



---

Universidad de Valladolid



**PROGRAMA DE DOCTORADO EN ENOLOGÍA,  
VITICULTURA Y SOSTENIBILIDAD**

TESIS DOCTORAL:

**EFFECTOS COMBINADOS DE LA  
CLOROSIS FÉRRICA Y EL ESTADO  
HÍDRICO DEL VIÑEDO EN LA CALIDAD  
DE LA UVA Y EL VINO CV. TEMPRANILLO**

Presentada por **Ramón Sánchez Alonso** para  
optar al grado de  
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Pedro Martín Peña  
Encarnación Fernández Fernández  
José Manuel Rodríguez Nogales



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1. LA CALIDAD DE LA UVA Y DEL VINO .....	11
1.1.1. Componentes de la calidad del vino .....	11
1.1.1.1. La composición fenólica y el color del vino.....	11
1.1.1.2. El perfil aromático .....	15
1.1.1.2.1. Aromas primarios.....	17
1.1.1.2.2. Aromas secundarios.....	20
1.1.1.2.3. Aromas terciarios .....	24
1.1.2. El potencial enológico del viñedo. Factores vitícolas que afectan a la composición de la uva .....	25
1.1.2.1. El clima y el suelo .....	25
1.1.2.2. El material vegetal.....	27
1.1.2.3. Las técnicas de cultivo.....	28
1.2. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CUALITATIVO DEL VIÑEDO BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO Y CLOROSIS FÉRRICA.....	30
1.2.1. El deficit hídrico.....	30
1.2.2. La deficiencia de hierro .....	31
1.3. CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL ENOLÓGICO DE VIÑEDOS DE SECANO AFECTADOS POR DEFICIENCIA DE HIERRO.....	33
2. REFERENCIAS.....	36
3. OBJETIVOS .....	63
4. PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL .....	63
5. ESTRUCTURA .....	66
5.1. CAPÍTULO 1.....	67
5.2. CAPÍTULO 2.....	68
5.3. CAPÍTULO 3.....	69
6. CONCLUSIONES .....	70



## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer en primer lugar a la Junta de Castilla y León (proyecto VA013P17 y fondos FEDER) por financiar esta investigación.

Quiero agradecer a mis directores, el Dr. José Manuel Rodríguez Nogales, la Dra. Encarnación Fernández Fernández y en especial a mi director y tutor el Dr. Pedro Martín Peña la oportunidad que me dieron para realizar esta Tesis. Especial agradecimiento también a la Dra. María Rosa González García.

Agradezco el trabajo realizado a todos los técnicos, postdoctorandos, doctorandos y alumnos de la Universidad de Valladolid que han colaborado en la obtención de los resultados de esta Tesis.

Quiero dar las gracias a mis padres y a Ana su apoyo durante esta etapa.

Quiero dar mi agradecimiento a Bodegas Emilio Moro S.L., en cuyo viñedo se han llevado a cabo los estudios de esta Tesis.

## RESUMEN

El déficit hídrico y la deficiencia nutricional de hierro (clorosis férrica) son factores de estrés ambiental que afectan frecuentemente al cultivo de la vid en la zona mediterránea. Los estudios sobre el impacto de ambos factores, cuando actúan simultáneamente, son escasos.

En esta Tesis se han evaluado los efectos combinados de la incidencia de clorosis férrica y del estado hídrico de la vid sobre la calidad y el perfil aromático de la uva y del vino Tempranillo y se ha estudiado la viabilidad de la medida del contenido foliar de clorofila en el envero (Chl) como indicador precoz del potencial de calidad de las uvas en esas condiciones. Además, en esta Tesis se ha investigado, por primera vez, cómo niveles moderados de carencia de hierro en la vid pueden afectar a la presencia de compuestos orgánicos volátiles en los vinos.

Para ello, se realizó un seguimiento durante varias campañas de 20 subzonas de viñedo de secano (10 m × 10 m cada una), desde no afectadas hasta moderadamente afectadas por clorosis férrica, en la Denominación de Origen Protegida Ribera del Duero. Los niveles de estrés hídrico y nutricional del viñedo, estimados a partir del potencial hídrico foliar antes del amanecer y el contenido de clorofila foliar medidos en el envero, se relacionaron con los valores de vigor, rendimiento y composición de la uva, así como con las características químicas y organolépticas del vino.

La incidencia leve a moderada de clorosis férrica no tuvo efectos significativos sobre el vigor de la vid, el rendimiento o el tamaño de las uvas, pero aumentó las concentraciones de algunos terpenos específicos, norisoprenoides C13, ácidos y fenoles volátiles en la uva. Por su parte, el déficit hídrico tendió a incrementar la intensidad del color y el contenido de antocianinas extraíbles de las uvas.

Se ha observado que el estrés por deficiencia de hierro disminuye el pH del vino y contribuye a la mejora de atributos sensoriales de tonalidad e intensidad de la capa, intensidad del sabor y persistencia en boca. Se observaron aumentos en el color rojo, en la astringencia y en la persistencia del vino asociados con la incidencia de clorosis férrica, aunque restringidos en condiciones de déficit hídrico elevado.

Los resultados muestran que el estrés moderado por deficiencia de hierro aumentó en los vinos las concentraciones de compuestos volátiles asociados a notas florales, como el 2-fenilacetaldehído, el 2-feniletanol y el acetato de 2-feniletilo, al tiempo que redujo la presencia de los alcoholes C6, responsables del aroma herbáceo. El mayor contenido total de

compuestos fenólicos se observó en las subzonas de viñedo con mejor estado hídrico. En las subzonas más estresadas, tanto por déficit hídrico como por carencia de hierro, se observan menores contenidos de alcoholes C6 que en las subzonas menos estresadas.

Los resultados indican que el estrés por deficiencia de hierro de leve a moderado puede tener efectos positivos sobre los compuestos químicos y los atributos sensoriales del vino Tempranillo. Las mediciones del contenido de clorofila foliar en el envero podrían ser muy útiles para mapear el potencial de calidad en viñedos de secano afectados por deficiencia de hierro.

## ABSTRACT

Water deficit and iron nutritional deficiency (iron chlorosis) are environmental stress factors that frequently affect grapevine cultivation in the Mediterranean area. Studies on the impact of both factors, when acting simultaneously, are scarce.

In this Thesis, the combined effects of the incidence of iron chlorosis and the water status of the vine on the quality and aromatic profile of the Tempranillo grape and wine have been evaluated, and the feasibility of measuring the foliar chlorophyll content in veraison (Chl) has been studied as an early indicator of the quality potential of the grapes under these conditions. In addition, this Thesis has investigated, for the first time, how moderate levels of iron deficiency in grapevines can affect the presence of volatile organic compounds in wines.

During several campaigns a group of 20 subareas of non-irrigated vineyards (10 m × 10 m each), from not affected to moderately affected by iron chlorosis, was monitored in the Ribera del Duero Designation of Origin. The water status and nutritional stress levels of the vineyard, estimated from the leaf water potential before sunrise and the foliar chlorophyll content measured at veraison, were related to the values of vigor, yield and grape composition parameters, as well as with the chemical and organoleptic characteristics of the wine.

Mild to moderate incidence of iron chlorosis had no significant effects on vine vigor, yield, or berry size, but increased concentrations of some specific terpenes, C13 norisoprenoids, volatile acids, and phenols in grapes. On the other hand, the water deficit tended to increase the color intensity and the extractable anthocyanin content of the grapes.

It has been observed that iron deficiency stress lowers the pH of the wine and contributes to the improvement of sensory attributes as tonality, layer intensity, flavour intensity and persistence in the mouth. Increases in red color, astringency and wine persistence associated with the incidence of iron chlorosis were observed, although restricted in conditions of high water deficit.

The results show that moderate stress due to iron deficiency increased the concentrations of volatile compounds associated with floral notes, such as 2-phenylacetaldehyde, 2-phenylethanol and 2-phenylethyl acetate, in wines, while reducing the presence of C6 alcohols, responsible for the herbaceous aroma. The highest total content of phenolic compounds was observed in the vineyard subzones with the best water status. In the most stressed subzones,

both due to water deficit and iron deficiency, lower contents of C6 alcohols are observed than in the less stressed subzones.

The results indicate that mild to moderate iron deficiency stress can have positive effects on chemical composition and sensory attributes of Tempranillo wine. Measurements of leaf chlorophyll content at veraison could be very useful to map quality potential in rainfed vineyards affected by iron deficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

La vid (*Vitis vinifera L.*) es una de las plantas más profusamente cultivadas en todo el mundo, destacando tanto por su extensión como por su valor económico (Vivier y Pretorius, 2002).

Italia (49,1 Mill. hL), Francia (46,6 Mill. hL) y España (40,7 Mill. hL) son los principales productores de vino a nivel internacional y juntos representaban el 53 % de la producción mundial de vino en 2020. El área destinada a viñedos en España (961 mha), es la mayor a nivel mundial, y junto con Francia (797 mha), China (785 mha), Italia (719 mha) y Turquía (431 mha) completaban los 5 primeros puestos en 2020 (OIV, 2021).

La vid se cultiva en un amplio rango de climas (Van Leeuwen y Seguin, 2006). El cambio climático está provocando una mayor demanda en la evapotranspiración del viñedo y una menor disponibilidad de agua, por lo que muchas zonas del mundo requieren su adaptación para mantener la rentabilidad del viñedo (Naulleau *et al.*, 2021). El déficit hídrico se ha convertido en el principal factor limitante de la producción, especialmente en el área mediterránea (Lemke *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2003).

El estrés hídrico produce el cierre de los estomas de la planta, reduciendo la disponibilidad de dióxido de carbono en el mesófilo de la hoja (Flexas *et al.*, 2002). Una disponibilidad de agua limitada puede afectar en gran medida a la productividad de las plantas (Chai *et al.*, 2016; Pérez-Pastor *et al.*, 2016; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010). Sin embargo, un déficit hídrico moderado en el viñedo puede ser beneficioso para algunos aspectos de la calidad de la uva (Cataldo *et al.*, 2020; Temnani *et al.*, 2021)

La carencia nutricional de hierro (clorosis férrica) es otro estrés abiótico muy frecuente en viticultura. La deficiencia de hierro limita la capacidad fotosintética de las plantas, puesto que conlleva un descenso de la síntesis de pigmentos fotosintéticos y disminuye la eficiencia del fotosistema II en las plantas (Bavaresco *et al.*, 2006; Hailemichael *et al.*, 2016).

Numerosos estudios demuestran que los viñedos ubicados en suelos calcáreos de la zona mediterránea, afectados por estrés hídrico o por deficiencia de hierro, ven disminuida su capacidad productiva, causando importantes pérdidas económicas (Li *et al.*, 2017; Martín *et al.*, 2007; Naulleau *et al.*, 2021). Sin embargo, existen muy pocos trabajos que estudien el impacto conjunto de ambos tipos de estrés, cuando actúan simultáneamente, sobre el vigor y el rendimiento del viñedo y la composición de la uva y del vino.

Aunque un estrés intenso por carencia de hierro o por déficit de agua provoca pérdidas en el potencial cualitativo de la uva, niveles moderados de estrés pueden tener efectos positivos en ese potencial. Al restringirse el crecimiento vegetativo de la planta se obtienen rendimientos más moderados y uvas más pequeñas que concentran constituyentes como azúcares o antocianinas (Balint y Reynolds, 2017; Bavaresco *et al.*, 2005). Es interesante estudiar cómo estas posibles mejoras en la composición de las uvas se extienden a la composición y las características sensoriales del vino. En el caso de la deficiencia de hierro, no existen en la bibliografía científica estudios sobre este particular.

Existe un conocimiento muy limitado de cómo el estrés hídrico afecta al perfil sensorial de los vinos, con resultados a veces contradictorios (Balint y Reynolds, 2017; Ledderhof *et al.*, 2014). La mayoría de los estudios sobre el tema corresponden a experiencias de riego (Mirás-Avalos *et al.*, 2019; Tian y Gu, 2019). Además, los trabajos destinados a interpretar los efectos de la variabilidad espacial en el estado hídrico de viñedos de secano han recibido menos atención (Hakimi y Reynolds, 2010). El establecimiento de relaciones entre los atributos específicos del vino con el grado de madurez de la uva y el comportamiento agronómico del viñedo puede proporcionar información interesante para la gestión del cultivo en viticultura de precisión.

En el caso de la clorosis férrica, los trabajos publicados en la bibliografía abordan normalmente experiencias de correctores de la carencia en condiciones controladas, muchas veces con plantas cultivadas en recipientes (Kolesch *et al.*, 1987; Mengel *et al.*, 1984), siendo escasas las investigaciones que abordan la variabilidad de la incidencia de la clorosis en campo (Meggio *et al.*, 2010).

## **1.1. LA CALIDAD DE LA UVA Y DEL VINO**

### **1.1.1. Componentes de la calidad del vino**

Es un hecho comúnmente aceptado que la calidad de un vino depende en su mayor parte de la calidad de las uvas que se emplean para su elaboración (Allegro *et al.*, 2021; Merkytė *et al.*, 2020). Los enólogos deben alcanzar unos objetivos de madurez en la uva acordes con el vino que desean obtener, para lo cual es fundamental definir la fecha óptima de vendimia. Esta fecha depende fundamentalmente de la evolución de los parámetros de composición de la uva a lo largo de la maduración, pero también de la previsión de agentes meteorológicos adversos que pueden deteriorar la cosecha (Jones y Davis, 2000; Sgubin *et al.*, 2018).

La *calidad analítica* se puede definir con parámetros básicos como el grado alcohólico, el pH, la acidez total y volátil, el color y el índice de polifenoles totales, y parámetros más específicos como la composición en compuestos orgánicos volátiles y fenólicos. Esta calidad depende básicamente del medio físico en el que está implantado el viñedo, de la maduración de la uva, de la relación entre la producción del viñedo y el vigor del mismo, de la variedad vinífera y de la relación piel-mosto, sin olvidar otros factores asociados al proceso enotécnico y microbiológico seguido (Aladrén, 2013).

#### **1.1.1.1. La composición fenólica y el color del vino**

Mediante la observación del color de un vino se puede obtener información acerca de su edad, de su concentración tánica, de su estado de conservación e incluso se pueden predecir algunos defectos que se notarán al beberlo.

En el espectro de absorción, los vinos jóvenes presentan un máximo de absorbancia a 520 nm, correspondiente al color rojo y unas componentes amarilla (420 nm) y azul (620 nm) relativamente importantes (figura 1). El vino de 5 años presenta una componente roja menor y el amarillo es más importante que en el vino joven, por ello el vino tiene un color teja. El vino con 25 años tiene una componente amarilla claramente más alta y por tanto su color será marrón (Zamora, 2003).

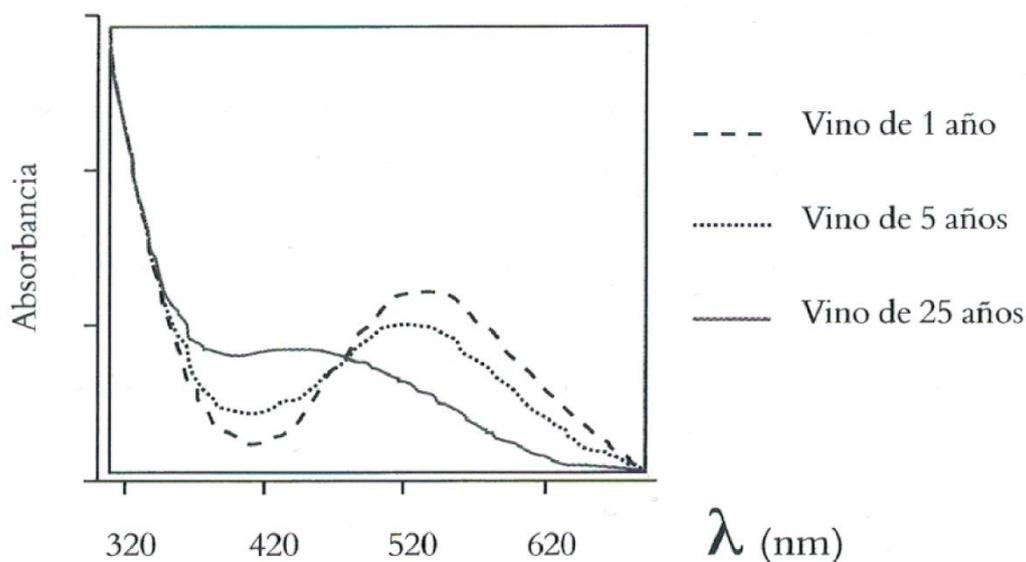


Figura 1. Espectro de absorción del vino (Zamora, 2003). Reproducido con permiso de AMV EDICIONES.

El color ha sido ampliamente reconocido como un buen predictor de la calidad del vino tinto. El grupo de investigación de Jackson (Jackson *et al.*, 1978) y posteriormente el de Parpinello (Parpinello *et al.*, 2009) han demostrado que una mayor calidad general, determinada después de una evaluación sensorial completa, se asocia con una mayor intensidad de color, para los vinos Beaujolais y Novello, respectivamente; en un estudio realizado con vinos tintos jóvenes del sur de Australia se encontraron resultados similares (Somers y Evans, 1974).

Las moléculas responsables del color del vino son los compuestos fenólicos. Estos compuestos se clasifican en dos subgrupos: flavonoides y no flavonoides (Cheynier *et al.*, 2000). Los antocianos y los flavanoles son los compuestos fenólicos que más influencia tienen sobre su color y evolución, y sobre otras características organolépticas definitorias de la calidad del vino.

La biosíntesis y la acumulación de los compuestos fenólicos en las uvas se ven afectadas por la variedad de uva, la madurez de estas en el momento de la vendimia, las condiciones climáticas y geográficas y el estrés hídrico del viñedo (Dokoozlian y Kliewer, 1996; Kennedy *et al.*, 2002; Kontoudakis *et al.*, 2011). La influencia del “factor variedad” sobre la composición cualitativa y cuantitativa de la uva es evidente. Así, Núñez *et al.* (2004) y Otteneder *et al.* (2004) encontraron perfiles antociánicos característicos en distintas variedades de uva, mientras que

otros autores mostraron amplias diferencias en el perfil de flavonoles (Castillo-Muñoz *et al.*, 2007; Mattivi *et al.*, 2006).

