estudio.*

## Caracterización del viñedo

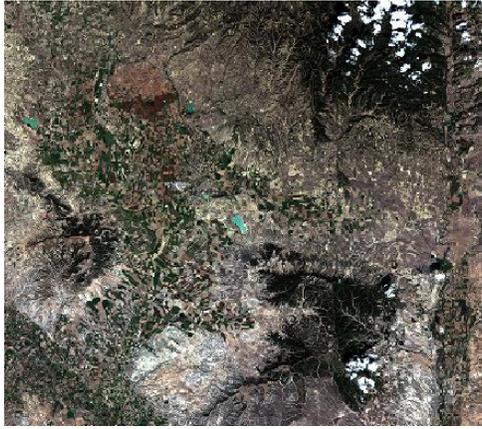
El trabajo experimental se realizó en un viñedo de 7,5 ha sembrado con Tempranillo el cual se encuentra ubicado en Traibuenas, Navarra, España (42°22 20,1 N 1°37 34,2 W, WGS84, Altitud: 328 m), en una región caracterizada por un clima semiárido. (Tipo Bs en la clasificación de

Koppen; P <350 mm; ETPPenman> 1150 mm). Se han seleccionada dos parcelas contiguas denominadas Cascajo y Carretera respectivamente, se realizó la toma de imágenes y de datos en los vuelos ejecutados el año 2015 sobre la parcela de Cascajo, y la toma de imágenes y de datos de vuelo sobre la parcela de Carretera se desarrolló en los años 2017, 2019 y 2020 , Los mapas obtenidos con las imágenes captadas con el UAV fueron las del VI (índice de volumen), y las del NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), y estas a su vez fueron comparadas con los mapas agronómicos obtenidos del IRC (Ratio isotópico del carbono). El viñedo está formado como un cordón vertical posicionado como un cordón bilateral, el número de yemas se fijó en 12 yemas por m de línea de hilera, el espaciamiento de plantas es de 3 m entre hileras y 1 m dentro de la hilera. El viñedo tenía 18 años al comienzo del experimento, se manejó de acuerdo con las prácticas estándar en el área, y las vides no se vieron afectadas de manera significativa por plagas o enfermedades, con la única excepción que un escaso 2% de las cepas presentaban síntomas de esca de forma moderada. Se caracterizó la variabilidad espacial dentro del viñedo estableciendo dos rejillas de muestreo. El primero, dedicado a la caracterización agronómica del viñedo, estaba compuesto por 92 puntos de muestreo (SPs), y seguía un patrón rectangular relativamente regular con una distancia media de  $25 \times 25$  m entre SPs. La segunda cuadrícula se dedicó a la caracterización del estado hídrico de la vid, siguiendo un patrón irregular conformado por 14 puntos de medición del estado hídrico (PSA). En cada SP y WSP, se marcaron 10 cepas ubicadas en dos hileras adyacentes, y todas se utilizaron para las mediciones experimentales.

Composición de uva en cosecha: unas 300 uvas se tomaron como una muestra en cada SP para determinar el peso de la baya (BW) así como los principales parámetros de composición. Después de la trituración, se midió la concentración total de sólidos solubles (TSS) con un refractómetro de compensación de temperatura RFM840 (Bellingham-Stanley Ltd., Kent, Reino Unido), el pH y la acidez titulable (TA) usando un auto-titulador pH-Burette 24 (Crison, Reino Unido). Barcelona, España), la concentración de ácido málico (MalA) y tartárico (TarA) se midió enzimáticamente utilizando un autoanalizador (Easychem, Systea spa, Italia). mientras que el nitrógeno asimilable por levaduras (YAN) se estimó siguiendo el procedimiento descrito por Aerny (1996) con las modificaciones detalladas en García et al. (2011). El contenido total de antocianinas (TAnt) se evaluó después de 4 h de extracción a pH = 1.0 siguiendo la metodología descrita en Glories y Agustín (1993).

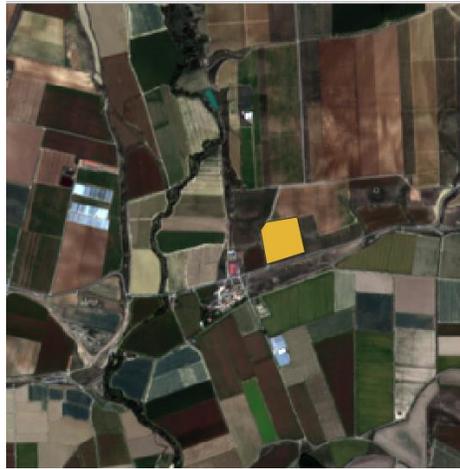
El Ratio isotópico de carbono ( $^{13}\text{C}$ ) fue tomado en muestras de 50 bayas recolectadas en la cosecha, luego secadas al horno y molidas en un polvo fino homogéneo, y analizadas usando un analizador elemental (NC2500, Carlo Erba Reagents, Ródano, Italia) acoplado a un espectrómetro de masas isotópico (Thermoquest Delta Plus, ThermoFinnigan, Bremen, Alemania) como se detalla en Santesteban et al. (2012). Esta medición se realizó en los años 2015, 2017, 2019 y 2020.

### Recopilación de la información y procesamiento



*Ilustración 2: Imagen satelital color real RGB de la zona de la parcela de estudio.*

La recopilación de los datos de teledetección se realizó en las campañas 2015 para la parcela de cascajo y en las campañas del 2017, 2019 y 2020. Para la obtención de las imágenes satelitales en la parcela de Carretera, se utilizaron imágenes extraídas del banco de datos del satélite europeo Sentinel Copernicus 2 y para la parcela de cascajo se tomaron las imágenes de un estudio previo del grupo de viticultura de la UPNA. La misión espacial Sentinel II, comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol, en fases a  $180^\circ$  entre sí. Su propósito es el de monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre.



*Ilustración 3: Polígono (RGB) enmascarando el área de estudio.*

Para la recopilación de datos, se extrajeron 4 imágenes por año comprendidas entre los meses de junio hasta septiembre. Posteriormente se realizó el procesamiento de estas a través del programa de ordenador Qgis (Quantum geographical system). De cada archivo anual de imágenes se procedió a la extracción de las bandas 2, 3, 4 y 8 para calcular el color verdadero (RGB) y la banda del espectro cercano (NIR). Al seleccionar las bandas se pudo obtener una imagen con los colores reales que se pueden percibir por el ojo humano, y además se utilizaron las bandas 4 y 8 para la ejecución de la imagen NVDI definitiva. Posteriormente se digitalaron las coordenadas y se localizó el punto geográfico exacto de la parcela, luego se procedió a la extracción de la imagen parcelaria a través de la creación de un polígono digital el cual permitió sobremontar los puntos digitales donde se habían ejecutado las mediciones del ratio isotópico del carbono.

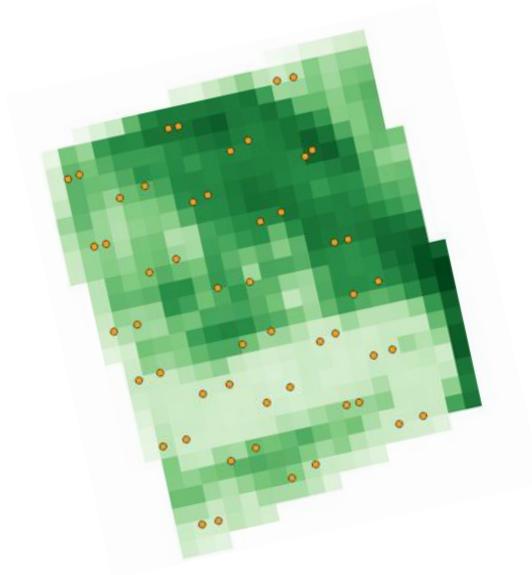


Ilustración 4: Imagen pseudocolor en 4 gamas representando los puntos del R13.

La plataforma UAV usada y su respectiva carga útil, para la captación de imágenes en el año 2015 era un Mikrokopter Okto XL multirrotor modificado (HiSystems GmbH, Moomerland, Alemania), descrito en detalle en (Matese et al, 2015). Este incluía un hardware premontado y un módulo GPS V3.0 como sistema de posicionamiento, capaz de transportar una carga útil de 2 kg durante 15 minutos de vuelo. La comunicación de los parámetros de vuelo con el operador de tierra fue proporcionada por un enlace de radio a 2,4 GHz, mientras que otro canal a 5,8 GHz se utilizó para la transmisión de datos de teledetección. El núcleo del sistema UAV es un panel de control de vuelo (FlightCtrl), basada en un microcontrolador ATmega1284P (Atmel Corporation, San José, CA, EE. UU.), el cual se comunica con los ocho controladores sin escobillas mediante un bus serie bidireccional de dos cables (I2C). El sistema Integra un sensor de presión y acelerómetros de 3 ejes para calcular y alinear el UAV con la gravedad. El controlador de vuelo (FlightCtrl) está vinculado a un tablero de control de navegación (NaviCtrl), equipado con un microcontrolador ARM9 (Atmel Corporation, San José, CA, EE. UU.) Y una tarjeta de ranura MicroSD para almacenamiento de datos de waypoint. Un sistema de sensor de navegación integrado basado en una brújula digital 3D para monitorizar la rotación del eje z (guiñada) y un módulo LEA-6GPS (U-blox AG, Thalwil, Suiza) con un error circular de unos 2 m, permiten varios niveles de vuelo autónomo. El UAV está conformado por ocho tarjetas de control ATMEGA8 (Atmel Corporation, San José, CA, EE. UU.), Dedicadas a la gestión de cada motor brushless con un tiempo de respuesta muy rápido (menos de

0,5 ms). El proceso de planificación de vuelo se realizó con el software Mikrokopter Tools, que permite al usuario generar una ruta o waypoints, en función del campo de visión del sensor (FOV) estableciendo así la superposición entre las imágenes y la resolución del terreno necesaria. Un soporte de cámara universal equipado con tres servomotores permite una correcta adquisición de la imagen corrigiendo los efectos de inclinación y balanceo. Se utilizó una FLIR TAU II 320 (FLIR Systems, Inc., EE. UU.) Para la adquisición de datos térmicos se utilizó un sensor optimizado para aplicaciones UAV, este tiene un tamaño mínimo ( $44,5 \times 44,5 \times 30,0$  mm) y un peso (72 g). Las características del sensor de imagen, es decir,  $324 \times 256$  píxeles y  $24^\circ \times 18^\circ$  FOV con una distancia focal fija de 19 mm, permiten obtener imágenes de unos  $40 \times 30$  m en el suelo, con una resolución de 0,13 m / píxel a 100 m de altitud de vuelo. La cámara está equipada con un sensor no refrigerado capaz de medir la radiación de onda larga en el rango espectral de 7,5 a 13 m. La calibración radiométrica se llevó a cabo en el laboratorio, utilizando blackbodies (cuerpos oscuros) bajo diferentes temperaturas ambiente y objetivo para desarrollar algoritmos de calibración radiométrica siguiendo el procedimiento descrito en Berni et al. (2009).

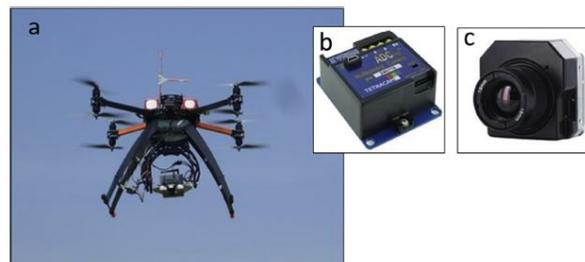


Ilustración 5: A) Mikrokopter junto a B) cámara espectral y C) térmica.

### Campaña de vuelo

Los vuelos se realizaron al comienzo del invierno, el sitio fue monitoreado con un estudio de vuelo único a 70 m sobre el nivel del suelo al mediodía solar, proporcionando una resolución de imagen de 9 cm pixel-1ground. La configuración de la cámara se estableció en una exposición fija con disparo automático a una frecuencia de 2 s. La trayectoria o (waypoint) se generó para obtener un 80% de superposición tanto entre fotos (superposición hacia adelante) como entre líneas de vuelo (superposición lateral), con el fin de lograr la mayor precisión en el paso de elaboración de mosaicos. Las imágenes se registraron en condiciones de radiación homogénea y estable, en

condiciones de cielo despejado y sin viento. La adquisición térmica por parte del UAV se realizó entre las 13:00 a las 14:30 h mediante cinco vuelos consecutivos de 15 min cada uno. Poco después de la imagen térmica. La adquisición por el UAV (5-10 min más tarde)

### Procesamiento de datos de imagen

La emisividad de la hoja adquirida en el espectro infrarrojo térmico regional permitió el cálculo del estrés hídrico relacionado con la temperatura de la hoja, a través de la estimación del CWSI (índice de estrés hídrico del cultivo) utilizando la ecuación modificada. (1) derivado de (Jackson et al., 1988):

$$CWSI = (T_s - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$$

### Evaluación de la relación entre el CWSI y el estado hídrico de la planta

Para evaluar la correspondencia instantánea entre la caracterización del estado del agua mediante técnicas proxy estándar e imágenes térmicas, los valores g de arena medidos en el WSP en el día de la campaña de vuelo se compararon con su análisis de regresión mediante CWSI.

