



---

Universidad de Valladolid

## Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias

### Máster en calidad, desarrollo e innovación de alimentos

**Estrategias para combatir los efectos del  
cambio climático desde el viñedo a la  
bodega. Técnicas de reducción del grado  
alcohólico.**

Alberto del Campo Carranza

Tutores:

José Manuel Rodríguez Nogales

María Rosa González García

Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal

Grupo de investigación en Viticultura y Enología

Curso: 2024 - 2025

## ÍNDICE

<u>1.</u>	<u>RESUMEN Y PALABRAS CLAVE</u>	<b>3</b>
<u>2.</u>	<u>OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO</u>	<b>3</b>
<u>3.</u>	<u>METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	<b>4</b>
<u>4.</u>	<u>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ESTUDIADO</u>	<b>4</b>
<u>4.1.</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	<b>4</b>
<u>4.2.</u>	<u>EL MARCO TEÓRICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO</u>	<b>5</b>
<u>5.</u>	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	<b>5</b>
<u>5.1.</u>	<u>IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL VIÑEDO</u>	<b>5</b>
<u>5.2.</u>	<u>ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN FRENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO EN VIÑEDO, REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO DE LAS UVAS EN CAMPO</u>	<b>8</b>
<u>5.3.</u>	<u>IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN BODEGA Y EN LA ELABORACIÓN DE VINO</u>	<b>15</b>
<u>5.4.</u>	<u>ESTRATEGIAS ENOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO DE MOSTOS Y VINOS COMO RESPUESTA AL CAMBIO CLIMÁTICO</u>	<b>15</b>
<u>6.</u>	<u>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO</u>	<b>27</b>
<u>7.</u>	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<b>28</b>

## **1. RESUMEN Y PALABRAS CLAVE**

### **Resumen:**

El aumento de las temperaturas, la reducción de la disponibilidad hídrica y la modificación de los ciclos fenológicos de la vid han provocado un incremento del grado alcohólico de los vinos, así como desequilibrios en su perfil sensorial y enológico. A partir de una revisión técnica y científica actualizada, el trabajo explora diversas estrategias de adaptación y mitigación, desde prácticas agronómicas en el viñedo hasta intervenciones tecnológicas en bodega, todas ellas orientadas a reducir el grado alcohólico y sin comprometer la calidad final del vino. En definitiva, se ofrece una visión integral de los desafíos actuales de la vitivinicultura en el contexto de emergencia climática, proponiendo soluciones técnicas viables y respetuosas con la planta y el vino.

### **Palabras clave:**

Cambio climático, Viticultura sostenible, Adaptación en viñedo, Grado alcohólico, Innovación en bodega, Reducción de alcohol, Estrés térmico y maduración, Vino y sostenibilidad.

### **Abstract:**

*Rising temperatures, reduced water availability, and altered vine phenological cycles have led to an increase in the alcohol content of wines, as well as imbalances in their sensory and oenological profiles. Based on an updated technical and scientific review, this paper explores various adaptation and mitigation strategies, from agronomic practices in the vineyard to technological interventions in the winery, all aimed at reducing alcohol content without compromising the final quality of the wine. Ultimately, it offers a comprehensive overview of the current challenges facing viticulture and the context of the climate emergency, proposing viable technical solutions that are respectful of both the plant and the wine.*

### **Keywords:**

*Climate change, Sustainable viticulture, Vineyard adaptation, Alcohol content, Winery innovation, Alcohol reduction, Heat stress and ripening, Wine and sustainability.*

## **2. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo principal analizar las estrategias disponibles para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático en el sector vitivinícola, desde el viñedo hasta la bodega, prestando especial atención a las técnicas orientadas a reducir el grado alcohólico del vino como una consecuencia directa del calentamiento global.

En concreto, este trabajo pretende responder a cuestiones como: ¿qué impactos concretos está teniendo el cambio climático sobre la fisiología de la vid, la composición de la uva y los procesos enológicos?, ¿qué herramientas y prácticas existen hoy, tanto en el viñedo como en la bodega, para adaptarse a este nuevo contexto climático?, ¿qué posibilidades reales hay de reducir el grado alcohólico de los vinos sin comprometer su calidad, autenticidad y aceptación por parte del consumidor?

La importancia científica de este trabajo se basa en que el cambio climático ya no es una amenaza futura, sino una realidad que afecta al cultivo de la vid y al desarrollo de las prácticas enológicas en bodega. Se están obteniendo alteraciones en el calendario fenológico de la vid, modificaciones en el equilibrio entre azúcares, acidez y compuestos aromáticos y aceleraciones en la maduración, lo que todo ello se traduce en la obtención de vinos con un mayor grado alcohólico, menor y un perfil sensorial alterado.

## **ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO**

Desde el punto de vista agronómico y enológico, el cambio climático supone un reto técnico y sensorial de un orden muy importante. Este fenómeno exige respuestas basadas tanto en la innovación en las prácticas agronómicas como en las prácticas enológicas. A su vez, será necesario una y tecnológicas del vino modificación en los conocimientos tradicionales que nos permitan adaptarnos al nuevo escenario del cambio climático.

Desde el punto de vista social, el vino no solo representa un producto agrícola, sino también un patrimonio cultural, económico y territorial de enorme importancia en muchas regiones del mundo, especialmente en países de gran producción, tradición y cultura vitivinícola como España. Adaptar la viticultura al cambio climático no solo garantiza la calidad del producto final, sino también la sostenibilidad del medio rural, la identidad de las denominaciones de origen y la viabilidad de un sector que emplea a miles de personas.

Este estudio se centra en un alcance temático claro: prácticas vitícolas y enológicas para mitigar el impacto del cambio climático y reducir el grado alcohólico de los vinos. Para ello se analizará la situación actual como también las tendencias y líneas de trabajo más relevantes a corto y medio plazo, apoyándose en literatura científica reciente.

Finalmente se espera que este trabajo contribuya a generar conocimiento útil para técnicos e investigadores del área de viticultura y enología sobre la adaptación de la vitivinicultura adaptada a los nuevos desafíos del siglo XXI.

### **3. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Fuentes empleadas para la recopilación de los datos y artículos científicos han sido Scopus, Web of Science, AGRIS y DIALNET. También se ha tenido el apoyo de libros y estudios de autores especialistas en la materia a estudio y por último proyectos que se están llevando para la aplicación de los estudios teóricos aplicados a la realidad y el apoyo a sus conclusiones ya vividas, todo ello obtenido en las bases de datos anteriormente indicadas. Las palabras clave utilizadas para la búsqueda han sido: climate change, global warming, vineyard climate resilience, vineyard heat stress, harvest timing, terroir adaptation, alcohol reduction, dealcoholization techniques, low-alcohol wines.

Se han aplicado criterios de exclusión respecto a la creación de estos estudios, solamente utilizando resultados de estudios entre los años 2005 y 2025. y de autores especialistas en la materia.

El número final de artículos seleccionados para la realización de la revisión ha sido de 207 artículos.

### **4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ESTUDIADO**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

El cambio climático se presenta como uno de los mayores desafíos del siglo XXI, ya no solo a nivel ambiental, sino también a nivel social y económico. La viticultura se presenta como una actividad agrícola muy sensible a las variedades climáticas por la alta dependencia del viñedo respecto a las condiciones meteorológicas específicas que van a determinar tanto la calidad como la cantidad de la producción (Jones et al., 2005).

El calentamiento global viene consigo con un incremento de eventos extremos a su paso: grandes olas de calor, sequías y lluvias torrenciales. A su vez, otro de los grandes problemas que genera es un desajuste de las estaciones climáticas que tradicionalmente conocemos, alterando el ciclo biológico de la vid. Estos cambios producen desajustes en la fenología y provocan adelantos en la brotación, floración y vendimia, influyendo directamente en la maduración de la

ALBERTO DEL CAMPO CARRANZA

MÁSTER EN CALIDAD, DESARROLLO E INNOVACIÓN DE ALIMENTOS

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

uva y produciendo un desequilibrio entre la relación azúcar, acidez y compuestos fenólicos. (Van Leeuwen & Darriet, 2016).

### **4.2. EL MARCO TEÓRICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

El cambio climático se define como una alteración significativa y sostenida en los patrones del clima global o regional durante largos períodos de tiempo. Sus formas de manifestación son en variaciones de temperatura, precipitaciones, nubosidad y eventos extremos entre otros factores durante períodos prolongados (décadas o más tiempo). El cambio climático no se trata solamente de un aumento de la temperatura media global, sino que también va de la mano con otros factores a tener en cuenta: transformación en la cantidad y forma de las precipitaciones, la frecuencia de los eventos climáticos extremos (IPCC, 2021).

El principal mecanismo de explicación del calentamiento global es el efecto invernadero: desde la Revolución Industrial, la emisión masiva de gases de efecto invernadero ha amplificado este fenómeno provocando un calentamiento acelerado (NASA, 2023).

Las mayores evidencias del cambio climático son:

- Aumento de la temperatura global:

Según los datos de la NASA (2023), la temperatura media global del planeta ha aumentado 1,1 °C desde finales del siglo XIX, siendo los últimos ocho años los más cálidos registrados (NASA 2025).

- Eventos extremos:

La frecuencia e intensidad de olas de calor, sequías, huracanes, incendios forestales y lluvias torrenciales ha aumentado, afectando la seguridad alimentaria, salud pública y las infraestructuras (WMO, 2023). Las olas de calor son uno de los eventos extremos que más claramente han aumentado debido al calentamiento global. Las sequías también han mostrado una tendencia creciente en muchas regiones. Un informe del World Resources Institute advierte que el estrés hídrico global de los cultivos está aumentando debido a un cambio en los patrones de precipitación y a una mayor evaporación causada por las temperaturas elevadas (WRI, 2019). Por otro lado, se ha observado un aumento en la intensidad de lluvias torrenciales e inundaciones. Un planeta más cálido retiene más humedad en la atmósfera (aproximadamente un 7% más por cada grado Celsius de aumento), lo que favorece precipitaciones más intensas cuando ocurre una tormenta (Trenberth, 2011).

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL VIÑEDO**

#### **5.1.1. Temperatura**

En el viñedo, el clima es un factor fundamental que condiciona no solo la producción, sino también la calidad y la tipicidad del mosto y del vino. Esto es debido a su incidencia en los distintos procesos fisiológicos de la planta, los cuales se están viendo alterados por cambios en el régimen de temperaturas, pluviometría y radiación (Ibáñez et al., 2019).

Se estima que, para finales del siglo XXI, muchas áreas de producción experimentarán aumentos de 2 a 4 °C en comparación con los niveles preindustriales (IPCC, 2021). Este aumento afecta directamente a la duración de las fases fenológicas de la vid, acortando los ciclos y provocando una maduración más temprana, lo que puede comprometer la acumulación equilibrada de azúcares, ácidos y compuestos fenólicos (Jones et al., 2005). Este problema conlleva a un desequilibrio entre la madurez tecnológica y la fenólica, que se explicará más adelante. A su vez,

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

este aumento de temperatura y de la radiación solar va a producir efectos negativos incrementando el estrés térmico, produciendo el riesgo de golpes de calor en los cultivos y quemaduras en los frutos de no realizar una buena gestión en el viñedo.

### 5.1.2. Precipitaciones y eventos extremos

La variación en el número y cantidad de precipitaciones durante el ciclo vitícola se ha visto reducido en los últimos años, obteniendo un menor número de precipitaciones, aunque de una forma más extrema. Esto, sumado con las altas temperaturas, genera en la planta un efecto de estrés y su consiguiente afección en el rendimiento afectando negativamente al tamaño del racimo, el cuajado de frutos y la eficiencia fotosintética y una desprotección frente a plagas y enfermedades (Intrigliolo et al. 2010; Schultz, 2016).

Debido a los efectos comentados también se establece un nuevo modelo en las precipitaciones y éstas se producen en menor número, pero de forma más intensa, con pérdidas sustanciales por escorrentía, y menor número durante el ciclo vegetativo, pudiendo generar grandes problemas para el cultivo (Ibáñez, S., et al. 2019).

### 5.1.3. Efectos sobre fenología de la vid y composición de la uva

La vid es una planta termófila y de crecimiento estacional, que desarrolla su ciclo vegetativo a través de las siguientes fases fenológicas: brotación, floración, maduración y vendimia. Estas fases generales de la vid se encuentran directamente moduladas por variables como la temperatura, la radiación solar y la disponibilidad hídrica (Jones et al., 2005; van Leeuwen y Darriet, 2016). El aumento global de la temperatura producirá están alterando la cronología y duración de estas fases, afectando a la fisiología de la planta, el contenido químico de las uvas y, en consecuencia, la calidad del vino (Duchêne et al., 2010; Fraga et al., 2016).

Fases fenológicas de la vid más afectadas por el cambio climático:

#### a. Brotación

Como resultado del calentamiento global, múltiples regiones vitícolas están experimentando adelantos en la brotación de entre 2 y 10 días por década (Jones & Davis, 2000; Fraga et al., 2016). Es cierto que el número de heladas primaverales se está viendo reducido, pero el riesgo sigue presente. Este adelanto en la brotación conlleva un riesgo elevado de daños por las posibles heladas primaverales.

#### b. Floración

La floración, momento crítico para la futura producción, depende tanto de la temperatura acumulada como de condiciones climáticas estables (temperaturas moderadas, ausencia de lluvias intensas o vientos fuertes). Al igual que la brotación, esta fase también se ha adelantado como consecuencia del calentamiento global (Jones et al., 2005).

Un estudio de Duchêne y Schneider (2005) en la región francesa de Alsacia mostró que la floración se adelantó aproximadamente 10 días entre 1970 y 2003. Además, se ha observado que la duración de esta etapa tiende a reducirse, lo que puede comprometer la polinización y fecundación de las flores, afectando el cuajado del fruto (Webb et al., 2007). Este fenómeno puede repercutir en la productividad del viñedo y en la uniformidad del desarrollo posterior del racimo.

#### c. Maduración y vendimia

Esta etapa es sumamente sensible a la temperatura, y su aceleración debido al cambio climático puede generar importantes desequilibrios entre la madurez tecnológica, fenólica y aromática (van Leeuwen et al., 2004). El cambio climático también ha provocado un adelanto de la vendimia en

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

la mayoría de las regiones vitícolas, en algunos casos de hasta un mes respecto a décadas anteriores (Ramos et al., 2008; Duchêne et al., 2010).

El incremento de la temperatura favorece la acumulación rápida de azúcares, lo que lleva a un aumento del grado alcohólico potencial del vino. Sin embargo, la degradación de los ácidos ocurre más rápidamente que la síntesis de compuestos fenólicos, provocando uvas con bajo contenido de ácido tartárico y un pH elevado, perjudicial para la estabilidad del vino (Mira de Orduña, 2010).

En términos enológicos, vendimiar en fechas más tempranas puede derivar en vinos con mayor grado alcohólico, menor acidez, menor frescura y perfil aromático alterado, especialmente en variedades blancas más sensibles como Sauvignon Blanc o Riesling (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017). A su vez, el menor equilibrio entre azúcar y acidez representa un reto importante para la conservación y longevidad del vino.

### 5.1.4. Plagas y enfermedades emergentes

El incremento de temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación, las olas de calor y los inviernos más suaves están facilitando la aparición de nuevas enfermedades, mayores tasas de reproducción de vectores, y la expansión geográfica de patógenos y plagas, previamente limitados, por factores climáticos (Caffarra et al., 2012; Delbac & Thiery, 2015). Los eventos climáticos extremos, como lluvias intensas o sequías prolongadas, pueden favorecer brotes de enfermedades oportunistas o debilitar las defensas de la vid (Salinari et al., 2006).

El estrés hídrico en el viñedo modifica profundamente la fisiología de la vid y su interacción con el entorno, lo que favorece el desarrollo de plagas y enfermedades. La falta de agua reduce la capacidad fotosintética y la producción de compuestos fenólicos y antioxidantes, debilitando los mecanismos de defensa natural de la planta frente a patógenos como *Plasmopara viticola*, *Erysiphe necator* o *Botrytis cinerea* (Chaves et al., 2010). A nivel ecológico, el estrés hídrico altera el microclima del viñedo —por ejemplo, mediante la reducción del follaje— creando condiciones más cálidas y secas que benefician a plagas como la araña roja (*Tetranychus urticae*) o la polilla del racimo (*Lobesia botrana*) (Pons et al., 2017). Además, el debilitamiento de los tejidos vegetales y el cambio en la composición de la savia pueden aumentar la atracción de insectos vectores, facilitando la transmisión de enfermedades (Fereres & Moreno, 2009). Este conjunto de efectos hace que el estrés hídrico actúe como un factor indirecto de predisposición a múltiples agentes nocivos, comprometiendo tanto la sanidad como la calidad del viñedo.