- Los compuestos fenólicos no flavonoides:

Dentro de los compuestos fenólicos no flavonoides encontramos los ácidos fenoles y los estilbenos.

Los ácidos fenoles son compuestos carentes de color presentes en décimas de mg/L, se encuentran en todas las partes de la uva y del racimo (piel, pulpa, semillas y raspón), y se dividen en dos grupos: ácidos benzoicos y ácidos cinámicos (Šikuten *et al.*, 2020). Estos compuestos existen de forma predominante como ácidos hidroxibenzoico e hidroxicinámico, encontrándose tanto de forma libre como conjugada (Garrido y Borges, 2013).

Los ácidos hidroxibenzoicos son necesarios para la síntesis de otros compuestos implicados en el crecimiento y el desarrollo de las uvas. El ácido gálico es considerado el ácido benzoico más abundante y un importante compuesto fenólico ya que es un precursor de todos los taninos hidrolizables y forma parte de los taninos condensados (Tomaz *et al.*, 2019). Los ácidos hidroxicinámicos representan la mayor parte de los ácidos fenólicos de las uvas y son precursores de compuestos fenólicos volátiles (Conde *et al.*, 2007).

Los estilbenos son compuestos polifenólicos que actúan como fitoalexinas, protegiendo a las uvas del estrés biótico y abiótico (Šikuten *et al.*, 2020). Langcake y Pryce (1976) determinaron que los estilbenos, localizados en la piel de las uvas, participan en la defensa de las bayas frente a los ataques fúngicos. Estos compuestos han recibido una especial atención en los últimos años debido a sus posibles efectos beneficiosos en la salud humana, especialmente el resveratrol (Gambini *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2019). La mayor parte de los estilbenos de la uva están contenidos en la piel, pero también pueden encontrarse en las semillas e incluso en el tallo y en las hojas de la vid (Hasan y Bae, 2017).

- Los compuestos fenólicos flavonoides:

Las clases más representativas de flavonoides en la uva están constituidas por antocianinas y flavonoides. Además del color, las percepciones en boca como la astringencia y el amargor están directamente asociadas con las antocianinas y las proantocianidinas (PA) (Gawel, 1998; Vidal *et al.*, 2003) y ambos compuestos intervienen de forma determinante en la actividad antioxidante de las uvas y de los vinos (Meng *et al.*, 2012). Las antocianinas se acumulan en la

piel de las uvas tintas a partir del envero; están presentes como derivados glucósidos de delphinidina, cianidina, petunidina, peonidina y malvidina (Fournand *et al.*, 2006). La catequina, la epicatequina, la galato-epicatequina y la epigallocatequina son flavonoides presentes desde el cuajado en las pieles y semillas de las uvas como monómeros libres y formas poliméricas, que se denominan PA o taninos (Downey *et al.*, 2003). Las PA ubicadas en la piel de las uvas tienen un mayor grado medio de polimerización (mDP) y una menor proporción de formas galloiladas en comparación con las de las semillas, mientras que la epigallocatequina no se encuentra en los flavonoides de las semillas. Por tanto, la epigallocatequina y el galato de epicatequina que se encuentran en el vino pueden indicar el tejido, la piel o la semilla de la baya de la que se extraen las PA (Cheynier *et al.*, 2006).

La importancia de cada clase de flavonoides en las uvas para la calidad del vino se conoce desde hace mucho tiempo. El aporte de las antocianinas al color del vino puede ser directo, por sus propiedades espectrales, o indirecto tras la reacción de copigmentación con otros compuestos fenólicos, como los flavonoles que se encuentran presentes en menor cantidad respecto a otros flavonoides (Boulton, 2001). Durante la crianza del vino, la formación de polímeros pigmentados, resultante de la reacción entre las antocianinas y las PA, modula el color del vino que cambia a un tono marrón rojizo (Hayasaka y Kennedy, 2003).

Las antocianinas, los monómeros de flavan-3-ol y las PA contribuyen a la percepción de importantes atributos de sensación en boca (por ejemplo astringencia y amargor) y a la calidad general del vino (Gonzalo-Diago *et al.*, 2014; Kennedy *et al.*, 2006). En este contexto, Mercurio *et al.* (2010) indicaron que los vinos australianos procedentes de uvas de Cabernet Sauvignon y Shiraz con una mayor concentración de compuestos fenólicos totales se correlacionaban con un mayor valor de mercado. También se observó que el aumento en el precio por botella estaba relacionado con un aumento en la intensidad del color, en la concentración de taninos y en el grado mDP de los taninos (Kassara y Kennedy, 2011). Por otra parte, un estudio realizado con vinos tintos premium de diferentes Denominaciones de Origen españolas describe una relación positiva entre la calidad global y las concentraciones del dímero de malvidina-catequina y de las PA ligadas a polisacáridos (Saenz-Navajas *et al.*, 2010).

Los parámetros CIELab se muestran como una de las medidas más objetivas del color, que se define a partir de unas coordenadas denominadas  $L^*$  (claridad),  $a^*$  (componente color rojo-verde) y  $b^*$  (componente color amarillo-azul). Los parámetros  $C^*$  (croma) y  $H^*$  (tono) se calculan a partir de  $a^*$  y  $b^*$  (OIV, 2006).

Las coordenadas CIELab se ubican dentro de un espacio tridimensional, estando cada una de ellas en cada uno de los ejes que definen el espacio (Cheftel y Cheftel, 1992). La coordenada  $L^*$  se encuentra en el eje vertical, tomando valores entre 0 y 100 (indicando el valor 0 alta claridad y 100 baja claridad). La coordenada  $a^*$ , corresponde al eje de abscisas, tomando valores entre +60 y -60 (siendo +60 la gama de matices rojos y -60 la gama de matices verdes). Y por último la coordenada  $b^*$ , corresponde al eje de ordenadas con valores entre +60 y -60 (siendo +60 la gama de matices amarillos y -60 la gama de matices azules) (figura 2).

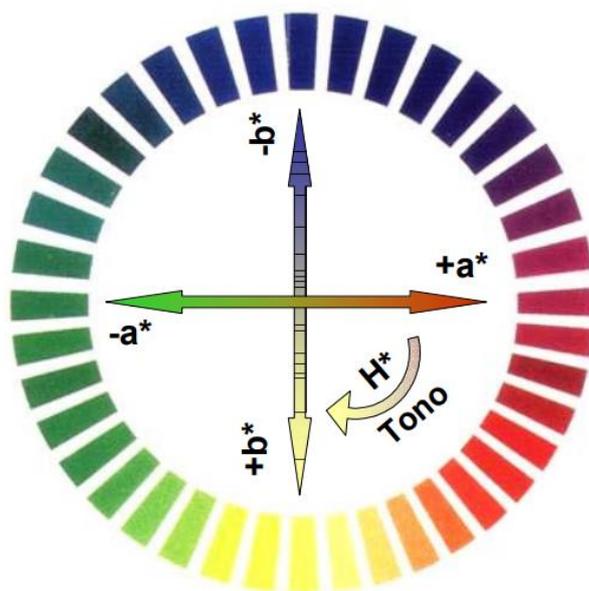


Figura 2. Diagrama secuencial y/o continuado de las coordenadas colorimétricas  $a^*$  y  $b^*$ , y de su magnitud derivada como es el tono ( $H^*$ ) (OIV, 2006).

#### 1.1.1.2. El perfil aromático

El aroma del vino es un marcador esencial de su calidad, es muy complejo y su percepción es el resultado de una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles (libres y ligados) presentes en concentraciones muy bajas. Se ha demostrado que el vino tiene más de 800 compuestos volátiles con un amplio rango de concentración, desde ng/L hasta cientos de mg/L (Machyňáková *et al.*, 2019). No todos los compuestos contribuyen de la misma forma al aroma del vino. De hecho, se ha definido el cálculo del “valor activo de olor” (OAV, de sus siglas en inglés “odour activity value”) como el cociente entre la concentración del compuesto a evaluar y el umbral de percepción de dicho compuesto, permitiendo estimar la contribución al espectro aromático del vino cuando ese resultado es  $\geq 1$ . Según Guth (1997) este concepto es necesario para cuantificar las diferencias aromáticas entre vinos con diferente procedencia

varietal o geográfica. Sin embargo, actualmente se encuentra en debate la fiabilidad del OAV como indicador de la importancia real del odorante en el vino (Ferreira et al., 2022).

Los compuestos volátiles libres contribuyen directamente al aroma del vino, mientras que los compuestos ligados se encuentran en el mosto en forma de compuestos inodoros, que pueden convertirse en formas volátiles, mediante hidrólisis ácida y enzimática, durante los procesos de vinificación, almacenamiento y envejecimiento del vino (López *et al.*, 2004).

Algunos de los compuestos de más impacto en el espectro aromático del vino se describen en la tabla 1.

*Tabla 1. Compuestos considerados como compuestos de impacto en los distintos tipos de vinos (Ferreira, 2007).*

<b>Compuesto aromático</b>	<b>Descripción</b>
Linalol	Aroma varietal de moscatel. Floral, cítrico
Óxido de rosa cis	Aroma floral. Varietal de Gewürztraminer
(E)-whiskylactona	Olor a madera
Sotolón (3-hidroxi-4,5-dimetil-2(5H)-furanona)	Vinos oxidativos. Oporto, Madeira, Jerez
4-metil-4-mercaptopentanona	Aroma a boj. Varietal de Sauvignon Blanc
3-mercapto-hexanol	Mango verde y boj
Acetato de 3-mercaptohexilo	Fruta tropical. Varietal de Verdejo
Furfuriltiol (FFT, o 2-furanmetanetiol)	Aroma a café. Característico de los champagne envejecidos
Bencilmercaptano	Aroma a tostado. Champagne envejecido, Chardonnay sobre lías
Sulfuro de dimetilo (DMS)	Olor azufrado. Vinos envejecidos
Metional (metil-tiopropenal)	Chocolate
Diacetilo	Mantequilla (Chardonnay)
Acetato de isoamilo	Aroma característico en Pinotage y Tempranillo
Rotundona	Pimienta (Shiraz)

Según el momento en que se generen, los compuestos aromáticos se clasifican en tres categorías:

- Formados en la uva: primarios o varietales.
- Formados por la acción de las levaduras o las bacterias: secundarios o fermentativos.
- Relacionados con la crianza en barrica y botella: terciarios.

#### **1.1.1.2.1. Aromas primarios**

Los aromas primarios del vino, también definidos como aromas varietales, son compuestos aromáticos que representan en el vino el aroma típico de las variedades de uva. Las formas libres de estos compuestos contribuyen de forma directa al aroma (Zalacaín *et al.*, 2007). Sin embargo, las formas no volátiles se encuentran en más proporción, siendo en su mayoría compuestos glicosilados. La hidrólisis de estos compuestos glicoconjugados puede producir agliconas aromáticamente activas, como terpenos, norisoprenoides C13, derivados bencénicos y alcoholes alifáticos (Gunata *et al.*, 1985; Ribéreau-Gayon *et al.*, 2021). Estos compuestos son de gran relevancia debido a que desempeñan un papel fundamental en la diferenciación de vinos procedentes de las distintas variedades de uva usadas en enología (Dimitriadis y Williams, 1984; Gunata *et al.*, 1985).

La viticultura y las prácticas culturales son factores que influyen en la composición aromática de la uva (González-Barreiro *et al.*, 2015; Vilanova *et al.*, 2007, 2017). Los aromas primarios pertenecientes a una misma variedad de uva pueden presentar diferentes características en función de factores naturales derivados del clima, tipo de suelo, fertilización, presencia/ausencia de plagas o incluso la ubicación geográfica, que pueden provocar diferentes condiciones de cultivo en cada zona y también cada año. Además, el período de maduración y el cuidado del viticultor a la hora de seleccionar las uvas pueden influir en el aroma primario final del vino (Pereira *et al.*, 2020).

Se sabe que las uvas contienen terpenos libres y combinados con enlaces glicosídicos con glucósidos, siendo los monoterpenos y sesquiterpenos los que aportan aroma y sabor. Si bien pocos aromas se han asociado directamente a variedades específicas, cada variedad de uva posee una huella aromática. Los glicósidos o ésteres de monoterpeno no muestran cambios significativos en su cantidad por la acción de las levaduras en la fermentación. Por tanto, se pueden utilizar para clasificar diferentes variedades, como los vinos elaborados a partir de uvas Muscat y Riesling, mediante el estudio de su composición analítica basada en tan solo 12 compuestos monoterpénicos (Rapp y Mandery, 1986; Styger *et al.*, 2011). Sin embargo, la baja

concentración de estos compuestos no permite su apreciación sensorial a no ser que su potencial se vea reforzado en etapas posteriores por reacciones enzimáticas que tengan mayor impacto en el aroma final del vino (Belda *et al.*, 2017). Además, otros precursores que no poseen características olorosas están involucrados en el desarrollo de otras sustancias aromáticas (por ejemplo, monoterpenos, dioles o terpenos, polioles, ácidos grasos, carotenoides, precursores glicosilados del aroma y fenoles volátiles) (Pereira *et al.*, 2020).

Las principales familias de compuestos involucradas en los aromas primarios o varietales del vino son los terpenos, los norisoprenoides C13 y los compuestos C6.

- Terpenos

Los terpenos son compuestos que derivan de las uvas y contribuyen en gran medida al aroma varietal de algunos vinos aromáticos. Con umbrales de percepción relativamente bajos, muchos terpenos contribuyen al aroma floral del vino directamente o mediante efectos sinérgicos (Swiegers y Pretorius, 2005). Aparecen de forma libre, percibidos directamente, y de forma combinada. Los terpenos combinados o ligados, cuyo contenido aumenta durante la maduración (Bayonove, 1993), se liberan en el transcurso de la vinificación por las enzimas de la uva y las levaduras o por las enzimas añadidas. Son fácilmente perceptibles desde cantidades muy bajas de concentración (mg/L) y son responsables del aroma de uva asociado a la variedad Muscat, pero también presentes en otras variedades de uva. Entre ellos, los alcoholes monoterpenos más olorosos son el linalol, geraniol, nerol, citronelol, 3,6-dimetil-1,5-octa-dien-1,7-diol, hotrienol y  $\alpha$ -terpineol, que aportan aromas florales, afrutados y cítricos al vino (Jeromel *et al.*, 2019; Ruiz *et al.*, 2019).

- Norisoprenoides C13

Los norisoprenoides son un grupo de compuestos aromáticos derivados de la degradación de los carotenoides, un grupo de pigmentos no aromáticos tetraterpenoides que existen ampliamente en las plantas. Estos compuestos son responsables, entre otros, de los olores a flores (violeta), fruta (compota de manzana, frutas exóticas), tabaco y petróleo. Los norisoprenoides C13, con 13 átomos de carbono, se encuentran entre muchos compuestos aromáticos conocidos con umbrales sensoriales extremadamente bajos y son fuente importante de aromas derivados de la uva en los vinos. Los norisoprenoides C13 más comunes son la  $\beta$ -damascenona, la  $\beta$ -ionona, el 1,1,6-trimetil-1,2-dihidronaftaleno (TDN), el (E)-1-(2,3,6-trimetilfenil)buta-1,3-dieno (TPB) y el vitispirano (Yuan *et al.*, 2015). Sus estructuras químicas se muestran en la figura 3.

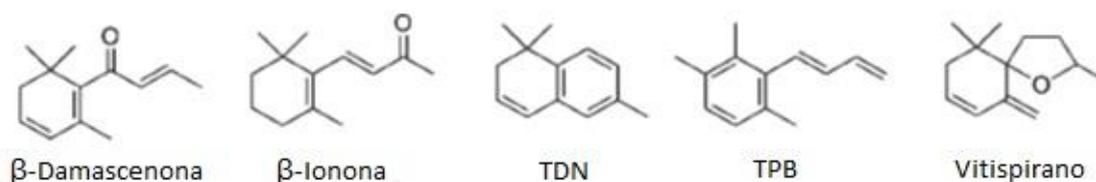


Figura 3. Estructuras químicas de algunos norisoprenoides C13 importantes en las uvas (Yuan *et al.*, 2015).

La  $\beta$ -damascenona y la  $\beta$ -ionona fueron observadas por primera vez en el vino por Schreier y Drawert (1974). Dado que la  $\beta$ -damascenona y la  $\beta$ -ionona se encuentran comúnmente a niveles por encima de sus umbrales sensoriales en los vinos, se sugiere que contribuyen de manera importante en variedades de uva no florales como Merlot, Cabernet Sauvignon y Pinot Noir (Fang y Quian, 2005; Gürbüz *et al.*, 2006; López *et al.*, 1999; Pineau *et al.*, 2007). La  $\beta$ -damascenona tiene un olor dulce y parecido a la miel o la manzana asada (Kováts, 1987) con un umbral sensorial de 50 ng/L en etanol acuoso al 10% (Guth, 1997). Sin embargo, la contribución de la  $\beta$ -damascenona al aroma del vino sigue siendo controvertida. La evidencia hasta la fecha indica que probablemente actúa como un potenciador de la intensidad del aroma, particularmente de los aromas de tipo afrutado (Escudero *et al.*, 2007; Ferreira *et al.*, 2002; Pineau *et al.*, 2007; Sefton *et al.*, 2011), y tiene la capacidad de enmascarar el aroma "herbáceo" asociado con la 2-isobutil-3-metoxipirazina (Pineau *et al.*, 2007). La  $\beta$ -ionona se describe a menudo como aroma a violeta y frambuesa, con umbrales sensoriales de 90 ng/L en el vino (Kotseridis *et al.*, 1999). El TDN tiene aromas similares al queroseno con un umbral sensorial de 2  $\mu$ g/L tanto en un vino patrón como en los vinos blancos naturales (Sacks *et al.*, 2012). El TPB fue encontrado por primera vez en vinos por Janusz *et al.* (2003). Se asocia con un aroma floral agradable en bajas concentraciones pero con aromas químicos cuando se encuentra en concentraciones altas (Cox *et al.*, 2005). El vitispirano fue identificado por primera vez en vinos por Simpson *et al.* (1977). Tiene dos carbonos quirales y, por lo tanto, dos pares de diastereoisómeros (a menudo referidos como vitispirano A y vitispirano B). El aroma de los diastereoisómeros es distinto, la forma *cis* se describe con aromas florales (crisantemo) y afrutados mientras que la forma *trans* se relaciona a aromas de flores exóticas y terrosos. Posteriormente Rapp y Mandery (1986), asociaron el vitispirano con aromas de alcanfor y eucalipto. El umbral sensorial de 800  $\mu$ g/L determinado para el vitispirano corresponde a la suma de sus diastereoisómeros (Eggers *et al.*, 2006).