A escala estacional, la evaluación de la idoneidad de las imágenes térmicas adquiridas en una fecha para estimar la variabilidad estacional en el estado del agua a lo largo del campo se realizó mediante un enfoque de modelado espacial. El modelado espacial del potencial hídrico foliar a lo largo del viñedo se realizó de acuerdo con el enfoque propuesto por Acevedo-Opazo et al. (2010a, 2010b, 2008). En este enfoque, una (o más) variables auxiliares, cuya distribución espacial es bien conocida, se combina con la información del estado del agua de la planta en un sitio de referencia para elaborar un modelo que estima el estado del agua de la planta. el mismo procedimiento considerado por Herrero-Langreo et al. (2013), donde se pueden encontrar más detalles sobre la metodología. Siguiendo ese procedimiento, consideramos la relación de los isótopos de carbono ( $^{13}C$ ) medida en el 92 SP en la temporada anterior como la variable auxiliar, y el PSA más estresado como el sitio de referencia. El modelo se calibró y probó utilizando las mediciones de

todos los PSA, considerando las mediciones realizadas semanalmente en 2015. El potencial hídrico foliar promedio estacional en cada PS podría luego estimarse a partir del modelo. Se calcularon modelos independientes para s-mand s-n. Siguiendo el enfoque empírico propuesto por Acevedo-Opazo et al. (2008).

### El sistema de teledetección

La viticultura de precisión ha recibido un impulso significativo gracias al desarrollo tecnológico de la teledetección. Se han utilizado satélites, aeronaves y, más recientemente, sistemas UAVs para el registro de información, a una distancia con diferentes escalas de resolución sobre un área grande en un tiempo relativamente corto (Matese et Di Gennaro, 2015). En particular, los UAVs, controlados remotamente desde el suelo, permiten recopilar imágenes infrarrojas térmicas, multiespectrales y visibles sincronizadas y georreferenciadas, con un tiempo de planificación reducido y una resolución espacial en tierra adecuada (típicamente 8-10 cm / píxel para reflectancia y 15-20 cm / píxel para mediciones térmicas a una distancia de 100 m. Hasta hace cinco años, las imágenes de satélite eran la principal herramienta para observar el crecimiento de los cultivos en los campos agrícolas. En el momento de adquirir imágenes con un UAV, en realidad se está practicando la teledetección, la cual puede ser explicada como la ciencia de adquirir información sobre la superficie de la tierra sin estar realmente en contacto con ella. En este proceso, el sol actúa como fuente de luz. La luz viaja desde el sol a través de la atmósfera e interactúa con la superficie de la tierra. Una cámara debajo del UAV detecta y registra la luz reflejada. Posteriormente, la imagen resultante se procesa y analiza mediante un programa de ordenador y se transforma en un mapa. Cuando se toma una imagen con una cámara montada sobre un UAV, se mide la cantidad de luz reflejada que proviene de la superficie terrestre. Las propiedades espectrales de los materiales determinan cómo se refleja la luz en las diferentes zonas del EM (Espectro electromagnético). En la teledetección se mide la cantidad de luz reflejada o reflectancia en función de la longitud de onda. La curva de reflectancia espectral resultante se denomina firma espectral. La reflectancia se indica en el eje y, esta puede tener dos rangos: entre 0 y 1 o entre 0 y 100%. Ambos rangos se utilizan en la práctica. El agua tiene una reflectancia baja en la parte visible. Se refleja muy poca luz y, como resultado, el agua tiene un color oscuro. El suelo seco tiene una alta reflectancia y para nuestros ojos es bastante brillante. La vegetación se encuentra entre el agua y el

suelo seco en el espectro visible, pero tiene una reflectancia característicamente alta en la región del infrarrojo cercano. No se puede apreciar este fenómeno simplemente con los ojos, pero se puede medir con una cámara de infrarrojos.

### Reflectancia: definiciones y firma espectral de la vegetación

El ojo humano, puede observar la parte visible del espectro electromagnético (EM). El EM se refiere a todo el rango de luz incluyendo aquel que no puede ser visto por el ojo humano, el cual puede medirse con cámaras o sensores especialmente adaptados para esta tarea, por ejemplo, el infrarrojo (IF) o el ultravioleta (UV) hacen parte del EM que no pueden ser vistos simplemente con los ojos, pero, si con cámaras diseñadas específicamente para este menester. También se puede medir la luz reflejada fuera de la parte visible del espectro, de esta manera, lo que es invisible para el ojo humano, se vuelve visible en las imágenes de la cámara. Las regiones específicas del EM están indicadas por su longitud de onda. Por ejemplo, la luz visible tiene una longitud de onda entre 400 y 700 nm. Además, la parte infrarroja con una longitud de onda entre 700 y 2500 nm es una región importante para la teledetección.

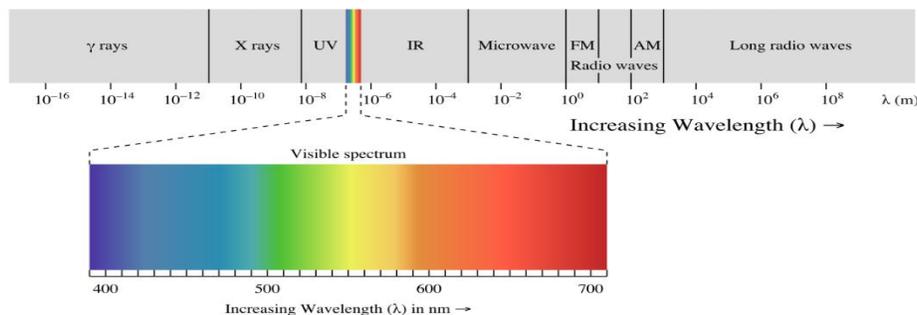
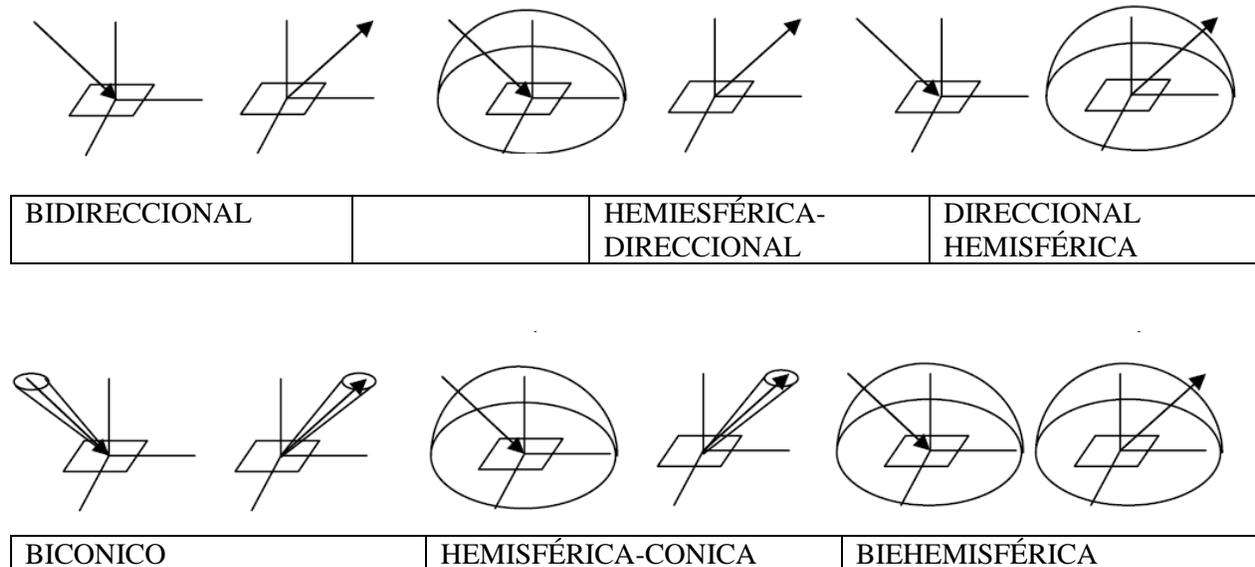


Ilustración 6: Regiones del espectro electromagnético.

El patrón de reflectancia angular de la canopi es de particular interés para diagnosticar el estado fisiológico de las plantas. Se pueden encontrar varias definiciones de reflectancia en la literatura (Siegel et Howell, 1972) se basan en la característica de radiación incidente y reflejada. La figura 3 proporciona algunos ejemplos pictóricos de diferentes cantidades de reflectancia que van desde la condición bidireccional (una sola dirección para las radiancias incidente y reflejada) hasta la condición bihemisférica (tanto la iluminación como la reflexión están integradas en el hemisferio). Como lo describen (Schaeppman et al, 2006), en la teledetección la condición de medición más

común en el campo es la configuración hemisférica-cónica. Esta definición asume la radiación incidente de la superficie que consiste en una mezcla de componentes solares directos y difusos que crean un campo de iluminación que es hemisférico en extensión angular. Por otro lado, el campo de visión del instrumento de medición implica un resplandor reflejado adquirido dentro de un ángulo sólido finito.



*Ilustración 7: Definiciones de reflectancia.*

La variación de la reflectancia con la longitud de onda de la vegetación, en los rangos visible e infrarrojo cercano, puede asociarse con la respuesta fisiológica de la planta a las condiciones de crecimiento y adaptaciones al medio. Como se muestra en la Figura 2, en el espectro visible (400-700 nm), la reflectancia de la planta es baja debido a la absorción de los pigmentos fotosintéticos (principalmente clorofilas y carotenoides). En la región infrarroja cercana (700-1300 nm), las discontinuidades estructurales encontradas en la hoja son responsables de los altos valores de reflectancia tanto a nivel de la planta como de la canopi. El borde rojo (680-750 nm) es la longitud de onda de pendiente máxima en el aumento de reflectancia del rojo al infrarrojo cercano, mientras que la región del infrarrojo medio (1300-3000 nm) presenta un perfil de reflectancia afectado por las características de absorción del agua. y otros compuestos. De particular relevancia es la diferencia entre la alta reflectancia de la radiación infrarroja cercana y la baja reflectancia (alta

absorción por clorofila) de la radiación roja, ya que puede estar relacionada con el estado vegetativo, como se describe en la figura.

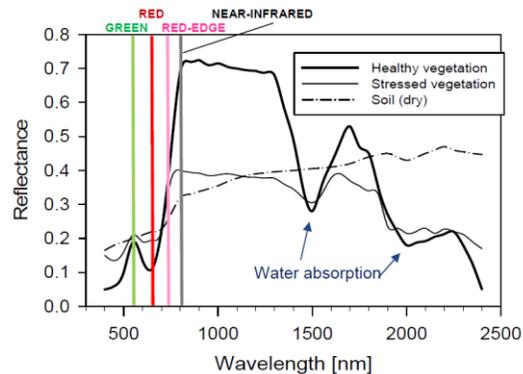


Ilustración 8: Firmas típicas del espectro (Desde la parte visible hasta el medio infrarrojo) de la vegetación y el suelo.

### Imágenes térmicas del infrarrojo

El uso de imágenes térmicas infrarrojas de la vegetación se remonta a los años 60 (Fuchs et Tanner, 1966). El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), introducido por (Jackson et al, 1981) y calculado a partir de una combinación de la temperatura de la superficie de la canopi y factores ambientales (como radiación neta, déficit de presión de vapor, velocidad del viento), se puede utilizar de manera eficiente para mapear la variabilidad espacial de los déficits hídricos. El reciente desarrollo de cámaras termográficas portátiles y tecnología de teledetección ha ampliado enormemente las oportunidades para analizar las propiedades térmicas de las canopis de los cultivos y ha ampliado la información disponible sobre el crecimiento y el estado de las plantas.