Las enfermedades y plagas que mayor afección producen por el contexto del cambio climático son: Mildiu (*Plasmopara viticola*), Oídio (*Erysiphe necator*), Lobesia botrana (polilla del racimo) y *Xylella fastidiosa*. A su vez, el cambio climático está permitiendo que plagas y enfermedades que anteriormente estaban limitadas a latitudes bajas o climas tropicales puedan establecerse en zonas templadas, como: *Scaphoideus titanus* (vector de la flavescentia dorada), *Drosophila suzukii* y enfermedades de madera (Yesca, Eutipiosis).

### 5.1.5. Productividad y rentabilidad del cultivo. Zonas vitivinícolas en transformación

La productividad, medida como rendimiento por hectárea, ha mostrado tendencias variables según región. En algunas zonas de clima templado, el incremento de temperatura ha mejorado inicialmente el rendimiento gracias a una mayor actividad vegetativa y mayor eficiencia térmica (Fraga et al., 2016). Sin embargo, en regiones más cálidas, como el sur de España, Australia o California, los umbral térmicos ya están siendo superados, generando efectos negativos como: Reducción del cuajado por estrés térmico durante la floración, mayor evapotranspiración y competencia hídrica y un incremento en la frecuencia de olas de calor, con consecuencias sobre la fisiología de la planta. Se proyecta que, sin medidas de adaptación, los rendimientos podrían

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

disminuir entre un 15 y un 50% en algunas regiones mediterráneas hacia finales del siglo XXI (Moriondo et al., 2013).

El aumento térmico acelera la síntesis de azúcares en detrimento de la acidez, afectando la estructura y tipicidad del vino (van Leeuwen et al., 2019). Esto tiene un impacto directo en la rentabilidad, ya que el precio de la uva no depende solo del volumen, sino de parámetros cualitativos que se ven comprometidos en escenarios extremos. Los efectos del cambio climático están obligando a incorporar nuevas tecnologías y recursos para asegurar la producción y esto implica un aumento de los costes de inversión y mantenimiento, reduciendo el margen de beneficio, especialmente en pequeñas y medianas explotaciones (Tomasi et al., 2015).

### 5.2. ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN FREnte AL CAMBIO CLIMÁTICO EN VIÑEDO. REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE AZÚCAR DE LAS UVAS EN CAMPO

Por todo lo explicado con anterioridad, será necesario realizar una evolución hacia prácticas vitícolas más sostenibles y capaces de preservar y mejorar los recursos, y, a su vez, de encontrar mecanismos para enfrentarse o adaptarse al nuevo escenario de la viticultura en el cambio climático (Ibáñez, et al. 2019).

Las estrategias de adaptación frente al cambio climático en viñedo para reducir el grado alcohólico en las uvas que se van a tratar son las siguientes

Tabla 1. Estrategias de adaptación al cambio climático en viñedo para reducir el contenido de azúcar de las uvas en campo

ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN VIÑEDO PARA REDUCIR EL CONTENIDO DE AZÚCAR DE LAS UVAS EN CAMPO
Cambio de variedades o portainjertos
Manejo del suelo y cubierta vegetal
Manejo de la vegetación
Manejo de racimos
Riego eficiente
Técnicas de conducción y poda
Zonificación vitícola y relocalización de cultivos
Cambio de variedades o portainjertos

El objetivo de esta técnica es encontrar material vegetal que posea ciclos biológicos más largos, con maduración y vendimia más tardía y a su vez, teniendo un control en el incremento de la acidez y la coloración del mosto. Este nuevo material vegetal ha de tener una maduración tardía, tolerancia al calor y sequía y un contenido moderado en azúcar (Ibáñez, et al. 2019).

#### A. Variedades de vid

Las variedades de vid con ciclos fenológicos más largos permiten un retraso en la maduración de las uvas, evitando así las altas temperaturas estivales que aceleran la acumulación de azúcares y descompensan la acidez (Palliotti et al., 2014). Las variedades de vid que mejor se adaptan a los climas cálidos son: Touriga nacional, Assyrtiko, clones tardíos de Tempranillo, Petit Verdot y Marselan entre otras. Son variedades que están siendo reevaluadas por su capacidad de adaptación a climas cálidos y que están siendo implantadas en zonas mediterráneas para contrarrestar los efectos del cambio climático (Resco et al., 2016).

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

También se están considerando la implantación de clones seleccionados dentro de variedades tradicionales, para así tener el material vegetal usado de manera común, pero con una fenología más tardía. También se están utilizando variedades o clones adaptados al clima mediterráneo, como la variedad Callet, junto a variedades más sensibles en ensayos comparativos con portainjertos estándar como R-110 (Rodríguez-Izquierdo et al. 2025).

Las aplicaciones prácticas y futuras líneas de investigación se van a desarrollar en torno al estudio de la selección de clones con maduración tardía para controlar el grado alcohólico y tener rendimientos similares. También la integración de la mejora asistida por genómica (breeding assisted by genomics). Esta es una técnica moderna de mejora genética de plantas que utiliza la información del ADN (genoma) de la vid para seleccionar de forma más precisa y rápida nuevas variedades que combinen características deseables, como resistencia al calor, sequía o enfermedades a la vez que se reduce el grado alcohólico y conserva las características enológicas deseadas. Esta técnica ahorra muchos años en comparación con la mejora tradicional, permite conservar la identidad enológica mientras se adapta la planta al cambio climático y es una técnica más precisa y eficiente, reduciendo el número de ensayos de campo necesarios. También se está estudiando la edición de genes que regulen la acumulación de azúcares y la tolerancia a la sequía (Fernández – López, et al. 2022; Gambetta, et al. 2024; Van de Wiel, et al. 2025)

### B. Portainjertos

Será necesario utilizar portainjertos con perfiles específicos que dispongan de una alta eficiencia en uso del agua, control de vigor, capacidad para retrasar la fenología y reducir la acumulación de azúcares.

Se están realizando prácticas de injertos de variedades sensibles a sequía (como Shiraz, Merlot) sobre portainjertos como 110 Richter, 140 Ruggeri, 1103 Paulsen, 440-53 M, conocidos por su tolerancia al estrés hídrico (Stevens, et al. 2010). También se están realizando ensayos sobre combinaciones de portainjertos y densidades de plantación para mejorar el uso del agua y la eficiencia productiva (Romero et al. 2019; Edwards et al. 2022; Wine Australia & CSIRO 2023)

Tabla 2. Variedades de portainjertos que se adaptan al cambio climático

PORTAINJERTOS DE VID QUE SE ADAPTAN MEJOR A CLIMAS CÁLIDOS	
101 – 14 Mgt	Presentan vigor reducido y buena tolerancia a condiciones secas. Pueden ralentizar el desarrollo de la planta y moderar el contenido de azúcares en las bayas. (Romero et al., 2017).
420 A Mgt	
110 R	
140 Ruggeri	Muestran buen comportamiento bajo condiciones de déficit hídrico. (Ollat et al., 2016).
1103 Paulsen	
PORTAINJERTOS DE VID QUE NO SE ADAPTAN A CLIMAS CÁLIDOS	
41B	Variedades más tradicionales tienen peores condiciones de adaptación a las modificaciones del clima. (Ollat et al., 2016).
SO4	
El uso de portainjertos menos vigorosos también contribuye a moderar el crecimiento vegetativo y el rendimiento, facilitando un equilibrio entre producción y calidad. (Steven et al. 2010 ; Santesteban et al. 2023; Antonio Fernandes et al. 2024)	

Las propuestas de investigación y las líneas futuras proponen que la selección del material vegetal que se adapte a las condiciones climáticas y de las que se obtenga un contenido de azúcares más equilibrado se realice en el propio viñedo, de tal manera que no se pierda su caracterización. Otras líneas de investigación futuras incluyen: recomendación de patrones

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

específicos según climas y objetivos enológicos para abordar el incremento de temperaturas y sequías, selección de fenotipos de alta eficiencia, con imágenes hiperespectrales y drones que permitan una selección genómica de portainjertos que se adapten mejor al cambio climático y tengan un menor contenido de azúcares.

### 5.2.1. Manejo del suelo y cubierta vegetal

El manejo del suelo, y en particular el uso de cubiertas vegetales, se ha consolidado como una herramienta agroecológica clave para mitigar los efectos del cambio climático en el viñedo. Estas prácticas buscan optimizar el equilibrio hídrico y térmico del suelo, reducir el vigor de la vid, y en consecuencia, ralentizar la maduración de la uva, lo que puede traducirse en un menor contenido de azúcares y, por tanto, un grado alcohólico potencial más bajo. A su vez, este tipo de prácticas también ayuda a luchar contra las escorrentías. El aumento de los fenómenos extremos de precipitaciones, generan un aumento de la erosión del suelo por escorrentía superficial una disminución de la capacidad de retención de agua una reducción de la biodiversidad edáfica y degradación estructural del suelo y una mayor dependencia de insumos externos, como fertilizantes y agua de riego (Ibáñez et al. 2019).

El uso de cubiertas vegetales implica mantener o implantar una capa de vegetación viva (gramíneas, leguminosas o especies mixtas) entre las filas de cultivo. Pueden ser temporales o permanentes, sembradas o espontáneas, y gestionarse mediante segado, pastoreo o laboreo superficial. El objetivo principal es modular el microclima del viñedo, favorecer la competencia por el agua y los nutrientes en determinados momentos del ciclo vegetativo (especialmente durante el envero), mejorar la estructura del suelo, aumentar su capacidad de infiltración, reducir la erosión, y fomentar la biodiversidad funcional. Además, al generar competencia hídrica controlada, se retrasa el desarrollo vegetativo y la acumulación de azúcares en la baya, lo cual desacopla parcialmente la madurez tecnológica y fenólica de la uva, ayudando a reducir el grado alcohólico final del vino sin comprometer su calidad sensorial (Pallioti et al., 2014).

Estudios recientes han demostrado que las cubiertas vegetales bien gestionadas pueden reducir la acumulación de azúcares en la uva hasta en un 5–10%, retrasando la maduración sin afectar negativamente la acidez o los compuestos fenólicos (Brillante et al., 2020). En zonas mediterráneas, donde el estrés térmico y la escasez de agua son críticos, las cubiertas inducen una competencia moderada que permite limitar el crecimiento vegetativo excesivo y reducir la relación hoja/ fruto, mejorando la eficiencia en la maduración fenólica (Celette et al., 2009; Ferree et al., 2023). Un análisis reciente de Santesteban et al. (2023) resalta que el uso de cubiertas puede ser una estrategia efectiva para reducir el grado alcohólico potencial entre 0,3 y 1,0 % vol., dependiendo del tipo de cubierta, la gestión hídrica y la variedad.

En regiones como el Penedès, Rioja y Priorat (España), o Burdeos (Francia), se ha documentado una reducción de hasta el 80% de la pérdida de suelo gracias al uso de cubiertas (García-Díaz et al., 2017). No obstante, no es recomendable la implantación de cubiertas vegetales en zonas de pluviometría baja, zonas con suelos pobres o con baja actividad microbiana y en viñedos jóvenes o con portainjertos de bajo vigor. En estos casos la competencia puede ser más perjudicial que beneficiosa.

Para la elección de la cubierta vegetal, autores como Buesa et al., (2021) recomiendan la elección de especies que estén adaptadas en el clima local, realización de prácticas de cubiertas temporales en primavera, elección de especies de baja demanda hídrica y una implantación de sensores de humedad y teledetección para tomar decisiones precisas.

Las líneas futuras de investigación acerca del manejo del suelo y el empleo de cubiertas vegetales son: Selección de especies de cubiertas más eficientes en fijación de carbono y regulación térmica, analizar los efectos combinados con el uso de bioestimulantes y el análisis

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

de la microbiota del suelo y realizar una modelización predictiva del impacto de cubiertas vegetales sobre la composición de la uva.

### 5.2.2. Manejo de la vegetación

El manejo de la vegetación en el viñedo, junto con otras prácticas culturales como el uso de sustancias antitranspirantes, reflectantes o fitorreguladores, ha cobrado relevancia como estrategia adaptativa frente al cambio climático, especialmente para modular el ritmo de maduración de la uva y reducir su contenido de azúcares, con el objetivo final de disminuir el grado alcohólico potencial del vino sin comprometer su calidad (Martínez, 2018)

Las técnicas de manejo de la vegetación para reducir los efectos del calor y la reducción del grado alcohólico son:

- Reducción de la superficie foliar

Estas prácticas buscan modificar el microclima del racimo y la relación fuente/sumidero, es decir, el equilibrio entre la capacidad fotosintética de la planta (hojas) y la demanda de carbohidratos por parte de los órganos de reserva y los frutos.

Una de las técnicas es la aplicación de despuntes, desnietes o deshojados. Esta técnica reduce la actividad fotosintética global y limita la acumulación de azúcares en la baya si se realiza entre cuajado y envero. Estudios como Poni et al. (2018) y Gatti et al. (2016) demuestran reducciones del grado alcohólico de hasta 1,0 % vol en variedades como Sangiovese y Merlot. Además, esta técnica produce un estrés a la planta del que ha de recuperarse, retrasando la fecha de maduración y vendimia (Martínez 2018).

También se puede llevar a cabo el deshojado mínimo o deshojado tardío: Consiste en mantener e o restaurar el follaje en la zona de racimos para disminuir la exposición solar y reducir la síntesis de azúcares. Palliotti et al. (2017) observan que el deshojado mínimo puede preservar la acidez y retrasar la madurez sin afectar negativamente la fenólica. Se producen ambientes más frescos y se evitan quemaduras. No obstante, una mala gestión de la práctica puede generar problemas sanitarios (Martínez de Toda, 2018).

Por último, se pueden desarrollar desniveles en la canopia (canopia inclinada o gestión vertical): Modulan la interceptación de luz y reducen la temperatura del racimo, ralentizando la maduración (Intrigliolo et al., 2023).

- Uso de antitranspirantes y sustancias reflectantes

El uso de antitranspirantes (caolín, esteres grasos): Reducen la pérdida de agua foliar cerrando parcial o totalmente los estomas, lo que disminuye la actividad fotosintética. El uso de caolín, además, crea una capa reflectante que reduce la temperatura del racimo. Estudios como los de Shellie & Glenn (2010) han demostrado su efectividad en limitar la acumulación de azúcares y proteger la piel de la uva frente a quemaduras solares. Se produce un retraso del ciclo fenológico, asociado a la maduración y vendimia, sin producir tanto estrés a la planta (Martínez de Toda, 2018).

La aplicación de sustancias reflectantes (carbonato cálcico, caolín, bentonita): Aplicadas por vía foliar, reducen la temperatura superficial de las hojas y racimos. Filippetti et al. (2020) demostraron que reducen el grado alcohólico y mejoran la acidez tartárica y málica, especialmente en zonas cálidas. Estas prácticas no generan tanto estrés a la planta (Martínez de Toda, 2018).

- Uso de fitorreguladores u hormonas vegetales:

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

Los fitorreguladores, como el ácido abscísico (ABA), giberelinas o citoquininas, se aplican para modular el crecimiento y maduración de la baya. Recientemente, se han utilizado para desacoplar la maduración tecnológica y fenólica. Por ejemplo, el ABA acelera la maduración fenólica sin aumentar azúcares (Albacete et al., 2021), mientras que las citoquininas pueden ralentizar la acumulación de azúcares (He et al., 2020; Ziliotto et al., 2012; Böttcher et al., 2021).

Las futuras líneas de investigación se orientan a definir ventanas fenológicas óptimas para cada técnica, evaluar las sinergias entre prácticas, modelar la respuesta metabólica de la uva y estudiar el efecto a largo plazo sobre parámetros enológicos y sensoriales.

### 5.2.3. Manejo de racimos

El manejo directo de los racimos representa una vía práctica y efectiva para modular la carga productiva, modificar el microclima del fruto y alterar la dinámica de maduración.

Estas técnicas pueden producir retrasos en la maduración de en torno a 10 – 20 días del ciclo. Otras, como el forzado de yemas, puede desplazar la fecha de vendimia incluso en dos meses. Una combinación de varias técnicas también es posible, pudiendo obtener retrasos de entre 15 y 45 días en la maduración (Martínez de Toda, 2018).

- Aclareo masivo de racimos

Es la eliminación selectiva de racimos durante las fases tempranas del desarrollo (desde cuajado hasta envero), con el objetivo de reducir el rendimiento por cepa. Los objetivos de esta técnica son disminuir la carga para mejorar la calidad de la fruta, homogeneizar la maduración y evitar la sobremaduración de racimos más expuestos o adelantados (Martínez de Toda, 2018).

Aunque tradicionalmente se ha usado para aumentar la concentración de compuestos fenólicos, estudios recientes en climas cálidos han demostrado que, si se aplica tarde (envero), puede ralentizar la maduración de los racimos restantes al reducir la eficiencia fotosintética global (Gatti et al., 2012; Poni et al., 2018).

En algunas condiciones, también se ha usado de forma inversa: eliminando los racimos más desarrollados para retrasar la vendimia.