- Compuestos C6

Los alcoholes C6 suelen tener, aromáticamente, un carácter vegetal y herbáceo, lo que provoca un efecto negativo en el aroma del vino (Ferreira *et al.*, 2000). Se ha observado que cuanto más oxígeno disuelto hay en el mosto, se generan más aldehídos C6 a través de la degeneración de los ácidos lipídicos catalizados por las enzimas lipoxigenasa e hidroperóxido liasa (LOX/HPL) (Jackson, 2008). Una porción de aldehídos C6 se transformará en alcoholes C6 durante la fermentación (Forde *et al.*, 2011).

Los aromas herbáceos que evocan el pimiento verde o el puerro se pueden percibir en ciertas variedades de uva mal maduras de Cabernet Sauvignon y Sauvignon Blanc. Estos olores se deben a la presencia de diversas metoxi-pirazinas a una concentración entre 5-40 ng/L. Su cantidad disminuye a lo largo de la maduración (Roujou y Dubourdieu, 1999).

#### **1.1.1.2.2. Aromas secundarios**

Los aromas secundarios que aparecen en el vino se pueden dividir en prefermentativos, derivados del tratamiento mecánico de la uva, y fermentativos, los potenciados durante los procesos de fermentación alcohólica o maloláctica (Pereira *et al.*, 2020; Perestrelo *et al.*, 2020). La especie de levadura más utilizada para la fermentación alcohólica es *Saccharomyces cerevisiae*, aunque existen alrededor de 20 géneros de levadura con la misma capacidad fermentativa como *Saccharomyces*, *Candida*, *Issatchenkia*, *Pichia*, *Hanseniaspora* (*Kloeckera*) o *Brettanomyces* (*Dekkera*) (Jeromel *et al.*, 2019). Estas especies no-*Saccharomyces* impulsan la liberación de aromas mediante la secreción de enzimas y la síntesis de nuevos metabolitos secundarios. Además, contribuyen a la estabilidad del color del vino. Por lo tanto, se utilizan estratégicamente para crear cultivos iniciadores múltiples, mixtos o secuenciales en combinación con *S. cerevisiae* (Belda *et al.*, 2017; Blanco-Padilla *et al.*, 2014; Van Wyk *et al.*, 2019). En vinos tintos, normalmente después de la fermentación alcohólica tiene lugar la fermentación maloláctica conducida por bacterias lácticas. Durante esta etapa, el ácido málico se descarboxila por la acción de *Oenococcus oeni* o *Lactobacillus plantarum*, dos especies de bacterias lácticas (Belda *et al.*, 2017).

A lo largo de la fermentación, los principales aromas creados pertenecen a las categorías de ácidos grasos volátiles, alcoholes superiores, acetatos y ésteres etílicos que hacen evolucionar el perfil aromático del vino (Jeromel *et al.*, 2019). Estas moléculas suelen estar presentes en umbrales sensoriales elevados (los productos de oxidación del linalol poseen un umbral de percepción de 6000 µg/L) y su combinación crea la matriz del aroma del vino (Fariña *et al.*, 2015; Jeromel *et al.*, 2019). Por tanto, aunque la composición final del aroma del vino depende

en gran medida de las especies y cepas fermentativas, el microbioma de la uva está ganando atención, ya que diferentes trabajos apuntan a su relevancia en las propiedades sensoriales finales de los vinos (Belda *et al.*, 2014, 2017; Van Wyk *et al.*, 2019).

Entre los principales volátiles que definen el vino, los ácidos grasos volátiles, los alcoholes superiores, los ésteres y los fenoles volátiles juegan un papel clave en la creación de los aromas secundarios.

- Ácidos grasos volátiles

En la categoría de los ácidos grasos alifáticos, además del ácido volátil más abundante que es el ácido acético, los principales ácidos grasos de cadena media son los ácidos hexanoico, octanoico o decanoico. Además, en el grupo de los ácidos grasos insaturados cabe mencionar el ácido 9-decenoico que posee propiedades conservantes y es relevante desde el punto de vista del aroma cuando se transforma en éster etílico (Schreier y Jennings, 1979).

Las levaduras son las principales productoras de estos ácidos grasos que son el sustrato inicial para la formación final de los ésteres etílicos. Entre las levaduras, *S. cerevisiae* es capaz de sintetizar principalmente los ácidos hexanoico y octanoico en grandes cantidades, pero también los ácidos pentanoico, decanoico y 3-metilbutanoico. Se ha descrito que otras especies no-*Saccharomyces* como el género *Hanseniaspora* producen ácido acético (en rangos muy variables, de 0,6 a 3,4 g/L) y como los géneros *Hanseniasporavineae* y *Candidazemplinina*, y las especies *H. uvarum* y *H. guilliermondii* muestran tasas de síntesis más altas para el ácido isobutírico (Jeromel *et al.*, 2019; Padilla *et al.*, 2016).

- Alcoholes superiores

Los alcoholes más abundantes en el vino, además del etanol y el glicerol, son los dioles y los alcoholes superiores. El etanol proporciona viscosidad, equilibra el sabor y fija los olores, mientras que los alcoholes superiores y el glicerol contribuyen en gran medida a la complejidad del aroma del vino y a la sensación en boca general del vino. Los alcoholes superiores son el resultado del catabolismo de los aminoácidos mediante un proceso conocido como reacción de Ehrlich, y afectan directa o indirectamente a la síntesis de compuestos aromáticos. Los alcoholes superiores también están implicados como precursores de ésteres, que son compuestos importantes en el aroma del vino (Padilla *et al.*, 2016; Styger *et al.*, 2011). Los principales alcoholes superiores son el 1-propanol, el isobutanol y el alcohol isoamílico. Otros volátiles importantes son el 2-feniletanol, el tirosol o triptofol y otros alcoholes

superiores presentes en cantidades inferiores, como el 2-metilbutanol-1, el 3-metil-1-butanol. Concentraciones moderadas de algunos de los compuestos volátiles considerados de alta intensidad de olor, como el 3-metil-1-butanol, el 2-feniletanol o el alcohol isoamílico, pueden tener un impacto positivo en el vino aportando notas aromáticas de flores, miel y frutas. La concentración de los alcoholes juega un papel clave en la complejidad de la composición del aroma. Valores de estos alcoholes por debajo de 300 mg/L proporcionan notas frutales y florales, mientras que valores por encima de 400 mg/L pueden ser negativos al agregar aromas picantes y desagradables (Belda. *et al.*, 2017; Jeromel *et al.*, 2019; Padilla *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2020).

Entre los diferentes parámetros de fermentación que afectan a la concentración final de los alcoholes superiores en el vino, la cepa de levadura es uno de los parámetros clave, seguido de la temperatura, el pH y el oxígeno, además de la madurez y variedad de la uva (Muñoz *et al.*, 2006). La síntesis de alcoholes superiores ha sido ampliamente estudiada y relacionada con diferentes especies y/o protocolos de inoculación para obtener vinos con una composición de alcohol equilibrada (Padilla *et al.*, 2016; Stribny *et al.*, 2015; Tokpohozin *et al.*, 2019).

#### - Ésteres

Los ésteres son otro grupo relevante, responsables también de la complejidad aromática de los vinos con más de 160 compuestos representativos identificados.

Los ésteres son los segundos constituyentes volátiles más importantes del vino y durante mucho tiempo se han considerado como contribuyentes especialmente importantes al aroma del vino porque son la fuente principal de aromas afrutados (Sumbly *et al.*, 2010). La mayoría de los ésteres que se encuentran en las bebidas alcohólicas son metabolitos secundarios producidos por las levaduras durante la fermentación alcohólica (Swiegers y Pretorius, 2005).

Desde un punto de vista químico, se pueden clasificar en ésteres etílicos de ácidos grasos o ésteres de acetato. En la primera categoría, el hexanoato de etilo, el octanoato de etilo y el decanoato de etilo son los más abundantes. En estas moléculas, el etanol representa una contribución importante a su estructura.

Los ésteres etílicos de ácidos grasos se producen durante la fermentación alcohólica por la acción de la levadura mediante la etanolisis del acil-CoA que se forma durante la síntesis o degradación de los ácidos grasos (Sumbly *et al.*, 2010; Swiegers y Pretorius, 2005). La mayoría

de los ésteres etílicos tienen umbrales de percepción bastante bajos y, por lo tanto, tienen un fuerte efecto sobre el aroma del vino (Gómez-Míguez *et al.*, 2007).

En el vino, los principales ésteres etílicos de los ácidos grasos incluyen butanoato, caproato, caprilato, caprato y laurato de etilo. Como otros ésteres, también pueden proporcionar aromas afrutados que se vuelven más suaves con el creciente número de carbonos en su estructura química. La formación de estos ésteres depende de la selección de las especies de levadura y otros parámetros de fermentación como las bajas temperaturas (Rapp y Mandery, 1986). Falcao *et al.* (2012) indicaron que el leucato de etilo podría ser el responsable del aroma de mora fresca de los vinos tintos de Burdeos. Estos autores determinaron el umbral sensorial de este compuesto en 300 µg/L en un patrón vínico y señalaron una interacción perceptiva sinérgica con el butanoato de etilo.

Los ésteres de acetato se producen a partir de la reacción del acetil-CoA con alcoholes superiores formados por degradación de aminoácidos o carbohidratos (Sumbly *et al.*, 2010; Swiegers y Pretorius, 2005). Los alcoholes superiores son esenciales para la formación de estos ésteres. Los principales ésteres de acetato son el acetato de isobutilo, amilo, hexilo, etilo (aroma afrutado), isoamilo (aroma de plátano) y 2-feniletilo, que contribuyen aromáticamente en el vino con notas de miel, afrutadas y florales (Jeromel *et al.*, 2019; Perestrelo *et al.*, 2020; Rapp y Mandery, 1986).

En términos generales, los ésteres tienen efectos positivos sobre el aroma de los vinos jóvenes. Sin embargo, como ocurre en el caso de los alcoholes superiores, cantidades excesivas de ésteres pueden inducir efectos negativos sobre la calidad del vino. Una alta concentración de ésteres puede ocultar los aromas varietales y simplificar la composición del aroma del producto final o estropear el vino, por ejemplo, si el acetato de etilo supera los 150-200 mg/L (Padilla *et al.*, 2016; Perestrelo *et al.*, 2020).

#### - Fenoles volátiles

Estos compuestos proceden de la degradación de los ácidos fenoles presentes en la uva (Zamora, 2003). Las notas aromáticas positivas de este grupo de moléculas se han relacionado principalmente con el proceso de envejecimiento donde los principales fenoles volátiles son el guayacol, el 4-metilguayacol, el 4-etilguayacol, el fenol, el o-cresol o la vainillina. Las enzimas implicadas en estos pasos metabólicos están principalmente asociadas con las bacterias lácticas, tales como las β-glucosidasas, las proteasas, las esterasas, las citrato liasas y las descarboxilasas del ácido fenólico. Entre los fenoles no volátiles presentes en la uva es común

encontrar ácidos fenólicos (ácidos cafeico, ferúlico y p-cumárico) o sus ésteres tartáricos (ácidos caftárico, feruloil tartárico, p-cumaroil tartárico). Las bacterias lácticas tienen la capacidad de metabolizar a los ácidos cinámicos, como el ácido p-cumárico o ferúlico, que mediante un paso de descarboxilación pueden transformarse en 4-vinil guayacol y 4-vinilfenol (Carpena *et al.*, 2020).

### 1.1.1.2.3. Aromas terciarios

Los aromas terciarios se crean durante el último paso de la elaboración de un vino, la crianza y envejecimiento, donde el almacenamiento del producto final es el principal responsable de la transferencia de aromas y sabores al vino. El método de envejecimiento típico es el uso de barricas de madera construidas en su mayoría con diferentes especies de roble como *Quercus alba*, *Q. robur* o *Q. petraea* (Carpena *et al.*, 2020). El vino envejecido en estas barricas se enriquece en compuestos volátiles como las lactonas de guayacol y las vainillinas e incluso por compuestos como el furfural, el 5-metilfurfural, el eugenol, el 5-hidroximetilfurfural, el 4-metilguayacol, la  $\beta$ -metil- $\gamma$ -octalactona, el guayacol y el siringol, al aplicar diferentes tratamientos de tostado a la madera (Chatonnet *et al.*, 1992; Tao *et al.*, 2014). El uso de diferentes tipos de madera proporciona diferentes compuestos volátiles al vino envejecido. El roble americano contribuye más a la presencia de la cis- y trans- $\beta$ -metil- $\gamma$ -octalactona en el vino (Chatonnet y Debourdieu, 1998; Guichard *et al.*, 1995). De hecho, el análisis de estos dos isómeros se ha utilizado para distinguir entre vinos envejecidos en roble francés y americano (Díaz-Plaza *et al.*, 2002; Pérez-Coello *et al.*, 1999; Waterhouse y Towey, 1994). Otras diferencias significativas entre los compuestos aromáticos aportados por las barricas de origen americano y francés son la ratio de los isómeros cis/trans de whiskylactona, siendo el roble francés más favorable hacia el isómero trans, o la diferencia en las concentraciones de eugenol y guaiacol, significativamente más alta en los vinos criados en roble americano (Chatonnet *et al.*, 1997; Fernández *et al.*, 2003)

Además del *Quercus*, se sabe que otro tipo de maderas como la *Acacia*, el *Prunus* o la *Castanea* contienen altas concentraciones de taninos que se utilizan para envejecer los vinos, ya que este tipo de polifenoles no volátiles pueden transferirse y contribuir a algunas propiedades sensoriales del vino como el color, la astringencia y el amargor (Fraga-Corral *et al.*, 2020; Perestrelo *et al.*, 2020).

## **1.1.2. El potencial enológico del viñedo. Factores vitícolas que afectan a la composición de la uva.**

### **1.1.2.1. El clima y el suelo**

De acuerdo con la definición de la Organización internacional de la Viña y el Vino (OIV), “El “terroir” vitivinícola es un concepto que se refiere a un espacio sobre el cual se desarrolla un saber colectivo de las interacciones entre un medio físico y biológico identificable y las prácticas vitivinícolas aplicadas, que confieren unas características distintivas a los productos originarios de este espacio. El “terroir” incluye características específicas del suelo, de la topografía, del clima, del paisaje y de la biodiversidad” (OIV, 2010). El *terroir* condiciona el desarrollo de la vid y la composición de las bayas, y se considera un aspecto central para determinar la calidad y tipicidad del vino (Van Leeuwen *et al.*, 2004). Dado que los vinos de alta calidad se obtienen en climas muy variados, es imposible definir un clima ideal en términos de temperatura, lluvia (cantidad y distribución) o radiación solar. Tampoco se puede definir el mejor suelo posible para vinos de alta calidad en cuanto a pedregosidad, contenido en arcilla o caliza, profundidad del perfil o contenido de nutrientes. Los factores del entorno natural deben considerarse en términos de su interacción con la vid (Fraga *et al.*, 2012; Van Leeuwen y Seguin, 2006).

El clima determina la viabilidad de los cultivos y afecta, en gran medida, a la variabilidad del rendimiento de un año a otro (Jones, 2003). Algunos parámetros importantes de la calidad de la uva, como los contenidos en sólidos solubles, ácidos orgánicos (ácido tartárico y málico), polifenoles y antocianinas, el color, el pH y los compuestos orgánicos volátiles responsables del aroma, se ven altamente influenciados por factores climáticos (Jackson y Lombard, 1993).

La vid posee una gran sensibilidad a los factores del clima. Las temperaturas tienen gran efecto sobre la fenología de la planta y la composición de la uva (Jackson y Lombard, 1993; Mira, 2010). Es un cultivo muy afectado por el cambio climático (Fourment *et al.*, 2011; Jones *et al.*, 2004, 2005)

Se ha registrado un aumento de las temperaturas medias, durante la fase de crecimiento de la vid, en gran parte de las regiones vitícolas a nivel mundial, desde el año 1950 (Jones *et al.*, 2005; Schultz, 2000). Duchêne y Schneider (2005) muestran con datos meteorológicos y fenológicos registrados en Alsacia desde los años 70, que el ciclo se ha adelantado y que el período entre la brotación y la vendimia se ha acortado y las fechas se han avanzado. Estos autores indican que la maduración de las uvas se produce en condiciones cada vez más cálidas

y bajo una demanda de agua mayor. Sin embargo, no hay evidencias claras de que el incremento de temperaturas vaya acompañado de un cambio en el régimen de las precipitaciones, por lo que es probable que los riesgos de déficit hídrico aumenten en el futuro.

El aumento de la temperatura media anual afecta al contenido de los componentes principales de la baya, con un aumento de la acumulación de azúcares (Neethling *et al.*, 2011; Petrie y Sadras, 2008), una reducción de la acidez total y un aumento de pH (Bergqvist *et al.*, 2001; Duchêne y Schneider, 2005; Jones y Davies, 2000). Estos cambios pueden modificar la tipicidad de los vinos (Schultz, 2000).