Un factor importante que influye tanto en la calidad como en la cantidad de uvas de vinificación es el agua: el exceso de agua conduce a un mayor crecimiento vegetativo y rendimiento, pero los parámetros de calidad de la uva, como el contenido de azúcar, la formación de pigmentos, la acidez y la maduración de la madera del vino se ven afectados negativamente. Por el contrario, el estrés hídrico severo induce el cierre de los estomas, provocando una actividad asimilativa muy reducida o nula y un crecimiento de brotes con efectos negativos en el rendimiento de la uva. Mantener un déficit hídrico de leve a moderado y, por tanto, inducir un cierto nivel de estrés puede ser muy beneficioso en el cultivo de la vid, ya que estimula parámetros de calidad óptimos sin comprometer

significativamente el rendimiento. Para lograr esto, el estado hídrico del cultivo debe medirse de manera precisa y confiable con el objetivo de mantener un nivel predeterminado de estrés leve (Möller et al, 2007). La reflectancia en la región del infrarrojo medio presenta una forma ligada principalmente a las características de absorción del agua y otros compuestos y puede ser indicativa del estado hídrico de la planta. Al mismo tiempo, los índices basados en la temperatura de la superficie del follaje o de la canopi son útiles para evaluar la precisión de la detección de estrés hídrico basado en termografía infrarroja aérea y / o terrestre. El indicador del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), utilizado para mapear la variabilidad espacial en los déficits hídricos, se deduce de la termografía de acuerdo con la relación:

$$CWSI = (T_s - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$$

En la termografía, los valores superiores e inferiores, respectivamente. Más precisamente,  $T_{dry}$  es la temperatura de la superficie de una planta que no transpira completamente estresada, mientras que  $T_{wet}$  es la temperatura de la superficie de una planta que transpira bien regada. Los límites superior e inferior de  $T_s$  se pueden calcular teóricamente mediante el balance de energía para una hoja completamente seca y para una hoja bien regada, de la siguiente manera:

$$T_{dry} = T_{air} + (r_{HR} R_{ni}) / (\delta_{air} C_{p, air})$$

$$T_{wet} = T_{air} + (r_{HR} r_{aW} R_{ni} \gamma) / [(\delta_{air} C_{p, air}) (r_{aW} \gamma + r_{HR} \Delta)] - (r_{HR} VPD) / (r_{aW} \gamma + r_{HR} \Delta)$$

donde  $T_{air}$ ,  $\delta_{air}$  y  $C_{p, air}$  son la temperatura ( $^{\circ} C$ ), la densidad ( $kg\ m^{-3}$ ) y el calor específico ( $J\ kg^{-1}K^{-1}$ ) del aire, respectivamente;  $R_{ni}$  es la radiación neta ( $W\ m^{-2}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $Pa\ K^{-1}$ ),  $VPD$  es el déficit de presión de vapor ( $Pa$ ),  $\Delta$  es la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor de saturación con la temperatura ( $Pa\ K^{-1}$ ), mientras que  $r_{HR}$  ( $s\ m^{-1}$ ) y  $r_{aW}$  ( $s\ m^{-1}$ ) son parámetros relacionados con la transferencia de calor de la canopi y las resistencias al vapor de agua, respectivamente ((ver, por ejemplo, (Jackson et al, 1981), ( Jones, 1999). Los límites superior e inferior de la temperatura de la superficie se pueden evaluar en función de factores ambientales como la radiación neta, el déficit de presión de vapor y la velocidad del viento (que afecta tanto la transferencia de calor como la resistencia al vapor de agua) medidos en el campo o deducido por mediciones directas sobre superficies de referencia, secas y húmedas, ya sean naturales o artificiales. Para un cultivo bien regado, el CWSI es típicamente menor que 0.2, mientras que los valores de 0.8-0.9 indican condiciones de estrés hídrico.

---

## El Ratio Isotópico del Carbono

La palabra isótopo se refiere al hecho de que los isótopos son especies de átomos de un elemento químico ubicado en la misma posición en la tabla periódica. Los isótopos de un elemento comparten un número atómico, porque tienen el mismo número de protones, pero su masa atómica y propiedades físicas no son las mismas, ya que el número de neutrones en sus núcleos es diferente. Los isótopos estables mantienen una concentración constante en la Tierra a lo largo del tiempo, mientras que los isótopos radiactivos son átomos que se desintegran a velocidades predecibles y mensurables para formar otros isótopos, emitiendo un electrón nuclear o un núcleo de helio y radiación. Los isótopos estables considerados con más frecuencia en las ciencias de las plantas y el medio ambiente son los incluidos en los elementos C, O, H y N (Marshall et al. 2007). La relevancia de estas formas se debe a su abundancia en la superficie de la Tierra y a su implicación en procesos biológicos relevantes (Adams y Grierson 2001).

Los isótopos estables de otros elementos más pesados, como B, S, Sr y Mg, también se utilizan en la investigación de plantas, aunque con menos frecuencia. Como un ejemplo de aplicación práctica, la abundancia natural de isótopos estables en el vino se puede utilizar para detectar el fraude midiendo las proporciones isotópicas en el etanol y el agua del vino. En un ejemplo, los valores de  $2\text{H} / 1\text{H}$  (D / H) y  $13\text{C} / 12\text{C}$  del etanol se utilizan para detectar la adición de azúcar exógeno antes o durante la fermentación del mosto, como el etanol resultante de los dos azúcares añadidos principales (remolacha y azúcar de caña). tiene proporciones isotópicas diferentes a las del etanol de uva (Dordevic et al. 2013).

Hay dos isótopos de carbono estables en la naturaleza,  $12\text{C}$  y  $13\text{C}$ , y la mayor parte de este elemento se encuentra en la forma más ligera  $12\text{C}$  (98,93%), mientras que el  $13\text{C}$  más pesado representa el 1,07% (Hoefs 2009). El carbono de los tejidos vegetales proviene del que existe en las moléculas de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, fijado mediante la fotosíntesis. Dos procesos discriminan contra el isótopo más pesado durante la fotosíntesis en plantas  $\text{C}_3$ , siendo el principal el hecho de que la enzima carboxilante primaria, ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa-oxigenasa (Rubisco), discrimina contra  $13\text{C}$ , debido a su reactividad intrínsecamente menor al  $13\text{C}$  en comparación con  $12\text{C}$  (27 ‰ según Farquhar et al. 1989). La discriminación del isótopo del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) que ocurre durante el intercambio de gases fotosintético en plantas  $\text{C}_3$  (Farquhar et al., 1982; Farquhar et al., 1988) considera el fraccionamiento de la difusión del  $\text{CO}_2$  a través de la capa límite (2.9‰), de los

estomas (4.4‰), del agua (0.7‰), de la disolución del CO<sub>2</sub> (1.1‰) y el fraccionamiento neto de PEPC y de la actividad de Rubisco (estimado en 29‰). Además, la velocidad de difusión del <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> a través del poro del estoma y la capa límite es también menor que la del <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> (4,4 y 2,9 ‰, respectivamente, según Farquhar et al. 1989). Estos procesos hacen que la firma isotópica del carbono en los tejidos de las plantas sea más baja que la del CO<sub>2</sub> atmosférico. Como el  $\delta^{13}\text{C}$  en el CO<sub>2</sub> atmosférico es relativamente estable, la firma isotópica de carbono de los tejidos vegetales es un buen indicador de la actividad fotosintética. Se ha logrado determinar que el sometimiento prolongado de los tejidos vegetales a un estrés hídrico genera un cierre estomático en la hoja, y la función de discriminación (sea por difusión o síntesis) entre el isótopo <sup>12</sup>C y el <sup>13</sup>C se ven alteradas; produciendo una absorción superior de CO<sub>2</sub> con altos niveles del <sup>13</sup>C al interior de la hoja, en relación con los niveles absorbidos del <sup>12</sup>C. Por consiguiente, se observa una mayor correlación de  $\delta^{13}\text{C}$  con el estado hídrico de la planta, sugiriendo que  $\delta^{13}\text{C}$  se puede considerar como un parámetro indicador del estado hídrico del cultivo, más que de su eficiencia en el uso del agua (EUA), dado que la EUA es una variable en la que influyen más factores además del propio nivel de disponibilidad de agua en el suelo. La principal ventaja que presenta el  $\delta^{13}\text{C}$  es que integra en un solo valor el estrés acumulado a lo largo de la campaña (Santesteban et al 2015), lo que implica que una muestra de mosto tomada en las proximidades de vendimia nos permite **integrar y conocer cuál ha sido el estrés hídrico** a lo largo del verano. La medida del ratio isotópico de carbono es relativamente sencilla, se hace en laboratorios especializados a partir de muestras de uva o de mosto, con un coste analítico de 15-30 €/muestra. En este trabajo se plantea evaluar el interés de este parámetro como herramienta complementaria para la estimación de los daños por sequía.

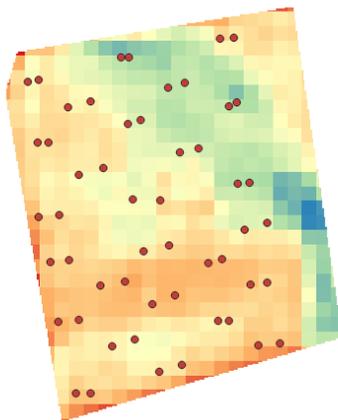


Ilustración 9: Ubicación geométrica de puntos de R 13 sobre una de las parcela de estudio.

En un artículo escrito para la Sociedad Australiana de Viticultura y Enología 2014, Santesteban expresó que, en la última década,  $\delta^{13}\text{C}$  ha sido la relación isotópica más utilizada y, como consecuencia, se dispone de un conocimiento relativamente sólido sobre los principios que influyen en su valor. Para aplicaciones de uso general, las bayas son el órgano más adecuado, ya que se forman durante la época de la temporada en la que ocurre con mayor frecuencia el déficit hídrico, y las determinaciones pueden realizarse en bayas enteras o en mosto. Desde su perspectiva, debido a su bajo costo y gran importancia,  $\delta^{13}\text{C}$  debería medirse no solo en cualquier experimento que trate sobre las relaciones hídricas de la vid y el riego, sino también en cualquier experimento que tenga como objetivo evaluar prácticas agronómicas que podrían modificar indirectamente el estado del agua, por ejemplo, sistemas de aclareo, defoliación y formación de racimos. En estas experimentaciones el  $\delta^{13}\text{C}$  facilitará considerablemente la interpretación de los resultados obtenidos, ya que en ocasiones es difícil determinar si el efecto observado es consecuencia directa o indirecta de prácticas agronómicas diferenciales. De manera similar,  $\delta^{13}\text{C}$  puede convertirse en una poderosa herramienta para la zonificación, ya sea a pequeña escala (es decir, viticultura de precisión) o a mediana escala (es decir, estudios de terroir), ya que una sola medición puede integrar los efectos relacionados con la disponibilidad de agua en el rendimiento de la vid. Desde el punto de vista del usuario final,  $\delta^{13}\text{C}$  también podría tener otras aplicaciones. Por ejemplo, las bodegas podrían estimar el déficit hídrico al que estaban sometidos los viñedos simplemente tomando muestras cerca de la cosecha, y podrían establecer un umbral que los lotes de uva premium no deberían exceder debido a un estrés hídrico excesivo o insuficiente.

## Resultados y discusión

En cuanto a la adquisición de las imágenes satelitales, estas fueron tomadas por el Sentinel 2 y la plataforma Copernicus open Access Hub. Las imágenes que allí se encontraron para este trabajo fueron de excelente calidad (10m / píxel) y permitieron seleccionar y posteriormente separar las bandas sin mayor dificultad para luego procesarlas con el programa de ordenador Qgis. Luego de procesar las imágenes, estas produjeron unos valores de NVDI muy acordes con la parcela estudio según su climatología y características geográficas. Los mapas de los puntos que se tenían en

archivo CSV del  $\delta^{13}C$  pudieron sobremontarse con facilidad para posteriormente identificar los valores de NVDI que correspondían a cada punto.

Con las imágenes satelitales se trabajaron 3 años 2017,2019 y 2020, a cada uno se le generaron 4 imágenes de NVDI de los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Posteriormente se realizó una comparación visual entre cada entre los 4 meses del mismo año. Al realizar la comparación visual de los años 2017 y 2019 no se evidencia una transformación dramática en las coloraciones de los pixeles, lo cual, de manera visual, indica que entre estos meses no se han presentado casos de estrés hídrico aparentes (ver figuras del anexo).

Al realizar la comparación visual de los meses del año 2020, los cambios en las coloraciones son mucho más pronunciados, se puede evidenciar un ligero estrés, el cual se pronuncia entre los meses de julio y agosto. Sin embargo, para la realización de este trabajo, aparte de realizar una inspección visual se compararon los valores de los NVDIs obtenidos con un banco de datos de los años antes mencionados los cuales tenían ya los valores del ( $\delta^{13}C$ ) identificados.

