

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di  
Agronomia Animali Alimenti Risorse naturali e Ambiente

Corso di Laurea in  
Scienze e Tecnologie Viticole ed Enologiche

## EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI IN VITICOLTURA

Relatore:

Prof. Andrea Pitacco

Laureando:

Francesco Annechini

Matricola n. 1230002

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

INTRODUZIONE .....	3
CARATTERISTICHE DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO.....	4
TEMPERATURA .....	4
DISPONIBILITÀ IDRICA .....	5
RADIAZIONE SOLARE .....	6
CONCENTRAZIONE ATMOSFERICA DI CO <sub>2</sub> .....	7
EFFETTI IN VITICOLTURA .....	7
EFFETTI SULLA FISIOLOGIA .....	8
BILANCIO IDRICO .....	8
CONCENTRAZIONE DI CO <sub>2</sub> .....	11
STRESS DA CALORE E DA RADIAZIONI .....	11
FENOLOGIA.....	13
METABOLITI DELL’UVA .....	14
IMPATTO DELLA TEMPERATURA SUI COMPOSTI ORGANICI .....	15
IMPATTO DELLE RADIAZIONI SUI COMPOSTI ORGANICI.....	21
IMPATTO DELLO STATO IDRICO SUI COMPOSTI ORGANICI .....	22
IMPATTO DELLA CO <sub>2</sub> SUI COMPOSTI ORGANICI.....	23
RAPPORTO TRA MATURAZIONE ZUCCHERINA E MATURAZIONE FENOLICA .....	24
STRATEGIE DI ADATTAMENTO .....	24
IRRIGAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE .....	25
GESTIONE DELLA CHIOMA.....	27
GESTIONE DEL SUOLO .....	28
POTATURA TARDIVA.....	29
SCELTA DEL MATERIALE VEGETALE .....	30
CONCLUSIONI .....	31
BIBLIOGRAFIA .....	33

## RIASSUNTO

In questo lavoro viene trattato il tema dei cambiamenti climatici nel contesto vitivinicolo. Si inizia con una panoramica sui fattori che determinano i cambiamenti climatici, descrivendoli singolarmente. Vengono riportati i dati raccolti negli ultimi decenni sull'aumento della temperatura, sulla composizione dell'atmosfera, sulla disponibilità idrica e sulle radiazioni che raggiungono il nostro pianeta. Di questi fattori viene descritto come si manifestano e come evolvono a livello globale e nelle zone viticole.

Il secondo capitolo tratta gli effetti che hanno i fattori ambientali sulla viticoltura. Si comincia a parlare di stress abiotici come lo stress termico e da radiazioni, stress idrico, del ruolo della CO<sub>2</sub> e del loro impatto sia sulla fisiologia che sulla fenologia della vite. Successivamente in questo capitolo, troviamo la parte incentrata sulla maturazione dell'uva. Qui viene descritto il ruolo dei fattori ambientali nell'accumulo dei metaboliti dell'uva, in particolare come varia la loro concentrazione al variare delle condizioni climatiche. Risulta difficile dare delle risposte chiare sull'incidenza dei singoli fattori sul metabolismo dell'uva in quanto il loro ruolo sia spesso intrecciato e non sempre un'osservazione sia il risultato diretto di un solo fattore. In ogni caso in questo secondo capitolo si è cercato di esprimere nel modo più chiaro possibile gli effetti osservati sulla concentrazione di zuccheri, acidi, azoto, fenoli e componente aromatica.