El granizo puede tener efectos destructivos en las plantaciones de vid, comprometiendo la producción anual de uva, dañando los tejidos vegetales (lo que favorece la entrada de enfermedades) y restringiendo el vigor de las plantas, que acaban siendo más sensibles a las heladas invernales (Santos y Belo-Pereira, 2019).

Las heladas tardías, es decir, las que ocurren después de la brotación de la vid, son un riesgo importante para los viñedos, causando pérdidas sustanciales de rendimiento en diferentes regiones vitivinícolas (Sgubin *et al.*, 2018). Las heladas tardías, han disminuido su frecuencia durante las últimas décadas en la Europa occidental según varios estudios (Leolini *et al.*, 2018; Scheifinger *et al.*, 2003). Sin embargo, debido al adelanto fenológico de la brotación a causa del cambio climático, la evolución del riesgo de heladas tardías es difícil de prever para las próximas décadas (Sgubin *et al.*, 2018).

Además de los factores climáticos, la textura y la composición química del suelo afectan de forma determinante a la calidad del vino. Blouin y Peynaud (2012) indican que los suelos calcáreos desarrollan finura y capacidad de envejecimiento en los vinos. Los suelos arcillosos favorecen la producción de vinos generosos. Las arenas y gravas pueden contribuir a la aceleración de la maduración y son suelos especialmente adecuados para variedades blancas. Los efectos de estas características edáficas se amplían o atenúan en función de la profundidad del suelo que son capaces de alcanzar las raíces y por su capacidad de drenaje (Seguin, 1969).

Las vides se pueden cultivar en una gran variedad de suelos. En suelos profundos y ricos, las vides son vigorosas y altamente productivas, pero producen vinos de peor calidad. El efecto del suelo sobre el comportamiento de la vid y la composición de la uva es complejo, porque el medio edáfico influye en la nutrición mineral de la vid y en la disponibilidad de agua, y actúa

sobre el desarrollo radicular en general, al definir las condiciones de humedad y temperatura y el ambiente físico-químico de la rizosfera (Van Leeuwen y Seguin, 2006).

La nutrición mineral es una herramienta de gestión fundamental para los viticultores, que puede influir en gran medida sobre la calidad de la uva (Singh, 2002). Los elementos esenciales se clasifican como macro o micronutrientes dependiendo de la cantidad de ese elemento requerida por la planta (Ashley, 2011). Los macronutrientes son el nitrógeno, el fósforo, el potasio, el calcio, el magnesio y el azufre, que se encuentran en niveles altos en el tejido vegetal (0,2 a 3,0 % del peso seco). Los micronutrientes, que se encuentran en niveles más bajos, incluyen el hierro, el manganeso, el molibdeno, el cobre, el zinc, el boro y el cloro. Las deficiencias o la toxicidad de los elementos esenciales individuales pueden resultar en síntomas característicos y en un crecimiento y desarrollo restringidos (Ashley, 2011; Proffitt y Campbell-Clause, 2012).

La temperatura, el agua, la radiación solar y la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico son los principales factores abióticos que gobiernan la síntesis y degradación de metabolitos primarios (azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, etc.) y secundarios (compuestos fenólicos y volátiles y sus precursores) directamente, a través de la regulación de sus rutas biosintéticas, o indirectamente, a través de sus efectos sobre la fisiología y fenología de la vid (Rienth *et al.*, 2021).

La radiación solar es una fuente primaria de energía para el desarrollo de las plantas, captada a través de la fotosíntesis. La cantidad de radiación solar absorbida por el dosel de hojas determina la productividad del cultivo y la calidad de la uva (Brighenti *et al.*, 2015) y ejerce un gran efecto sobre la respuesta fisiológica y el desarrollo de la vid (Poni, 2005). La máxima eficiencia fotosintética requiere entre 150 y 200 W/m<sup>2</sup> de intensidad lumínica y se ve fuertemente afectada por las condiciones ambientales en las que se desarrollan las hojas. La eficiencia disminuye drásticamente si las hojas están sombreadas (Assis *et al.*, 2004).

#### **1.1.2.2. El material vegetal**

La elección de una variedad de uva y de un portainjertos adecuados y su adaptación a la climatología de la zona es un factor determinante en la producción de vinos de calidad (Blouin y Peynaud, 2012; Pouget, 1978). Cada variedad de uva tiene características específicas en cuanto a la época de madurez, la productividad y la adaptación a un clima determinado, pero la elección del portainjertos puede mejorar la adaptación de la vid al suelo (Jogaiah *et al.*, 2014; Koundouras *et al.*, 2008). La elección del portainjertos también es relevante para

controlar ciertas plagas del suelo, además de la filoxera, como los nematodos (Linderman y Davis, 2001; Téliz *et al.*, 2007). Por otra parte, el empleo de distintos portainjertos puede afectar al desarrollo vegetativo-productivo y a la calidad de la uva (Li *et al.*, 2019; Reynolds y Wardle, 2001; Yuste *et al.*, 2017)

### **1.1.2.3. Las técnicas de cultivo**

La gestión del suelo de los viñedos tiene implicaciones en la calidad del vino: la conservación del suelo, el control de las malas hierbas, la fertilización, el riego, las medidas de fomento de la biodiversidad o el control de plagas son aspectos muy importantes para controlar el vigor y el crecimiento de la vid e influir positivamente en la calidad de la uva (Cataldo *et al.*, 2020). Un suministro abundante de agua y nutrientes al suelo promoverá el desarrollo radicular y dará como resultado un crecimiento vigoroso de la parte aérea (Champagnol, 1984). Las vides demasiado vigorosas suelen desarrollar un crecimiento excesivo de los brotes y compactan la vegetación. El alargamiento de los brotes también permanece activo más allá del periodo de crecimiento de la vegetación, siendo común una mayor proliferación de los brotes laterales (Smart *et al.*, 1985, 1988). En las vides vigorosas hay un mayor número de hojas, y estas son más grandes y de color más oscuro, dando lugar a una sombra excesiva en el interior del dosel (Shaulis y Smart 1974; Smart *et al.*, 1985). Smart (1984) y Smart *et al.* (1988) mostraron que la actividad fotosintética de las hojas sombreadas es muy inferior a la de las hojas bien iluminadas.

El manejo de la vegetación puede modificar la relación entre fruto y superficie foliar, así como el microclima de las hojas y los racimos, afectando a la maduración y a la calidad final de las uvas. Una buena exposición de los racimos a la luz solar mejora la calidad de las uvas (Smart, 1985), pero si esta exposición es excesiva puede resultar negativa (Bergqvist *et al.*, 2001). Los efectos de la luz y la sombra en el follaje y en los racimos pueden ser modulados con prácticas culturales, como los tipos de conducción, el tipo de poda, las operaciones de poda en verde, etc. (Jackson y Lombard, 1993). Los doseles demasiado densos dan lugar a retrasos en la maduración de la fruta y el agostamiento de los sarmientos (Shaulis y Smart, 1974; Smart *et al.*, 1989), mala calidad de la uva, baja productividad (Kliewer, 1982) y una mayor incidencia de enfermedades (Rotem y Patti, 1969). Haselgrove *et al.* (2000) indicaron que un dosel de vegetación más denso conduce a uvas con caracteres más herbáceos en su perfil aromático.

La exposición de las uvas a la luz solar normalmente se asocia con una mayor calidad debido a los niveles más altos de compuestos fenólicos, y niveles más bajos de ácidos en el mosto, así

como una menor incidencia de enfermedades (Abeysinghe *et al.*, 2019; Bergqvist *et al.*, 2001; Dokoozlian y Kliewer, 1996). Entre los compuestos fenólicos, los más sensibles son los flavonoides y, en particular, los glucósidos de flavonol, cuyos niveles aumentan drásticamente con el aumento de la exposición a la luz solar, en consonancia con su actividad de protección contra el daño oxidativo producido por la radiación UV (Martínez-Lüscher *et al.*, 2014; Reshef *et al.*, 2017, 2018).

Debido a que los carotenoides son pigmentos con función fotoprotectora, su biosíntesis generalmente mejora bajo una alta radiación solar (Kwasniewski *et al.*, 2010). Los niveles de norisoprenoides C13 también están altamente correlacionados con la exposición prolongada al sol (Kwasniewski *et al.*, 2010; Schüttler *et al.*, 2015; Young *et al.*, 2016). Young *et al.* (2016) sugieren que el aumento de los niveles de norisoprenoides observado en las uvas bien expuestas a la luz se debe a una mayor disponibilidad de carotenoides, que son precursores de aquellos.

El metabolismo de los antocianos responde tanto a cambios en las condiciones de iluminación como de temperatura del racimo. La luz es un factor limitante en la acumulación de antocianos en las bayas, sobre todo en la primera parte de la maduración (Haselgrove *et al.*, 2000). En estudios llevados a cabo por Kliewer (1970, 1977) se demostró que intensidades de luz un 25 % por encima de la luz solar ambiental daban como resultado una acumulación máxima de antocianinas en el hollejo de la uva. Sin embargo, se ha observado que el aumento concomitante de la temperatura en las uvas expuestas a la luz solar en condiciones de campo, puede reducir el color de las bayas, particularmente en regiones cálidas (Bergqvist *et al.*, 2001). Cuando la luz recibida es suficiente, la temperatura pasa a ser el factor limitante en el metabolismo de los antocianos (Haselgrove *et al.*, 2000). Por otra parte, Naor *et al.* (2002) concluyeron que las puntuaciones sensoriales del vino, realizadas por paneles de catadores entrenados, disminuían al reducirse la proporción entre el área foliar y el peso de la uva de las cepas.

## **1.2. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CUALITATIVO DEL VIÑEDO BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO Y CLOROSIS FÉRRICA**

### **1.2.1. El déficit hídrico**

El impacto del estrés hídrico en la región mediterránea sobre el comportamiento productivo y cualitativo de los viñedos es un tema de estudio de gran relevancia en las últimas décadas (Gutiérrez *et al.*, 2021; Ohana-Levi *et al.*, 2022 ; Razavi, *et al.*, 2008). El cambio climático y la escasez de agua que puede generar amenazan hoy al rendimiento del viñedo y a la calidad del vino a escala mundial (IPCC, 2014).

Un déficit hídrico moderado es necesario para la producción de vino tinto de calidad (Van Leeuwen *et al.*, 2009a), ya que favorece el proceso de maduración de la baya, con una mayor acumulación de azúcares y metabolitos secundarios (Carbonneau, 2004; Castellarin *et al.*, 2007; Cohen *et al.*, 2008; Shellie, 2006; Van Leeuwen *et al.*, 2009b). En regiones afectadas por sequía estacional (como ocurre en el clima de tipo mediterráneo) el estrés hídrico, combinado con altas temperaturas, puede llevar a fuertes restricciones en el crecimiento vegetativo, en la producción y en la calidad de las uvas (Chaves *et al.* 2010; Ojeda *et al.*, 2002). Por otro lado, una alta disponibilidad de agua en vides vigorosas también reducirá la calidad de la uva, en este caso a través de disminuciones en el color y en el contenido de azúcar, dando una acidez desequilibrada (Keller *et al.*, 2008; Medrano *et al.*, 2003; Romero *et al.*, 2010)

Cuando las vides enfrentan déficits de agua el rendimiento y el tamaño de las bayas disminuye, y los compuestos fenólicos totales aumentan de concentración en la uva, lo que resulta en un mayor potencial de calidad de la misma (Choné *et al.*, 2001; Medrano *et al.*, 2003; Ojeda *et al.*, 2002; Van Leeuwen *et al.*, 2004).

La reacción fisiológica de una vid al estrés hídrico y sus efectos en el crecimiento y desarrollo de los brotes y los racimos dependerá del momento del ciclo anual en que se produzca y de la intensidad de ese estrés (Balint y Reynolds., 2013; Chaves, 1991; Van Leeuwen *et al.*, 2009a). Por ejemplo, la división celular en la baya es muy activa inmediatamente después de la floración-cuajado, por lo que el estrés hídrico en esta etapa puede reducir significativamente el tamaño de las uvas en la vendimia, ya que el tamaño de la baya depende en gran medida del número de células que esta tiene (Goodwin, 2009). Los déficits hídricos entre la antesis y el envero disminuyen el tamaño de la uva, a menudo de forma irreversible, incluso si no hay escasez de agua después del comienzo de la maduración (Goldammer, 2013; McCarthy, 1997).

El cierre de los estomas es la respuesta más temprana a la baja disponibilidad de agua para la planta y esto induce una disminución de la actividad fotosintética (Chaves, 1991). Además, el estrés hídrico favorece la fotoinhibición, que daña el centro de reacción del fotosistema II (PS II) y que resulta también en un descenso en la asimilación de CO<sub>2</sub> (Adir *et al.*, 2003).

Las necesidades de agua aumentan en proporción al área foliar desplegada por la vid. Las vides más grandes y vigorosas requieren más agua que las vides pequeñas y más débiles. Sin embargo, el estrés hídrico suele ser más severo en un viñedo joven porque aquí las plantas tienen sistemas radiculares menos desarrollados (Goldammer, 2013).

La velocidad de maduración de las bayas aumenta cuando el estado hídrico de la vid es bajo. Esto repercute en un aumento del contenido de antocianinas y taninos en las uvas (Van Leeuwen *et al.*, 2003). El efecto del estrés hídrico sobre el contenido de azúcar del mosto depende del rendimiento. Con rendimientos bajos el déficit de agua de la vid aumenta el contenido de azúcares, mientras que con rendimientos altos lo reduce (Tregoat *et al.*, 2002).

El estrés hídrico también afecta al potencial aromático de la uva. Chapman *et al.* (2005) observaron que los vinos de Cabernet Sauvignon elaborados a partir de vides sometidas a estrés hídrico mostraban en el análisis sensorial puntuaciones significativamente más altas en el aroma frutal y de frutos secos, que los vinos elaborados a partir de vides regadas. En este mismo estudio, los vinos procedentes de un tratamiento de riego estándar fueron calificados mejor en aroma vegetal, aroma de pimiento morrón, aroma de pimienta negra y astringencia que los vinos de un tratamiento de riego mínimo, indicando que el déficit hídrico en la vid conduce a vinos con aromas y sabores más afrutados que un alto estado hídrico. Por otra parte, Des Gachons *et al.* (2005) indicaron que el potencial aromático de las uvas blancas puede disminuir en condiciones de estrés por déficit hídrico severo.

### **1.2.2. La deficiencia de hierro**

El hierro es un elemento esencial para las plantas, constituyente de los citocromos y enzimas implicados en la síntesis de la clorofila, la fotosíntesis, la respiración y la reducción de los nitratos (Medrano *et al.*, 2010). La deficiencia de hierro en las plantas se denomina “clorosis férrica” o “clorosis cálcica” porque en la mayoría de los casos está inducida por un exceso de caliza en el suelo (Morlat *et al.*, 1980). Los suelos calizos suponen el 39 % de la superficie total en el mundo con un total de 1.000 millones de hectáreas y es muy frecuente en el viñedo (Çelik y Katkat, 2010). Las altas concentraciones de bicarbonato y el elevado pH en estos suelos

reducen la disponibilidad de hierro y afectan también a los procesos metabólicos de asimilación en las plantas (Pestana *et al.*, 2005).

Debido a la baja movilidad del hierro dentro de la planta, los primeros síntomas de la carencia se aprecian en las hojas más jóvenes. Dichas hojas toman una tonalidad amarillenta, al principio, permaneciendo verdes las zonas próximas a las nervaduras (Del Campillo y Torrent, 1992). Si la carencia persiste, se llega a una decoloración total de las hojas, que acaban necrosando (Hidalgo y Hidalgo, 2011).

En muchas ocasiones, el contenido de hierro en las hojas cloróticas, expresado sobre materia seca, es similar o incluso superior al de las hojas verdes. El hecho, conocido como “paradoja de la clorosis férrica”, es consecuencia de una acumulación de hierro fisiológicamente inactivo en las hojas afectadas, así como de un menor desarrollo de estas, lo que produce un efecto de concentración del elemento en los tejidos (Bavaresco *et al.*, 1999; Römheld, 2000; Zaharieva y Römheld, 2000).

La actividad fotosintética se ve reducida en las plantas afectadas por clorosis férrica según el contenido en clorofila va disminuyendo, con lo cual la carencia provoca un menor crecimiento vegetativo, área foliar y producción de materia seca (Bertamini y Nedunchezian, 2005; Chen *et al.*, 2004; Pestana *et al.*, 2003; Tagliavini y Rombolà, 2001), así como problemas en el cuajado y en el desarrollo del fruto (Bavaresco *et al.*, 2010; Hidalgo y Hidalgo, 2011). La carencia puede conducir a reducciones importantes del rendimiento y pérdidas de calidad de la uva (Álvarez-Fernández *et al.*, 2006; Bavaresco *et al.*, 2006). Bajo condiciones de clorosis férrica los mostos reducen los contenidos en azúcar y antocianos e incrementan la acidez total (Castino *et al.*, 1987; Veliksar *et al.*, 2005).

Sin embargo, la restricción en el crecimiento vegetativo, con niveles de estrés por carencia de hierro de leve a moderado, puede tener efectos positivos en la calidad de la uva. Esta reducción del crecimiento genera un menor rendimiento y bayas más pequeñas, provocando una concentración de constituyentes como son los azúcares y los compuestos fenólicos (Balint y Reynolds, 2017; González *et al.*, 2019). Bavaresco *et al.* (2005) detectaron que un nivel moderado de clorosis férrica puede mejorar la calidad del vino debido a cambios positivos en la composición de la uva en cuanto al pH, y los contenidos en sólidos solubles, antocianos y resveratrol. Estos autores relacionaron estos cambios con un peso medio del racimo y de la baya más bajos en las plantas afectadas.