Para realizar la comparación matemática se extrajeron los valores de los pixeles del NVDI donde se encontraban los puntos zonales del ( $\delta^{13}C$ ). luego se realizó una correlación matemática entre los puntos zonales del ( $\delta^{13}C$ ) y los valores del NVDI, los cuales arrojaron los valores que se ven en las siguientes figuras.

Año 2017

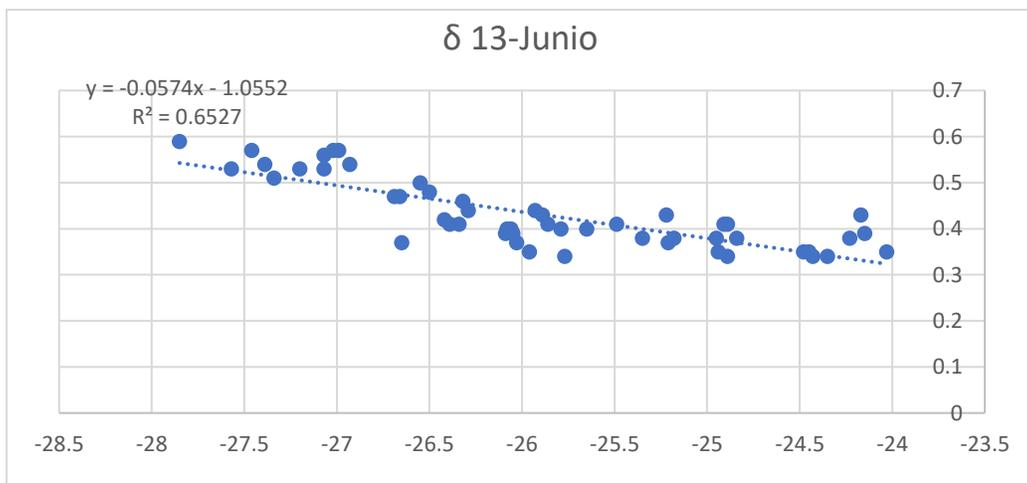


Tabla 1:  $\delta^{13}C$ -Junio /17

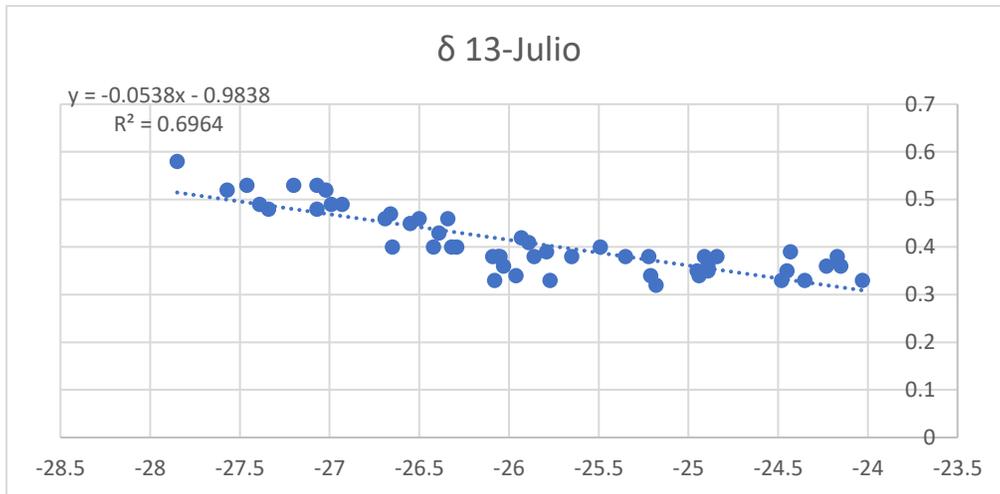


Tabla 2: δ 13-Julio /17

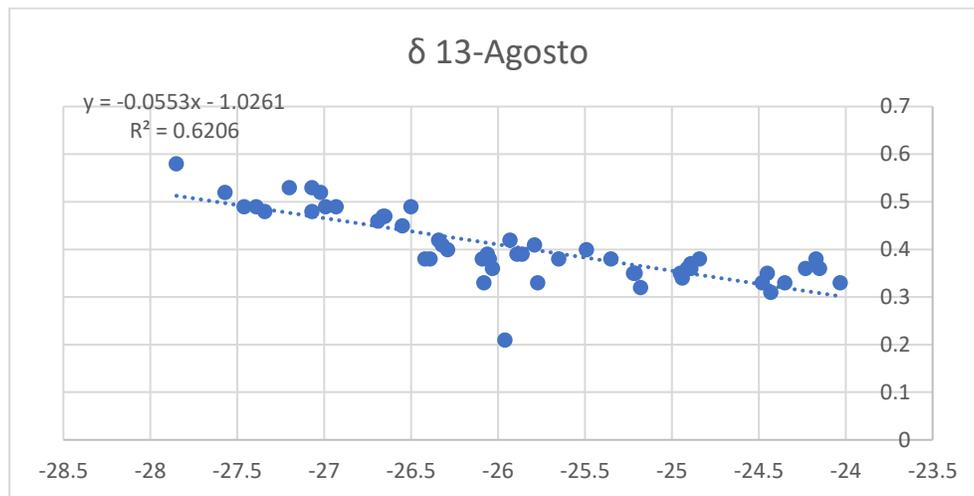


Tabla 3: δ 13-Agosto /17

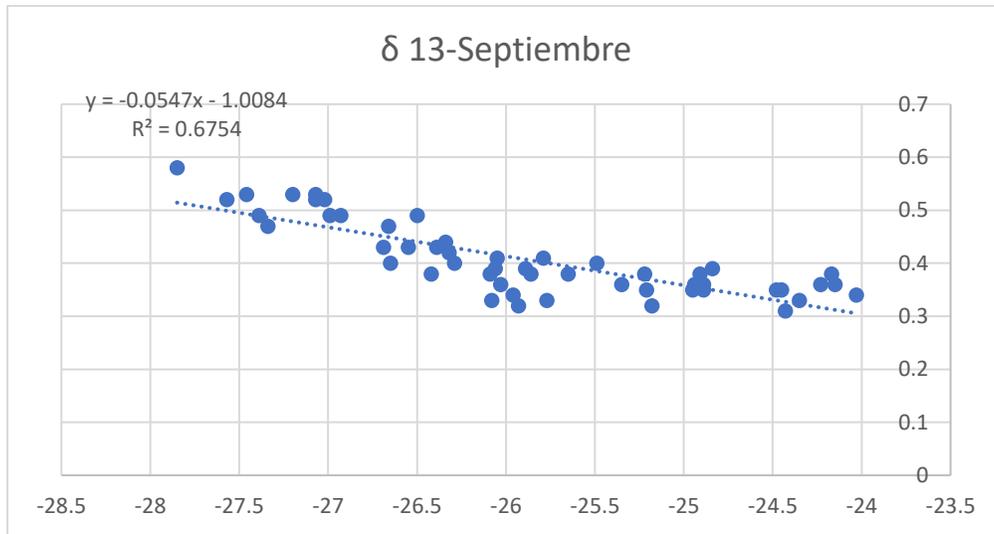


Tabla 4: δ 13-Septiembre /17

Las correlaciones que se presentaron entre los valores del NDVI y los del (δ13C) entre los meses de junio y septiembre del 2017 son las mejores de los 3 años pues sus valores del R<sup>2</sup> rondan valores de 0,66.

Año 2019

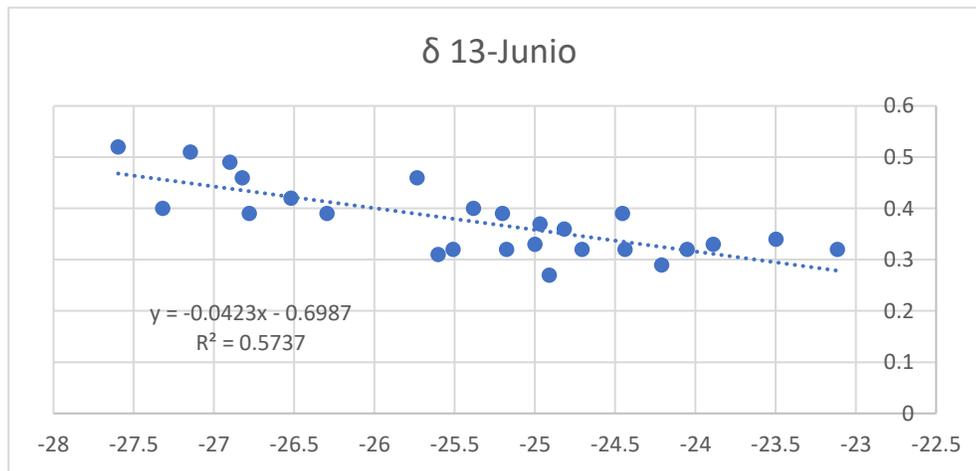


Tabla 5: δ 13-Junio /19

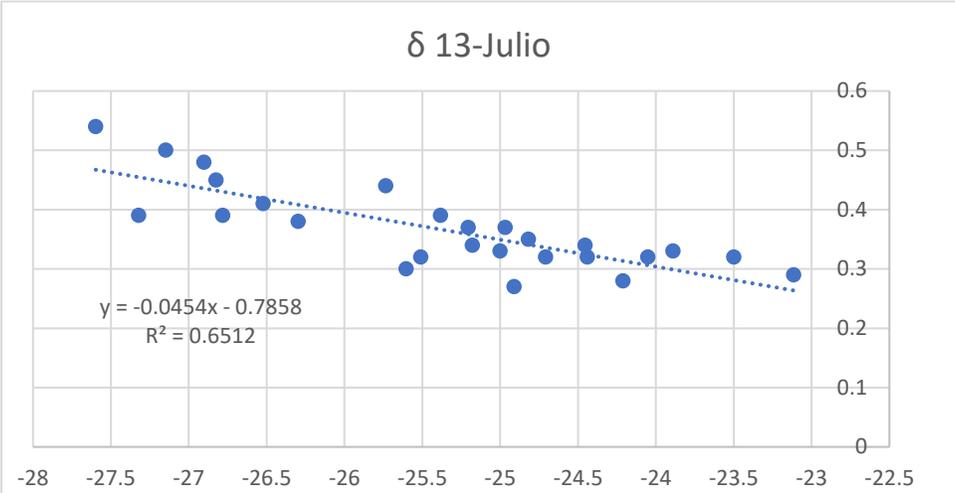


Tabla 6:  $\delta$  13-Julio /19

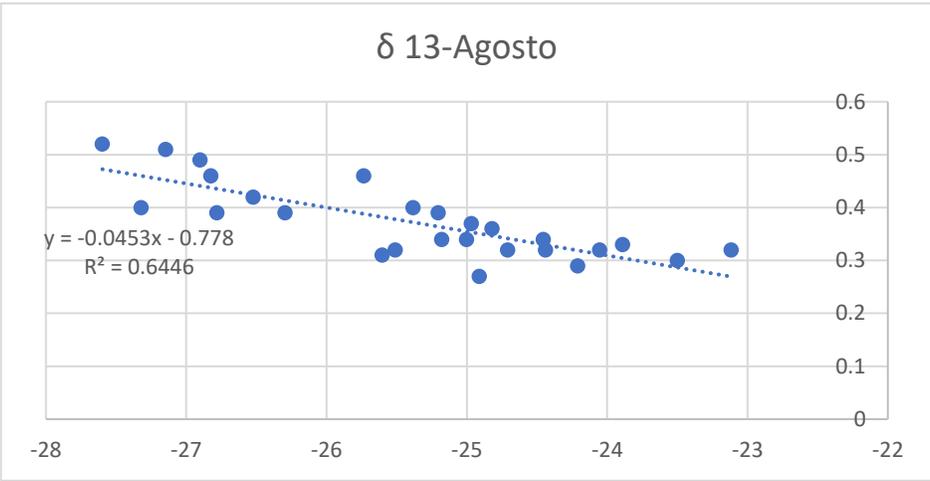


Tabla 7:  $\delta$  13-Agosto /19

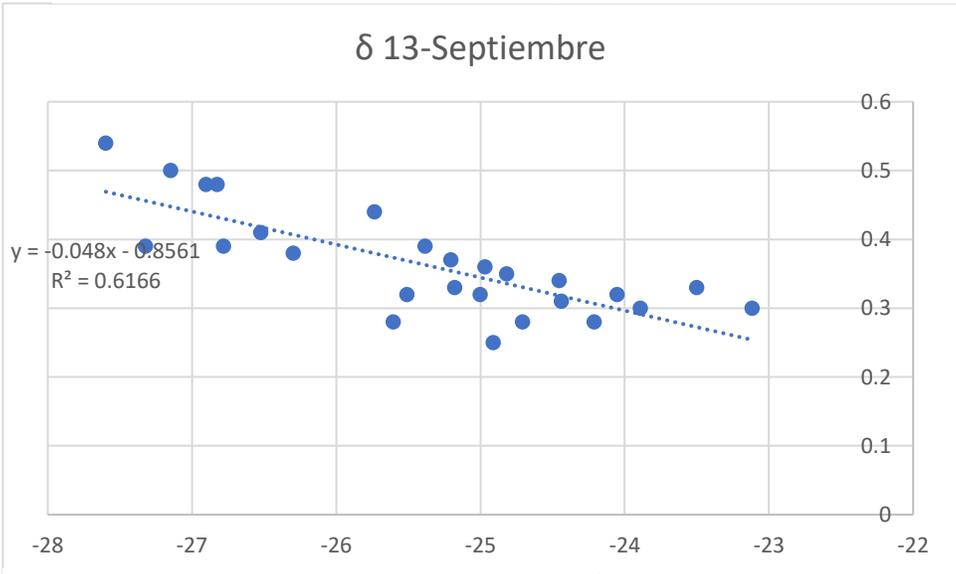


Tabla 8:  $\delta$  13-Septiembre /19

Tal como se puede observar las correlaciones que se presentaron entre los valores del NDVI y los del ( $\delta^{13}C$ ) entre los meses de junio y septiembre del 2019 son muy buenas pues sus valores del  $R^2$  rondan valores de 0,62.