Las futuras líneas de investigación se centrarán en estudiar el momento óptimo según variedad y clima, estudio de la combinación con técnicas de manejo de vegetación y evaluación económica del rendimiento-calidad.

- Sombreado con mallas

Consiste en cubrir parcial o totalmente la zona de racimos con mallas sombreadoras instaladas en los alambres del sistema de conducción. El objetivo de esta técnica es reducir la radiación solar directa sobre los racimos, disminuir la temperatura del fruto y ralentizar la maduración de azúcares y prevenir daños por golpe de calor o quemaduras (Martínez de Toda, 2018).

Investigaciones recientes como la de Intrigliolo et al. (2023) demostraron que las mallas de sombra pueden reducir hasta 2 °C la temperatura del racimo, preservando la acidez y reduciendo la acumulación de azúcares en variedades como Tempranillo. Otras como la de Filippetti et al. (2020) comprobaron mejoras en la relación antocianinas/azúcares y menor pérdida de aromas volátiles.

Las futuras líneas de investigación irán enfocadas en función de los tipos de mallas según espectro reflectante, la optimización en sistemas mecanizados y el efecto en la microbiota del racimo.

- Doble vendimia o vendimia escalonada

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

En zonas con vendimia temprana aplicar forzado de yemas latentes para doble vendimia. Las yemas latentes se desarrollan en el año posterior. Con el forzado, gracias a las condiciones del clima, se puede tener una doble vendimia con menor graduación. Los racimos de la primera cosecha suelen estar menos maduros, y se utilizan para elaborar vinos bajos en alcohol o para realizar mezclas (Martínez 2018).

Los objetivos de esta técnica son reducir la carga y detener parcialmente la maduración, obtener mostos de menor riqueza en azúcares y equilibrar vinos mediante ensamblaje con diferentes perfiles de madurez.

Investigaciones recientes como la de Mirás-Avalos et al. (2023) evaluaron la eficacia de la doble vendimia en condiciones semiáridas de España y observaron una reducción del grado alcohólico de hasta 1,2 % vol. sin comprometer parámetros sensoriales ni concentración de polifenoles. Otras como la de Gatti et al. (2022) han propuesto un modelo matemático para predecir el efecto en la composición de mezcla de mostos de diferentes madureces.

Las futuras líneas de investigación se basarán en la interacción con levaduras adaptadas a bajos grados alcohólicos y aprovechamiento de la primera cosecha para bases de espumosos.

### 5.2.4. Riego eficiente

La eficiencia en el uso del agua se ha convertido en una prioridad para mantener la productividad, calidad y sostenibilidad del viñedo (Flexas et al., 2010; IPCC, 2021). La transición hacia una viticultura resiliente requiere repensar el manejo hídrico mediante prácticas como el riego deficitario controlado (RDC), el uso de sensores de humedad del suelo y del estado hídrico de la planta, y el apoyo de tecnologías como la teledetección y el análisis de datos en tiempo real (Intrigliolo & Castel, 2010). Esta estrategia tiene como finalidad regular el desarrollo vegetativo y reproductivo de la vid mediante un suministro hídrico preciso y controlado, con el objetivo de desacoplar parcialmente la maduración tecnológica (azúcares) de la fenólica (taninos, antocianos).

Será necesario realizar un control del agua aportada, solamente es necesario aportar lo mínimo ya que en exceso no genera beneficios, produciendo consigo estrés hídrico. (Ibáñez et al. 2019). Para ello, un buen control del estado hídrico se llevará a cabo con la medida del potencial hídrico foliar de la cepa (Ibáñez et al. 2019).

Intrigliolo et al. (2020) y Buesa et al. (2021) han demostrado que el riego deficitario moderado durante el envero reduce significativamente la acumulación de azúcares en variedades como Tempranillo y Garnacha, sin afectar negativamente los compuestos fenólicos. Santesteban et al. (2019) observaron que el riego en preenvero puede retardar la madurez tecnológica, manteniendo la concentración de antocianinas y la frescura del vino. Medrano et al. (2022) proponen el uso de sensores de planta y herramientas de teledetección para ajustar el riego en tiempo real, optimizando el uso de recursos y minimizando el impacto sobre el grado alcohólico. Crespo et al. (2023) evalúan la combinación de riego eficiente con otras prácticas como manejo del follaje y selección de portainjertos, concluyendo que los enfoques integrados son más efectivos para mitigar los efectos del cambio climático.

Esta técnica permite reducir el grado alcohólico final entre 0,5 y 1,5 % vol., dependiendo del manejo y variedad.

Las futuras líneas de investigación se basarán en la integración de modelos de simulación de balance hídrico y maduración, la evaluación de la respuesta varietal específica al RDC, ya que no todas las variedades responden igual, el desarrollo de sistemas de riego inteligente basados

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

en inteligencia artificial y big data y la sinergia con portainjertos resistentes a la sequía y cubiertas vegetales.

### 5.2.5. Técnicas de conducción y poda

El sistema de conducción define la forma espacial del viñedo, influenciando directamente la intercepción de luz solar, la ventilación y la exposición de los racimos. Ante esta realidad, las técnicas tradicionales de conducción y poda cobran un nuevo protagonismo como herramientas de manejo adaptativo, capaces de modular el microclima del dosel, optimizar el uso del agua, y retrasar o adelantar ciertos eventos fenológicos críticos como la brotación, la floración o la maduración (Pallioti et al., 2014).

#### A. Nuevas técnicas de conducción

Sistemas como el cordón Royat o Guyot vertical maximizan la exposición al sol, lo cual puede ser perjudicial bajo temperaturas extremas. Si hablamos de técnicas de conducción adaptadas al cambio climático, sistemas de conducción horizontales o en pérgola (como el tendone o el Lira) permiten una mayor protección de los racimos frente al exceso de radiación y calor, al crear sombras parciales y favorecer un mejor control térmico, como se observan en las siguientes imágenes (Pallioti et al., 2014; Martínez de Toda et al., 2019).

#### B. Nuevas técnicas de poda

La poda tardía es el tipo de poda que más se está empleando para combatir los efectos del cambio climático y reducir el contenido de azúcar en las bayas. Esta poda se realiza en el momento en que la planta mueve la sabia. Su objetivo es debilitar a la planta, parando así su desarrollo y obteniendo con ello un retraso en el ciclo. La planta en vez de desarrollarse en una época más temprana por el aumento de temperatura en los meses fríos, lo hace en una época más tardía, llegando a la vendimia en momentos más frescos y obteniendo una maduración más óptima. A su vez, se evita el daño por heladas o tener brotes expuestos a olas de calor tempranas (Friend & rought, 2007).

### 5.2.6. Zonificación vitícola y relocalización de cultivos

Las modificaciones en los patrones de temperatura, precipitación, radiación solar y eventos extremos han comenzado a alterar profundamente la idoneidad de muchas regiones vitivinícolas tradicionales (Jones et al., 2005; Hannah et al., 2013). Ante esta situación, dos estrategias emergen como herramientas fundamentales de adaptación: la zonificación vitícola y la relocalización de cultivos.

La zonificación vitícola permite caracterizar y delimitar áreas en función de su aptitud climática, edafológica y topográfica para la producción de uva de calidad. La zonificación permite anticipar los impactos del cambio climático, reorientar la elección de variedades o portainjertos, evaluar riesgos productivos y enológicos, planificar nuevas plantaciones.

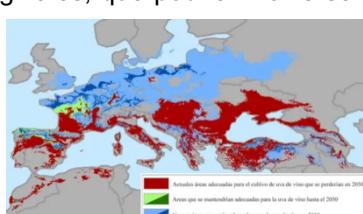
Por ejemplo, en Portugal, el proyecto ADAPACLIMA utilizó modelos de zonificación para prever cómo cambiará la aptitud de regiones del Douro bajo diferentes escenarios climáticos hasta 2100 (Santos et al., 2020).

En cambio, la relocalización implica el desplazamiento de viñedos hacia regiones actualmente marginales, que podrían volverse más adecuadas bajo escenarios climáticos futuros (Mozell &

Thach, 2014). La reubicación del viñedo hacia zonas más

Ilustración 1. Nuevas zonas de viñedo debido a los efectos del cambio climático

Fuente: tiempo.com “El mundo del vino, en vilo por los efectos del cambio climático”



## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

frescas, ya sea a mayor altitud o latitudes más altas, constituye una estrategia a largo plazo para adaptarse al calentamiento global. A medida que aumenta la altitud, la temperatura media disminuye, lo cual retrasa la maduración y favorece un equilibrio en la composición de las uvas (Jones & Schultz, 2016).

En regiones como el sur de España, sur de Italia, Australia y California, estos efectos amenazan la viabilidad futura de variedades tradicionales (Santos et al., 2020). Por otro lado, zonas que históricamente eran demasiado frías, como el Reino Unido, el norte de Francia, o altitudes elevadas, se están convirtiendo en áreas potencialmente aptas para viticultura de calidad como se indica en la imagen anterior (Fraga et al., 2016). El Reino Unido ha multiplicado por cinco su superficie vitícola desde los años 2000, y hoy produce espumosos de calidad internacional gracias al calentamiento de su clima (Mozell & Thach, 2014).

Además, modificar la orientación de las filas del viñedo puede reducir la radiación solar directa sobre los racimos. Orientaciones este-oeste, en contraposición a las clásicas norte-sur, pueden disminuir la insolación acumulada y mitigar la acumulación de azúcares (Martínez-Lüscher et al., 2017).

### **5.3. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN BODEGA Y EN LA ELABORACIÓN DE VINO.**

El cambio climático también está afectando a la calidad enológica del vino. Según van aumentando las temperaturas globales y se ven alterados los patrones de precipitación, las características químicas y organolépticas del vino, que son determinantes de su calidad sensorial, estabilidad y tipicidad, están cambiando de manera significativa. (Jones et al., 2005; Mira de Orduña, 2010).

La calidad del vino está estrechamente ligada a la composición de la uva al momento de la vendimia, especialmente a la concentración de azúcares, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y compuestos volátiles aromáticos. Estos parámetros, altamente dependientes de las condiciones climáticas durante el ciclo de maduración, están experimentando transformaciones importantes debido al calentamiento global (van Leeuwen et al., 2013). En regiones tradicionalmente templadas, la maduración tecnológica (acumulación de azúcares) se está produciendo más rápidamente que la maduración fenólica y aromática, lo que genera un desacoplamiento entre los distintos tipos de maduración, dificultando la obtención de un perfil equilibrado (Duchêne et al., 2010).

#### **5.3.1.Alteraciones químicas: azúcares, acidez y polifenoles.**

Uno de los efectos más evidentes del aumento térmico es el incremento en la concentración de azúcares en las bayas, lo que deriva en vinos con mayor grado alcohólico. Este fenómeno puede comprometer el balance gustativo, aumentar la percepción de calor en boca y afectar negativamente la estabilidad microbiológica del vino (Mira de Orduña, 2010). Paralelamente, se ha observado una reducción en la concentración de ácido málico, especialmente en climas cálidos, provocando vinos con acidez más baja y, por ende, menor frescura y capacidad de guarda (Palliotti et al., 2014).

Además, el estrés térmico y/o hídrico durante el envero y la maduración influye en la síntesis de antocianos y taninos, que son claves para el color, estructura y potencial de envejecimiento del vino tinto. En algunos casos, estos compuestos se ven reducidos o desequilibrados, afectando negativamente la intensidad cromática y la sensación en boca (Teixeira et al., 2013).

#### **5.3.2.Cambios organolépticos: aroma, sabor y tipicidad.**

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

Desde el punto de vista organoléptico, el cambio climático está transformando el perfil aromático del vino. Las temperaturas elevadas pueden reducir la concentración de compuestos volátiles clave como terpenos, norisoprenoides y tioles, especialmente en variedades aromáticas como Sauvignon Blanc o Riesling, comprometiendo su expresión varietal (Salazar et al., 2021). Al mismo tiempo, se ha reportado una disminución de precursores aromáticos glicósidos y un aumento de aromas indeseados asociados al estrés térmico, como notas cocidas o vegetales (Martínez-Lüscher & Kurtural, 2021).

Además, se está viendo afectada la tipicidad del vino, es decir, el carácter distintivo que una región o variedad imprime al producto. El cambio climático tiende a homogeneizar perfiles sensoriales, lo que supone una amenaza para las denominaciones de origen tradicionales, cuyo prestigio se basa precisamente en esa identidad enológica única (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).

### **5.4. ESTRATEGIAS ENOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO DE MOSTOS Y VINOS COMO RESPUESTA AL CAMBIO CLIMÁTICO**

El aumento del contenido de azúcar en las uvas conlleva vinos con mayor grado alcohólico, lo que representa un desafío tanto desde el punto de vista sensorial como regulatorio. Un vino con alto contenido alcohólico puede presentar una sensación de calor en boca, menor equilibrio gustativo y mayor riesgo de oxidación. Además, las levaduras comerciales más comunes de *Saccharomyces cerevisiae* tienen una tolerancia alcohólica limitada (~15–16 % vol.), lo que puede comprometer la finalización adecuada de la fermentación (Belda et al., 2017).

Si bien existen prácticas agronómicas para mitigar estos efectos en el viñedo, es en la bodega donde pueden implementarse soluciones técnicas más directas y controladas. A continuación, se describen en detalle las principales estrategias disponibles en bodega para reducir el contenido de azúcares de los mostos y el grado alcohólico de los vinos.

Las estrategias que se han recogido en la presente revisión para la reducción del grado alcohólico y paliar los efectos del cambio climático en bodega son las de la siguiente tabla:

*Tabla 3. Estrategias para la reducción del grado alcohólico de vinos en bodega. Momento de aplicación de las estrategias*

MOMENTO DE LA ESTRATEGIA	TIPO DE ESTRATEGIA
Prefermentativas	Tiempo de maceración y clarificación del mosto
	Dilución del mosto en agua
	Uso de enzima glucosa oxidasa
Fermentativas	Control de las condiciones de fermentación (temperatura, oxigenación y nutrición)
	Empleo de levaduras no-Saccharomyces y levaduras modificadas
	Empleo de levaduras genéticamente modificadas
Postfermentativas	Ósmosis inversa
	Nanofiltración
	Pervaporación
	Conos rotatorios
	Destilación osmótica
	Evaporación al vacío
	Electrodiálisis desalcoholizante
	Fraccionamiento y reensablaje de vinos

#### 5.4.1. ESTRATEGIAS PREFERMENTATIVAS

##### a. Clarificación del mosto y tiempo de maceración

La presencia de sólidos y precursores fenólicos en el mosto puede modificar la dinámica fermentativa: Mostos más turbios favorecen una mayor biomasa levaduriforme, y por tanto, mayor producción de etanol. Mostos clarificados o con menor contenido de sólidos tienden a tener una fermentación más lenta y con menor rendimiento alcohólico. Una clarificación moderada (70–100 NTU) puede reducir la tasa de fermentación y el contenido final de alcohol, especialmente en blancos y rosados (Ugliano et al., 2008). Es por tanto que la clarificación del mosto busca reducir la turbidez, eliminar compuestos fenólicos oxidables y regular la disponibilidad de nutrientes y compuestos volátiles (Casalta et al., 2016; Canals et al., 2008). Estudios como el de Álvarez et al., 2023 demuestran que mostos blancos muy clarificados fermentan más lentamente y presentan reducciones de hasta 0,3 % vol. de alcohol en comparación con mostos sin clarificar, sin perjuicio de la estabilidad proteica o del perfil aromático. Además, niveles de turbidez por debajo de 100 NTU limitan la presencia de lípidos y aminoácidos esenciales para la síntesis de alcoholes superiores, lo que indirectamente puede derivar en un perfil alcohólico más bajo (Bely et al., 2003). Por su parte, Martínez-Gil et al. (2013) señalaron que el uso conjunto de clarificantes proteicos y una filtración precoz puede limitar la formación de alcohol sin afectar negativamente a la intensidad aromática del vino.

En el caso de una maceración prefermentativa breve tiene como objetivo limitar la solubilización de azúcares residuales contenidos en los tejidos sólidos de la uva, particularmente en variedades sobremaduras cultivadas en climas cálidos. La técnica permite, además, reducir la carga tánica y modular el perfil sensorial hacia vinos más ligeros (Kontoudakis et al., 2011). En términos enológicos, maceraciones inferiores a 6 h han mostrado disminuir ligeramente el potencial alcohólico, aunque su impacto es más significativo cuando se combina con otras estrategias como la selección de levaduras de bajo rendimiento alcohólico (Morata et al., 2012).

Como conclusión se puede obtener que el ajuste de estos factores de forma aislada suele generar reducciones modestas del grado alcohólico (0,2–0,6% vol.), pero cuando se combinan de forma estratégica (por ejemplo, baja temperatura + baja disposición de nitrógeno + uso de levaduras no-Saccharomyces), pueden lograrse reducciones de hasta 1–1,5% vol., sin deteriorar la calidad sensorial del vino (Varela et al., 2016).