### **1.3. CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL ENOLÓGICO DE VIÑEDOS DE SECANO AFECTADOS POR DEFICIENCIA DE HIERRO**

Dentro de los viñedos de secano, la variación local en las condiciones del suelo, como la profundidad de la capa explorable por el sistema radicular, la textura, el pH o el contenido de caliza activa, pueden generar una amplia variabilidad espacial en el estado hídrico y/o en la disponibilidad de hierro para las plantas, afectando al rendimiento y a la composición de la uva (Li *et al.*, 2006; Martín *et al.*, 2007). La delimitación de zonas de viñedo en función del nivel de estrés, puede mejorar enormemente la gestión integral del cultivo en viticultura de precisión. La separación de la vendimia de diferentes zonas permite hacer distintas elaboraciones en bodega de acuerdo al potencial de calidad de la uva (Santos *et al.*, 2012).

Se han desarrollado diversas herramientas para monitorizar el estado hídrico del suelo y de las plantas individuales. Sin embargo, estas técnicas pueden no ser adecuadas para estudiar el estado hídrico de la vid a nivel de parcela o sub-parcela (Rienth y Scholasch, 2019; Van Leeuwen *et al.*, 2011). La toma de muestras en el viñedo ayudará a conocer mejor la variabilidad entre las diferentes parcelas (Santos *et al.*, 2012). Para su aplicación en viticultura de precisión es necesario aplicar técnicas simples, no destructivas, rápidas y económicas para evaluar así de una forma práctica el nivel de estrés en el viñedo, delimitar su variación espacial y evaluar su impacto (Kalaji *et al.*, 2011; Tuccio *et al.*, 2015).

En las últimas décadas se ha producido un gran desarrollo de las técnicas de viticultura de precisión (Ammoniaci *et al.*, 2021; Bramley, 2010; Sassu *et al.*, 2021). Con ellas se abre la posibilidad de diseñar diferentes estrategias de gestión del viñedo basadas en la variación espacio-temporal del crecimiento vegetativo (Tardáguila *et al.*, 2011), del rendimiento (Bramley y Hamilton, 2004) o de la composición de la uva (Bramley, 2005; Trought y Bramley, 2011).

La composición de la uva en el momento de la vendimia muestra una mayor variabilidad espacial en los compuestos fenólicos y las antocianinas que en los azúcares y el pH (Bramley, 2005), mientras que los patrones de variación del rendimiento son estables en el tiempo y están impulsados por la variabilidad en la topografía y el suelo. El conocimiento de estos patrones de variación puede generar oportunidades para una gestión zonal más precisa y la realización de una vendimia selectiva (Agati *et al.*, 2018).

El vigor de las vides es un parámetro que se ve influenciado de forma determinante por el estado hídrico y el estrés por clorosis férrica. Su control asegura el equilibrio entre las fases

vegetativa y reproductiva, lo que a su vez repercute en la calidad de la uva (Mota *et al.*, 2010). La gestión específica del vigor y del rendimiento en las parcelas de viñedo puede beneficiar enormemente al manejo del cultivo y aumentar la calidad de la uva (Bramley *et al.*, 2011).

La síntesis y acumulación de los compuestos fenólicos en las uvas durante la maduración dependen en gran medida de la capacidad fotosintética de la vid y la exposición de las uvas a la radiación solar (Rienth *et al.*, 2021). La vid es rica en compuestos fenilpropanoides, como los flavonoides y los estilbenos, los cuales están presentes en la mayoría de los tejidos vegetales. Estos compuestos se describen como antioxidantes que se acumulan en respuesta al estrés biótico y abiótico (Tavares *et al.*, 2013). En este sentido, Bavaresco *et al.* (2005) encontraron que las condiciones de estrés por deficiencia de hierro inducida en suelos calcáreos aumentaban los niveles de biosíntesis de antocianinas en los hollejos de las uvas. Los mecanismos bioquímicos involucrados no están claros, pero se puede especular que el hierro es parte constitutiva de las enzimas implicadas en la síntesis de la lignina, y su deficiencia puede derivar la vía del shikimato hacia la síntesis de otros compuestos fenólicos, incluyendo antocianinas.

Las consecuencias de la clorosis férrica en la calidad de la uva están en función del nivel que alcance la fisiopatía en la campaña, y también en función de los efectos acumulativos de la misma que se manifiestan en las cepas año tras año, como la disminución progresiva del vigor (Martín *et al.*, 2007).

El efecto más obvio de la deficiencia de hierro es la disminución de las concentraciones de pigmentos fotosintéticos en las hojas de las plantas afectadas (Morales *et al.*, 1990). Algunos instrumentos portátiles como por ejemplo el SPAD (Soil Plant Analysis Development) estiman el nivel de clorofila a partir de las diferencias en las absorbancias de las hojas a 650 nm y 940 nm (Minolta, 1989) y proporcionan una medición cuantitativa objetiva de la clorosis foliar asociada a la deficiencia de hierro (Ates y Kaya, 2021; Peryea y Kammereck, 1996). No obstante, el amarillamiento del tejido foliar puede ser causado por otros factores distintos a la clorosis férrica, como un drenaje insuficiente del suelo, ataques parasitarios u otras deficiencias nutricionales, como las de manganeso y zinc (Keller, 2005). Por esta razón, el contenido clorofílico foliar no debe ser la única herramienta para el diagnóstico de la clorosis férrica.

Los procesos bioquímicos implicados en la fotosíntesis pueden ser modificados de manera diferencial por estreses ambientales, de forma que mientras algunos son inactivados o

regulados a la baja, otros permanecen relativamente inalterados. En el caso de la deficiencia de hierro, la reducción de la tasa fotosintética en las hojas cloróticas se ha relacionado con una reducción de la eficiencia de fotosistema II (Covarrubias *et al.*, 2014; Morales *et al.*, 2000), una variable que puede ser estimada mediante medidas de la fluorescencia de la clorofila. Estas medidas podrían ser una herramienta muy útil para detectar el estrés en las plantas en una etapa temprana, cuando no hay síntomas visibles. Las técnicas de medida de la fluorescencia de la clorofila no son invasivas y proporcionan información completa acerca de la eficiencia fotosintética, la integridad del aparato fotosintético y la tasa de transferencia de electrones (Baker y Rosenqvist, 2004; Maxwell y Johnson, 2000). El comportamiento de diferentes parámetros de la fluorescencia de la clorofila de las hojas en condiciones de clorosis férrica ha sido estudiado por numerosos autores (Allakhverdiev *et al.*, 1987; Bavaresco *et al.*, 2006; Bertamini *et al.*, 2001, 2002; Heilemichael *et al.*, 2016; Netto *et al.*, 2005). Dobrowski *et al.* (2005) y Zarco-Tejada *et al.* (2013) han correlacionado la fluorescencia estacionaria, en condiciones de luz natural, con la fotosíntesis neta tanto en ensayos a nivel de hoja como con imágenes hiperespectrales, confirmando resultados anteriores, como los obtenidos por Flexas *et al.* (2000), en hojas de vides afectadas por estrés hídrico.

En muchas zonas vitícolas de secano afectadas por clorosis férrica sería interesante avanzar en métodos para la caracterización de la variabilidad en el potencial enológico de la uva dentro del viñedo. Esto permitiría optimizar la gestión del cultivo en base al efecto combinado del déficit de hierro y del estado hídrico sobre los parámetros de calidad de la uva, delimitando zonas diferenciadas que se podrían vendimiarse de forma separada. Así se podrían hacer elaboraciones diferentes con el objetivo de maximizar la calidad final del vino.

## 2. REFERENCIAS

Abeyasinghe, S. K., Greer, D. H. & Rogiers, S. Y. (2019). The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis vinifera* 'Shiraz' under vineyard conditions. *Vitis*, 58(1), 7-16.

Adir, N., Zer, H., Shochat, S. & Ohad, I. (2003). Photoinhibition—a historical perspective. *Photosynthesis Research*, 76, 343-370.

Agati, G., Soudani, K., Tuccio, L., Fierini, E., Ben Ghazlen, N., Fadaili, E. M., Romani, A. & Cerovic, Z. G. (2018). Management zone delineation for winegrape selective harvesting based on fluorescence-sensor mapping of grape skin anthocyanins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5778-5789.

Aladrén, E. F. (2013). Aspectos vitícolas en la calidad del vino. *ACE: Revista de Enología*, 137(2).

Allakhverdiev, S. I., Šetlíková, E., Klimov, V. V. & Šetlík, I. (1987). In photoinhibited photosystem II particles pheophytin photoreduction remains unimpaired. *FEBS Letters*, 226(1), 186-190.

Allegro, G., Pastore, C., Valentini, G. & Filippetti, I. (2021). The evolution of phenolic compounds in *Vitis vinifera* L. red berries during ripening: Analysis and role on wine sensory—A review. *Agronomy*, 11(5), 999-1013.

Ates, F. & Kaya, O. (2021). The relationship between iron and nitrogen concentrations based on Kjeldahl method and SPAD-502 readings in grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. 'Sultana seedless'). *Erwerbs-Obstbau*, 63(1), 53-59.

Álvarez-Fernández, A., Abadía, J. & Abadía, A. (2006) Iron deficiency, fruit yield and fruit quality. In Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms. *Springer, Dordrecht*, 85-101.

Ammoniaci, M., Kartsiotis, S. P., Perria, R. & Storchi, P. (2021). State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. *Agriculture*, 11(3), 201-221.

Assis, J. S., Lima, J. M. & Coelho, M. A. (2004). Fisiologia da videira. In Feira nacional da agricultura irrigada, Petrolina. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/157816>.

Ashley, R. (2011). Grapevine nutrition—an Australian perspective. *Foster's Wine Estates Americas*, 85557311.

- Balint, G. & Reynolds, A. G. (2013). Effect of different irrigation strategies on vine physiology, yield, grape composition and sensory profile of Sauvignon blanc (*Vitis vinifera* L.) in a cool climate area. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 47(3), 159-181.
- Balint, G. & Reynolds, A. G. (2017). Irrigation strategies impact Baco noir grapevines in Ontario. II. Fruit composition and wine sensory analysis. *American Journal of Enology and Viticulture*, 68(3), 310-324.
- Baker, N. R. & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607-1621.
- Bavaresco, L., Bertamini, M. & Iacono, F. (2006). Lime-induced chlorosis and physiological responses in grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot blanc) leaves. *Vitis*, 45(1), 45-46.
- Bavaresco, L., Civardi, S., Pezzutto, S., Vezzulli, S. & Ferrari, F. (2005). Grape production, technological parameters, and stilbenic compounds as affected by lime-induced chlorosis. *Vitis*, 44(2), 63-65.
- Bavaresco, L., de Macedo, M. I. V. Z., Gonçalves, B., Civardi, S., Gatti, M. & Ferrari, F. (2010). Effects of traditional and new methods on overcoming lime-induced chlorosis of grapevine. *American Journal of Enology and Viticulture*, 61(2), 186-190.
- Bavaresco, L., Giachino, E. & Colla, R. (1999). Iron chlorosis paradox in grapevine. *Journal of Plant Nutrition*, 22(10), 1589-1597.
- Bayonove, C. (1993). Les composés terpeniques. In Les acquisitions récentes en chromatographie du vin. *Editorial Diffusion*, 99-120.
- Belda, I., Ruiz, J., Esteban-Fernández, A., Navascués, E., Marquina, D., Santos, A. & Moreno-Arribas, M. V. (2017). Microbial contribution to wine aroma and its intended use for wine quality improvement. *Molecules*, 22(2), 189-218.
- Bergqvist, J., Dokoozlian, N. & Ebisuda, N. (2001). Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52(1), 1-7.

Bertamini, M., Muthuchelian, K. & Nedunchezian, N. (2002). Iron deficiency induced changes on the donor side of PS II in field grown grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot Noir) leaves. *Plant Science*, 162(4), 599-605.

Bertamini, M. & Nedunchezian, N. (2005). Grapevine growth and physiological responses to iron deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 28(5), 737-749.

Bertamini, M., Nedunchezian, N. & Borghi, B. (2001). Effect of iron deficiency induced changes on photosynthetic pigments, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase, and photosystem activities in field grown grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot Noir) leaves. *Photosynthetica*, 39(1), 59-65.

Blanco-Padilla, A., Soto, K. M., Hernández, M. & Mendoza, S. (2014). Food antimicrobials nanocarriers. *The Scientific World Journal*, 837215.

Blouin, J. & Peynaud, É. (2012). Viticulture, oenologie et qualité. In *Connaissance et travail du vin*. Dunod, 5-10.

Boulton, R. (2001). The copigmentation of anthocyanins and its role in the color of red wine: A critical review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52(2), 67-87.

Bramley, R. G. V. (2005). Understanding variability in winegrape production systems. 2. Within vineyard variation in quality over several vintages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(1), 33-42.

Bramley, R. G. V. (2010). Precision Viticulture: Managing vineyard variability for improved quality outcomes. In *Managing wine quality (Vol. one)*. *Viticulture and wine quality Cambridge: Woodhead Publishin*, 445-480.

Bramley, R. G. V. & Hamilton, R. P. (2004). Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(1), 32-45.

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.

Brighenti, A. F., Malinovski, L. I., Stefanini, M., Vieira, H. J. & Silva, A. L. (2015). Comparison between the wine producing regions of São Joaquim-SC, Brazil and San Michele all'Adige-TN, Italy. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(2), 281-288.

Carbonneau, A. (2004). Climat du vignoble et raisonnement de l'irrigation et de la conduite. In Actas colloque mondiaiviti. *IFV*, 109-126.

Carpena, M., Pereira, A. G., Prieto, M. A. & Simal-Gandara, J. (2020). Wine aging technology: Fundamental role of wood barrels. *Foods*, 9(9), 1160-1185.

Castellarin, S. D., Pfeiffer, A., Sivilotti, P., Degan, M., Peterlunger, E. & Di Gaspero, G. (2007). Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruits of grapevine under seasonal water deficit. *Plant, Cell & Environment*, 30(11), 1381-1399.

Castillo-Muñoz, N., Gómez-Alonso, S., García-Romero, E. & Hermosín-Gutiérrez, I. (2007). Flavonol profiles of *Vitis vinifera* red grapes and their single-cultivar wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(3), 992-1002.

Castino, M., Ubigli, M., Corino, L., Luzzati, A., Siragusa, N. & Nappi, P. (1987). Oenological effects of nutrients deficiencies on the grape variety Barbera cultivated in Piedmont vineyards. *Vignevini*, 14, 37-54.

Cataldo, E., Salvi, L., Sbraci, S., Storchi, P. & Mattii, G. B. (2020). Sustainable viticulture: Effects of soil management in *Vitis vinifera*. *Agronomy*, 10(12), 1949-1964.

Çelik, H. & Katkat, A. V. (2010). Comparison of various chemical extraction methods used for determination of the available iron amounts of calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(3), 290-300.

Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y. & Siddique, K. H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 3-25

Champagnol, F. (1984). Influence des facteurs externes. In Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. *Champagnol, St-Gély du Fec*, 3-6.

Chapman, D. M., Roby, G., Ebeler, S. E., Guinard, J. X. & Matthews, M. A. (2005). Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different water status. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(3), 339-347.

Chatonnet, P., Dubourdieu, D. & Boidron, J. N. (1992). Incidence of fermentation and ageing conditions of dry white wines in barrels on their composition in substances yielded by oak wood. *Sciences des Aliments*, 12(4), 665-685.

Chatonnet, P. & Dubourdieu, D. (1998). Comparative study of the characteristics of American white oak (*Quercus alba*) and European oak (*Quercus petraea* and *Q. robur*) for production of barrels used in barrel aging of wines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49(1), 79-85.

Chatonnet, P., Ricardo-Da-Silva, J. M. & Dubourdieu, D. (1997). Influence de l'utilisation de barriques en chêne sessile européen (*Quercus petraea*) ou en chêne blanc américain (*Quercus alba*) sur la composition et la qualité des vins rouges. *Revue Française d'Oenologie*, 165, 44-48.

Chaves, M. M. (1991). Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, 42(1), 1-16.

Chaves, M. M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J. M., Santos, T., Regalado, A. P., Rodrigues, M. L. & Lopes, C. M. (2010). Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*, 105, 661-676.

Cheftel, J. C. y Cheftel, H. (1992). Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. *Acribia*, 1-333

Chen, L. S., Smith, B. R. & Cheng, L. (2004). CO<sub>2</sub> assimilation, photosynthetic enzymes, and carbohydrates of Concord grape leaves in response to iron supply. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(5), 738-744.

Cheynier, V., Duenas-Paton, M., Salas, E., Maury, C., Souquet, J. M., Sarni-Manchado, P. & Fulcrand, H. (2006). Structure and properties of wine pigments and tannins. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3), 298-305.

Cheynier, V., Moutounet, M. & Sarni-Manchado, P. (2000). Los compuestos fenólicos. In *Enología: Fundamentos científicos y tecnológicos*. Mundi Prensa Libros, 114-136.

Choné, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D. & Gaudillère, J. P. (2001). Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*, 87(4), 477-483.

Cohen, S. D., Tarara, J. M. & Kennedy, J. A. (2008). Assessing the impact of temperature on grape phenolic metabolism. *Analytica Chimica Acta*, 621(1), 57-67.