Año 2020

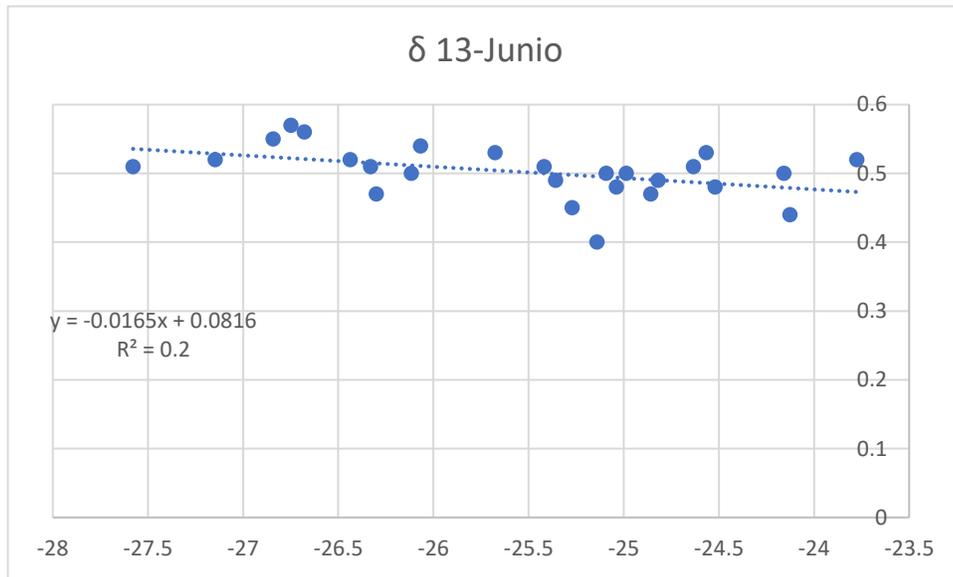


Tabla 9:  $\delta^{13}\text{-Junio} / 20$

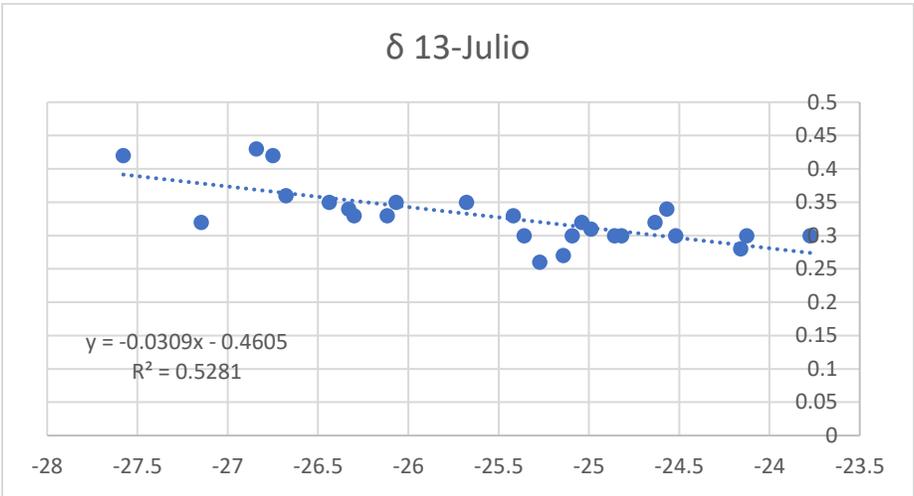


Tabla 10:  $\delta$  13-Julio /20

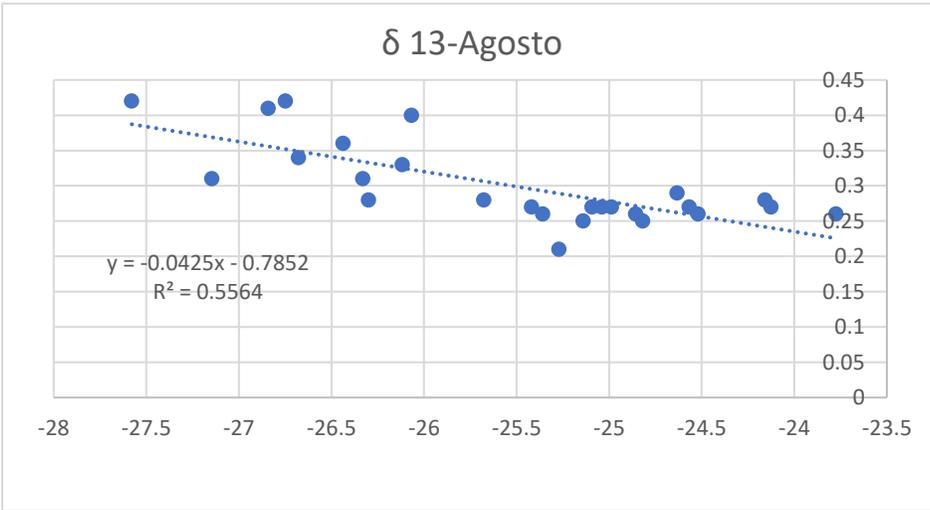


Tabla 11:  $\delta$  13-Agosto /20

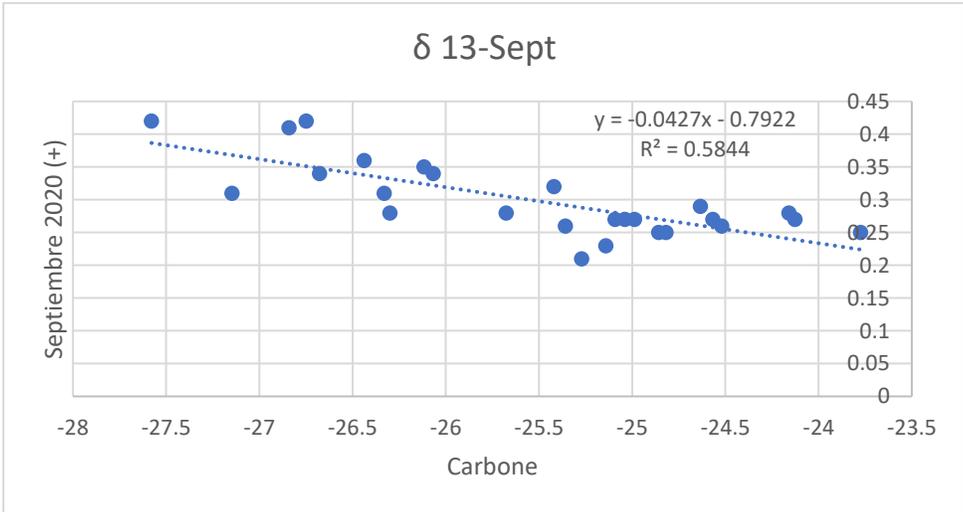


Tabla 12:  $\delta$  13-Septiembre /20

Las correlaciones de este año fueron las más bajas rondando valores del  $R^2$  0,46, sin embargo, estos valores en agronomía para correlaciones siguen siendo buenos.

De los 12 meses evaluados solo el mes Junio del 2020 mostro una correlación muy baja, anómala con respecto a los resultados, 4 estuvieron por encima de 0,50 que ya se considera una buena correlación y 7 meses obtuvieron correlaciones superiores a 0,60 lo que se consideran como muy buena correlaciones en agronomía.

	2017				2019				2020			
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
R2	0,6527	0,6964	0,6206	0,6754	0,5737	0,6512	0,6446	0,6166	0,2	0,5281	0,5564	0,5844

Tabla 13: Valores de correlación finales de R2

Dentro del análisis matemático se realizaron también parejas entre las diferencias de 2 meses, por ejemplo, (julio-junio), (agosto-julio) y (septiembre-agosto). Se quería determinar si existía una correlación entre los valores del  $\delta$  13-y la diferencia de los valores de los meses emparejados. Sin embargo, a lo largo del análisis visual de las imágenes y ponderando los valores del NDVI se encontró que no existían cambios significativos y por lo tanto los valores obtenidos en las correlaciones son casi despreciables (Ver en anexos).

Varios sistemas de satélite, como Sentinel-2 o Landsat, se utilizan con regularidad por parte de algunos agricultores, ya que se han desarrollado aplicaciones de monitoreo específicas en los cultivos. Una ventaja importante de los satélites es que pueden cubrir todo el globo de forma regular. Sin embargo, tras la aparición de los drones o UAVs, han cambiado radicalmente las perspectivas; a través de los últimos años, los UAVs han mejorado su autonomía de vuelo, han disminuido sus costos de producción y se han convertido en una herramienta más accesible para algunos agricultores, sin embargo, para la obtención de las imágenes espectrales de esta parcela las imágenes del Sentinel fueron suficientes proporcionando la información que se requería para procesar los datos.

Para el análisis de la termografía del año 2015 se contó con la base de datos del grupo de viticultura de la Universidad Pública de Navarra. Las imágenes termográficas son una herramienta que se ha incorporado de manera relativamente reciente a la agricultura. Se trata de una tecnología que

---

permite la visualización de las diferencias en la temperatura de la superficie de la radiación infrarroja emitida. La utilidad de esta técnica en agricultura se basa en el hecho de que permite detectar, de manera directa, disminuciones importantes en la transpiración ya que, cuando el agua se pierde a través de los estomas, la temperatura de las hojas disminuye, pero una vez los estomas se cierran, la transpiración no ocurre más y la temperatura de las hojas que absorben la luz solar aumenta (Costa et al. 2010). Por consiguiente, se trata de una técnica que sí está directamente relacionada con el estado hídrico de las plantas, dado que la temperatura de las hojas puede considerarse un indicador adecuado de la apertura estomática (Fuchs 1990; Jones et al. 2002).

La variabilidad dentro del campo en el estado hídrico de la vid también fue notable, 13C variando de  $-24,1\%$  a  $-27,9\%$  (11 A y B). Estos valores, según la escala propuesta en (Santesteban et al., 2015), corresponden a condiciones que van desde un estrés hídrico casi severo hasta un déficit débil. Esta variabilidad en el estado del agua probablemente explica la variabilidad en otras variables agronómicas, ya que se sabe que la disponibilidad de agua es el factor principal que determina el crecimiento, el rendimiento y la composición de la uva en áreas semiáridas (Medrano et al., 2014).

Para la evaluación de la variabilidad instantánea en el estado del agua se procedió al procesamiento de las imágenes térmicas, lo que condujo a un mapa de distribución de CWSI a lo largo del campo (Fig. 10). Se encontró una amplia gama de valores de CWSI (0,28-0,69), lo que confirma la relevancia de la variabilidad dentro del campo observada con las variables agronómicas, y la pertinencia de tener en cuenta esta variabilidad.

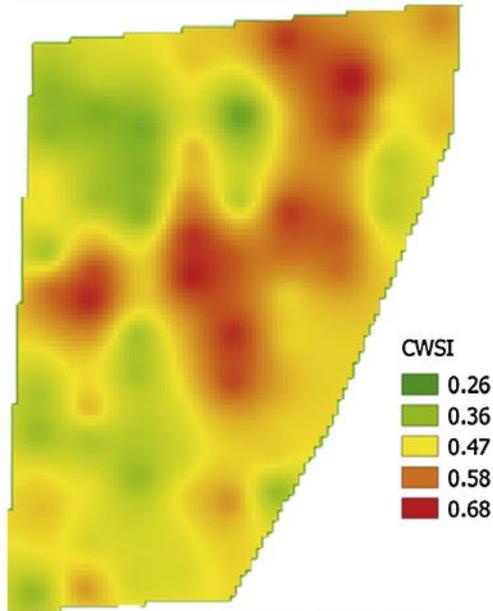


Ilustración 10: Variación en el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en el viñedo 'Tempranillo' de 7,5 ha.