Nel terzo capitolo vengono raccolte le migliori strategie di adattamento attuabili a breve e a lungo termine; quindi, si danno indicazioni sulle pratiche agronomiche attuabili e sulla scelta del materiale vegetale. Le pratiche agronomiche sono rivolte soprattutto a migliorare la gestione dell'acqua. Ciò significa migliorare lo stato idrico del vigneto. Questo può essere fatto aumentando la disponibilità idrica del suolo, migliorando la resilienza della vite e controllando l'evapotraspirazione. Inoltre, gestire nel modo più sostenibile possibile le risorse idriche è un elemento fondamentale per quanto riguarda l'aspetto idrico. Alcune pratiche agronomiche sono focalizzate a minimizzare i danni da calore e da radiazione attraverso la gestione della chioma e la potatura tardiva, la quale permette di ritardare tutte le fasi fenologiche con tutti vantaggi che ne conseguono. Infine, viene precisato come la selezione di nuove cultivar e nuovi portainnesti più resistenti ai principali stress abiotici sia fondamentale per avere una scelta del materiale vegetale più completa ed efficace per i viticoltori in questo scenario di cambiamenti climatici.

## INTRODUZIONE

Sebbene sia chiaro dalle prove storiche che i cambiamenti climatici fanno parte degli adattamenti naturali della Terra sempre più prove indicano un crescente impatto dell'uomo sul nostro clima, e il nostro ruolo nel modificare il bilancio energetico della Terra e del clima è diventato sempre più evidente. Le prove del riscaldamento del sistema climatico sono inequivocabili (IPCC, 2014) il riscaldamento della superficie terrestre, dell'atmosfera e degli oceani del mondo, la diminuzione della quantità di neve e la perdita di massa di ghiaccio insieme all'innalzamento del livello dei mari mettono a rischio i nostri sistemi agricoli influenzando l'idoneità e la sostenibilità delle colture in tutto il mondo, comprese le produzioni vitivinicole. Le temperature stanno aumentando in tutto il mondo e la maggior parte delle regioni è esposta a deficit idrici e stress termici con maggiore frequenza.

Le conseguenze sulle produzioni riguardano il cambiamento della fisiologia, della fenologia e della qualità dell'uva. Le temperature più elevate innescano una fenologia anticipata e questo sposta la fase di maturazione verso periodi più caldi in estate, alterando la composizione dell'uva, in particolare la concentrazione e la stabilità dei composti aromatici e riducendo l'acidità. Lo stress idrico riduce le rese e modifica la composizione dei frutti, inoltre, la frequenza di eventi climatici estremi come grandine ed inondazioni è destinata ad aumentare (van Leeuwen e Darriet, 2016).

La produzione di vino avviene in aree geografiche e climatiche relativamente ristrette, il più delle volte in regioni di media latitudine soggette a un'elevata variabilità climatica, inoltre, le singole varietà di uva da vino hanno intervalli climatici tipicamente ristretti, che limitano ulteriormente le aree adatte alla loro coltivazione (Jones e Webb, 2010). Attuare strategie di adattamento è necessario per continuare a produrre vini di alta qualità e per preservare la loro tipicità in un clima che cambia. La scelta del materiale vegetale è una risorsa preziosa per attuare queste strategie (van Leeuwen e Darriet, 2016) ma ogni azione legata al miglioramento genetico richiede tempi lunghi per una efficace implementazione.

In questo lavoro si è voluto evidenziare la relazione tra i cambiamenti climatici e le produzioni vitivinicole, descrivendo la loro influenza sulla fenologia della vite e sulla maturazione dell'uva, indicando le possibili strategie di adattamento a tali cambiamenti.

## CARATTERISTICHE DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

In questo capitolo ci concentriamo sul descrivere come i principali fattori abiotici ovvero temperatura, acqua, radiazione solare e concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> stanno cambiando nel corso del riscaldamento globale.

La concentrazione atmosferica del gas a effetto serra, in particolare quella della CO<sub>2</sub>, il principale responsabile del riscaldamento globale, è in continuo aumento dall'inizio della rivoluzione industriale (circa 1.750) a causa dell'uso crescente di combustibili fossili (Rienth et al. 2021). Le temperature più alte portano a tassi di evapotraspirazione più elevati e quindi a un maggiore fabbisogno idrico durante la stagione di crescita. Lo stato idrico della vite è largamente determinato dall'evapotraspirazione e dalle precipitazioni (Lebon et al., 2003), pertanto, se l'evapotraspirazione aumenta con la temperatura, un clima più caldo è anche un clima tendenzialmente più arido, anche se le precipitazioni non diminuiscono.