- Conde, C., Silva, P., Fontes, N., Dias, A. C. P., Tavares, R. M., Sousa, M. J., Agasse, A., Delrot, S. & Gerós, H. (2007). Biochemical changes throughout grape berry development and fruit and wine quality. *Food*, 1(1), 1-22.
- Covarrubias, J. I., Pisi, A. & Rombolà, A. D. (2014). Evaluation of sustainable management techniques for preventing iron chlorosis in the grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(1), 149-159.
- Cordente, A. G., Solomon, M., Schulkin, A., Francis, I. L., Barker, A., Borneman, A. R. & Curtin, C. D. (2018). Novel wine yeast with ARO4 and TYR1 mutations that overproduce 'floral' aroma compounds 2-phenylethanol and 2-phenylethyl acetate. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(14), 5977-5988.
- Cox, A., Capone, D. L., Eley, G. M., Perkins, M. V. & Sefton, M. A. (2005). Quantitative analysis, occurrence, and stability of (E)-1-(2, 3, 6-trimethylphenyl) buta-1, 3-diene in wine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(9), 3584-3591.
- Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M. & Shinozaki, K. (2011). Effects of abiotic stress on plants: A systems biology perspective. *BMC Plant Biology*, 11(1), 1-14.
- Darias-Martín, J., Carrillo, M., Díaz, E. & Boulton, R. B. (2001). Enhancement of red wine colour by pre-fermentation addition of copigments. *Food Chemistry*, 73(2), 217-220.
- De Castilhos, M. B. M., Del Bianchi, V. L., Gómez-Alonso, S., García-Romero, E. & Hermosín-Gutiérrez, I. (2020). Sensory descriptive and comprehensive GC-MS as suitable tools to characterize the effects of alternative winemaking procedures on wine aroma. Part II: BRS Rúbea and BRS Cora. *Food Chemistry*, 311, 126025.
- Del Campillo, M. C. & Torrent, J. (1992). Predicting the incidence of iron chlorosis in calcareous soils of southern Spain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(3-4), 399-416.
- Des Gachons, C. P., Leeuwen, C. V., Tominaga, T., Soyer, J. P., Gaudillère, J. P. & Dubourdieu, D. (2005). Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(1), 73-85.

Díaz-Plaza, E. M., Reyero, J. R., Pardo, F., Alonso, G. L. & Salinas, M. R. (2002). Influence of oak wood on the aromatic composition and quality of wines with different tannin contents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(9), 2622-2626.

Dimitriadis, E. & Williams, P. J. (1984). The development and use of a rapid analytical technique for estimation of free and potentially volatile monoterpene flavorants of grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 35(2), 66-71.

Dobrowski, S. Z., Pushnik, J. C., Zarco-Tejada, P. J. & Ustin, S. L. (2005). Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*, 97(3), 403-414.

Dokoozlian, N. K. & Kliewer, W. M. (1996). Influence of light on grape berry growth and composition varies during fruit development. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(5), 869-874.

Downey, M. O., Harvey, J. S. & Robinson, S. P. (2003). Analysis of tannins in seeds and skins of Shiraz grapes throughout berry development. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(1), 15-27.

Duchêne, E. & Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: A glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(1), 93-99.

Eggers, N. J., Bohna, K. & Dooley, B. (2006). Determination of vitispirane in wines by stable isotope dilution assay. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(2), 226-232.

Escudero, A., Campo, E., Fariña, L., Cacho, J. & Ferreira, V. (2007). Analytical characterization of the aroma of five premium red wines. Insights into the role of odor families and the concept of fruitiness of wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(11), 4501-4510.

European Commission (1990). Regulation (EEC) N° 2676/90 of 17 Sept 1990. Community methods for the analysis of wines. Official Journal of the European Communities L272 (3/10/1990): 0001-0192.

Falcao, L. D., Lytra, G., Darriet, P. & Barbe, J. C. (2012). Identification of ethyl 2-hydroxy-4-methylpentanoate in red wines, a compound involved in blackberry aroma. *Food Chemistry*, 132(1), 230-236.

Fang, Y. & Qian, M. (2005). Aroma compounds in Oregon Pinot Noir wine determined by aroma extract dilution analysis (AEDA). *Flavour and Fragrance Journal*, 20(1), 22-29.

Fariña, L., Villar, V., Ares, G., Carrau, F., Dellacassa, E. & Boido, E. (2015). Volatile composition and aroma profile of Uruguayan Tannat wines. *Food Research International*, 69, 244-255.

Fernández, B., Cadahía, E. & Jalocha, J. (2003). Volatile compounds in a Spanish red wine aged in barrels made of Spanish, French, and American oak wood. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(26), 7671-7678.

Ferreira, V. (2007). La base química del aroma del vino: Un viaje analítico desde las moléculas hasta las sensaciones olfato-gustativas. *Real Academia de Ciencias*, 62, 7-36.

Ferreira, V., De La Fuente, A. & Sáenz-Navajas, M. P. (2022). Wine aroma vectors and sensory attributes. In *Managing Wine Quality*. Woodhead Publishing, 3-39.

Ferreira, V., López, R. & Cacho, J. F. (2000). Quantitative determination of the odorants of young red wines from different grape varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(11), 1659-1667.

Ferreira, V., Ortín, N., Escudero, A., López, R. & Cacho, J. (2002). Chemical characterization of the aroma of Grenache rose wines: Aroma extract dilution analysis, quantitative determination, and sensory reconstitution studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(14), 4048-4054.

Flexas, J., Bota, J., Escalona, J. M., Sampol, B. & Medrano, H. (2002). Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: An evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Functional Plant Biology*, 29(4), 461-471.

Flexas, J., Briantais, J. M., Cerovic, Z., Medrano, H. & Moya, I. (2000). Steady-state and maximum chlorophyll fluorescence responses to water stress in grapevine leaves: A new remote sensing system. *Remote Sensing of Environment*, 73(3), 283-297.

Forde, C. G., Cox, A., Williams, E. R. & Boss, P. K. (2011). Associations between the sensory attributes and volatile composition of Cabernet Sauvignon wines and the volatile composition of the grapes used for their production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(6), 2573-2583.

- Fourment, M., Ferrer, M. & Quéno, H. (2011). La vid (*Vitis vinifera* L. cv. Tannat) como indicadora del cambio climático: el caso de Uruguay. III *Congreso Internacional sobre Cambio Climático y Desarrollo Sustentable, La Plata*.
- Fournand, D., Vicens, A., Sidhoum, L., Souquet, J. M., Moutounet, M. & Cheynier, V. (2006). Accumulation and extractability of grape skin tannins and anthocyanins at different advanced physiological stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(19), 7331-7338.
- Fraga-Corral, M., García-Oliveira, P., Pereira, A. G., Lourenço-Lopes, C., Jimenez-Lopez, C., Prieto, M. A. & Simal-Gandara, J. (2020). Technological application of tannin-based extracts. *Molecules*, 25(3), 614-639.
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J. & Santos, J. A. (2012). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2), 94-110.
- Gambini, J., Gimeno-Mallench, L., Olaso-Gonzalez, G., Mastaloudis, A., Traber, M. G., Monleón, D., Borrás, C. & Viña, J. (2021). Moderate red wine consumption increases the expression of longevity-associated genes in controlled human populations and extends lifespan in *Drosophila melanogaster*. *Antioxidants*, 10(2), 301-316.
- Garrido, J. & Borges, F. (2013). Wine and grape polyphenols—A chemical perspective. *Food Research International*, 54(2), 1844-1858.
- Gawel, R. (1998). Red wine astringency: A review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 4(2), 74-95.
- Goldammer, T. (2013). Grapevine water management. In *The grape grower's handbook: a complete guide to viticulture for wine production*. Apex Publisher, 113-120.
- Gómez-Míguez, M. J., Cacho, J. F., Ferreira, V., Vicario, I. M. & Heredia, F. J. (2007). Volatile components of Zalema white wines. *Food Chemistry*, 100(4), 1464-1473.
- González-Barreiro, C., Rial-Otero, R., Cancho-Grande, B. & Simal-Gándara, J. (2015). Wine aroma compounds in grapes: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(2), 202-218.
- González M. R., Hailemichael G, Catalina A. & Martín P. (2019). Combined effects of water status and iron deficiency chlorosis on grape composition in non-irrigated vineyards. *Scientia Agricola*, 76, 473-480.

- Gonzalo-Diago, A., Dizy, M. & Fernández-Zurbano, P. (2014). Contribution of low molecular weight phenols to bitter taste and mouthfeel properties in red wines. *Food Chemistry*, 154, 187-198.
- Goodwin, I. (2009). Managing water stress in grapevines in greater Victoria, *Department of Primary Industries*.
- Guichard, E., Fournier, N., Masson, G. & Puech, J. L. (1995). Stereoisomers of  $\beta$ -methyl- $\gamma$ -octalactone. I. Quantification in brandies as a function of wood origin and treatment of the barrels. *American Journal of Enology and Viticulture*, 46(4), 419-423.
- Gunata, Y. Z., Bayonove, C. L., Baumes, R. L. & Cordonnier, R. E. (1985). The aroma of grapes I. Extraction and determination of free and glycosidically bound fractions of some grape aroma components. *Journal of Chromatography A*, 331, 83-90.
- Gürbüz, O., Rouseff, J. M. & Rouseff, R. L. (2006). Comparison of aroma volatiles in commercial Merlot and Cabernet Sauvignon wines using gas chromatography– olfactometry and gas chromatography– mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(11), 3990-3996.
- Guth, H. (1997). Quantitation and sensory studies of character impact odorants of different white wine varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(8), 3027-3032.
- Gutiérrez, S., Fernández-Navales, J., Diago, M. P., Iñiguez, R. & Tardaguila, J. (2021). Assessing and mapping vineyard water status using a ground mobile thermal imaging platform. *Irrigation Science*, 39(4), 457-468.
- Hailemichael, G., Catalina, A., González, M. R. & Martín, P. (2016). Relationships between water status, leaf chlorophyll content and photosynthetic performance in Tempranillo vineyards. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 37(2), 149–156.
- Hakimi, J. & Reynolds, A. G. (2010). Impact of vine water status on sensory attributes of Cabernet Franc wines in the Niagara Peninsula of Ontario. *OENO One*, 44(2), 61-75.
- Hasan, M. & Bae, H. (2017). An overview of stress-induced resveratrol synthesis in grapes: perspectives for resveratrol-enriched grape products. *Molecules*, 22(2), 294-312.
- Haselgrove, L., Botting, D., Van Heeswijck, R., Hoj, P. B., Dry, C., Ford, C. & Iland, P. G. (2000). Canopy microclimate and berry composition: the effect of bunch exposure on the phenolic

composition of *Vitis vinifera* L. Cv. Shiraz grape berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(2), 141-149.

Hayasaka, Y. & Kennedy, J. A. (2003). Mass spectrometric evidence for the formation of pigmented polymers in red wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(3), 210-220.

Hidalgo, L y Hidalgo, J. (2011). Clorosis caliza. In Tratado de viticultura. Volumen II. *Ediciones Mundiprensa*, 1544-1555.

IPCC (2014). Climate change 2014 synthesis report.

Jackson, D. I. & Lombard, P. B. (1993). Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality-A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44(4), 409-430.

Jackson, M. G., Timberlake, C. F., Bridle, P. & Vallis, L. (1978). Red wine quality: correlations between colour, aroma and flavour and pigment and other parameters of young Beaujolais. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 29(8), 715-727.

Jackson, R. S. (2008). Wine science: Principles and applications. *Elsevier-Academic Press*, 310.

Janusz, A., Capone, D. L., Puglisi, C. J., Perkins, M. V., Eley, G. M. & Sefton, M. A. (2003). (E)-1-(2, 3, 6-Trimethylphenyl) buta-1, 3-diene: A potent grape-derived odorant in wine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(26), 7759-7763.

Jeromel, A., Korenika, A. M. J. & Tomaz, I. (2019). An influence of different yeast species on wine aroma composition. In *Fermented Beverages. Woodhead Publishing*. 171-285

Jogaiah, S., Ramteke, S. D., Sharma, J. & Upadhyay, A. K. (2014). Moisture and salinity stress induced changes in biochemical constituents and water relations of different grape rootstock cultivars. *International Journal of Agronomy*, 789087.

Jones, G. V. (2003). Climate and terroir: Impacts of climate variability and change on wine; "terroir, geology and wines: A tribute to Simon J. Haynes", *Session held at the Geological Society of American Annual Meeting, Seattle*, 1-14.

- Jones, G. V. & Davis, R. E. (2000). Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51(3), 249-261.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R. & Storchmann, K. H. (2004). Climate and wine: Quality issues in a warmer world. In Proceedings of the Vineyard Data Quantification Society's 10th Econometrics Meeting, Dijon.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R. & Storchmann, K. (2005). Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3), 319-343.
- Kalaji, H. M., Bosa, K., Kościelniak, J. & Hossain, Z. (2011). Chlorophyll a fluorescence—a useful tool for the early detection of temperature stress in spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *OmicS: A Journal of Integrative Biology*, 15(12), 925-934.
- Kassara, S. & Kennedy, J. A. (2011). Relationship between red wine grade and phenolics. 2. Tannin composition and size. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(15), 8409-8412.
- Keller, M. (2005). Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(3), 267-283.
- Keller, M., Smithyman, R. P. & Mills, L. J. (2008). Interactive effects of deficit irrigation and crop load on Cabernet Sauvignon in an arid climate. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59(3), 221-234.
- Kennedy, J. A., Matthews, M. A. & Waterhouse, A. L. (2002). Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53(4), 268-274.
- Kennedy, J. A., Saucier, C. & Glories, Y. (2006). Grape and wine phenolics: History and perspective. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3), 239-248.
- Kliewer, W. M. (1970). Effect of day temperature and light intensity on coloration of *Vitis vinifera* L. grapes. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 95(6), 693-700.
- Kliewer, W. M. (1977). Influence of temperature, solar radiation and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(2), 96-103.

Kliewer, W. M. (1982). Vineyard canopy management: A review. Proceedings of The Grape and Wine Centennial Symposium, Davis, 342-352

Kolesch, H., Höfner, W. & Schaller, K. (1987). Effect of bicarbonate and phosphate on iron chlorosis of grape vines with special regard to the susceptibility of two rootstocks. Part II: pot experiments. *Journal of Plant Nutrition*, 10(2), 231-249.

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.

Kotseridis, Y., Baumes, R. L., Bertrand, A. & Skouroumounis, G. K. (1999). Quantitative determination of  $\beta$ -ionone in red wines and grapes of Bordeaux using a stable isotope dilution assay. *Journal of Chromatography A*, 848(1-2), 317-325.

Koundouras, S., Tsialtas, I. T., Zioziou, E. & Nikolaou, N. (2008). Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet–Sauvignon) under contrasting water status: leaf physiological and structural responses. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 128(1-2), 86-96.

Kováts, E. S. (1987). Composition of essential oils. Part 7. Bulgarian oil of rose (*Rosa damascena* Mill). *Journal of Chromatography*, 406, 185-222.

Kwasniewski, M. T., Vanden Heuvel, J. E., Pan, B. S. & Sacks, G. L. (2010). Timing of cluster light environment manipulation during grape development affects C13 norisoprenoid and carotenoid concentrations in Riesling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(11), 6841-6849.

Langcake, P. & Pryce, R. J. (1976). The production of resveratrol by *Vitis vinifera* and other members of the Vitaceae as a response to infection or injury. *Physiological Plant Pathology*, 9(1), 77-86.

Ledderhof, D., Reynolds, A. G., Manin, L. & Brown, R. (2014). Influence of water status on sensory profiles of Ontario Pinot noir wines. *LWT – Food Science and Technology*, 57(1), 65-82.

Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H. & Zhang, T. (2007). Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the

Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 339-383.

Leolini, L., Moriondo, M., Fila, G., Costafreda-Aumedes, S., Ferrise, R. & Bindi, M. (2018). Late spring frost impacts on future grapevine distribution in Europe. *Field Crops Research*, 222, 197-208.

Li, M., Guo, Z., Jia, N., Yuan, J., Han, B., Yin, Y., Sun, Y., Liu, C. J. & Zhao, S. (2019). Evaluation of eight rootstocks on the growth and berry quality of 'Marselan' grapevines. *Scientia Horticulturae*, 248, 58-61.

Li, R. H., Guo, P. G., Michael, B., Stefania, G. & Salvatore, C. (2006). Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, 5(10), 751-757.

Li, T., Hao, X., Kang, S. & Leng, D. (2017). Spatial variation of winegrape yield and berry composition and their relationships to spatiotemporal distribution of soil water content. *American Journal of Enology and Viticulture*, 68(3), 369-377.

Linderman, R. G. & Davis, E. A. (2001). Comparative response of selected grapevine rootstocks and cultivars to inoculation with different mycorrhizal fungi. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52(1), 8-11.

López, R., Ezpeleta, E., Sánchez, I., Cacho, J. & Ferreira, V. (2004). Analysis of the aroma intensities of volatile compounds released from mild acid hydrolysates of odourless precursors extracted from Tempranillo and Grenache grapes using gas chromatography-olfactometry. *Food Chemistry*, 88(1), 95-103.

López, R., Ferreira, V., Hernandez, P., & Cacho, J. F. (1999). Identification of impact odorants of young red wines made with Merlot, Cabernet Sauvignon and Grenache grape varieties: A comparative study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(11), 1461-1467.

Machyňáková, A., Khvalbota, L., Furdikova, K., Drtilova, T. & Špánik, I. (2019). Characterization of volatile organic compounds in Slovak Tokaj wines. *Journal of Food & Nutrition Research*, 58(4), 307-318.

Martín, P., Zarco-Tejada, P. J., González, M. R. & Berjón, A. (2007). Using hyperspectral remote sensing to map grape quality in Tempranillo vineyards affected by iron deficiency chlorosis. *Vitis-Geilweilerhof*, 46(1), 7-14.

Martínez-Lüscher, J., Torres, N., Hilbert, G., Richard, T., Sánchez-Díaz, M., Delrot, S., Aguirreolea, J., Pascual, I. & Gomès, E. (2014). Ultraviolet-B radiation modifies the quantitative and qualitative profile of flavonoids and amino acids in grape berries. *Phytochemistry*, 102, 106-114.

Mattivi, F., Guzzon, R., Vrhovsek, U., Stefanini, M. & Velasco, R. (2006). Metabolite profiling of grape: flavonols and anthocyanins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7692-7702.

Maxwell, K. & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659-668.

McCarthy, M. G. (1997). The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz (*Vitis vinifera* L.). *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 3(3), 2-8.

Medrano, H., Escalona, J. M., Cifre, J., Bota, J. & Flexas, J. (2003). A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology*, 30(6), 607-619.

Medrano, H., Flexas, J., Ribas-Carbó, M. & Gulías, J. (2010). Measuring water use efficiency in grapevines. In *Methodologies and results in grapevine research*. Springer, Dordrecht, 123-134.