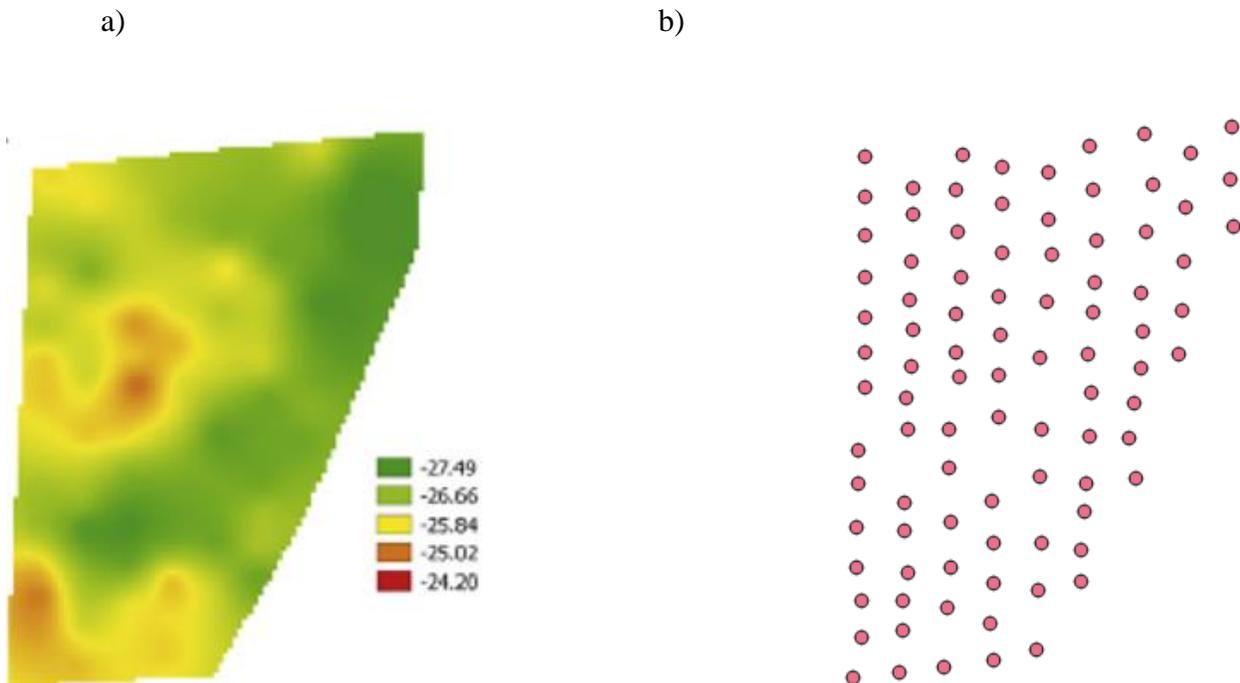


Ilustración 11: A) Termografía que indica los valores del ratio isotópico de carbono 2015. B) Mapa independiente de los puntos de valores del ratio isotópico de carbono 2015.

---

### Conclusiones

Al observar los resultados arrojados en este estudio, se aprecia que las imágenes satelitales provistas por el Sentinel II, pueden tener un alto potencial para identificar zonas con estrés hídrico y se recomienda el uso del ratio isotópico de carbono en las muestras tomadas en esa zona para la comprobación de la situación de estrés. Los píxeles ubicados en las imágenes satelitales del Sentinel han permitido un buen diagnóstico de zonas que potencialmente podrían tener sequía dentro de una parcela, y sería posible, que esta misma dinámica pudiera extrapolarse a otras parcelas, y, por tanto, usar esta técnica como una herramienta de diagnóstico inicial o de cribado de zonas que han presentado un estrés hídrico, donde se utilizó de manera conjunta con el ratio isotópico de carbono para aumentar su eficacia.

Las imágenes termográficas presentan la característica de dar a conocer el estado hídrico de un terreno en un momento puntual del cultivo. Las imágenes térmicas basadas en UAVs tienen un gran potencial para mapear variaciones instantáneas en el estado del agua dentro de un viñedo. Sin embargo, para el estudio actual, las imágenes del Sentinel II son lo suficientemente buenas para determinar zonas de estrés hídrico dentro de la parcela con muy buena precisión y calidad.

El uso de drones junto con las cámaras multiespectrales aumenta la precisión y la calidad de los píxeles en las imágenes, se recomienda para zonas en donde sea muy difícil el tener acceso a las imágenes satelitales, es decir lugares donde haya precipitaciones constantes y donde se formen nubes de manera frecuente ya que esta condición atmosférica impide el buen procesamiento de las imágenes satelitales.

## Bibliografía

- Acevedo-Opazo, C., Tisseyre, B., Guillaume, S., & 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.
- Adams, M.A. and Grierson, P.F. (2001) Stable isotopes at natural abundance in terrestrial plant ecology and ecophysiology: an update. *Plant Biology* 3, 299–310.
- Albornoz, L., Plaza, L. R., Navarro, A., López, M., Bageta, C., y Mercado, L. (2019). *Vineyard zoning of cv bonarda argentina (Vitis vinifera L.), from sentinel satellite images and three vegetation indexes*. 51(2), 167–176.
- Johnson, L. F., Bosch, D. F., Williams, D. C., & Lobitz, B. M. (2001). Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(4), 557–560
- Arno´ J, Martí´nez Casanovas J, Ribes-Dasi M, Rosell JR (2009) Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish J Agric Res* 7:779–790
- Arnó, J.; Martínez Casanovas, 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. [CrossRef]
- Arnó, J., Rosell, J. R., Blanco, R., Ramos, M. C., & Martínez-Casanovas, J. A. (2012). Spatial variability in grape yield and quality influenced by soil and crop nutrition characteristics. *Precision Agriculture*, 13(3), 1–18.
- Basso, B., Sartori, L., y Bertocco, M. (2006). Manual de Agricultura de precisión (Umedia, M. De, and P. y A. Agricultura, Eds.). Madrid.
- Bellvert, J., Marsal, J., Girona, J., & Zarco-Tejada, P. J. (2015). Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrigation Science*, 33(2), 81–93.
- Bellvert, J., Marsal, J., Mata, M., & Girona, J. (2012). Identifying irrigation zones across a 7.5-ha “Pinot noir” vineyard based on the variability of vine water status and multispectral images. *Irrigation Science*, 30(6), 499–509. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0380-y>.
- Bellvert J, Zarco-Tejada PJ, Girona J and Fereres E 2014 Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle *Precision Agriculture* 15 361–376
- Bramley RGV (2010) Precision viticulture: Managing vineyard variability for improved quality outcomes. Chapter 12. In:
- Berni, J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738.
- Bramley, R. G. V., Ouzman, J., & Thornton, C. (2011). Selective harvesting is a feasible and profitable strategy even when grape and wine production is geared towards large fermentation volumes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(3), 298–305.
- Bramley, R. G. V., Proffitt, A. P. V., Hinze, C. J., Pearse, B., & Hamilton, R. P. (2005). Generating benefits from precision viticulture through selective harvesting. *Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, (2003), 891–898.
- Bramley, R. G. V., Siebert, T. E., Herderich, M. J., & Krstic, M. P. (2017). Patterns of within-vineyard spatial variation in the “pepper” compound rotundone are temporally stable from year to year. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23(1), 42–47.
- Bramley, R. G. V., Trought, M. C. T., & Praat, J. P. (2011). Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: Characterising variation in vineyard performance and options for the implementation of Precision Viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(1), 72–78.
- Bramley, R. G. V., Ouzman, J., & Boss, P. K. (2011). Variation in vine vigour, grape yield and vineyard soils and topography as indicators of variation in the chemical composition of grapes, wine and wine sensory attributes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 217–229.
- Bramley, R. G. V., Ouzman, J., & Thornton, C. (2011). Selective harvesting is a feasible and profitable strategy even when grape and wine production is geared towards large fermentation volumes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(3), 298–305.
- Costa JM, Grant OM, Chaves MM (2010) *Use of thermal imaging in viticulture: current application and prospects*. In ‘*Methodologies and results in grapevine research*’. (Eds S Delrot, H Medrano, E Or L Bavaresco, S Grando) pp. 135–150. (Springer: Dordrecht, The Netherlands)
- Crookston, R. K. (2006). Top 10 list of developments and issue impacting crop management and ecology during the past 50 years. *Crop Science*, 46(5), 2253–2262.

- Dordevic, N., Camin, F., Marianella, R.M., Postma, G.J., Buydens, L.M.C. and Wehrens, R. (2013) Detecting the addition of sugar and water to wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 19, 324–330.
- Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R. and Hubick, K.T. (1989) Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology* 40,503–537.
- Farquhar, G.D., Hubick, K.T., Condon, A.G., Richards, R.A. (1988). Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency. En: Rundel, P.W., Ehleringer, J.R. y Nagy, K.A. (eds.). *Stable isotopes in ecological research*, pp 21–40. Springer-Verlag, New York, USA.
- Farquhar, G.D., O'Leary, M.H., Berry, J.A. (1982). On the relationship between carbon isotope discrimination and the inter-cellular carbon-dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 121–137
- Fuchs M (1990) *Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress*. *Theor Appl Climatol* 42:253–261
- Gambutì, A., Lamorte, S., Capuano, R., Genovese, A., Lisanti, M. T., Piombino, P., & Moio, L. (2007). Study of the influence of grape ripeness degree on aroma characteristics of aglianico wines by instrumental and sensory analysis. *Acta Horticulturae*, 754, 533–540.
- Grant, O.M.; Tronina, L.; Jones, H.G.; Chaves, M.M. *Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes*. *J. Exp. Bot.* 2007, 58, 815–825.
- Hall A, Lamb DW, Holzapfel B, Louis J (2002) Optical remote sensing applications in viticulture: a review. *Aust J Grape Wine Res* 8:36–47
- Hoefs, J. (2009) *Stable isotope geochemistry* (Springer-Verlag: Berlin, Germany).
- Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ and Pinter Jr PJ 1981 Canopy temperature as a crop water stress indicator *Water Resources Research* 17 1133–1138
- ] Jones HG and Leinonen I 2003 Thermal imaging for the study of plant water relations *Journal of Agricultural Meteorology* 3 205–217
- Jones HG 1999 Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling *Agricultural and Forest Meteorology* 95 139–149 Jones HG, Stoll M, Santos T, De Sousa C, Chaves MM, Grant OM (2002) *Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine*. *J Exp Bot* 53: 2249–2260
- Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Fort, F., Canals, J. M., De Freitas, V., & Zamora, F. (2011). Influence of the heterogeneity of grape phenolic maturity on wine composition and quality. *Food Chemistry*, 124(3), 767–774
- Luterbacher J., Xoplaki E., Casty C., Wanner H., Pauling A., Kuettel M., Rutishauser T., Broennimann S., Fischer E., Fleitmann D., Gonzalez-Rouco J.E., Garcí'a-Herrera R., Barriendos M., Rodrigo F.S., Gonzalez-Hidalgo J.C., Saz M.A., Gimeno L., Ribera P., Brunet M., Paeth H., Rimbu N., Felis T., Jacobeit J., Duenkeloh A., Zorita E., Guiot J., Turkes M., Alcoforado M.J., Trigo R., Wheeler D., Tett S.F.B., Mann M.E., Touchan R., Shindell D.T., Silenzi S., Montagna P., Camuffo D., Mariotti A., Nanni T., Brunetti M., Maugeri M., Zerefos C., De Zolt S., Lionello P., Nunes M.F., Rath V., Beltrami H., Garnier E., Le Roy Ladurie E. (2006) Mediterranean climate variability over the last centuries, a review. In *The Mediterranean Climate: An Overview of the Main Characteristics and Issues*,
- Matese, A., Di Gennaro, S. F., 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. *Comp. Electr. Agric.*, 162, 931–940.
- Matese, A.; Di Gennaro, S.F. Technology in Precision Viticulture: A State-of-the-Art Review. *Int. J. Wine Res.* 2015, 69. [CrossRef]
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971–2990.
- Möller M, Alchanatis V, Cohen Y, Meron M, Tsipris J, Naor A, Ostrovsky V, Sprintsin M and Cohen S 2007 Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine *Journal of Experimental Botany* 58 827–838
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429–436.
- Pierce, F.J.; Nowak, P. *Aspects of Precision Agriculture*. In *Advances in Agronomy*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1999; Volume 67, pp. 1–85. ISBN 978-0-12-000767-7.
- Reynolds AG (ed) *Understanding and managing wine quality and safety*. Woodhead Publishing, Cambridge, pp 445–480
- Santesteban, L. G. (2019). Precision viticulture and advanced analytics. A short review. *Food Chemistry*, 279, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.140>
- Santesteban, L. G., Guillaume, S., Royo, J. B., & Tisseyre, B. (2013). Are precision agriculture tools and methods relevant at the whole-vineyard scale? *Precision Agriculture*, 14(1), 2–17.