Las ventajas de ambas técnicas incluyen su bajo coste, facilidad de implementación en bodega, y la posibilidad de combinarlas con otras herramientas de manejo como el uso de enzimas pectolíticas o levaduras no-Saccharomyces. Además, no requieren tecnología invasiva ni generan subproductos químicos, por lo que son sostenibles y compatibles con la producción ecológica (Díaz-Maroto et al., 2005). Entre sus limitaciones, se encuentra su impacto relativamente modesto sobre la reducción del grado alcohólico (generalmente menor a 0,5 % vol.) y la posible pérdida de compuestos precursores aromáticos o fenólicos si la clarificación es excesiva (Ugliano et al., 2010).

Este tipo de aplicaciones es muy útil para vinos rosados o tintos jóvenes, donde se busca frescura y cuerpo ligero. También es aplicable para vinos blancos y espumosos.

##### b. Dilución del mosto con agua

Esta técnica consiste en la adición controlada de agua potable o tratada directamente al mosto o incluso a la uva antes del estrujado, con el objetivo de reducir la concentración de azúcares fermentables y, por tanto, el contenido alcohólico final del vino (Longo et al., 2018). La legislación europea ha sido históricamente restrictiva con esta práctica, pero en determinadas regiones vitícolas como Australia o California ya se permite bajo ciertos límites, siempre que se mantenga

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

la calidad organoléptica del vino (Christmann & Redl, 2022). En Australia, según la Norma 4.5.1. del Código de Normas Alimentarias de Australia y Nueva Zelanda, está permitido adicionar agua potable al mosto siempre que no reduzca el contenido en azúcares por debajo de 13,5 °C Baumé. Además, el volumen no puede exceder los 70 mL/L (7%) si la adición es para facilitar la fermentación o por otras razones técnicas (Food Standards Australia New Zealand 2017). En el caso de California, el Título 17 del Reglamento de California 17010(a) establece que sólo se puede añadir agua en la cantidad mínima necesaria para facilitar la fermentación normal. En este caso la norma no establece una cifra específica definida en grados Baumé (California Code of Regulations)

La dilución disminuye la densidad del mosto, lo que afecta la cinética de fermentación y el comportamiento de las levaduras. Según estudios de Bindon et al. (2013), esta técnica puede reducir el grado alcohólico en un margen de 0,5 a 1,5 % vol. dependiendo del volumen de agua añadido, con resultados sensoriales variables. No obstante, una dilución excesiva puede alterar el equilibrio fenólico y aromático del vino si no se gestiona adecuadamente (Schmidtke et al., 2012).

Diversos estudios han evaluado los efectos enológicos de esta práctica. Por ejemplo, Longo et al. (2018) demostraron que la dilución con hasta un 15 % de agua en mostos de uva Syrah puede reducir el alcohol en más de un 1,2 % vol., sin pérdida significativa de antocianos ni compuestos aromáticos si se acompaña de técnicas complementarias como el manejo del oxígeno o la crianza sobre lías. A su vez, Šuklje et al. (2016) observaron que, en climas cálidos, la dilución de mostos de Cabernet Sauvignon no solo redujo el contenido alcohólico, sino que también favoreció la percepción de frescura y la expresión varietal, siempre que el agua se añadiera antes de la fermentación y no al vino terminado.

Entre las ventajas de esta técnica destaca la capacidad de reducción del grado alcohólico sin practicar una intervención compleja. Además, es una técnica económica, reversible y compatible con vinificaciones tradicionales. No obstante, entre sus limitaciones se incluye el riesgo de desequilibrio organoléptico, la dilución de compuestos beneficiosos como los ácidos orgánicos, polifenoles y precursores aromáticos, así como el rechazo comercial en mercados donde se prioriza la pureza del proceso (Šuklje et al., 2019; González-Centeno et al., 2020).

Es por ello que las líneas futuras de investigación se centran en establecer protocolos óptimos para diferentes variedades, momentos de adición, y combinación con otras técnicas como la ósmosis inversa o la crianza sobre lías para compensar los efectos negativos de la dilución (Ugliano et al., 2010; Christmann & Redl, 2022).

### c. Uso de enzima glucosa oxidasa

Entre las estrategias biotecnológicas orientadas a mitigar este fenómeno, destaca el uso de la enzima glucosa oxidasa, habitualmente combinada con catalasa, por su capacidad para oxidar la glucosa presente en el mosto antes de la fermentación alcohólica.

La glucosa oxidasa cataliza la conversión de β-D-glucosa en ácido glucónico, con la consecuente producción de peróxido de hidrógeno, el cual debe ser rápidamente degradado por la acción de la catalasa para evitar la inhibición de la propia actividad enzimática, así como efectos oxidativos no deseados sobre compuestos del mosto. La aplicación de este sistema enzimático permite una reducción significativa del contenido de glucosa fermentable, lo que se traduce en un menor grado alcohólico potencial sin comprometer la calidad varietal del vino. En estudios recientes, del-Bosque et al. (2023) lograron reducir hasta 26,3 g/L de glucosa en condiciones controladas, lo que representa una disminución aproximada de 1,5 % vol. en el contenido alcohólico final, utilizando enzimas inmovilizadas en matrices de gel híbrido de sílice y alginato con posibilidad de reutilización durante al menos ocho ciclos enológicos.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

Mangas et al. (2023), por su parte, evaluaron la aplicación conjunta de oxidasa y catalasa en mostos blancos con elevado contenido azucarado y pH alto, observando reducciones de entre 1,0 y 2,5 % vol. en el contenido alcohólico, así como una disminución del pH de 0,3 a 0,5 unidades, lo cual podría beneficiar la estabilidad microbiológica del vino. Asimismo, reportaron una mejora general del perfil aromático y una reducción limitada en compuestos volátiles florales, sin perjuicio para la calidad organoléptica global. Resultados similares fueron observados por Röcker et al. (2016), quienes confirmaron una reducción alcohólica de hasta 2,0 % vol.

Las ventajas del empleo de este sistema enzimático son múltiples: se trata de un método biológico no transgénico, que permite una intervención precisa sobre la concentración de azúcares sin alterar la composición varietal del mosto. Además, las enzimas inmovilizadas presentan una mayor estabilidad operativa en condiciones enológicas y posibilitan su reutilización, lo que incrementa la eficiencia económica y reduce el impacto ambiental. No obstante, existen limitaciones que deben ser consideradas, como la necesidad de mantener condiciones aeróbicas controladas durante la reacción enzimática, la posible generación de compuestos oxidativos si no se elimina adecuadamente el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, y las variaciones sensoriales que pueden derivarse de la alteración de los equilibrios redox en el mosto.

En este sentido, futuras líneas de investigación deberían centrarse en la mejora de los sistemas de inmovilización enzimática, la optimización de las condiciones de reacción en bodega, la integración del tratamiento en línea con otras operaciones de vinificación, así como en la evaluación sensorial a largo plazo de los vinos obtenidos mediante esta técnica.

### 5.4.2. ESTRATEGIAS FERMENTATIVAS

#### a. Control de las condiciones de fermentación

El grado alcohólico final de un vino no depende únicamente del contenido inicial de azúcares del mosto, sino también del rendimiento fermentativo de las levaduras y de las condiciones bajo las cuales se desarrolla la fermentación alcohólica. (Morales, et al. 2014; Varela, et al. 2017; Quirós, et al. 2023) Ajustando factores como la temperatura, la oxigenación y la disponibilidad de nutrientes, es posible modular el metabolismo de las levaduras y desviar parte del carbono hacia metabolitos no etanólicos, como el glicerol, los ácidos orgánicos o los polisacáridos. (Varela, et al. 2004; Varela, et al. 2012)

- Temperatura de fermentación

La temperatura influye fuertemente en el metabolismo de las levaduras. En general, fermentar a temperaturas bajas entre 12 y 16 °C, la velocidad de fermentación disminuye y las levaduras tienden a producir más glicerol y compuestos secundarios a expensas de una menor eficiencia en la conversión de azúcares en etanol (Ciani & Ferraro, 1996; Varela et al., 2012). En cambio, a temperaturas más altas, entre 20 – 28 °C, la velocidad de fermentación aumenta a la vez que la producción de etanol y la volatilización de compuestos aromáticos (Varela et al. 2012)

Fermentar a temperaturas controladas y moderadamente bajas puede reducir ligeramente el grado alcohólico (hasta 0,2–0,4 % vol.) y mejorar la complejidad aromática del vino (Varela et al., 2015). Varela et al. (2012) observaron que controlar la temperatura de fermentación en combinación con el uso de cepas de *S. cerevisiae* modificadas o no convencionales permite obtener vinos con una reducción de alcohol de hasta 0,5–1 % vol., sin comprometer la calidad sensorial. Por su parte, Contreras et al. (2014) destacaron que fermentaciones a temperatura controlada con levaduras *no-Saccharomyces* como *Metschnikowia pulcherrima* o *Lachancea thermotolerans* producen más glicerol y ácidos orgánicos, reduciendo ligeramente el contenido de etanol y mejorando la acidez y el frescor del vino. Esta combinación de estrategias también es defendida por Varela et al., 2016.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

Las ventajas de esta técnica incluyen su bajo coste, la facilidad de implementación en bodega y su compatibilidad con otras prácticas reductoras de alcohol. Además, permite mantener bajo control la cinética fermentativa, evitando fermentaciones tumultuosas o paradas (Morales et al., 2014). Sin embargo, las limitaciones son notables: la reducción del grado alcohólico obtenida exclusivamente por el manejo de la temperatura es modesta (normalmente <1 % vol.), y el efecto depende en gran medida de la cepa utilizada, la composición del mosto y otros factores tecnológicos. Además, temperaturas excesivamente bajas pueden ralentizar o detener la fermentación, mientras que las altas favorecen la pérdida de compuestos volátiles (Ugliano et al., 2010).

Esta técnica es particularmente eficaz en fermentaciones blancas y rosadas, pero también puede adaptarse a tintas con buena gestión del nitrógeno y del oxígeno.

- Oxigenación controlada

La adición limitada de oxígeno en fases tempranas de la fermentación puede estimular rutas metabólicas respiratorias parciales en algunas levaduras, desviando parte del carbono hacia metabolitos secundarios como glicerol, ácidos orgánicos y polisacáridos y reduciendo la producción neta de etanol (Valero et al., 2002; García-Martínez et al., 2011; Varela et al., 2012).

El mecanismo de acción se basa en el papel del oxígeno como regulador de rutas metabólicas en *S. cerevisiae*. En condiciones de microoxigenación, se activan rutas alternativas como la de síntesis de glicerol y se reduce la actividad de la enzima alcohol deshidrogenasa, responsable de la conversión de acetaldehído a etanol (Erasmus et al., 2004). Además, el oxígeno favorece la biosíntesis de esterolos y ácidos grasos insaturados necesarios para la integridad de la membrana celular, mejorando la viabilidad de las levaduras en condiciones de estrés fermentativo (Fornairon-Bonnefond et al., 2002).

Estudios experimentales han mostrado resultados prometedores: García-Martínez et al. (2011) demostraron que la aplicación de oxígeno en fases tempranas de fermentación (24–48 h) puede reducir el contenido alcohólico en hasta 0,5–1,0 % vol., dependiendo de la dosis y la cepa de levadura utilizada. Por su parte, Morales et al. (2015) comprobaron que fermentaciones con oxigenación discontinua (10–20 mg/L) promovieron un aumento significativo en la producción de glicerol sin efectos negativos sobre la composición aromática del vino. Asimismo, la oxigenación combinada con el uso de levaduras no convencionales o modificadas genéticamente potencia aún más la desviación metabólica del carbono (Kutyna et al., 2010).

Entre las ventajas de esta técnica se encuentra su carácter no invasivo, la fácil integración en los sistemas enológicos actuales y su compatibilidad con otras estrategias como el control térmico o la selección de levaduras. Sin embargo, presenta limitaciones importantes: una oxigenación excesiva puede favorecer la proliferación de microorganismos no deseados, la oxidación de compuestos fenólicos y la pérdida de aromas volátiles (Ugliano et al., 2008). Además, la respuesta a la oxigenación es dependiente de la cepa, del mosto y del momento de aplicación. Es una técnica que ha de ser precisa, tanto en dosis como en duración, y requiere un monitoreo constante (Ribéreau-Gayon et al., 2006).

- Nutrición fermentativa y disponibilidad de nitrógeno

El nitrógeno disponible en el mosto es esencial para el crecimiento de las levaduras y su metabolismo secundario. Sin embargo, su cantidad y composición influyen directamente en la producción de etanol, glicerol y otros metabolitos. La manipulación del contenido de nitrógeno asimilable también puede usarse como herramienta para modular la ruta metabólica de las levaduras y, en consecuencia, influir en la producción de etanol y metabolitos secundarios (Crépin et al., 2012; Varela et al., 2012).

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

Un mosto con altos niveles de NFA favorece una fermentación más eficiente y completa, con mayor producción de etanol. En cambio, una restricción controlada de NFA (por debajo de 150 mg/L) puede limitar la tasa fermentativa, aumentar la producción de glicerol y reducir el grado alcohólico final (González-Royo et al., 2015). El mecanismo metabólico por el cual el nitrógeno afecta a la producción de etanol implica una interacción compleja entre la disponibilidad de nitrógeno y el flujo de carbono. Un contenido adecuado de nitrógeno favorece la actividad biosintética celular, desviando carbono hacia compuestos de reserva o estructurales como glicerol, ácidos grasos, aminoácidos o proteínas. En cambio, un contenido excesivo de nitrógeno puede inducir una mayor actividad fermentativa y mayor producción de etanol, mientras que deficiencias graves ralentizan la fermentación y pueden causar desviaciones organolépticas indeseables (Beltran et al., 2005; Sablayrolles, 2009).

Estudios han demostrado que el ajuste estratégico de la concentración y la fuente de nitrógeno puede reducir el grado alcohólico. Fornairon-Bonnefond et al. (2003) observaron que el uso de nitrógeno orgánico frente al inorgánico favorece una mayor producción de glicerol y menor rendimiento fermentativo. Igualmente, Ehsani et al. (2009) demostraron que ciertas combinaciones de cepas de *S. cerevisiae* y niveles moderados de NFA (150–200 mg/L) inducen una menor producción de etanol sin comprometer la cinética fermentativa.

Entre las ventajas del manejo de la nutrición nitrogenada se encuentra su simplicidad operativa, bajo coste y facilidad de integración en la vinificación convencional. Además, permite intervenir sobre la fermentación de forma indirecta sin necesidad de organismos modificados ni tratamientos físicos. Como limitaciones, destacan la elevada dependencia del tipo de levadura y del mosto, así como la dificultad de prever con exactitud la redistribución metabólica del carbono, que puede variar según las condiciones de fermentación (Taillandier et al., 2007; Varela et al., 2012).

A nivel práctico, esta técnica se aplica mediante la suplementación controlada de nitrógeno en forma de sales de amonio, aminoácidos o preparados orgánicos, normalmente en uno o varios puntos de la fermentación. (Rossouw, et al. 2011; Bell, et al. 2014; Benito, et al. 2018; Rollero, et al. 2019; Maturana, et al. 2021)

### **b. Empleo de levaduras no-Saccharomyces**

Estas levaduras *no-Saccharomyces*, tradicionalmente consideradas contaminantes o secundarias en la fermentación alcohólica, han demostrado poseer propiedades metabólicas que pueden ser útiles para reducir el grado alcohólico final del vino sin comprometer —e incluso mejorando— sus atributos sensoriales (Ciani et al., 2016). A diferencia de *S. cerevisiae*, que tiene una alta eficiencia en la conversión de azúcares en etanol, muchas especies *no-Saccharomyces* presentan un metabolismo fermentativo menos eficiente, produciendo mayor proporción de subproductos como glicerol, ácidos orgánicos o ésteres volátiles, y menos etanol.

Las levaduras no convencionales, como *Metschnikowia pulcherrima*, *Torulaspora delbrueckii* o *Lachancea thermotolerans*, tienen un rendimiento alcohólico menor que *S. cerevisiae*, ya que producen otros metabolitos como glicerol o ácidos orgánicos (Contreras et al., 2015). Estas levaduras se están utilizando para modular el perfil aromático, mejorar la complejidad sensorial y aumentar la acidez en fermentaciones de climas cálidos (Jolly et al., 2014).