Ciò che è chiaro è che l'alterazione dei diversi fattori abiotici sopra citati continuerà ad avere un impatto sempre maggiore sulla viticoltura di tutto il mondo.

## TEMPERATURA

Le temperature annuali della superficie dell'aria in media a livello globale sono aumentate di  $\approx 1,0^{\circ}\text{C}$  dal 1901 (USGCRP, 2017). Con i cinque anni più caldi registrati negli ultimi 5 anni (2014-18) e i 20 anni più caldi negli ultimi 22 anni; quindi, stiamo probabilmente assistendo al periodo più caldo nella storia della civiltà moderna (IPCC, 2014).

Per una prospettiva sui cambiamenti di temperatura nelle regioni viticole, Jones et al. (2005) hanno esaminato alcune delle regioni viticole di maggiore qualità del mondo, dimostrando che ogni regione ha registrato tendenze al riscaldamento del periodo vegetativo durante la seconda metà del XX secolo. Negli ultimi 30-70 anni, in molte regioni viticole del mondo si è assistito a una diminuzione della frequenza delle gelate, a uno spostamento della loro tempistica e a stagioni vegetative più calde e potenzialmente più lunghe, in funzione della maggiore disponibilità di calore.

Negli Stati Uniti occidentali, le stagioni vegetative durante il periodo 1948-2004 nelle principali regioni viticole della California, dell'Oregon e di Washington hanno registrato temperature più elevate di  $0,9^{\circ}\text{C}$  in media. Recenti ricerche condotte in Europa mostrano risultati simili, con tendenze al riscaldamento negli ultimi 30-50 anni che vengono superate ogni anno (Jones, 2022). In Spagna Ramos et al., (2008) hanno rilevato un riscaldamento complessivo della

stagione vegetativa nelle regioni vinicole di Penede, Priorat e Segria, nel nord-est della Spagna, che va da 1,0 ai 2,2 °C. In Italia, le temperature medie del periodo vegetativo sono aumentate di 2,3°C (Jones et al., 2005). Nel Palatinato, nel sud-ovest della Germania, le temperature medie annuali minime e massime dell'aria sono aumentate del rispettivamente di 0,9°C e di 3,4°C, con un aumento medio della temperatura media annuale di circa 2,1°C.

Il grafico riportato in Fig. 1 mostra la serie temporale delle temperature medie della stagione di crescita (da aprile a ottobre nell'emisfero boreale e da ottobre ad aprile nell'emisfero australe) per quattro località in una gamma di climi diversi.

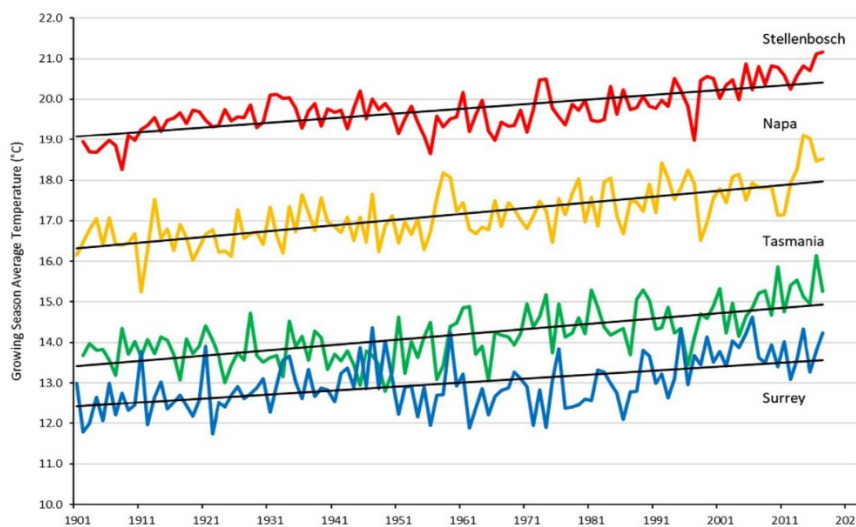


Figura 1. Temperature medie misurate durante la stagione vegetativa in 4 località viticole (Harris et al., 2014).