Santesteban, L.G., Miranda, C., Barbarin, I., Royo, J.B., 2015. Application of the measurement of the natural abundance of stable isotopes in viticulture: a review. *Aust. J. Grape Wine Res.* 21, 157–167.

Santos, A. O., Wample, R. L., Sachidhanantham, S., & Kaye, O. (2012). Grape quality mapping for vineyard differential harvesting. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 55(2), 193–204.

Schaepman-Strub G, Schaepman ME, Painter TH, Dangel S and Martonchik JV 2006 Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies *Remote Sensing of Environment* 103 27–42

Schultz H.R. (2000) Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6, 2–12.

Sepulcre-Canto G, Diago MP, Balda P, Marti'nez de Toda F, Morales F, Tardaguila J (2009) Monitoring vineyard spatial variability of vegetative growth and physiological status using an unmanned aerial vehicle (UAV). In: *Proceedings of GIESCO symposium*. Davis, USA

Siegel R and Howell JR 1972 *Thermal Radiation Heat Transfer* (McGraw-Hill)

Tagarakis, A., Liakos, V., Fountas, S., Koundouras, S., & Gemtos, T. A. (2013). Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. *Precision Agriculture*, 14(1), 18–39. Urretavizcaya, I., Royo, J. B., Miranda, C., Tisseyre, B., Guillaume, S., & Santesteban, L. G. (2017). Relevance of sink-size estimation for within-field zone delineation in vineyards. *Precision Agriculture*, 18(2), 133–144.

Tardaguila, J., Baluja, J., Arpon, L., Balda, P., & Oliveira, M. (2011). Variations of soil properties affect the vegetative growth and yield components of “Tempranillo” grapevines. *Precision Agriculture*, 12(5), 762–773.

Zarco-Tejada PJ, Berni JAJ, Sua' rez L, Fereres E (2008) A new era in remote sensing of crops with unmanned robots. *SPIE Newsroom*. doi:10.1117/2.1200812.143

Anexos

Junio 2017

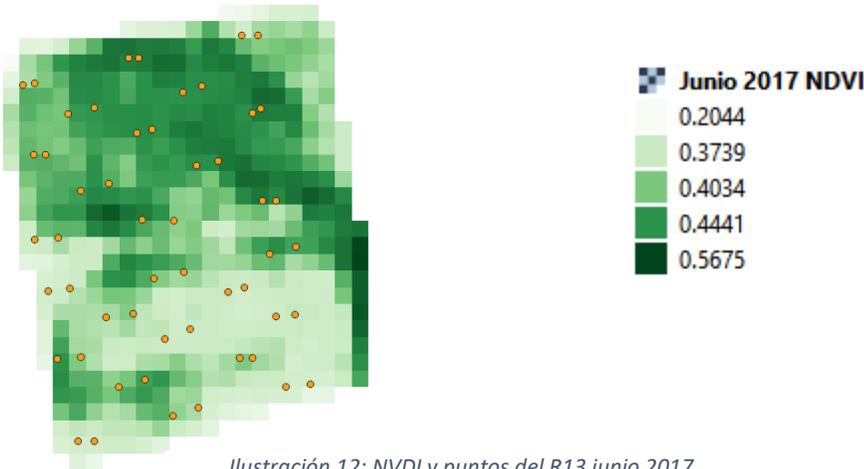


Ilustración 12: NVDI y puntos del R13 junio 2017.

Julio 2017



Ilustración 13: NVDI y puntos del R13 julio 2017.

Agosto 2017

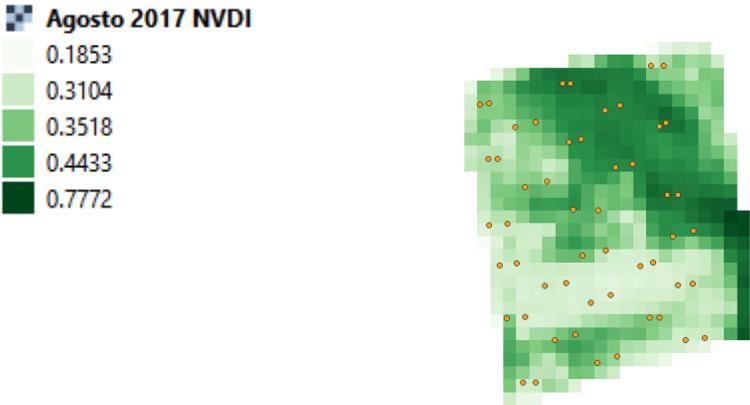


Ilustración 14: NVDI y puntos del R13 agosto 2017.

Septiembre 2017



Ilustración 15: NVDI y puntos del R13 septiembre 2017.

Junio 2019

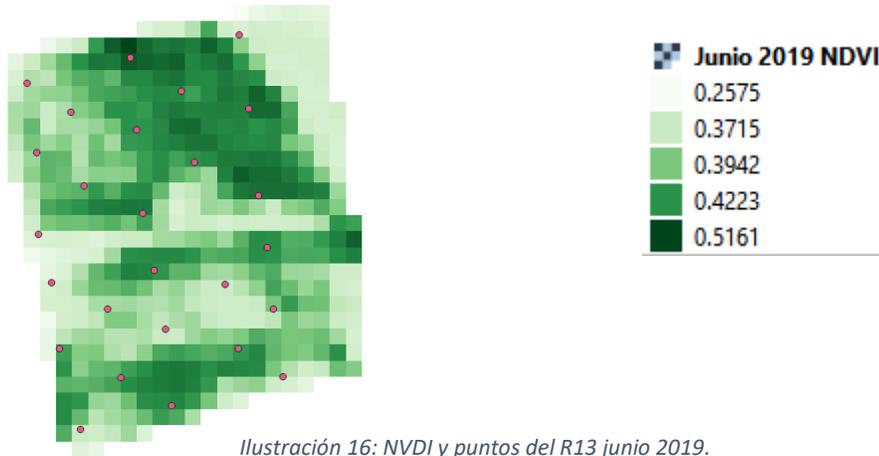


Ilustración 16: NVDI y puntos del R13 junio 2019.

Julio 2019

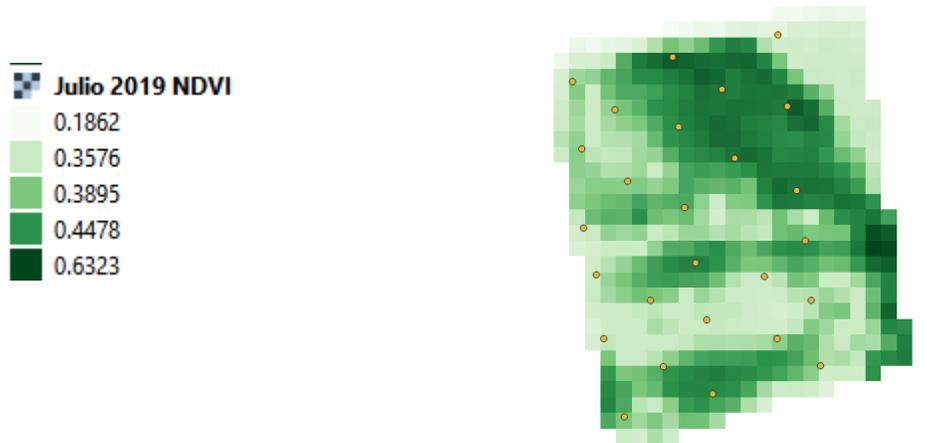


Ilustración 17: NVDI y puntos del R13 julio 2019.

Agosto 2019



Ilustración 18: NVDI y puntos del R13 agosto 2019.

Septiembre 2019

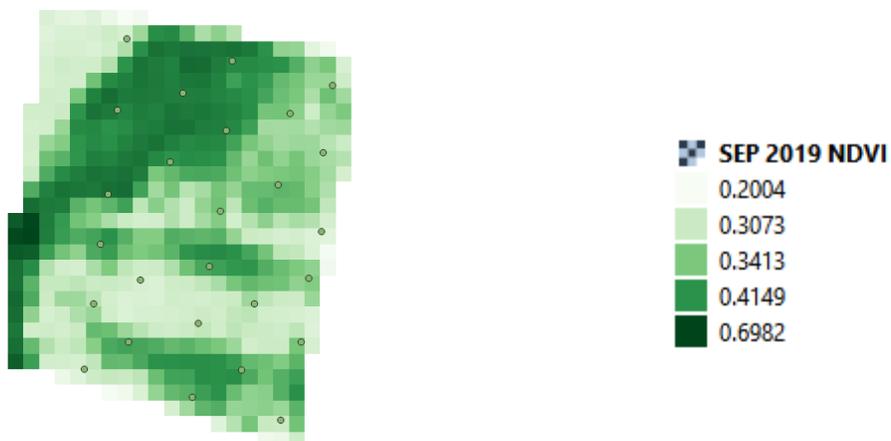


Ilustración 19: NVDI y puntos del R13 septiembre 2019.

Junio 2020

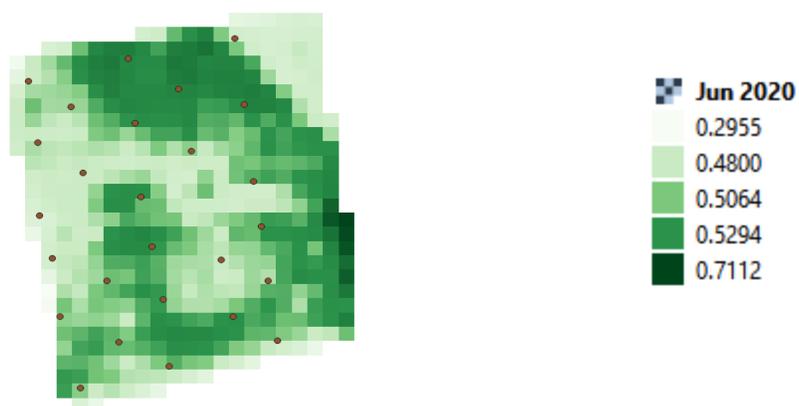


Ilustración 20: NVDI y puntos del R13 junio 2020.

Julio 2020

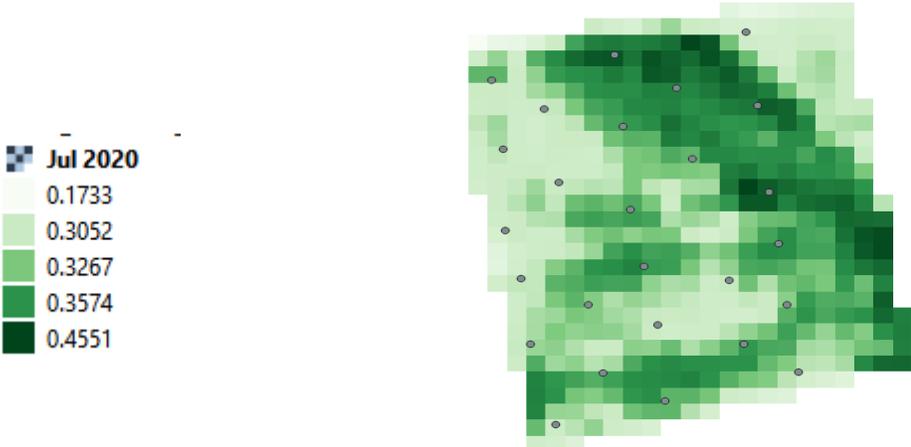


Ilustración 21: NVDI y puntos del R13 julio 2020.