Meggio, F., Zarco-Tejada, P. J., Núñez, L. C., Sepulcre-Cantó, G., González, M. R. & Martín, P. (2010). Grape quality assessment in vineyards affected by iron deficiency chlorosis using narrow-band physiological remote sensing indices. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1968-1986.

Meng, J. F., Xu, T. F., Qin, M. Y., Zhuang, X. F., Fang, Y. L. & Zhang, Z. W. (2012). Phenolic characterization of young wines made from spine grape (*Vitis davidii* Foex) grown in Chongyi County (China). *Food Research International*, 49(2), 664-671.

Mengel, K., Breininger, M. T. & Bübl, W. (1984). Bicarbonate, the most important factor inducing iron chlorosis in vine grapes on calcareous soil. *Plant and Soil*, 81(3), 333-344.

- Mercurio, M. D., Damberg, R. G., Cozzolino, D., Herderich, M. J. & Smith, P. A. (2010). Relationship between red wine grades and phenolics. 1. Tannin and total phenolics concentrations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(23), 12313-12319.
- Merkytė, V., Longo, E., Windisch, G. & Boselli, E. (2020). Phenolic compounds as markers of wine quality and authenticity. *Foods*, 9(12), 1785.
- Minolta, C. (1989). Manual for chlorophyll meter SPAD-502. *Osaka: Minolta Radiometric Instruments Divisions*.
- Mira, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844-1855.
- Mirás-Avalos, J. M., Bouzas-Cid, Y., Trigo-Córdoba, E., Orriols, I. & Falqué, E. (2019). Irrigation effects on the volatile composition and sensory profile of Albariño wines from two different terroirs. *European Food Research and Technology*, 245(10), 2157-2171.
- Morales, F., Abadía, A. & Abadía, J. (1990). Characterization of the xanthophyll cycle and other photosynthetic pigment changes induced by iron deficiency in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Plant Physiology*, 94(2), 607-613.
- Morales, F., Belkhouja, R., Abadía, A. & Abadía, J. (2000). Photosystem II efficiency and mechanisms of energy dissipation in iron-deficient, field-grown pear trees (*Pyrus communis* L.). *Photosynthesis Research*, 63(1), 9-21.
- Morlat, R., Dupont, J. & Salette, J. (1980). Some ecological aspects of iron chlorosis appearance during dry years in the vineyard planted on calcareous soils of the middle Loire valley. *Annales Agronomiques*, 31(2), 219-238.
- Mota, R. V. D., Silva, C. P. C., Favero, A. C., Purgatto, E., Shiga, T. M. & Regina, M. D. A. (2010). Physico-chemical composition of wine grapes berries in summer and winter growing seasons. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(4), 1127-1137.
- Muñoz, D., Peinado, R. A., Medina, M. & Moreno, J. (2006). Higher alcohols concentration and its relation with the biological aging evolution. *European Food Research and Technology*, 222(5), 629-635.

Naor, A., Gal, Y. & Bravdo, B. (2002). Shoot cluster thinning influence vegetative growth, fruit yield, and wine quality of 'Sauvignon' grapevines. *Journal of American Society Horticulture Science*, 127(4), 628-634.

Naulleau, A., Gary, C., Prévot, L. & Hossard, L. (2021). Evaluating strategies for adaptation to climate change in grapevine production—A systematic review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 2154-2174.

Neethling, E., Barbeau, G., Quenol, H. & Bonnefoy, C. (2011). Evolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le val de Loire. *Climatologie*, 8, 79-92.

Netto, A. T., Campostrini, E., de Oliveira, J. G. & Bressan-Smith, R. E. (2005). Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. *Scientia Horticulturae*, 104(2), 199-209.

Núñez, V., Monagas, M., Gomez-Cordovés, M. C. & Bartolomé, B. (2004). Vitis vinifera L. cv. Graciano grapes characterized by its anthocyanin profile. *Postharvest Biology and Technology*, 31(1), 69-79.

Ohana-Levi, N., Mintz, D. F., Hagag, N., Stern, Y., Munitz, S., Friedman-Levi, Y., Shacham, N., Grünzweig, J. M. & Netzer, Y. (2022). Grapevine responses to site-specific spatiotemporal factors in a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 259, 107226.

OIV (2010). Resolution OIV/VITI 333/2010. Definition of vitivinicultural "Terroir". In *The General Director of the OIV, General assembly, Tbilisi*.

OIV (2006). Resolución OENO 1/2006: Determinación de las características cromáticas según CIELab.

OIV (2021). State of the world vine and wine sector 2020.

OIV (2012). Statistical report on world vitiviniculture presented at the 35<sup>th</sup> World Congress of Vine and Wine, Izmir.

Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A. & Deloire, A. (2002). Influence of pre-and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American journal of Enology and Viticulture*, 53(4), 261-267.

Otteneder, H., Marx, R. & Zimmer, M. (2004). Analysis of the anthocyanin composition of Cabernet Sauvignon and Portugieser wines provides an objective assessment of the grape varieties. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(1), 3-7.

Padilla, B., Gil, J. V. & Manzanares, P. (2016). Past and future of non-Saccharomyces yeasts: From spoilage microorganisms to biotechnological tools for improving wine aroma complexity. *Frontiers in Microbiology*, 7, 411.

Parpinello, G. P., Versari, A., Chinnici, F. & Galassi, S. (2009). Relationship among sensory descriptors, consumer preference and color parameters of Italian Novello red wines. *Food Research International*, 42(10), 1389-1395.

Pereira, A. G., Fraga, M., Garcia-Oliveira, P., Carpena, M., Jimenez-Lopez, C., Lourenço-Lopes, C., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., Prieto, M. A. & Simal-Gandara, J. (2020). Management of wine aroma compounds: Principal basis and future perspectives. In *Winemaking-Stabilization, Aging Chemistry and Biochemistry*. *IntechOpen*, 1-25.

Perestrelo, R., Silva, C., Gonçalves, C., Castillo, M. & Câmara, J. S. (2020). An approach of the madeira wine chemistry. *Beverages*, 6(1), 12.

Pérez-Coello, M. S., Sanz, J. & Cabezudo, M. D. (1999). Determination of volatile compounds in hydroalcoholic extracts of French and American oak wood. *American Journal of Enology and Viticulture*, 50(2), 162-165.

Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M. C. & Conesa, M. R. (2016). Drought stress effect on woody tree yield. *Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach*, 2, 356-374.

Peryea, F. J., & Kammereck, R. (1996). Use of spad meter to quantify the effectiveness of mid-summer trunk injection of iron on iron-deficient pear trees. In *III International Symposium on Mineral Nutrition of Deciduous Fruit Trees* 448. 361-361.

Pestana, M., de Varennes, A., Abadía, J. & Faria, E. A. (2005). Differential tolerance to iron deficiency of citrus rootstocks grown in nutrient solution. *Scientia Horticulturae*, 104(1), 25-36.

Pestana, M., de Varennes, A. & Faria, E. A. (2003). Diagnosis and correction of iron chlorosis in fruit trees: A review. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 1(1), 46-51.

- Petrie, P. R. & Sadras, V. O. (2008). Advancement of grapevine maturity in Australia between 1993 and 2006: Putative causes, magnitude of trends and viticultural consequences. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 14(1), 33-45.
- Pineau, B., Barbe, J.-C., Van Leeuwen, C. & Dubordieu, D. (2007). Which impact for  $\beta$ -damascenone on red wines aroma?. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4103-4108.
- Poni, S (2005). Produrre quantita rispettando la qualita: Il ruolo della gestione della chioma. Parte 2. *InfoWine, Piacenza*, 5, 1-3.
- Pouget, R. (1978). Vine variety and rootstocks as major factors of the wine quality [selection, qualitative criteria, role of the rootstock]. *Annales de Technologie Agricole*, 27(1), 111-122.
- Proffitt, T. & Campbell-Clause, J. (2012). Managing grapevine nutrition and vineyard soil health. *Grape Wine Research Development Corporation*, 1-32.
- Rapp, A. & Mandery, H. (1986). Wine aroma. *Experientia*, 42(8), 873-884
- Razavi, F., Pollet, B., Steppe, K. & Van Labeke, M. C. (2008). Chlorophyll fluorescence as a tool for evaluation of drought stress in strawberry. *Photosynthetica*, 46(4), 631-633.
- Reshef, N., Agam, N. & Fait, A. (2018). Grape berry acclimation to excessive solar irradiance leads to repartitioning between major flavonoid groups. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(14), 3624-3636.
- Reshef, N., Walbaum, N., Agam, N. & Fait, A. (2017). Sunlight modulates fruit metabolic profile and shapes the spatial pattern of compound accumulation within the grape cluster. *Frontiers in plant science*, 8, 70-90.
- Reynolds, A. G. & Wardle, D. A. (2001). Rootstocks impact vine performance and fruit composition of grapes in British Columbia. *HortTechnology*, 11(3), 419-427.
- Ribéreau-Gayon, P., Glories, Y., Maujean, A. & Dubourdieu, D. (2021). The chemistry of wine: Varietal Aroma. In Handbook of Enology, volume 2. *John Wiley & Sons*, 205-230.
- Rienth, M. & Scholasch, T. (2019). State-of-the-art of tools and methods to assess vine water status. *Oeno One*, 53(4), 2403-2422.

Rienth, M., Vigneron, N., Darriet, P., Sweetman, C., Burbidge, C., Bonghi, C., Walker, R. P., Famiani, F. & Castellarin, S. D. (2021). Grape berry secondary metabolites and their modulation by abiotic factors in a climate change scenario—a review. *Frontiers in Plant Science*, 12(262).

Romero, P., Fernández-Fernández, J. I. & Martínez-Cutillas, A. (2010). Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *American Journal of Enology and Viticulture*, 61(3), 300-312.

Römheld, V. (2000). The chlorosis paradox: Fe inactivation in leaves as a secondary event in Fe deficiency chlorosis. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11-12), 1629-1643.

Rotem, J. & Patti, J. (1969). Irrigation and plant diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 7, 267-288.

Roujou, D. & Dubourdieu, D. (1999). Incidence des conditions de maturation et des pratiques viticoles sur la teneur en 2-methoxy-3-isobutylpyrazine des raisins de Cabernet Sauvignon et de Merlot à Bordeaux. In *Oenologie 99, 6e Symposium International d'œnologie. Lonvaud and Funel Ed*, 126-130.

Ruiz, J., Kiene, F., Belda, I., Fracassetti, D., Marquina, D., Navascués, E., Calderón, F., Benito, A., Rauhut, D., Santos, A. & Benito, S. (2019). Effects on varietal aromas during wine making: A review of the impact of varietal aromas on the flavor of wine. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(18), 7425-7450.

Ruiz-Sanchez, M. C., Domingo, R. & Castel, J. R. (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(2), 5-20.

Sacks, G. L., Gates, M. J., Ferry, F. X., Lavin, E. H., Kurtz, A. J. & Acree, T. E. (2012). Sensory threshold of 1, 1, 6-trimethyl-1, 2-dihydronaphthalene (TDN) and concentrations in young Riesling and non-Riesling wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(12), 2998-3004.

Saenz-Navajas, M. P., Tao, Y. S., Dizy, M., Ferreira, V. & Fernandez-Zurbano, P. (2010). Relationship between nonvolatile composition and sensory properties of premium Spanish red wines and their correlation to quality perception. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(23), 12407-12416.

Sánchez, R., González, M. R., Fernández-Fernández, E., Rodríguez-Nogales, J. M. & Martín, P. (2020a). Relationships between chlorophyll content of vine leaves, predawn leaf water

potential at veraison, and chemical and sensory attributes of wine. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5251-5259.

Sánchez, R., García, M. R. G., Vilanova, M., Rodríguez-Nogales, J. M. & Martín, P. (2020b). Aroma composition of Tempranillo grapes as affected by iron deficiency chlorosis and vine water status. *Scientia Agricola*, 78(2), e20190112.

Sánchez, R., Rodríguez-Nogales, J. M., Fernández-Fernández, E., González, M. R., Medina-Trujillo, L. & Martín, P. (2022). Volatile composition and sensory properties of wines from vineyards affected by iron chlorosis. *Food Chemistry*, 369, 130850.

Santos, J. A. & Belo-Pereira, M. (2019). A comprehensive analysis of hail events in Portugal: Climatology and consistency with atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 39(1), 188-205.

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.

Sassu, A., Gambella, F., Ghiani, L., Mercenaro, L., Caria, M. & Pazzona, A. L. (2021). Advances in unmanned aerial system remote sensing for precision viticulture. *Sensors*, 21(3), 956-977.

Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E. & Peter, C. (2003). Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(1), 41-51.

Schreier, P. & Drawert, F. (1974). Gaschromatographisch-massenspektrometrische Untersuchung flüchtiger Inhaltsstoffe des Weines. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 154(5), 273-278.

Schreier, P. & Jennings, W. G. (1979). Flavor composition of wines: A review. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 12(1), 59-111.

Schultz, H. (2000). Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(1), 2-12.

Schüttler, A., Guthier, C., Stoll, M., Darriet, P. & Rauhut, D. (2015). Impact of grape cluster defoliation on TDN potential in cool climate Riesling wines. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 5, p. 01006). EDP Sciences.

- Sefton, M. A., Skouroumounis, G. K., Elsey, G. M. & Taylor, D. K. (2011). Occurrence, sensory impact, formation, and fate of damascenone in grapes, wines, and other foods and beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(18), 9717-9746.
- Seguin, G. (1969). L'alimentation en eau de la vigne dans des sols du Haut-Médoc. *OENO One*, 3(2), 93-141.
- Šetlík, I., Allakhverdiev, S. I., Nedbal, L., Šetlíková, E. & Klimov, V. V. (1990). Three types of photosystem II photoinactivation. *Photosynthesis research*, 23(1), 39-48.
- Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., de Cortázar-Atauri, I. G., Ollat, N., Pagé, C. & van Leeuwen, C. (2018). The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250, 226-242.
- Shaulis, N. J., & Smart, R. E. (1974). Grapevine canopies: management, microclimate and yield responses. In *Proceedings XIX International Horticultural Congress, Warsaw*, 255-265.
- Shellie, K. C. (2006). Vine and berry response of Merlot (*Vitis vinifera* L.) to differential water stress. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(4), 514-518.
- Šikuten, I., Štambuk, P., Andabaka, Ž., Tomaz, I., Marković, Z., Stupić, D. & Preiner, D. (2020). Grapevine as a rich source of polyphenolic compounds. *Molecules*, 25(23), 5604.
- Simpson, R. F., Strauss, C. R. & Williams, P. J. (1977). Vitispirane: A C13 spiro ether in the aroma volatiles of grape juice, wines and distilled grape spirits. *Chemistry and Industry*, 15, 663-664.
- Singh, A. P., Singh, R., Verma, S. S., Rai, V., Kaschula, C. H., Maiti, P. & Gupta, S. C. (2019). Health benefits of resveratrol: Evidence from clinical studies. *Medicinal Research Reviews*, 39(5), 1851-1891.
- Singh, B. (2002). Effects of macro and micro nutrient spray on fruit yield and quality of grapes (*Vitis Vinifera* L.) cv. Perlette. *Acta Horticulturae*, 594, 197-202.
- Smart, R. E. (1984). Some aspects of climate, canopy microclimate, vine physiology and wine quality. *Ruakura Soil & Plant Research Station*,. 1-19
- Smart, R. E. (1985). Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality. A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36(3), 230-239.

- Smart, R. E., Dick, J. K. & Gravett, I. M. (1989). Shoot devigoration by natural means. In *Proceedings of the Seventh Australian Wine Industry Technical Conference*, 58-65.
- Smart, R. E., Robinson, J. B., Due, G. R. & Brien, C. J. (1985). Canopy microclimate modification for the cultivar Shiraz. I. Definition of canopy microclimate. *Vitis*, 24(1), 17-31.
- Smart, R. E., Smith, S. M. & Winchester, R. V. (1988). Light quality and quantity effects on fruit ripening for Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*, 39(3), 250-258.
- Somers, T. C. & Evans, M. E. (1974). Wine quality: Correlations with colour density and anthocyanin equilibria in a group of young red wines. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 25(11), 1369-1379.
- Stribny, J., Gamero, A., Pérez-Torrado, R. & Querol, A. (2015). *Saccharomyces kudriavzevii* and *Saccharomyces uvarum* differ from *Saccharomyces cerevisiae* during the production of aroma-active higher alcohols and acetate esters using their amino acidic precursors. *International journal of Food Microbiology*, 205, 41-46.
- Styger, G., Prior, B. & Bauer, F. F. (2011). Wine flavor and aroma. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38(9), 1145-1159.
- Sumby, K. M., Grbin, P. R. & Jiranek, V. (2010). Microbial modulation of aromatic esters in wine: Current knowledge and future prospects. *Food chemistry*, 121(1), 1-16.
- Swiegers, J. H., Bartowsky, E. J., Henschke, P. A. & Pretorius, I. (2005). Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(2), 139-173.
- Swiegers, J. H. & Pretorius, I. S. (2005). Yeast modulation of wine flavor. *Advances in Applied Microbiology*, 57, 131-175.
- Tagliavini, M. & Rombola, A. D. (2001). Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. *European Journal of Agronomy*, 15(2), 71-92.
- Tao, Y., García, J. F. & Sun, D. W. (2014). Advances in wine aging technologies for enhancing wine quality and accelerating wine aging process. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(6), 817-835.