Los siguientes estudios obtuvieron como objetivo la reducción del contenido alcohólico de los vinos: Estudios como el de Contreras et al. 2014 obtuvieron que el uso de *M. pulcherrima*, en fermentación con *S. cerevisiae*, lograron reducciones de 0,9 – 1,6 % vol. Wineland 2020 obtuvo reducciones bajo ciertas condiciones de oxígeno y tiempo de inoculación, de entre 0,6–1,6 % vol. Los mismos intervalos de reducción se obtuvieron en los estudios de Ciani et al. (2006), Sadoudi et al. (2012), Contreras et al. (2020) y Zhang et al. 2023). Los estudios de Gobbi, et al 2013, Benito et al., 2016 Martín, et al. 2020 y ; Vaquero, et al. 2020 y obtuvieron con el uso de cepas

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

de *Lachancea hermotolerans* se obtuvieron descensos del grado alcohólico de hasta 2 % vol. En el caso de *Torulaspora delbrueckii*, estudios de Bely et al., 2008; Jolly, et al. 2014; Canonico, et al. 2016 y Martín, et al. 2020 tuvieron descensos del grado alcohólico de entre 2 y 2,5 % vol., promoviendo la síntesis de glicerol a través de rutas como glicerol-pirúvico. Se obtuvieron vinos con más cuerpo, menor acidez, menor metabolismo oxidativo y un consumo más lento de azúcares. Por último, para el caso de *Hanseniaspora uvarum* y *Pichia kluyveri*, el descenso no fue tan alto como las anteriores, obteniendo un rango de entre 0,4 y 1,5 % vol. en fermentaciones secuenciales con *S. cerevisiae* pero que sí mejoraron el perfil aromático a través de tioles y terpenos y la diversificación sensorial (Contreras, et al. 2021)

No obstante, no todo son ventajas con el uso de este tipo de levaduras, sino que también se corre el riesgo de fermentaciones incompletas (si no se maneja adecuadamente la secuenciación o la nutrición), pueden producir desviaciones en la fermentación, requieren protocolos específicos para cada cepa de vino y algunas especies producen compuestos indeseables si no se controlan de manera correcta. (Jolly et al., 2014; Bagheri et al., 2015; Ciani & Comitini, 2015 y Varela & Borneman, 2017)

Como se ha visto en los estudios anteriormente citados como los de Contreras et al. 2014 y Contreras et al. 2021, una buena solución sería aplicar fermentaciones secuenciales o co-inoculaciones, entre levaduras *no-Saccharomyces* y *S. cerevisiae*, para reducir el grado alcohólico sin comprometer la calidad sensorial.

### **c. Empleo de levaduras genéticamente modificadas**

El empleo de levaduras genéticamente modificadas ha cobrado interés como una alternativa de precisión que permite redirigir el metabolismo fermentativo sin comprometer la viabilidad de la fermentación ni la calidad del vino (Nevoigt, 2008; Varela et al., 2012). Estas levaduras tienen su genoma modificado, el cual permite la alteración de funciones específicas.

Se han desarrollado cepas transgénicas de *S. cerevisiae* con vías metabólicas dirigidas a reducir la conversión de azúcares en etanol, favoreciendo la síntesis de otros compuestos (Dequin et al., 2017). Estas levaduras redirigen parte del flujo de carbono hacia productos alternativos al etanol, como glicerol, ácidos orgánicos o trehalosa, reduciendo así la producción neta de alcohol. Uno de los enfoques más estudiados ha sido la sobreexpresión del gen GPD1 (glicerol-3-fosfato deshidrogenasa), que incrementa la síntesis de glicerol a expensas del etanol (Cambon et al., 2006; Varela et al., 2012). También se ha trabajado en la disminución de la actividad piruvato descarboxilasa (PDC), que cataliza una de las etapas clave hacia la formación de etanol. Estas modificaciones deben realizarse cuidadosamente para evitar desequilibrios redox o acumulación de subproductos no deseados (Nevoigt, 2008).

Como resultado en la aplicación de las levaduras modificadas en vino se ha obtenido lo siguiente: Varela et al. (2012) diseñaron una cepa de *S. cerevisiae* que redujo la producción de etanol en 1.5 % vol. en vinificaciones a escala piloto, incrementando simultáneamente la producción de glicerol. Kutyna et al. (2010) lograron reducciones similares mediante ingeniería combinada de rutas del acetaldehído y la glicerina. Sin embargo, también se reportó la generación de niveles elevados de acetato y otros compuestos que, si no se controlan, pueden comprometer la calidad sensorial del vino. Por último, Dequin et al., 2017 obtuvo vinos con una reducción de hasta 1,5–2% vol. de alcohol dependiendo de la cepa de levadura utilizada.

Entre las principales ventajas de esta estrategia se encuentran su alta especificidad, la capacidad de adaptación a distintos vinos y la posibilidad de obtener resultados deseados mediante una planificación bien diseñada. No obstante, sus limitaciones incluyen la aceptación social y regulatoria de los organismos modificados genéticamente (OGM), que varía considerablemente según el país.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

En la UE, el uso de levaduras GM en enología está restringido, y su aplicación requiere cumplir con la normativa (Reglamento (CE) N.º 1829/2003). La OIV establece que solo pueden utilizarse levaduras GM o híbridas si cuentan con la autorización de la autoridad competente, y su uso se limita generalmente a vinificaciones experimentales o no destinadas a la comercialización masiva (OIV, 2003; OIV, 2017). En el caso de levaduras inactivadas, la Resolución OENO 459-2013 aborda las levaduras inactivadas con glutatión y señala que si el material procede de levaduras genéticamente modificadas, también debe contar con autorización oficial (OIV 2013)

### 5.4.3. ESTRATEGIAS POST FERMENTATIVAS

#### a. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa (OI) es una técnica de separación física basada en el uso de membranas semipermeables (tamaño 100 nm) que permiten el paso selectivo de ciertos compuestos. En el caso del vino, esta tecnología se emplea para separar y extraer una fracción del agua y etanol del vino ya fermentado (o del mosto parcialmente fermentado), logrando así una reducción del contenido alcohólico sin alterar radicalmente su composición global. (Álvarez et al., 2010).

El proceso implica aplicar una presión superior a la presión osmótica natural para forzar el paso del vino a través de una membrana que retiene la mayor parte de los compuestos de alto peso molecular (antocianos, taninos, compuestos aromáticos) y deja pasar a una fracción líquida compuesta principalmente de agua y etanol. Esta fracción extraída puede luego ser sometida a destilación u otra técnica de separación (como evaporación al vacío) para eliminar selectivamente el etanol, y luego reintroducir el agua en el vino base para restaurar su volumen (Muhlack et al., 2005; González-Royo et al., 2015).

Estudios realizados con vinos tintos y blancos muestran que la ósmosis inversa puede reducir el grado alcohólico entre 0,5 y 2,0% vol. sin pérdidas sensoriales significativas cuando se maneja correctamente (Pickering et al., 2007; Gambuti et al. 2011; Martínez-García et al., 2019). Por su parte, González-Royo et al. (2014) encontraron que la técnica preserva adecuadamente la estructura tánica y los compuestos fenólicos en vinos tintos, siempre que se apliquen límites moderados de reducción (hasta 2 % v/v.). En vinos blancos, Meillon et al. (2010) observaron que la técnica puede inducir ligeros cambios en el equilibrio aromático, especialmente si la fracción volátil no es correctamente reintroducida.

Entre las ventajas más destacadas de la ósmosis inversa se encuentran su precisión en la reducción alcohólica, su carácter no invasivo sobre los compuestos estructurales del vino, y su legalidad en numerosos países. Además, permite tratar volúmenes grandes con relativa rapidez y es aplicable tanto a vinos blancos como tintos (Pickering et al., 2008; Martínez-García et al., 2019). No obstante, presenta limitaciones importantes, como la pérdida de compuestos aromáticos volátiles, que puede afectar la expresión sensorial del vino, así como un coste tecnológico elevado, tanto en equipamiento como en mantenimiento. Además, el uso excesivo o mal controlado de la técnica puede alterar la percepción del cuerpo y del equilibrio global del vino. El máximo volumen a reducir por esta técnica es de 2,0 % vol. para conservar la tipicidad del vino y requiere de reformulación enológica posterior. (Ferrari et al., 2020).

La OI se emplea en bodegas a gran escala o tecnológicamente avanzadas, habitualmente tras la fermentación alcohólica, y puede combinarse con otras técnicas como el tratamiento con membranas de nanofiltración. La OIV permite su uso para reducciones moderadas de alcohol (hasta un 20 % del volumen inicial), siendo común en países productores como Australia, España, Francia y Estados Unidos (OIV, 2009).

#### b. Nanofiltración

La técnica de nanofiltración, basada en membranas de tamaño de poro de entre 1 y 10 nm, se utiliza en enología para ajustar el grado alcohólico sin aplicar calor, conservando así las

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

características sensoriales del vino mediante filtración selectiva. Se separa el vino en dos fracciones: permeado (compuesto principalmente por agua y etanol con baja concentración de sustancias de peso molecular superior) y retenido (rico en polifenoles, compuestos aromáticos y macromoléculas) (Sam, et al. 2021; Kumar et al., 2025)

En estudios piloto, Salgado et al. (2015) realizaron NF en mostos de Verdejo y Garnacha antes de la fermentación, reduciendo aproximadamente 1–2 % vol. en el vino final, y sin diferencias perceptibles sensorialmente. Además, el equipo de la ETSIIAA-UVA (Calvo et al., 2022) aplicó un sistema combinado de NF-pervaporación-dialysis en mostos de Verdejo, alcanzando reducciones de 2 % vol. y preservando el perfil aromático, mostrando una aceptabilidad sensorial sin diferencias significativas con el vino control.

Las ventajas de la nanofiltración incluyen su bajo consumo energético (comparado con técnicas térmicas), control sobre el grado alcohólico vía selección de membrana y presión, y retención de aromas y antocianos (Ivić, et al. 2021; Kovačević, et al. 2021; Kumar, et al. 2025). Entre las limitaciones destacan la fouling de membrana por polisacáridos o polifenoles, la necesidad de regeneración frecuente, y la posible pérdida de algunos volátiles ligeros (Ivić, et al. 2021; Brandi, et al. 2023).

Esta técnica es ideal en vinos blancos y rosados elaborados con altas concentraciones de azúcar, así como en tintos ligeros, complementándose con técnicas como la pervaporación o la electrodiálisis para optimizar la retención aromática y la eficiencia de la desalcoholización. Respecto a la calidad del vino, los estudios coinciden en que reducciones moderadas (1,0–2,0 % vol.) permiten mantener intacto el perfil sensorial y la estructura fenólica, conservando además una buena intensidad aromática y textura en boca (Sam, et al. 2021).

### **c. Pervaporación**

Consiste en la transferencia selectiva de componentes volátiles a través de una membrana semipermeable, donde el mosto o vino está en contacto con un lado de la membrana y el otro lado se encuentra en condiciones de vacío o flujo de gas que favorece la evaporación de las moléculas permeadas. Estas membranas son densas, donde el transporte ocurre por difusión selectiva a nivel molecular y no por exclusión por tamaño de poro. En este caso la selectividad depende de la afinidad química entre el componente a separar y el material de la membrana, y del coeficiente de solubilidad y difusión del etanol en esa membrana. Este proceso permite eliminar selectivamente el etanol sin someter al producto a temperaturas elevadas, preservando así su calidad sensorial (Sam, et al. 2021).

Diversos estudios han demostrado la eficacia de la pervaporación para reducir el contenido alcohólico en vinos con alta selectividad y sin pérdida significativa de compuestos aromáticos. Por ejemplo, Cassano et al. (2016) evaluaron membranas poliméricas para la desalcoholización parcial de vinos tintos, logrando reducciones de etanol de hasta 2% v/v sin comprometer la concentración de antocianos y compuestos volátiles. Además, García-Pérez et al. (2021) destacaron que la pervaporación mantiene las propiedades organolépticas y mejora la estabilidad microbiológica al reducir el contenido alcohólico.

Las principales ventajas de la pervaporación incluyen su bajo consumo energético en comparación con técnicas térmicas tradicionales, alta selectividad para el etanol, y la preservación de los compuestos sensibles al calor. Sin embargo, presenta limitaciones como el ensuciamiento y colmatación de membranas, costos iniciales elevados y la necesidad de un control riguroso de las condiciones operativas para evitar la pérdida de compuestos aromáticos ligeros. Además, la escala industrial aún está en desarrollo y requiere optimización para mejorar la eficiencia y el coste-beneficio (Sam, et al. 2021).

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

En la práctica, la pervaporación puede integrarse en líneas de producción de vinos para obtener productos con menor grado alcohólico, adaptándose a las demandas del mercado y regulaciones. Su aplicación es especialmente útil para vinos tintos y blancos con alta concentración alcohólica resultante del cambio climático o de variedades con elevados contenidos de azúcar (Cassano et al., 2016; García-Pérez et al., 2021).

### **d. Conos rotatorios**

La técnica de conos rotatorios es un método físico utilizado para la reducción del grado alcohólico en vinos, basado en la separación por centrifugación. Esta técnica emplea un sistema de conos cónicos que giran a alta velocidad, generando una fuerza centrífuga que permite la separación de componentes según su densidad y peso molecular. De esta forma, se puede extraer parte del etanol contenido en el vino sin aplicar calor, preservando así las características sensoriales del producto (Loyola et al. 2021).

El mecanismo de acción de los conos rotatorios se fundamenta en la aplicación de fuerzas centrífugas intensas que separan la mezcla líquida en fracciones con diferentes concentraciones de etanol. Al girar, los conos facilitan la segregación del alcohol, que posee una densidad menor que el resto de los componentes del vino, permitiendo su concentración y posterior extracción. Este proceso se puede ajustar variando la velocidad de rotación y el tiempo de tratamiento para controlar la reducción alcohólica deseada (Hernández, et al. 2017; García, et al. 2020; Dubourdieu, et al. 2019).

Estudios recientes han demostrado la efectividad de esta técnica para reducir el contenido de alcohol en vinos tintos y blancos sin comprometer significativamente sus perfiles aromáticos y colorimétricos. Por ejemplo, Hernández-Orte et al. (2017) reportaron una reducción de hasta 2% v/v en etanol utilizando conos rotatorios, con una mínima pérdida de compuestos volátiles importantes para la calidad sensorial. Asimismo, García et al. (2020) destacaron la capacidad de esta técnica para mantener la integridad de los polifenoles y la estabilidad del vino tras el proceso.

Entre las ventajas de los conos rotatorios se incluyen su bajo impacto térmico, lo que minimiza la degradación de compuestos sensibles, y su operación continua que facilita la integración en líneas de producción. No obstante, presenta limitaciones como la inversión inicial en equipos especializados, la necesidad de un control preciso para evitar la sobre extracción de componentes y la posible alteración física del vino debido a fuerzas mecánicas elevadas (Puglisi et al 2021)

### **e. Destilación osmótica**

El mecanismo de la destilación osmótica se basa en el uso de una membrana semipermeable que separa dos líquidos con diferentes concentraciones de solutos. El proceso genera un flujo de alcohol desde la fase con mayor concentración (vino o mosto) hacia la fase con menor concentración, impulsado por la diferencia de presión osmótica. La membrana actúa como barrera selectiva, permitiendo que el etanol y algunos compuestos volátiles pasen mientras retiene otros componentes importantes para la calidad del vino. La temperatura de operación es moderada, lo que evita la degradación térmica de compuestos sensibles (Sam, et al. 2021).

Estudios recientes, como los de Martínez et al. (2022) y López-García et al. (2023), han demostrado la eficacia de la destilación osmótica para reducir entre un 1.5% y 3% vol. el contenido alcohólico en vinos tintos y blancos. Estas investigaciones destacan la conservación de compuestos aromáticos y polifenoles, así como una mínima alteración en el perfil organoléptico.

Entre las ventajas de la destilación osmótica destacan su selectividad, bajo impacto térmico y eficiencia energética. No obstante, presenta limitaciones asociadas al ensuciamiento y colmatación de membranas, la necesidad de mantenimiento frecuente y la complejidad técnica

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

para mantener condiciones óptimas de operación. Además, el coste inicial de implementación puede ser elevado para algunas bodegas (Kumar, et al. 2020; García-Castillo, et al. 2021; Martínez, et al. 2022; López-García, et al. 2023)

En la práctica, la destilación osmótica es aplicable para la producción de vinos con grado alcohólico ajustado, permitiendo a los productores responder a las exigencias del mercado y a las normativas que limitan el contenido etílico.

### **h. Evaporación al vacío**

El fundamento de la técnica es un proceso de separación térmica que consiste en someter el vino a bajas presiones absolutas (20–100 mbar), lo que reduce la temperatura de ebullición del etanol (normalmente de 78,5 °C a temperaturas entre 25 y 35 °C). Este principio permite la evaporación selectiva de etanol y parte del agua sin dañar los compuestos termolábiles del vino (Pickering et al., 2008). A menudo, el vino tratado se somete a una fraccionación previa (por ejemplo, mediante ósmosis inversa) para aislar la fracción hidroalcohólica que posteriormente se destila al vacío, y luego se reintegra la fracción retenida para preservar la calidad (Varela et al., 2015; Pickering et al., 2008).