Agosto 2020

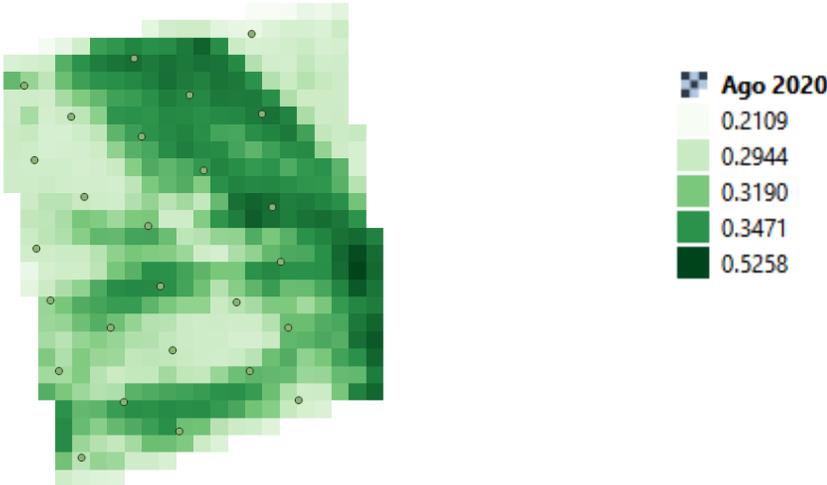


Ilustración 22: NVDI y puntos del R13 agosto 2020.

Septiembre 2020

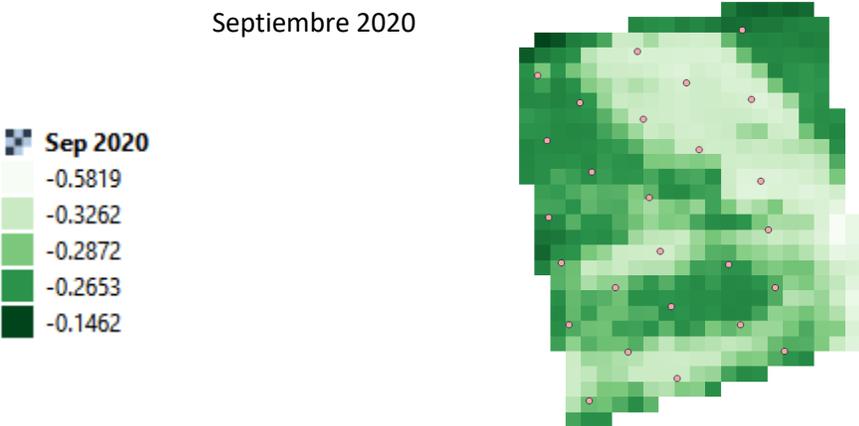


Ilustración 23: NVDI y puntos del R13 septiembre 2020.

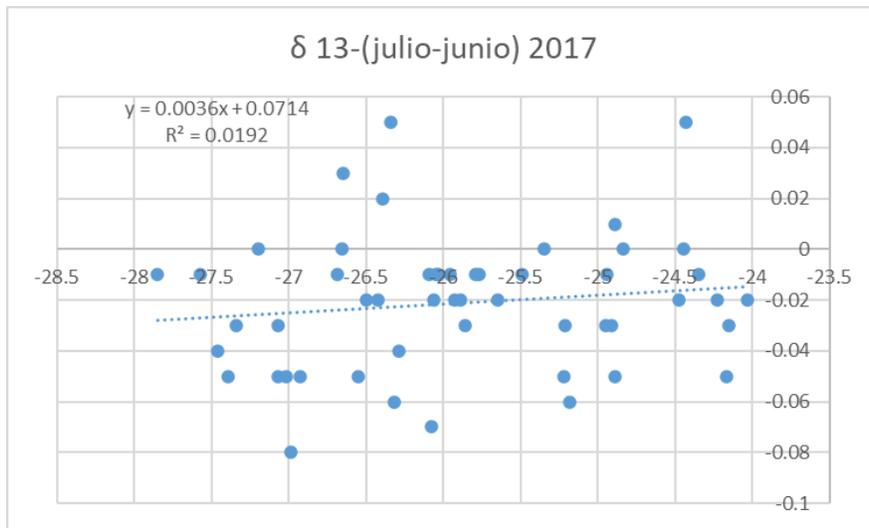


Tabla 14:  $\delta 13\text{-(julio-junio) 2017}$

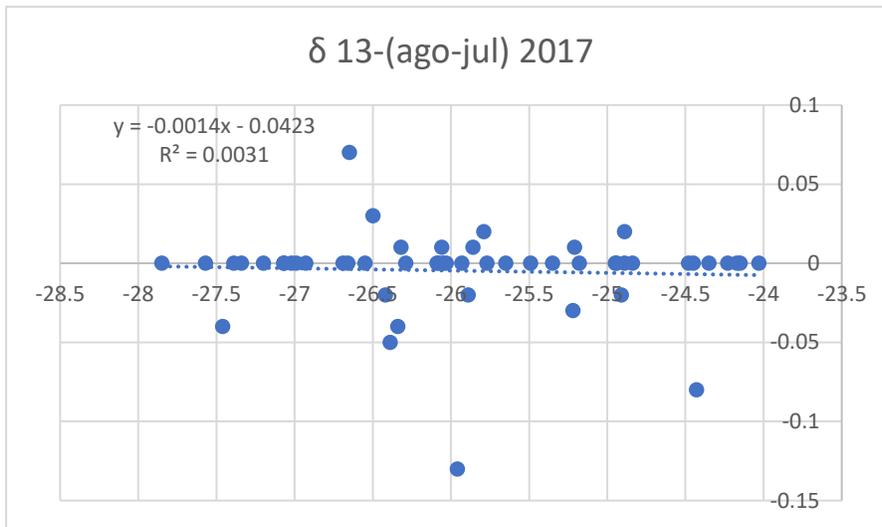


Tabla 16:  $\delta 13\text{-(agosto-julio) 2017}$

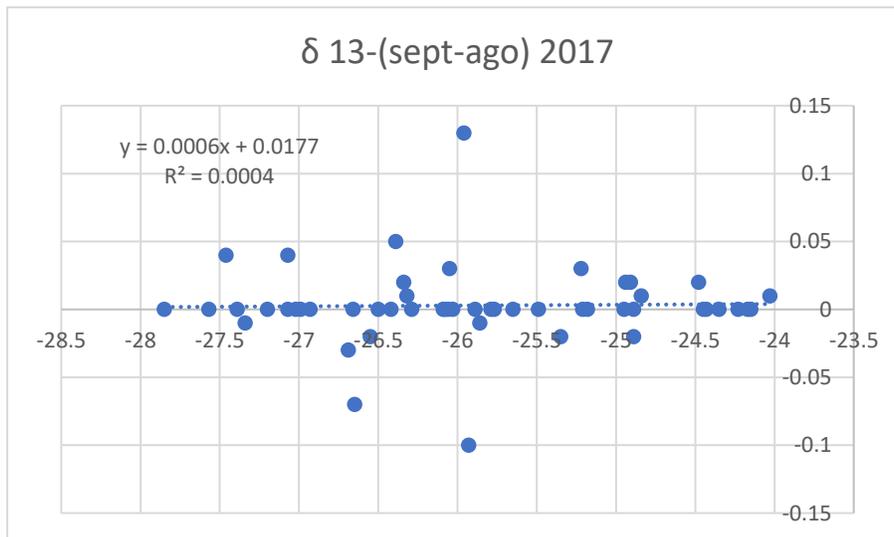
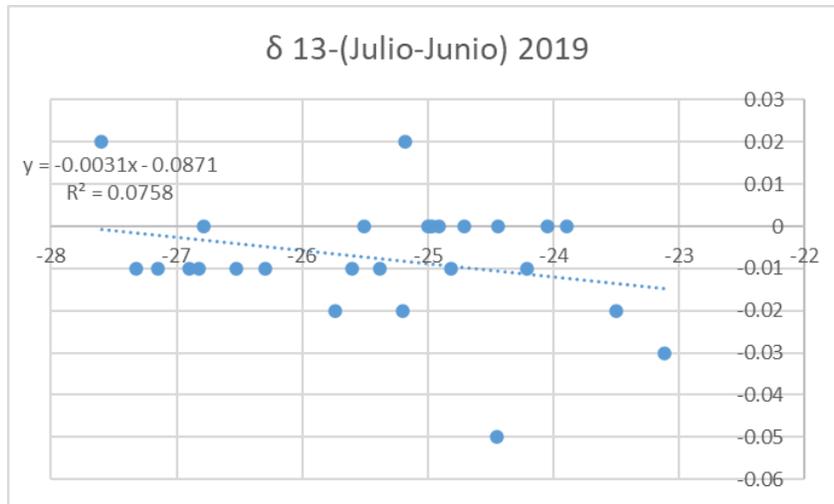


Tabla 17:  $\delta 13\text{-(sept-agosto) 2017}$



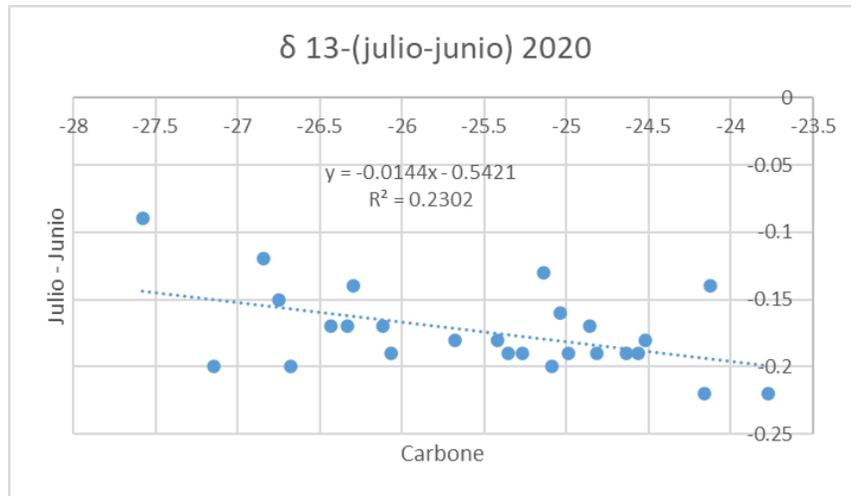


Tabla 21: δ 13-(julio-junio) 2020

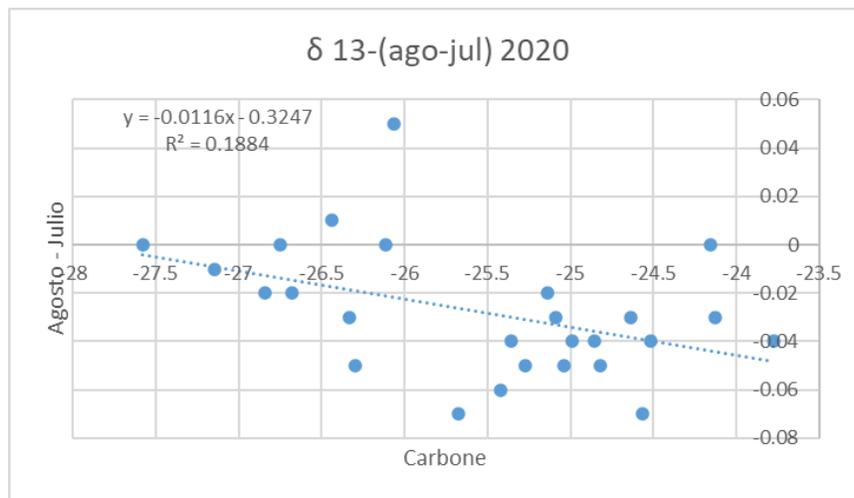


Tabla 22: δ 13-(agosto-julio) 2020

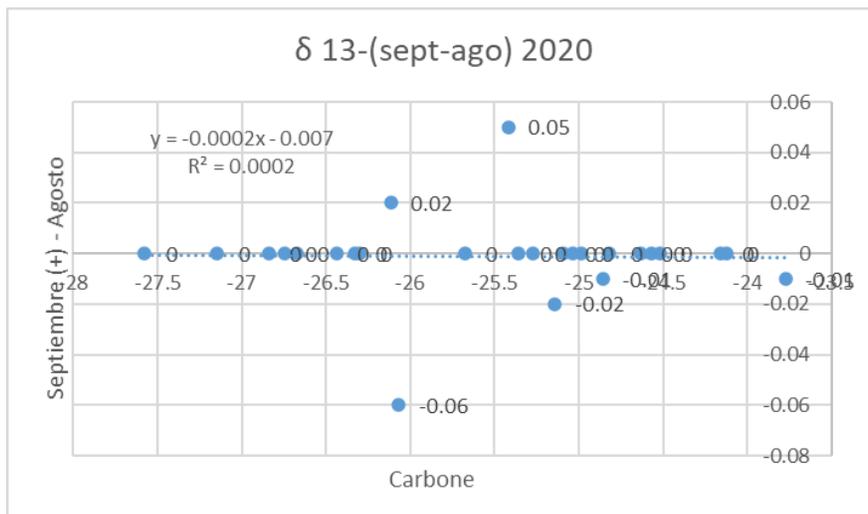


Tabla 23: δ 13-(septiembre-agosto) 2020