#### DISPONIBILITÀ IDRICA

La disponibilità idrica è messa sempre di più aleatoria e incerta nel contesto di cambiamento climatico e quindi, soprattutto negli ultimi anni, ci si è spesso trovati a dover parlare di siccità, anche in regioni dove questo problema non era rilevante. Questa può essere considerata come i fattori che hanno un impatto diretto sulla viticoltura, come l'aumento della temperatura e della domanda evaporativa.

In Europa, le precipitazioni annuali dal 1960 mostrano una tendenza all'aumento nell'Europa nord-orientale e nord-occidentale e una diminuzione in alcune parti dell'Europa meridionale (Agenzia europea dell'ambiente, 2017). Le precipitazioni medie estive sono diminuite significativamente nella maggior parte dell'Europa meridionale, mentre aumenti fino a 18 mm per decennio sono stati registrati in alcune parti dell'Europa settentrionale.

Esaminando nove regioni vinicole europee, Jones et al. (2005) hanno riscontrato un leggero aumento delle precipitazioni annuali in due regioni, ma nessuna tendenza nelle precipitazioni stagionali. Per quanto riguarda la Spagna, Moreno et al. (2005) hanno rilevato una tendenza a primavere ed estati molto più secche e a una diminuzione delle precipitazioni annuali, mentre Ramos et al. (2008) hanno riscontrato una diminuzione delle precipitazioni durante la primavera e l'estate che, combinata con il riscaldamento osservato nelle stesse regioni, ha portato a un aumento della domanda di acqua del 6%-14% in queste regioni, peraltro già classificate come semiaride.

Uno dei principali vincoli per il futuro della produzione vitivinicola riguarda le precipitazioni e il bilancio idrico. Con l'aumento delle temperature, la necessità di irrigare i vigneti potrebbe diventare sempre più cruciale, soprattutto quando l'acqua diventasse un fattore limitante per gli obiettivi enologici storici. Esistono sicuramente diversi esempi estremi nel mondo, dove i sistemi di produzione vinicola dipendono quasi al 100% dall'irrigazione o da un'efficiente condensazione notturna, come nelle zone semi-aride, sub-tropicali e tropicali (Koch e Oehl, 2016). Tuttavia, fare previsioni attendibili sull'andamento delle precipitazioni dei prossimi decenni risulta molto più complicato rispetto alle previsioni sulle temperature. In ogni caso possiamo dire che le precipitazioni probabilmente aumenteranno alle alte latitudini e diminuiranno nelle regioni subtropicali, il che significa che la riduzione delle precipitazioni avrà potenzialmente un impatto sull'Europa meridionale, sull'Australia meridionale, sull'Africa meridionale, su alcune parti degli Stati Uniti meridionali e su alcune parti del Sud America.

## RADIAZIONE SOLARE

La radiazione solare che arriva sulla superficie è fortemente influenzata dalla composizione atmosferica, in particolare dallo strato di ozono. Quest'ultimo è in grado di assorbire gran parte delle radiazioni UV provenienti dal sole e quindi si dimostra essenziale per regolarne la penetrazione nell'atmosfera.

Negli ultimi 40 anni lo strato di ozono è stato fortemente degradato a causa di alcune sostanze rilasciate dalle attività umane come i clorofluorocarburi. La conseguenza diretta è l'aumento significativo delle radiazioni UV-B che raggiungono la superficie terrestre e che hanno una notevole influenza sulla fisiologia di tutti gli esseri viventi (Rienth et al. 2021). L'aumento della radiazione UVB è di circa l'1-2% per decennio, ma può raggiungere l'8% per decennio ad altitudini più elevate (Schultz, 2000). In contrasto al rilascio di clorofluorocarburi ha tuttavia

ridotto significativamente il rischio di un ulteriore aumento di queste radiazioni, potenzialmente nocive soprattutto a certe latitudini.