Los estudios muestran que la técnica es eficaz para reducir el grado alcohólico de forma controlada. Pickering et al. (2008) demostraron que la evaporación al vacío permite reducciones de hasta 2–3 % vol. con mínimos impactos negativos en la percepción sensorial, siempre que el proceso se aplique de manera moderada. Varela et al. (2015) compararon esta técnica con la ósmosis inversa y concluyeron que, si bien la técnica puede producir una ligera pérdida de frescura aromática, preserva adecuadamente la estructura gustativa y resulta especialmente adecuada para vinos tintos. Asimismo, Ribéreau-Gayon et al. (2021) destacaron su utilidad en tratamientos complementarios para ajustar vinos con alcohol excesivo sin comprometer su tipicidad varietal.

Entre sus principales ventajas, la evaporación al vacío destaca por su simplicidad tecnológica, su capacidad de tratamiento de grandes volúmenes y su aplicación controlada a bajas temperaturas, lo que reduce el riesgo de alteración térmica (Fang & Boulton, 2006; Guchu et al., 2006). Sin embargo, presenta limitaciones como la posible pérdida de compuestos aromáticos volátiles, el coste energético del proceso, y la necesidad de equipos específicos. Además, su aplicación indiscriminada o excesiva puede afectar la complejidad sensorial del vino y su equilibrio en boca (Ferrari et al., 2020; Meillon et al., 2010). Además, esta técnica necesita de aplicar ajustes post – proceso (Pickering et al., 2008); (González-Royo et al., 2015).

Se aplica en las etapas finales de vinificación, tras la fermentación alcohólica, con el objetivo de ajustar el contenido alcohólico final a niveles más equilibrados para el perfil del producto. La OIV permite su uso bajo supervisión técnica y en combinación con otras técnicas físicas aprobadas (OIV, 2009).

### **i. Electrodiálisis desalcoholizante**

La electrodiálisis desalcoholizante es una técnica física basada en el uso de campos eléctricos y membranas semipermeables que permite reducir selectivamente el contenido de etanol en soluciones hidroalcohólicas como el vino (Gomez Plaza et al., 2021).

El principio de funcionamiento de esta técnica, se basa en la migración de iones o moléculas cargadas bajo un campo eléctrico a través de membranas específicas. En el caso del vino, se emplea una configuración de membranas bipolar y anión-catión selectivas, que separan etanol y ciertos ácidos del vino sin necesidad de disolventes orgánicos ni tratamientos térmicos. En la versión desalcoholizante de esta técnica, se emplean membranas diseñadas para permitir la migración de etanol en forma ionizada o formando complejos con portadores específicos (Heux

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

et al., 2022). La fracción desalcoholizada puede reincorporarse parcialmente al vino, permitiendo un ajuste fino del grado alcohólico.

Diversos estudios han demostrado la eficacia de la electrodiálisis para reducir el alcohol de manera controlada sin alterar significativamente la composición general del vino. Por ejemplo, Geffroy et al. (2019) lograron una reducción de hasta 2 % vol sin pérdidas sensoriales relevantes, mientras que Maza et al. (2021) observaron que la electrodiálisis desacoholizante preserva mejor los compuestos volátiles en comparación con técnicas térmicas como la destilación al vacío. Además, López et al. (2019) observaron que la ED puede incluso mejorar la percepción de frescura, al reequilibrar la relación etanol-acidez en vinos cálidos, lo cual es altamente deseable en el contexto del calentamiento climático. Sin embargo, se ha reportado que una eliminación excesiva de etanol (>2.5 % vol.) puede alterar la percepción de cuerpo y redondez del vino (Berna et al., 2023).

Entre las ventajas de la electrodiálisis destacan su precisión en el ajuste del alcohol, la baja temperatura del proceso (lo que evita pérdida de aromas) y su adaptabilidad a escala industrial. Además, no requiere el uso de aditivos químicos y permite procesar volúmenes significativos (Meillon et al. 2010; Liguori et al., 2013; González-Royo et al., 2016; y López et al. 2019) No obstante, entre sus limitaciones se encuentran el elevado coste de las membranas, el mantenimiento técnico del sistema y la necesidad de controlar cuidadosamente las condiciones operativas para evitar alteraciones organolépticas o pérdida de color en vinos tintos (Heux et al., 2022). Por ello, esta técnica se considera más adecuada para reducciones moderadas de grado alcohólico (hasta 1.5–2 % vol.), en las cuales las modificaciones organolépticas son mínimas o aceptables (Maza et al., 2021; Berna et al., 2023).

La aplicación práctica de esta técnica está siendo adoptada por bodegas de alto perfil tecnológico y aquellas que están produciendo vinos con bajo contenido alcohólico. Su implementación es viable como etapa final del proceso, antes del embotellado, y se integra fácilmente con sistemas de filtración ya existentes. (Sánchez-Benito et al. 2021; Fernández-Toro et al. 2022 y Romanos et al. 2023)

### **j. Fraccionamiento y reensamblaje de vinos**

En algunas bodegas se elaboran distintas fracciones de vino (más o menos alcohólicas) que luego se mezclan para alcanzar un perfil determinado. Se obtiene un producto final equilibrado, con un contenido alcohólico menor al original, pero sin comprometer su calidad sensorial. También se puede aplicar a partir de la separación de una fracción del vino total, su posterior desalcoholización parcial o total, y su reincorporación al volumen original para alcanzar el grado alcohólico deseado sin alterar drásticamente las características sensoriales del producto final (Gómez-Plaza et al., 2021; Berna et al., 2023). Este enfoque permite una mayor flexibilidad y control, aunque requiere planificación logística y evaluación sensorial precisa (Kontoudakis et al., 2011). A su vez, este enfoque permite reducir el grado alcohólico sin necesidad de aplicar tratamientos intensivos a todo el volumen de vino, preservando la calidad del producto.

Diversos estudios han evidenciado la efectividad del reensamblaje como estrategia para alcanzar reducciones de hasta 2–2,5 % vol. sin comprometer significativamente el perfil sensorial. Por ejemplo, Maza et al. (2021) observaron que esta técnica, combinada con electrodiálisis, logra una reducción eficaz de etanol en vinos tintos jóvenes manteniendo los niveles de antocianos y compuestos volátiles. De igual forma, Escudero-Gilete et al. (2022) señalaron que, cuando se realiza con fracciones desalcoholizadas mediante columnas de conos rotatorios, se mantiene una mayor fidelidad aromática respecto al vino original en comparación con técnicas que aplican desalcoholización a todo el volumen.

Entre las principales ventajas del fraccionamiento y reensamblaje destaca su versatilidad, ya que permite combinar diferentes tecnologías de desalcoholización y ajustar el grado alcohólico

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

deseado de forma precisa. Además, ofrece una menor agresividad sensorial en comparación con la desalcoholización total del volumen. Los vinos resultantes del fraccionamiento y reensamblaje suelen presentar una mayor frescura y acidez percibida, especialmente cuando se emplean fracciones de vendimia temprana (González-Royo et al., 2016). Sin embargo, también presenta limitaciones, como el coste energético de las técnicas asociadas y la posible pérdida de compuestos volátiles si no se controla adecuadamente el proceso de desalcoholización (Heux et al., 2022).

La práctica del ensamblaje está permitida por la OIV y por la normativa comunitaria europea (Reglamento UE 2019/934), siempre que las fracciones pertenezcan a la misma categoría de producto. También es compatible con denominaciones de origen, siempre que los vinos ensamblados pertenezcan a la misma DOP o cumplan los pliegos técnicos establecidos.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

El cambio climático ya está ocasionando alteraciones las cuales están haciendo que la viticultura y la enología tradicional tengan que ser reinventadas para adaptarse a los nuevos tiempos. Estas modificaciones climáticas están produciendo maduraciones de las bayas más tempranas y que se realizan de manera descompensada: esto genera un mayor contenido de azúcares en las uvas y, por tanto, haya que enfrentarse también al problema del aumento del grado alcohólico en los vinos.

En este contexto del cambio climático se han identificado y analizado múltiples estrategias de adaptación desde la materia prima, en el viñedo. Estrategias que permiten mitigar estos efectos adversos del cambio climático como el empleo de otras variedades o portainjertos fuera de las tradicionales, el manejo del suelo y de la cubierta vegetal, una gestión precisa de la vegetación y racimos, el riego eficiente, la adaptación de sistemas de conducción y poda, la zonificación vitícola o la vendimia anticipada y segmentada. Estas estrategias serán una herramienta clave para mejorar la adaptación del viñedo a las nuevas condiciones climáticas y obteniendo como resultado el objetivo de una reducción de la concentración en azúcares desde el campo.

Paralelamente en bodega también se están estudiando y desarrollando soluciones tecnológicas para poder afrontar la problemática de tener vinos con mayor graduación. Este trabajo ha clasificado estas estrategias en tres grandes bloques: en primer lugar con las estrategias pre-fermentativas, como la dilución del mosto, la modificación del tiempo de maceración y el uso de la enzima glucosa oxidasa, en segundo lugar con las estrategias fermentativas: como el uso de levaduras no convencionales o genéticamente modificadas y el control estricto de las condiciones de fermentación, y por último, las estrategias post-fermentativas: como la ósmosis inversa, la evaporación al vacío, la electrodialisis desalcoholizante, la pervaporación, conos rotatorios, destilación osmótica y el fraccionamiento y reensamblaje de vinos.

Hay que tener en cuenta que todas estas técnicas presentan ventajas técnicas contrastadas pero que también implican desafíos económicos, legales y sensoriales que hay que valorar.