- Tardáguila, 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.
- Tavares, S., Vesentini, D., Fernandes, J. C., Ferreira, R. B., Laureano, O., Ricardo-Da-Silva, J. M. & Amâncio, S. (2013). *Vitis vinifera* secondary metabolism as affected by sulfate depletion: diagnosis through phenylpropanoid pathway genes and metabolites. *Plant Physiology and Biochemistry*, 66, 118-126.
- Téliz, D., Landa, B. B., Rapoport, H. F., Camacho, F. P., Jiménez-Díaz, R. M. & Castillo, P. (2007). Plant-parasitic nematodes infecting grapevine in southern Spain and susceptible reaction to root-knot nematodes of rootstocks reported as moderately resistant. *Plant Disease*, 91(9), 1147-1154.
- Temnani, A., Conesa, M. R., Ruiz, M., López, J. A., Berríos, P. & Pérez-Pastor, A. (2021). Irrigation protocols in different water availability scenarios for ‘Crimson seedless’ table grapes under mediterranean semi-arid conditions. *Water*, 13(1), 22-39.
- Tian, T. & Gu, S. (2019). Improving fruit anthocyanins in ‘Cabernet Sauvignon’ by shifting fruit ripening and irrigation reduction post veraison in warmer region. *Vitis*, 58(1), 23-31
- Tokpohozin, S. E., Fischer, S. & Becker, T. (2019). Selection of a new *Saccharomyces* yeast to enhance relevant sorghum beer aroma components, higher alcohols and esters. *Food microbiology*, 83, 181-186.
- Tomaz, I., Huzanić, N., Preiner, D., Stupić, D., Andabaka, Ž., Maletić, E., Karoglan Kotic, J. & Ašperger, D. (2019). Extraction methods of polyphenol from grapes: extractions of grape polyphenols. In *Polyphenols in Plants*. Academic Press, 151-167.
- Tregoat, O., Van Leeuwen, C., Choné, X. & Gaudillère, J. P. (2002). The assessment of vine water and nitrogen uptake by means of physiological indicators influence on vine development and berry potential (*Vitis vinifera* L. cv Merlot, 2000, Bordeaux). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 36(3), 133-142.
- Trought, M. C. & Bramley, R. G. (2011). Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterising spatial and temporal changes in fruit composition and juice quality in the vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(1), 79-89.

- Tuccio, L., Agati, G. & Grassini, G. (2015). Non-destructive fluorescence sensing for applications in precision viticulture. In 2015 International Conference on BioPhotonics (BioPhotonics) (pp. 1-4). IEEE.
- Van Leeuwen, C., Friant, P., Chone, X., Tregoat, O., Koundouras, S. & Dubourdie, D. (2004). The influence of climate, soil and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3), 207–217.
- Van Leeuwen, C., Goutouly, J. P., Pernet, D., Resseguier, L., Friant, P. & Roby, J. (2011). Spatialisation of vine water and nitrogen status at the estate level or at the block level. 17th International Symposium Group of International Experts of Vitivincultural Systems for CoOperation, GiESCO, Asti–Alba (CN) Le progress Agricole et Viticole, 255-258.
- Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Jaeck, M. E., Rabusseau, S. & Gaudillere, J. P. (2003). Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'OIV*, 76(867), 367-378.
- Van Leeuwen, C., Tregoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D. & Gaudillère, J. P. (2009a). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes?. *Oeno One*, 43(3), 121-134.
- Van Leeuwen, C., Bois, B., Cellie, N., Trégoat, O. & Roby, J. P. (2009b). Les modifications de l'expression du terroir induites par le changement climatique nécessitent une adaptation du matériel végétal et des techniques viticoles. *Revue Française d'Oenologie*, 235, 10-14.
- Van Leeuwen, C. & Seguin, G. (2006). The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17(1), 1-10.
- Van Wyk, N., Grossmann, M., Wendland, J., Von Wallbrunn, C. & Pretorius, I. S. (2019). The whiff of wine yeast innovation: Strategies for enhancing aroma production by yeast during wine fermentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(49), 13496-13505.
- Veliksar, S., Mihailescu, C., Toma, S., Lisnic, S. & Kreidman, J. (2005). Purificarea ecologică a solurilor de surplusul de cupru după defrișarea plantațiilor multianuale. *Mediul Ambient*, 18(1), 1-5.

- Vidal, S., Francis, L., Guyot, S., Marnet, N., Kwiatkowski, M., Gawel, R. & Waters, E. J. (2003). The mouth-feel properties of grape and apple proanthocyanidins in a wine-like medium. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(6), 564-573.
- Vilanova, M., Genisheva, Z., Tubio, M., Álvarez, K., Lissarrague, J. R. & Oliveira, J. M. (2017). Effect of vertical shoot-positioned, Scott-Henry, Geneva double-curtain, arch-cane, and parral training systems on the volatile composition of Albariño wines. *Molecules*, 22(9), 1500.
- Vilanova, M., Zamuz, S., Vilariño, F. & Sieiro, C. (2007). Effect of terroir on the volatiles of *Vitis vinifera* cv. Albariño. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(7), 1252-1256.
- Vivier, M. A. & Pretorius, I. S. (2002). Genetically tailored grapevines for the wine industry. *Trends in Biotechnology*, 20(11), 472-478.
- Waterhouse, A. L. & Towey, J. P. (1994). Oak lactone isomer ratio distinguishes between wine fermented in American and French oak barrels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(9), 1971-1974.
- Williams, L. E., Phene, C. J., Grimes, D. W. & Trout, T. J. (2003). Water use of mature Thompson Seedless grapevines in California. *Irrigation Science*, 22(1), 11-18.
- Young, P. R., Eyeghe-Bickong, H. A., du Plessis, K., Alexandersson, E., Jacobson, D. A., Coetzee, Z., Deloire, A. & Vivier, M. A. (2016). Grapevine plasticity in response to an altered microclimate: Sauvignon Blanc modulates specific metabolites in response to increased berry exposure. *Plant physiology*, 170(3), 1235-1254.
- Yuan, F., Feng, H. & Qian, M. C. (2015). C13-norisoprenoids in grape and wine affected by different canopy management. In *Advances in Wine Research*. American Chemical Society, 147-160.
- Yuste, J., Vicente, A., Barajas, E., & Alburquerque, M. (2017). Diez portainjertos de vid: Efectos sobre el crecimiento, la producción y la composición de la uva del cv. Sauvignon blanc en la Denominación de Origen Rueda (España). In *BIO Web of Conferences* (Vol. 9, p. 01009). EDP Sciences.
- Zaharieva, T. & Römheld, V. (2000). Specific Fe<sup>2+</sup> uptake system in strategy I plants inducible under Fe deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11), 1733-1744.

Zalacaín, A., Marín, J., Alonso, G. L. & Salinas, M. R. (2007). Analysis of wine primary aroma compounds by stir bar sorptive extraction. *Talanta*, 71(4), 1610-1615.

Zamora, F. (2003). El color del vino tinto. In *Elaboración y crianza del vino tinto: Aspectos científicos y prácticos*. AMV Ediciones, 13-52.

Zarco-Tejada, P. J., Catalina, A., González, M. R. & Martín, P. (2013). Relationships between net photosynthesis and steady-state chlorophyll fluorescence retrieved from airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 136, 247-258.

### 3. OBJETIVOS

El objetivo general de esta Tesis es evaluar el impacto de la carencia nutricional de hierro y el estado hídrico del viñedo en la composición química y en las características sensoriales del vino, aportando información útil para manejar, en el marco de la viticultura de precisión, la variabilidad espacial del potencial enológico en viñedos de secano afectados por clorosis férrica.

Los objetivos específicos son:

1. Estudiar los efectos combinados de la incidencia de la clorosis por deficiencia de hierro y el estado hídrico del viñedo en el envero, sobre la composición y el perfil aromático de la uva Tempranillo.
2. Evaluar la viabilidad del contenido de clorofila foliar, medido en el envero, como herramienta para evaluar el potencial aromático de las uvas en viñedos de secano afectados por clorosis férrica.
3. Evaluar los efectos aditivos e interactivos de la incidencia de la deficiencia de hierro y el estado hídrico de la vid en el envero sobre la composición volátil y las características químicas y sensoriales del vino Tempranillo.
4. Estudiar las relaciones entre los parámetros de calidad del vino, el vigor de la vid, el tamaño y el grado de madurez de la uva en viñedos de secano afectados por clorosis férrica.

### 4. PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio se realizó durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019, en 20 subzonas de viñedo de secano de la variedad Tempranillo con una edad de 15 a 20 años, ubicadas en Pesquera de Duero (Valladolid), dentro de la Denominación de Origen Protegida Ribera del Duero.

Los suelos del área de estudio son calcáreos, muy básicos y pobres en materia orgánica, con alta variabilidad espacial en los contenidos extraíbles de potasio, fósforo y magnesio (Zarco-Tejada *et al.*, 2013). Las concentraciones de caliza activa (33-160 g/Kg) y hierro extraíble con ácido dietilentriaminopentaacético (2,3-6,4 mg/Kg) son muy heterogéneas dentro del área. Tales propiedades del suelo, junto con la presencia de un patrón sensible a la caliza como el 110-Richter, causaron diferentes niveles de clorosis por deficiencia de hierro en los viñedos,

desde no afectados hasta moderadamente afectados. Por otro lado, las diferencias en la topografía, la textura y las raíces explorables, y la profundidad de los suelos aseguraron una amplia variabilidad del estado hídrico de la vid dentro del área de estudio.

Las subzonas estudiadas (10 m × 10 m cada una) se ubicaron dentro de 9,2 ha de viñedo, con 1,5 km de distancia máxima entre ellas. Los sitios se seleccionaron después de una evaluación visual previa de la variabilidad espacial en el tamaño y el color del dosel. Se eligieron diferentes topografías, profundidades y propiedades fisicoquímicas del suelo para asegurar la máxima variabilidad en el estado hídrico y nutricional en las subzonas, de acuerdo con los propósitos de la investigación. Las vides están dispuestas en espaldera con un marco de plantación de 3,0 m × 1,5 m (2.222 plantas/ha), podadas en cordón Royat doble, con una carga media de 16 yemas por cepa. El rendimiento promedio de las subzonas fue de 7.500 Kg/ha en 2016, 4.400 Kg/ha en 2017, 4.000 Kg/ha en 2018 y 5.800 Kg/ha en 2019.

La zona de estudio tiene un clima mediterráneo continental, con bajas temperaturas en invierno y veranos calurosos y secos. La temperatura media anual es de 12,3 °C y la precipitación total anual es de 427 mm, de los cuales 71 mm corresponden a junio, julio y agosto. La temperatura media registrada en 2017 (12,7 °C) fue la más alta de los cuatro años de estudio, seguida de la de 2018 (12,2 °C), 2019 (12,1 °C) y 2016 (11,9 °C). Las precipitaciones acumuladas entre el 1 de abril y el 30 de septiembre registraron el mínimo de los cuatro años de estudio en 2017 (142 mm), seguidas de las registradas en 2019 (170 mm), 2016 (176 mm) y 2018 (267 mm). Sin riego, estos insuficientes suministros de agua en los suelos, generaron una amplia variabilidad del estado hídrico de la vid dentro del área.

Durante los años de estudio, en el momento del envero, se obtuvieron los datos de contenido clorofílico foliar (Chl) y potencial hídrico foliar al amanecer (LWP), que se utilizaron como indicadores de los niveles de estrés hídrico y nutricional del viñedo. Las subzonas se clasificaron en cuatro grupos, cruzando valores altos y bajos de Chl y valores altos y bajos de LWP. Se tomaron como valores límite entre grupos la mediana de las dos variables.

Los niveles de estrés hídrico y nutricional se relacionaron con los valores de vigor, rendimiento y composición de la uva, así como con las características químicas y organolépticas del vino.

La vendimia se llevó a cabo cada año cuando el valor del contenido en sólidos solubles en el mosto llegó a los 22 °Brix en el conjunto de subparcelas. En ese momento se tomaron dos muestras de 100 uvas en cada zona de estudio. El mosto obtenido a partir de la primera muestra se utilizó para determinar los sólidos solubles, la acidez total, el nitrógeno fácilmente

asimilable, el pH, el contenido en potasio, la intensidad de color y el tono del mosto. Las uvas de la segunda muestra se usaron para analizar el contenido total de polifenoles, las antocianinas totales y las fácilmente extraíbles.

Después de la vendimia, 30 kg de uvas de cada subzona se vinificaron siguiendo un esquema clásico de vinificación en tinto. Se recogieron 300 mL de mosto de uva despalillada/estrujada de cada muestra, para la determinación de los compuestos aromáticos volátiles del mosto. En los vinos elaborados se determinó la acidez total, el pH, el grado alcohólico, las coordenadas CIELAB, el índice de polifenoles totales y los compuestos volátiles. Los vinos se sometieron a un análisis sensorial llevado a cabo por un panel de catadores previamente entrenado.

Para determinar los efectos del año, el estado hídrico y la incidencia de clorosis férrica sobre las variables agronómicas del viñedo y las características de mostos y vinos se realizaron análisis multifactoriales de la varianza (ANOVA), empleando el test de comparación de medias de Tukey. Se usaron análisis de componentes principales y coeficientes de correlación de Pearson para estudiar las relaciones entre variables.

## **5. ESTRUCTURA**

La Tesis se ha dividido en tres capítulos.

En el primer capítulo se estudiaron los efectos combinados de la incidencia de la clorosis férrica y el estado hídrico del viñedo en el envero, sobre el perfil aromático (compuestos libres y ligados) de las uvas Tempranillo y se evaluó la viabilidad de la medición de la clorofila foliar en el envero, para determinar la calidad aromática de la uva en viñedos de secano afectados por clorosis férrica, de acuerdo con los objetivos 1 y 2 de la Tesis.

En el segundo capítulo se investigaron los efectos de la incidencia de la clorosis férrica en el viñedo sobre la composición volátil y las características sensoriales de los vinos Tempranillo (objetivo 3 de la Tesis).

En el tercer capítulo se evaluaron los efectos aditivos e interactivos de la incidencia de la deficiencia de hierro y el estado hídrico de la vid en el envero sobre las características químicas y sensoriales del vino Tempranillo, y se estudiaron las relaciones entre la calidad del vino y el vigor de la vid y el tamaño y la madurez de la uva en viñedos de secano afectados por clorosis férrica (objetivos 3 y 4 de la Tesis).

**5.1. Capítulo 1.** Composición aromática de la uva Tempranillo en viñedos afectados por clorosis férrica y estrés hídrico.

Sánchez, R., García, M. R. G., Vilanova, M., Rodríguez-Nogales, J. M. & Martín, P. (2020). Aroma composition of Tempranillo grapes as affected by iron deficiency chlorosis and vine water status. *Scientia Agricola*, 78, e20190112.

DOI: [10.1590/1678-992X-2019-0112](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0112)

**5.2. Capítulo 2.** Composición volátil y propiedades sensoriales de vinos procedentes de viñedos afectados por clorosis férrica.

Sánchez, R., Rodríguez-Nogales, J. M., Fernández-Fernández, E., González, M. R., Medina-Trujillo, L. & Martín, P. (2022). Volatile composition and sensory properties of wines from vineyards affected by iron chlorosis. *Food Chemistry*, 369, 130850.

DOI: [10.1016/j.foodchem.2021.130850](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130850)

**5.3. Capítulo 3.** Relaciones entre el contenido de clorofila foliar de la vid, el potencial hídrico de la hoja antes del amanecer en el envero y los atributos químicos y sensoriales del vino.

Sánchez, R., González, M. R., Fernández-Fernández, E., Rodríguez-Nogales, J. M. & Martín, P. (2020). Relationships between chlorophyll content of vine leaves, predawn leaf water potential at veraison, and chemical and sensory attributes of wine. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5251-5259.

DOI: [10.1002/jsfa.10575](https://doi.org/10.1002/jsfa.10575)

## 6. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos muestran que las zonas más afectadas por clorosis férrica dieron lugar a mostos con una menor acidez total, menor concentración en nitrógeno fácilmente asimilable y mayor contenido de polifenoles totales que las subzonas menos afectadas. Por su parte las subparcelas con estado hídrico más desfavorable mostraron mayor contenido en potasio, en antocianinas extraíbles e intensidad de color.
- Las uvas procedentes de vides con mayor nivel de estrés hídrico o por carencia de hierro restringieron las concentraciones de los alcoholes C6 y alcanzaron niveles de madurez aromática más favorables que las uvas de plantas menos estresadas. Se ha demostrado, además, que una deficiencia de hierro de leve a moderada puede tener efectos positivos en la calidad aromática de la uva, con un aumento de la biosíntesis de los norisoprenoides C13 y los fenoles volátiles, independientemente de su impacto en el crecimiento vegetativo, el rendimiento o el tamaño de la baya.
- Los resultados presentados confirman que el estrés por deficiencia de hierro de leve a moderado en el viñedo puede contribuir a mejorar la calidad del vino, disminuyendo el pH y mejorando los atributos sensoriales de tonalidad e intensidad de la capa, intensidad del sabor y persistencia en boca. En este contexto, las medidas del contenido foliar de clorofila en el envero podrían ser de gran utilidad para distinguir subzonas con diferente potencial de calidad en viñedos afectados por deficiencia de hierro.
- En comparación con la incidencia de clorosis férrica, el estado hídrico de la vid tuvo poco impacto en la composición y características cromáticas del vino en el área de estudio. En cuanto a los parámetros sensoriales, las subparcelas con bajo LWP mostraron puntuaciones más altas en los descriptores de limpidez, astringencia y persistencia en boca.
- Los efectos de interacción detectados entre estado hídrico y nivel foliar de clorofila en envero sugieren que el aumento del color rojo, de la astringencia y de la persistencia en boca del vino asociados a la incidencia de la clorosis férrica podrían verse restringidos si el déficit hídrico es elevado.

- Las variables de composición y los atributos sensoriales de los vinos, en general, no se correlacionaron con el tamaño de la baya ni con el grado de madurez tecnológica de la uva en el área de estudio.
- Un nivel moderado de estrés por deficiencia de hierro en la vid aumentó las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles asociados a notas florales, como el 2-fenilacetaldehído, el 2-feniletanol y el acetato de 2-feniletilo en los vinos, y redujo la presencia de los alcoholes C6, responsables del aroma verde-herbáceo. Como efecto negativo, los vinos de zonas afectadas por clorosis férrica redujeron la concentración de ésteres. Estos resultados pueden ser de utilidad para evaluar el potencial de calidad de los viñedos afectados por clorosis férrica.