#### CONCENTRAZIONE ATMOSFERICA DI CO<sub>2</sub>

La concentrazione atmosferica di anidride carbonica ha un impatto diretto sulla temperatura del pianeta e da qualche anno ha superato le 400 parti per milione (ppm), un livello che si è verificato l'ultima volta circa 3 milioni di anni fa, quando sia la temperatura media globale che il livello del mare erano significativamente più alti di oggi (Jones et al. 2022).

Ci sono prove sostanziali che l'entità del cambiamento climatico oltre i prossimi decenni dipenderà principalmente dalla quantità di gas a effetto serra (specialmente anidride carbonica) emessi a livello globale (IPCC, 2014).

#### EFFETTI IN VITICOLTURA

In questo capitolo vengono trattati gli effetti dei cambiamenti climatici sulla viticoltura, in particolare come lo stress termico, l'esposizione alle radiazioni e lo stress idrico influiscono sulla fisiologia della vite, sulla fenologia e sulla maturazione dell'uva.

La fisiologia e la fenologia della vite sono determinate soprattutto dalla temperatura. Dall'inizio degli anni '80, nella maggior parte delle regioni viticole, si è osservato un significativo avanzamento della fenologia e un cambiamento nella fisiologia della vite.

Inoltre, l'effetto combinato della fenologia anticipata e dell'aumento delle temperature determina condizioni più calde durante la maturazione dell'uva. In queste condizioni, l'uva contiene più zucchero e meno acidi organici, e la composizione dei metaboliti secondari, in particolare degli aromi e dei precursori degli aromi, viene drasticamente modificata. L'aumento dello stress idrico, dovuto alla diminuzione delle precipitazioni estive e/o all'aumento dell'evapotraspirazione, induce un arresto anticipato della crescita dei germogli, una riduzione delle dimensioni degli acini, un aumento del contenuto di composti fenolici della buccia, una riduzione delle concentrazioni di acido malico e una modifica dei composti aromatici e dei precursori di aromi.

L'aumento delle radiazioni UV-B aumenta l'accumulo di fenoli della buccia e modifica i composti aromatici e i precursori di aromi (van Leeuwen e Darriet, 2016). Uno studio condotto in Languedoc, nel sud della Francia, sulla composizione delle uve alla vendemmia ha evidenziato un aumento di oltre il 2% in volume dei livelli di alcol potenziale, l'acidità totale (acido tartarico) è diminuita di 1 g/L e il pH è aumentato di 0,2 unità negli ultimi 30 anni.



Modifiche simili nella composizione dell'uva sono state segnalate in molti altri vigneti (Duchêne e Schneider, 2005; Mira de Orduña, 2010). È probabile che questa evoluzione non sia solo il risultato di un aumento della temperatura: altri fattori possono essere l'aumento dell'anidride carbonica atmosferica (+15% nel periodo) e l'aumento delle radiazioni (Leeuwen e Darriet, 2016). Il grafico in Fig. 2 mostra i gradi alcolici potenziali, acidità totale e pH del succo d'uva appena prima della vendemmia in Languedoc dal 1984 al 2013.