Una perspectiva futura nos invita a avanzar hacia una vitivinicultura más adaptativa, sostenible y tecnológicamente integrada. Estas perspectivas apuntan a una mayor investigación en variedades autóctonas resistentes al calor y sequía, así como portainjertos; el desarrollo de tecnologías enológicas más precisas y menos invasivas que permitan regular el grado alcohólico preservando la integridad sensorial del vino, el impulso de una viticultura de precisión y la digitalización del manejo agronómico para anticipar y responder a variaciones climáticas; el establecimiento de normativas más flexibles que permitan el uso de nuevas técnicas sin comprometer la autenticidad del producto; y una conciencia del consumidor respecto a la sostenibilidad.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Albacete, A., et al. (2021). Hormonal regulation of grape berry ripening under abiotic stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160, 174–183.
- Álvarez, A., Aleixandre, J. L., García, M. J., & Lizama, V. (2010). Reducing the alcohol content of wine by reverse osmosis and membrane contactor techniques. *Food and Bioproducts Processing*, 88(1), 37–43.
- Bagheri, B., Bauer, F. F., & Setati, M. E. (2015). The impact of *Saccharomyces cerevisiae* on a wine yeast consortium in natural and inoculated fermentations. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1358.
- Bell, S.-J., Henschke, P. A., & Brockhoff-Schneider, F. (2014). New insights into the advantages of ammonium as a winemaking nutrient. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(4), 543–550.
- Beltran, G., Esteve-Zarzoso, B., Rozès, N., Mas, A., & Guillamón, J. M. (2005). Influence of the timing of nitrogen additions during synthetic must fermentations on fermentation kinetics and nitrogen consumption. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(4), 996–1002.
- Bely, M., Sablayrolles, J. M., & Barre, P. (2003). Influence of nitrogen addition on volatile acidity production by *Saccharomyces cerevisiae* during high sugar fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 96(6), 507–512.
- Bely, M., Stoeckle, P., Masneuf-Pomarede, I., & Dubourdieu, D. (2008). Impact of *mixed Torulaspora delbrueckii–Saccharomyces cerevisiae* culture on high-sugar fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 122(3), 312–320.
- Benito Saez, S. (2016). Non-*Saccharomyces* yeasts *Lachancea thermotolerans* and *Schizosaccharomyces pombe* mixed cultures: acidification and alcohol reduction in high-pH musts. *Ponencia en la 3ª Conferencia Europea de Seguridad Alimentaria y Estándares*, Valencia.
- Benito, Á., Calderón, F., Palomero, F., & Benito, S. (2016). Selection of appropriate lactic acid producing yeasts for winemaking. *European Food Research and Technology*, 242(4), 645–654.
- Benito, Á., Calderón, F., Palomero, F., & Benito, S. (2019). Acidification of wines using *Lachancea thermotolerans*. Impact on sensorial and chemical composition of low-alcohol wines. *Food Chemistry*, 271, 33–40.
- Benito, S., Calderón, F., Nevares, I., Barrio, E., Hernández, L. M., & Coca, J. (2018). Impact of the timing and nature of nitrogen additions on the production kinetics of fermentative aromas by *Saccharomyces cerevisiae* during winemaking fermentation in synthetic media. *Food Chemistry*, 240, 793–802.
- Berna, A., Pérez-Lamela, C., Rodríguez-Bencomo, J. J., & López, R. (2023). Dealcoholization technologies in winemaking: Current state, trends and challenges. *Food Chemistry*, 398, 134033.
- Bindon, K. A., Varela, C., Kennedy, J. A., Holt, H., Herderich, M. J., & Francis, I. L. (2013). Relationships between harvest time and wine composition in *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz. Part 2: Wine composition and quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(33), 8165–8176.
- Boller, E. F., Häni, F., & Poehling, H. M. (2004). Ecological infrastructures: Ideabook on functional biodiversity at the farm level. *IOBC/WPRS Bulletin*.
- Böttcher, C., Johnson, T., Burbidge, C., Nicholson, E. L., Boss, P. K., Maffei, S. M., Bastian, S., & Davies, C. (2021). Use of auxin to delay ripening: sensory and biochemical evaluation of Cabernet Sauvignon and Shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 28.
- Brandi, R., Cioffi, V., Brandi, G., & Cassano, A. (2023). The role of membranes in modern winemaking: From clarification to dealcoholization. *Membranes*, 15(1), 14.
- Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., & Kurtural, S. K. (2020). Use of remote sensing to optimize canopy management and improve fruit quality. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1766.
- Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., & Kurtural, S. K. (2020). Carbon balance and nitrogen cycling in a cover-cropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 239, 106267.
- Buesa, I., Escalona, J. M., & Medrano, H. (2021). Improving yield and grape composition of *Vitis vinifera* under climate change scenarios through deficit irrigation strategies. *Agricultural Water Management*, 249, 106811.
- Buesa, I., Pérez-Álvarez, E. P., & Intrigliolo, D. S. (2021). Smart soil and water management in Mediterranean vineyards under climate change scenarios. *Agricultural Water Management*, 248, 106770.
- Caffarra, A., Rinaldi, M., Eccel, E., Rossi, V., & Pertot, I. (2012). Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. *Agricultural Ecosystems & Environment*, 148, 89–101.
- California Code of Regulations. (n.d.). Title 17, Section 17010(a) – Wine production practices.
- Calvo, J. I., Asensio, J., Sainz, D., Zapatero, R., Carracedo, D., Fernández-Fernández, E., Prádanos, P., Palacio, L., & Hernández, A. (2022). Membrane Dialysis for Partial Dealcoholization of White Wines. *Membranes*, 12(5), 468.
- Cambon, B., Monteil, V., Mouret, J. R., & Salmon, J. M. (2006). Effects of GPD1 overexpression in *Saccharomyces cerevisiae* wine strains: reduction in ethanol yield and glycerol production. *Journal of Applied Microbiology*, 100(3), 594–600.
- Canals, R., Llaudy, M. C., Valls, J., Zamora, F., & Fort, F. (2008). Influence of clarification technique on the composition and sensory quality of white wines. *Food Chemistry*, 107(3), 1139–1143.
- Canonico, L., Comitini, F., & Ciani, M. (2016). Dominance and influence of *Torulaspora delbrueckii* during alcoholic fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 7, 893.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- Casalta, E., Vernhet, A., Sablayrolles, J. M., & Tesnière, C. (2016). Clarification treatment and fermentation: How do they influence wine aroma and mouthfeel. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(1), 157–165.
- Cassano, A., Conidi, C., & Drioli, E. (2016). Application of membrane technology for the production of low alcohol wines. *Membranes*, 6(4), 53.
- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2009). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 30(3), 153–161.
- Chaves, M. M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J. M., Santos, T., Regalado, A. P., ... & Lopes, C. M. (2010). Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*, 105(5), 661–676.
- Christmann, H., & Redl, A. (2022). Water addition and must concentration: Regulatory frameworks and impact on wine quality. In A. G. Reynolds (Ed.), *Managing wine quality* (Vol. 2, pp. 325–346). Woodhead Publishing.
- Ciani, M., & Comitini, F. (2006). Antimicrobial activity of *Metschnikowia pulcherrima* on wine yeasts. *Journal of Applied Microbiology*, 100(2), 135–147.
- Ciani, M., & Ferraro, L. (1996). Enhanced glycerol content in wines made with immobilized *Candida stellata* cells. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(4), 128–132.
- Ciani, M., Morales, P., Comitini, F., Tronchoni, J., Canonico, L., Curiel, J. A., ... & Barrio, E. (2016). Non-conventional yeast species for lowering ethanol content of wines. *Frontiers in Microbiology*, 7, 642.
- Contreras, A., Curtin, C., Varela, C., & Pretorius, I. S. (2015). Yeast engineering for improved wine aroma and flavor. *FEMS Yeast Research*, 15(1).
- Contreras, A., Hidalgo, C., Henschke, P. A., Chambers, P. J., Curtin, C., & Varela, C. (2014). Evaluation of non-Saccharomyces yeasts for the reduction of alcohol content in wine. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(5), 1670–1678.
- Contreras, A., Ruiz, J. J., Ferreyra, B. F., Cerdeira, M., & Pretorius, I. S. (2020). *Metschnikowia pulcherrima* reduces ethanol content and modulates aroma compounds in sequential fermentations. *Frontiers in Microbiology*, 11, 159.
- Contreras, A., Sangorrín, M. P., Lopez, C. A., Curtin, C., & Varela, C. (2015). Fermentative behaviour and metabolism of non-Saccharomyces yeasts in mixed fermentations with *Saccharomyces cerevisiae* for alcohol reduction. *International Journal of Food Microbiology*, 202, 18–28.
- Crépin, L., Nidelet, T., Sanchez, I., Dequin, S., & Camarasa, C. (2012). Sequential use of nitrogen compounds by *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation: a model based on kinetic and regulation characteristics of nitrogen permeases. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(22), 8102–8111.
- Crespo, J. M., et al. (2023). Combining irrigation and canopy management to mitigate climate change effects on grape composition. *OENO One*, 57(1), 133–148.
- del-Bosque, D., Vila-Crespo, J., Ruipérez, V., Fernández-Fernández, E., & Rodríguez-Nogales, J. M. (2023). Entrapment of glucose oxidase and catalase in silica–calcium–alginate hydrogel reduces the release of gluconic acid in must. *Gels*, 9(8), 622.
- del-Bosque, D.; Vila-Crespo, J.; Ruipérez, V.; Fernández-Fernández, E.; Rodríguez-Nogales, J.M. Silica-calcium-alginate hydrogels for the co-immobilization of glucose oxidase and catalase to reduce the glucose in grape must. *Gels* 2023, 9, 320.
- Delbac, L., & Thiery, D. (2015). Grape berry moths and climate change: What do we know and what should we expect? *OENO One*, 49(2), 59–69.
- Dequin, S., Escudier, J.-L., Bely, M., Noble, J., Albertin, W., Marullo, P., Masneuf-Pomareda, I., & Sablayrolles, J.-M. (2017). Modulating wine yeast fermentation performance and aroma production by controlling nitrogen assimilation. *Enology and Viticulture*, 71(3), 425–432.
- Díaz-Maroto, M. C., Pérez-Coello, M. S., & Cabezudo, M. D. (2005). Effect of different treatments on aroma profile of wines. *Food Control*, 16(1), 79–85.
- Dubourdieu, D., & Tominaga, T. (2019). Physical methods for partial alcohol removal in winemaking: Centrifugation and membrane techniques. *OENO One*, 53(2), 121–131.
- Duchêne, E., & Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: A glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(1), 93–99.
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climatic Change*, 105(3), 507–529.
- Duchêne, E., Schneider, C., & Ojeda, H. (2010). Grapevine and climate change: A glance at the situation in Alsace. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 44(4), 203–210.
- Edwards, E. (2022). Rootstock-conferred traits affect the water use efficiency of fruit production in Shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine Research*.
- EFSA. (2022). Update of the *Xylella fastidiosa* host plant database – systematic literature search up to 2021. *EFSA Journal*, 20(1).
- Ehsani, M., Fernández, M. R., Biosca, J. A., Julien, A., & Dequin, S. (2009). Effect of nitrogen limitation and supplementation on the reduction of ethanol yield by respiratory *Saccharomyces cerevisiae* strains during winemaking. *International Journal of Food Microbiology*, 134(1–2), 119–126.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- Erasmus, D. J., Van der Merwe, G. K., & Van Vuuren, H. J. (2004). Genome-wide expression analyses: Metabolic adaptation of *Saccharomyces cerevisiae* to high sugar stress. *FEMS Yeast Research*, 4(4–5), 375–399.
- Escudero-Gilete, M. L., Valcárcel-Muñoz, M. J., & Pérez-Coello, M. S. (2022). Aroma and sensory characteristics of wines obtained by partial dealcoholization using rotary cone column. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(2), 756–764.
- Fang, Y., & Boulton, R. (2006). Adsorption of phenolic compounds by wine solids. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3), 280–286.
- Fereres, A., & Moreno, A. (2009). Behaviour and transmission efficiency of insect vectors of plant viruses. *Journal of Plant Pathology*, 91(3), 705–713.
- Fernandes, A., Kovač, N., Fraga, H., & Santos, J. A. (2024). Challenges to viticulture in Montenegro under climate change. *ISPRS International Journal*, 2024.
- Fernández-López, D. J., Fernández-Fernández, J. I., Martínez-Mora, C., Bleda-Sánchez, J. A., & Ruiz-García, L. (2022). Productiveness and berry quality of new wine grape genotypes grown under drought conditions in a semi-arid wine-producing Mediterranean region. *Plants*, 11(10), 1363.
- Fernández-Toro, M., Pereira da Silva, E., & Tasselli, G. (2022). Electrodialysis dealcoholization in commercial wineries: Case studies and process integration. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 104–112.
- Ferrari, V., Lauria, A., & Tirelli, A. (2020). Dealcoholisation techniques for wine: Current status and perspectives. *Italian Journal of Food Science*, 32(2), 291–304.
- Ferree, D. C., & Welker, W. V. (2023). Influence of ground cover and irrigation on vine growth, yield, and fruit composition. *Acta Horticulturae*, 1390, 45–54.
- Filippetti, I., Allegro, G., Valentini, G., & Pastore, C. (2020). Reflective particle film applications improve grapevine yield and must composition under high light and temperature conditions. *OENO One*, 54(4), 1063–1075.
- Flexas, J., Galmés, J., Gallé, A., et al. (2010). Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(s1), 106–121.
- Food Standards Australia New Zealand. (2017). Australia New Zealand Food Standards Code – Standard 4.5.1 – Wine production requirements (Australia only).
- Fornairon-Bonnefond, C., Aguera, E., & Sablayrolles, J. M. (2002). Impact of oxygen addition during enological fermentation on yeast cell growth. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 93(2), 176–181.
- Fornairon-Bonnefond, C., Aguera, E., & Sablayrolles, J. M. (2003). Impact of nutrients on fermentation kinetics and on the assimilation of nitrogen compounds in enological conditions. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 96(6), 485–491.
- Fraga, H., García de Cortázar-Atauri, I., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global Change Biology*, 22(11), 3774–3788. <https://doi.org/10.1111/gcb.13382>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2016). Future scenarios for viticultural zoning in Europe: Ensemble projections and uncertainties. *International Journal of Biometeorology*, 60(3), 387–404.
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2016). Climate change projections for the Iberian Peninsula: High-resolution gridded data analysis and comparison. *Climate Research*, 69(2), 89–102.
- Friend, A. P., & Trought, M. C. T. (2007). Delayed winter spur-pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13(3), 157–164.
- Gambetta, G. A., Delmas, C. E. L., Marguerit, E., Ollat, N., Saint Cast, C., van Leeuwen, C., & Delzon, S. (2024). Drought tolerance in grapevine involves multiple interacting physiological mechanisms. IVES Technical Reviews – Vine and Wine, Octubre 2024.
- Gambuti, A., Picariello, L., Rinaldi, A., & Moio, L. (2011). Evolution of phenolic compounds and astringency during aging of red wine: Effect of oxygen exposure before bottling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(6), 3016–3024.
- García-Castillo, M. D., & López, J. A. (2021). Challenges and advances in membrane fouling control for osmotic distillation processes. *Membranes*, 11(4), 243.
- García-Díaz, A., Allas, R. B., Buesa, I., & García-Escudero, E. (2017). Soil erosion control in sloping vineyards under Mediterranean conditions: Cover crops versus traditional management. *Soil and Tillage Research*, 166, 25–33.
- García-Martínez, T., Moreno, J., Mauricio, J. C., & Moreno, J. A. (2011). Influence of controlled oxygenation on yeast metabolism during alcoholic fermentation in enology. *Food Chemistry*, 127(3), 1042–1047.
- García-Pérez, J. V., Gómez, E. F., & Orellana, R. J. (2021). Pervaporation for ethanol removal in wine: Maintaining quality and stability. *Journal of Food Engineering*, 298, 110484.
- García, L., & Brugarolas, M. (2015). La utilización de cubiertas vegetales en viticultura: beneficios agronómicos y medioambientales. *Revista de Estudios Agroalimentarios*, 31(2), 127–145.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- García, R., Martínez, M., & Sánchez, L. (2020). Influence of centrifugation parameters on alcohol removal and sensory characteristics of red wines. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3330–3338.
- Gatti, M., Bernizzoni, F., Civardi, S., & Poni, S. (2012). Effects of cluster thinning and pre-bloom leaf removal on growth and grape composition of Barbera vines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 63(4), 458–465.
- Gatti, M., Bernizzoni, F., Civardi, S., & Poni, S. (2016). Vine response to single and combined leaf removal and crop thinning in two red *Vitis vinifera* cultivars. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22, 422–430.
- Gatti, M., Merli, M. C., & Poni, S. (2022). Modelling the impact of double harvest on sugar accumulation and acidity in wine grapes. *Vitis*, 61(1), 1–8.
- Geffroy, O., Lopez, R., Serrano, E., Ferreira, V., & Peña-Neira, Á. (2019). Dealcoholization of red wines by membrane contactor: Impact on wine composition and sensory properties. *Food Chemistry*, 295, 275–284.
- Gobbi, M., Comitini, F., Domizio, P., Romani, C., Lencioni, L., Mannazzu, I., & Ciani, M. (2013). *Lachancea thermotolerans* and *Saccharomyces cerevisiae* co-fermentation: a strategy to enhance acidity and improve wine quality. *Food Microbiology*, 33(2), 271–281.
- Gomez Plaza, E., Cano-López, M., & Bautista-Ortín, A. B. (2021). Adaptation strategies to climate change in oenology: Reducing ethanol content in wine. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 38–51.
- González-Centeno, M. R., Hernando, A., & López, F. (2020). Impacto de la dilución del mosto con agua sobre la calidad sensorial de vinos tintos: implicaciones prácticas. *Enología y Viticultura*, 71(3), 33–40.
- González-Neves, G., Gil, G., & Favre, G. (2013). Influence of grape maturity on the extraction of phenolic compounds during the fermentation of red wines. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30(1), 34–43.
- González-Royo, E., Urtasun, A., Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Fort, F., Canals, J. M., & Zamora, F. (2014). Effect of partial dealcoholization by reverse osmosis on red wine composition and sensorial parameters. *Food Chemistry*, 158, 25–32.
- González-Royo, E., Urtasun, L., Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Esteve-Zarzoso, B., Mas, A., & Zamora, F. (2015). Reduction of alcohol content in red wines using different techniques: Comparison of changes on aroma and sensory attributes. *Food Chemistry*, 169, 38–48.
- González-Royo, E., Varela, C., & Siebert, T. (2015). De-alcoholization of wine by reverse osmosis and its impact on wine quality. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(S1), 138–150.
- González-Royo, E., Vilanova, M., Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Fort, F., Canals, J. M., & Zamora, F. (2016). Reduction of alcohol content of wine by combining membrane techniques and blending: Influence on aroma and sensory properties. *Food Chemistry*, 210, 647–655.
- Guchu, S. M., Basaran-Akgul, N., & Clifford, M. N. (2006). Influence of vacuum evaporation on flavour and composition of wine. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(5), 757–764.
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., ... & Hijmans, R. J. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), 6907–6912.
- He, M., Song, Y., Wang, X., & Wang, Y. (2020). Cytokinin inhibits grape berry ripening through regulation of auxin signaling and sugar metabolism. *Horticulture Research*, 7(1), 1–13.
- Hernández-Orte, P., Fernández-Fernández, J. I., & Escribano-Bailón, M. T. (2017). Use of centrifugation (rotating cones) for alcohol reduction in wine: Effects on phenolic and volatile compounds. *Food Chemistry*, 230, 471–479.
- Heux, S., Avramescu, M.-L., & Mietton-Peuchot, M. (2022). Review on the application of membrane processes for dealcoholization of wines and beers. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1702–1724.
- Ibáñez, S., Rivacoba, L., & García-Escudero, E. (2019). VITISAD: Estrategias para la adaptación del viñedo al cambio climático. Grupo VitisGestión, Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (ICVV).
- Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. (2010). Response of grapevine cv. Tempranillo to timing and amount of irrigation: Water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. *Irrigation Science*, 28(2), 113–125.
- Intrigliolo, D. S., et al. (2020). Regulated deficit irrigation strategies to reduce sugar accumulation in warm viticultural regions. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 26(3), 315–325.
- Intrigliolo, D. S., Mirás-Avalos, J. M., & Buesa, I. (2023). Vineyard canopy manipulation techniques for climate change adaptation: A review. *Agronomy*, 13(4), 1081.
- IPCC (2021). Sixth Assessment Report – Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- Ivić, I., Kopjar, M., Obhodaš, J., Vinković, A., Pichler, D., Mesić, J., & Pichler, A. (2021). Concentration with nanofiltration of red wine Cabernet Sauvignon: Effect on volatile compounds and chemical composition. *Membranes*, 11(5), 320.
- Jolly, N. P., Varela, C., & Pretorius, I. S. (2014). Not your ordinary yeast: *Non-Saccharomyces* yeasts in wine production uncovered. *FEMS Yeast Research*, 14(2), 215–237.
- 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.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- Jones, G. V., & Schultz, H. R. (2016). Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73(3), 319–343.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73(3), 319–343.
- Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Fort, F., Canals, J. M., & Zamora, F. (2011). Influence of grape maturity on the composition and quality of red wine. *Food Chemistry*, 124(2), 767–774.
- Kovacević, D. A., & Vinković, V. Z. (2021). Nanofiltration process as non-thermal alternative to thermovinification in winemaking. *OENO One*, 55(1), 37–46.
- Kumar, S., & Singh, R. (2020). Energy efficiency and operational challenges in membrane-based ethanol removal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109793.
- Kumar, Y., Khalangre, A., Suhag, R., & Cassano, A. (2025). Applications of reverse osmosis and nanofiltration membrane processes in wine and beer industry. *Membranes*, 15(5), 140.
- Kutyna, D. R., Varela, C., Henschke, P. A., Chambers, P. J., & Stanley, G. A. (2010). Microbiological approaches to lowering ethanol concentration in wine. *Trends in Food Science & Technology*, 21(6), 293–302.
- Kutyna, D. R., Varela, C., Henschke, P. A., Chambers, P. J., & Stanley, G. A. (2010). Microbiological strategies for lowering ethanol concentration in wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16, 105–115.
- Lasanta, C., Gómez-Plaza, E., & López, R. (2014). Application of electrodialysis for the partial dealcoholization of wines: Sensory and chemical impact. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(8), 1901–1908.
- Liguori, L., Russo, P., Albanese, D., Crescitelli, A., & Di Matteo, M. (2013). Electrodialysis treatment to reduce the alcohol content of a white wine: Influence on aroma compounds. *European Food Research and Technology*, 236, 629–635.
- Longo, R., Blackman, J. W., Antalick, G., Torley, P. J., Rogiers, S. Y., & Schmidtke, L. M. (2018). Reducing alcohol concentration of Shiraz and Chardonnay wines using water dilution and early harvest: Impact on wine composition, sensory properties and consumer acceptance. *Food Chemistry*, 259, 196–206.
- López-García, M., Sánchez, E., & Gómez, R. (2023). Evaluation of osmotic distillation membranes for low-alcohol wine production: Performance and membrane fouling. *Separation and Purification Technology*, 297, 121408.
- López, R., Torres, R. I., & Pérez, A. (2019). Electrodialysis as an effective technique for ethanol removal in white wines: Pilot-scale application and sensory impact. *Separation and Purification Technology*, 226, 177–185.
- Loyola García, R., Gutiérrez-Gamboa, G., Medel-Marabolí, M., & Díaz-Gálvez, I. (2021). Lowering wine alcohol content by reverse osmosis and spinning cone columns: Effects on sensory characteristics of the beverages. *IVES Technical Reviews – Vine and Wine*
- Martín, J., Cuervo, C., Molpeceres, V., Morales, P., González, R., & Suárez-Lepe, J. A. (2020). Autochthonous *non-Saccharomyces* yeasts for wine quality improvement: focus on *Lachancea thermotolerans*. *Fermentation*, 6(3), 80
- Martínez de Toda, F. (2018). El cambio climático y el vino: Nuevas líneas de investigación vitícola. *Dossier Viña*, 43-46.
- Martínez de Toda, F., Balda, P., & Miranda, S. (2019). Adaptación del viñedo al cambio climático en Rioja: Comportamiento agronómico y enológico de nuevas variedades. *Viticultura y Enología Profesional*, 152, 30–41.
- Martínez de Toda, F., Ramos, M. C., Baeza, P., & Ruiz, M. (2019). Adaptive viticulture: What can be expected from different training systems under climate change? *Vitis*, 58, 33–42.
- Martínez-Gil, A. M., Llauradó, J. M., & Pozo-Bayón, M. Á. (2013). Impact of must clarification on aroma profile of wines from different grape varieties. *Food Research International*, 54(1), 106–113.
- Martínez-Lüscher, J., & Kurtural, S. K. (2021). Reducing the impact of climate change on grape and wine production: A review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 633846.
- Martínez, F., Pérez, A., & Torres, J. (2022). Osmotic distillation for ethanol removal in wines: Efficiency and impact on sensory quality. *Journal of Food Engineering*, 312, 110734.
- Maturana, D., Valera, M. E., Salazar, F., & Blanco, P. (2021). Impact of nitrogen addition on wine fermentation by *S. cervisiae* strains with different nitrogen requirements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(21), 6022–6031.
- Maza, M., Muñoz, A., Álvarez, I., & Raso, J. (2021). Impact of membrane-based dealcoholization on aroma and flavor in wine: A critical review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67, 102559.
- Medrano, H., Bota, J., et al. (2022). Smart irrigation and viticulture: New technologies for sustainable water use. *Frontiers in Plant Science*, 13, 987654.
- Meillon, S., Urbano, C., Guillot, G., Schlich, P., & Mehinagic, E. (2010). Impact of partial alcohol reduction in Syrah wine on perceived complexity and temporality of sensations and link with preference. *Food Quality and Preference*, 21(7), 732–740.
- Mérillon, J.-M., & Ramawat, K. G. (Eds.). (2020). *Fungal biodiversity: Distribution, conservation and prospecting for bioactive compounds*. Cham: Springer.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- Mira de Orduña, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844–1855.
- Mirás-Avalos, J. M., Uriarte, D., Lakso, A. N., Intrigliolo, D. S., Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., Orriols-Fernández, I. (2023). Double harvest as a strategy to mitigate climate change effects on grape composition: A field trial in a warm Spanish viticultural area. *OENO One*, 57(1), 33–45.
- Morales, P., Rojas, V., Quirós, M., & González, R. (2014). The impact of oxygen on the final alcohol content of wine fermented by a mixed starter culture. *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Morata, A., Benito, S., González, C., Palomero, F., & Suárez-Lepe, J. A. (2012). Natural starters from *non-Saccharomyces* yeasts to reduce the alcohol content of wines. *International Journal of Food Microbiology*, 157(2), 245–251.
- Moriondo, M., Bindi, M., & Giannakopoulos, C. (2013). Climate change impact assessment: The case of grapevine in Europe. *Climatic Change*, 117(4), 825–845.
- Mozell, M. R., & Thach, L. (2014). The impact of climate change on the global wine industry: Challenges & solutions. *Wine Economics and Policy*, 3(2), 81–89.
- Muhlack, R. A., Holt, H. E., & Borneman, A. R. (2005). Membrane-based technologies for wine production. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(5), 461–479.
- NASA. (2023). Vital Signs of the Planet – Global Temperature.
- Nevoigt, E. (2008). Progress in metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 72(3), 379–412.
- OIV. (2003). Resolución OENO 16/2003: Levaduras secas activas utilizadas en la vinificación. Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV).
- OIV. (2009). Resolución OIV-OENO 394A-2009: Corrección del grado alcohólico volumétrico del vino mediante técnicas físicas. Organización Internacional de la Viña y el Vino.
- OIV. (2013). Resolución OENO 459-2013: Levaduras inactivadas ricas en glutatión. Organización Internacional de la Viña y el Vino.
- OIV. (2017). Resolución OENO 576A-2017: Cepas de *Saccharomyces cerevisiae* utilizadas en vinificación. Organización Internacional de la Viña y el Vino.
- OIV (2021). Code of oenological practices – Resolution OIV-OENO 394A-2012. International Organisation of Vine and Wine.
- Ollat, N., Peccoux, A., Papura, D., Esmentjaud, D., Marguerit, E., Tandonnet, J. P. & Torregrosa, L. (2016). Rootstocks as a component of adaptation to environment. In Gerós, H., Chaves, M. M., Delrot, S., & Medrano, H. (Eds.), *Grapevine in a Changing Environment: A Molecular and Ecophysiological Perspective* (pp. 68–108). Wiley-Blackwell.
- Palliotti, A., et al. (2017). Impact of early leaf removal and water restriction on yield and fruit composition of Sangiovese grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23(2), 235–245.
- Palliotti, A., Gatti, M., & Poni, S. (2014). Early leaf removal to improve vineyard efficiency: Gas exchange, source to sink balance, and reserve storage responses. *American Journal of Enology and Viticulture*, 65(4), 411–419.
- Palliotti, A., Gatti, M., & Poni, S. (2014). Innovations in vineyard management practices and canopy manipulation for optimizing grape composition: Current status and future prospects. In: Gerós, H., Chaves, M. M., Delrot, S., et al. (Eds.). *Grapevine in a Changing Environment*. Wiley-Blackwell.
- Parr, W. V., Green, J. A., White, K. G., & Sherlock, R. R. (2007). The distinctive flavour of New Zealand Sauvignon blanc: Sensory characterisation by wine professionals. *Food Quality and Preference*, 18(6), 849–861.
- Pickering, G. J. (2000). Low-alcohol wines: A review. *Journal of Wine Research*, 11(2), 129–144.
- Pickering, G. J., Heatherbell, D. A., & Barnes, M. F. (2008). The production of reduced-alcohol wine using fermentation arrest and vacuum distillation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 50(2), 160–168.
- Poni, S., Gatti, M., et al. (2018). Advances in crop load management in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 24(3), 350–362.
- Pons, X., Lumbierres, B., & Starý, P. (2017). Climate change effects on insects in agriculture: pest dynamics and management. *Current Opinion in Insect Science*, 23, 49–53.
- Puglisi, C., Ristic, R., Saint, J., & Wilkinson, K. (2022). Evaluation of spinning cone column distillation as a strategy for remediation of smoke taint in juice and wine. *Molecules*, 27(22), 8096.
- Quirós, M., Morales, P., Rojas, V., & González, R. (2023). Evaluation of different nitrogen sources on growth and fermentation performance for enhancing ethanol production by wine yeasts. *Heliyon*, 9(12), e22608.
- Ramos, M. C., Jones, G. V., & Yuste, J. (2008). Phenology and grape composition of Tempranillo and Cabernet Sauvignon varieties cultivated in the Ribera del Duero DO under climate change conditions. *International Journal of Biometeorology*, 52(5), 321–329.
- Renault, P., Coulon, J., de Revel, G., Barbe, J. C., & Bely, M. (2015). Increase of fruity aroma during mixed *Torulaspora delbrueckii/Saccharomyces cerevisiae* fermentation is linked to specific esters enhancement. *International Journal of Food Microbiology*, 207, 40–48.
- Resco, P., Iglesias, A., Bardají, I., & Blanco, M. (2016). A participatory approach for assessing climate change adaptation policies in agriculture: The case of the Spanish wine sector. *Land Use Policy*, 58, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.06.026>

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- Revisión MDPI (2023). Estrategias biotecnológicas para la reducción del alcohol en vino. 11(3), 159.
- Testa, B., Coppola, F., Succi, M., & Iorizzo, M. (2025). Biotechnological strategies for ethanol reduction in wine. *Fermentation*, 11(3), 159.
- Ribéreau-Gayon, P., Glories, Y., Maujean, A., & Dubourdieu, D. (2006). *Handbook of Enology: Volume 2 – The Chemistry of Wine and Stabilization and Treatments* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Rollero, S., Albertin, W., Bely, M., Masneuf-Pomarede, I., Coulon, J., & Marullo, P. (2019). Influence of nitrogen status in wine alcoholic fermentation: A review. *International Journal of Food Microbiology*, 290, 162–171.
- Romanos, P., & Salgado, J. (2023). Advanced electrodialysis systems for low-alcohol wine production: Integration and performance in modern wineries. *Journal of Membrane Science*, 658, 120829.
- Romero, P., et al. (2019). Combining rootstocks and deficit irrigation techniques to maintain vineyard sustainability under semiarid and water limiting conditions. *Science & Wine*.
- Romero, P., Fernández-Fernández, J. I., & Martínez-Cutillas, A. (2017). Physiological thresholds for efficient regulated deficit-irrigation management in winegrapes grown under semiarid conditions. *American Journal of Enology and Viticulture*, 68(2), 123–132.
- Rossouw, D., van der Westhuizen, T., & Bauer, F. F. (2011). Comparison of inorganic and organic nitrogen supplementation of grape juice: Effect on volatile composition and aroma profile of a Chardonnay wine fermented with *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7330–7337.
- Sablayrolles, J. M. (2009). Fermented beverages: The peculiarities of the fermentation process. In G. Spinnler & C. Brulé (Eds.), *Handbook of Food Science and Technology* (Vol. 2, pp. 115–140). Wiley-ISTE.
- Sadoudi, M., Tourdot-Maréchal, R., Alexandre, H., & Charpentier, C. (2012). Mechanisms of low ethanol production and enhanced aroma profiles induced by *Metschnikowia pulcherrima* in wine fermentation. *FEMS Yeast Research*, 12(8), 129–138.
- Salazar, D., Alonso, G. L., & Palacios, V. (2021). Effect of climate and irrigation regime on aroma potential and wine quality. *Food Chemistry*, 344, 128622.
- Sadras, V. O., & Moran, M. A. (2012). Elevated temperature decouples anthocyanins and sugars in berries of Shiraz and Cabernet Franc. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18(2), 115–122.
- Salgado, C. M., Fernández-Fernández, E., Palacio, L., Hernández, A., & Prádanos, P. (2015). Alcohol reduction in red and white wines by nanofiltration of musts before fermentation. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 285–295.
- Salinari, F., Giosuè, S., Tubiello, F. N., Rettori, A., Rossi, V., Spanna, F. & Rosenzweig, C. (2006). Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*, 12(7), 1299–1307.
- Sam, F. E., Ma, T.-Z., Salifu, R., Wang, J., Jiang, Y.-M., Zhang, B., & Han, S.-Y. (2021). Techniques for dealcoholization of wines: their impact on wine phenolic composition, volatile composition, and sensory characteristics. *Foods*, 10(10), 2498.
- Sánchez-Benito, A., & Gutiérrez-Gamboa, G. (2021). Membrane integration strategies for final-stage alcohol adjustment in wine. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 1891–1903.
- Santesteban, L. G., Miranda, C., & Royo, J. B. (2019). Modulating grape composition through irrigation timing under climate change conditions. *OENO One*, 53(2), 189–198.
- Santesteban, L. G., Rekarte, I., Torres, N., Galar, M., Villa-Llop, A., Visconti, F., Intrigliolo, D. S., Escalona, J. M., De Herralde, F., & Miranda, C. (2023). The role of rootstocks for grape growing adaptation to climate change: Meta-analysis of the research conducted in Spanish viticulture. *OENO One*, 57(2), 283–290.
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L. T., Correia, C. & Moriondo, M. (2020). A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), 3092.
- Schultz, H. R. (2016). Global climate change, sustainability, and some challenges for grape and wine production. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 181–200.
- Shellie, K. C., & Glenn, D. M. (2010). Wine grape response to particle film under field conditions. *American Journal of Enology and Viticulture*, 61(3), 295–303.
- Stevens, R. J., Coombe, B. G., & Mosedale, J. R. (2010). Reduced irrigation and rootstock effects on vegetative growth, yield and its components, and leaf physiological responses of Shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(1), 25–36.
- Šuklje, K., Antalick, G., Coetzee, Z., Schmidke, L., & Deloire, A. (2016). The effect of grape composition and harvest timing on the sensory profile of Sauvignon blanc wines. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 37(2), 183–194.
- Šuklje, K., Zireb, M., & Ugliano, M. (2019). Managing wine alcohol content through dilution and other technologies: effects on sensory perception and wine matrix. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 25(1), 30–40.
- Taillandier, P., Julien-Ortiz, A., & Brandam, C. (2007). Nitrogen requirements of wine yeasts: Impact on fermentation kinetics and interactions with other nutrients. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58(3), 341–346.

## ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL VIÑEDO A BODEGA Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO

- Teixeira, A., Eiras-Dias, J., Castellarin, S. D., & Gerós, H. (2013). Berry phenolics of grapevine under challenging environments. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(9), 18711–18739.
- Tomasi, D., Gaiotti, F., & Jones, G. V. (2015). The impact of climate change on the quality of grape and wine production. *Acta Horticulturae*, 1197, 141–148.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1), 123–138.
- Ugliano, M., Moio, L., Cravero, F., Genovese, A., & Gambuti, A. (2010). Influence of oxygen exposure and storage conditions on aroma and color evolution of red wines: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 426–435.
- Ugliano, M., Moio, L., Cravero, F., Genovese, A., & Gambuti, A. (2008). Effect of oxygen exposure on wine aroma and color stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(1), 1–10.
- Ugliano, M., Siebert, T. E., Travis, B., Francis, I. L., & Henschke, P. A. (2010). Contribution of primary and secondary fermentation aromas to the aroma profile of Chardonnay wines fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(3), 468–478.
- Van de Wiel, C. C. M., Magon, T., Brault, A., Onetto, C., Calderón, D., Shangguan, D., Mullins, M. (2025). A new climate for genomic and epigenomic innovation in grapevine. *Molecular Horticulture*. <https://doi.org/10.1186/s43897-025-00171-1>
- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 150–167.
- van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard and winery. *OENO One*, 51(2), 147–154.
- van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., & Ollat, N. (2019). An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. *Agronomy*, 9(9), 514.
- van Leeuwen, C., Roby, J. P., & de Rességuier, L. (2013). Soil-related terroir factors: A review. *OENO One*, 47(2), 105–118.
- Vaquero, C., Loira, I., Bañuelos, M. A., Morata, A., & Suárez-Lepe, J. A. (2020). Industrial performance of *Lachancea thermotolerans* strains to modulate pH and color in warm-climate white wines. *Microorganisms*, 8(9), 1236.
- Varela, C., & Curtin, C. (2021). *Non-Saccharomyces* yeasts: current status and future directions in wine biotechnology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(14), 2294–2316.
- Varela, C., & Pretorius, I. S. (2017). Yeast's balancing act between ethanol and glycerol production in low-alcohol wines. *Microbial Biotechnology*, 10(2), 264–278.
- Varela, C., Chambers, P. J., & Curtin, C. (2016). Use of non-conventional yeasts in fermentations for reduced-alcohol wines. In *Alcohol in wine* (pp. 89–104). Elsevier.
- Varela, C., Kutyna, D. R., Solomon, M. R., Black, C. A., Borneman, A. R., Henschke, P. A., & Chambers, P. J. (2012). Targeted metabolic engineering of wine yeast for the production of lower-alcohol wines. *FEMS Yeast Research*, 12(2), 130–142.
- Varela, C., Kutyna, D. R., Solomon, M. R., Black, C. A., Henschke, P. A., Chambers, P. J. (2012). Reducing ethanol content in wine using engineered wine yeast strains. *Food Microbiology*, 29(2), 278–283.
- Varela, C., Siebert, T., & Cozzolino, D. (2015). Grape and wine composition in the context of climate change. In M. Morata & I. Loira (Eds.), *Technological advances for alcohol reduction in wine* (pp. 81–100). Elsevier.
- Varela, C., Torrea, D., Schmidt, S. A., Ancin-Azpilicueta, C., & Henschke, P. A. (2012). Effect of oxygen and nitrogen supplementation on the volatile composition of wines fermented by *Saccharomyces cerevisiae* and a non-*Saccharomyces* yeast. *Food Chemistry*, 135(4), 2873–2883.
- Wine Australia & CSIRO (2023). Field trials: new scion-rootstock combinations and evaluation of new technology for improved water use efficiency and reduced costs [Informe técnico]. CSIRO Agriculture and Food / Wine Australia.
- Wineland, J. (2020). Biocontrol and aroma impact of *Metschnikowia pulcherrima* in Chardonnay and Shiraz fermentations. *WineLand Journal*, 15(2), 45–52.
- World Resources Institute (WRI) (2019). Aqueduct Water Risk Atlas.
- Zhang, M., Luo, L., Gao, T., Sun, K., Ge, C., & Yan, H. (2023). Effects of indigenous *Metschnikowia pulcherrima* on alcohol reduction and aroma of Muscat wine. *China Brewing*, 42(1), 133–141.