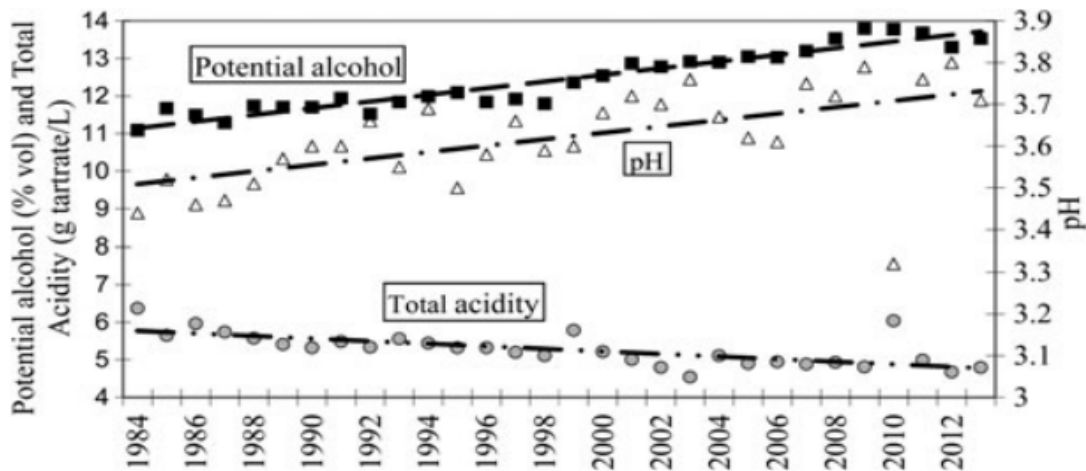


Figura 2. Gradi alcolici potenziali, acidità totale (acido tartarico) e pH del mosto appena prima della vendemmia in Languedoc dal 1984 al 2013. (Leeuwen e Darriet, 2016).

## EFFETTI SULLA FISIOLOGIA

### BILANCIO IDRICO

Lo stato idrico della vite dipende dalla tessitura del terreno, dalla profondità dell'apparato radicale, dalla pioggia caduta, dall'evapotraspirazione e dall'area fogliare (van Leeuwen e Darriet, 2016). Innanzitutto, è necessario capire cosa determina effettivamente l'utilizzo dell'acqua da parte della vite. L'acqua fluisce lungo un gradiente di pressione negativa dal suolo (da 0 a -1,5 MPa circa) attraverso la vite (circa da -0,01 a -2,5 MPa) ed evapora nell'aria (circa -100 MPa). Il sito di evaporazione è la foglia e la velocità di tale evaporazione (traspirazione) è guidata dal deficit di pressione del vapore, ovvero la differenza tra la pressione di vapore nella foglia e quella dell'aria (Jones et al., 2022).

L'assorbimento della radiazione solare e la velocità del vento influenzano il deficit di pressione di vapore sulla superficie fogliare e di conseguenza anche la temperatura della foglia stessa. Se le condizioni di idratazione della foglia non sono limitanti, più la temperatura fogliare è alta, maggiore è la traspirazione.

Quando la traspirazione della vite supera la disponibilità di acqua nel terreno si verifica una condizione di deficit idrico; in questa situazione la vite può andare incontro ad un collasso idraulico e alla perdita di turgore dei tessuti e ci possono essere ripercussioni sulla fenologia e sulla fisiologia della vite compreso lo sviluppo degli acini. In realtà uno stress idrico moderato è associato ad un'annata di qualità, ma se questo stato persiste può compromettere la fotosintesi (Hsiao, 1973), la fertilità delle gemme (Guilpart et al., 2014), la crescita dei germogli (Lebon et al., 2006), l'accrescimento degli acini (Trégoat et al., 2002; van Leeuwen e Seguin, 1994) e provocare un aumento del contenuto di tannini e antociani dell'uva (Duteau et al., 1981; Matthews e Anderson, 1988; van Leeuwen e Seguin, 1994) causando squilibri nella concentrazione di composti organici come acidi, zuccheri e composti fenolici.

In uno studio sul bilancio idrico nella zona di Saint-Emilion (Bordeaux, Francia) è stato creato un modello che prende in considerazione il periodo vegetativo dal 1952 al 2012.

Il grafico in Fig. 3 evidenzia un bilancio idrico sempre più negativo il che significa annate sempre più secche.

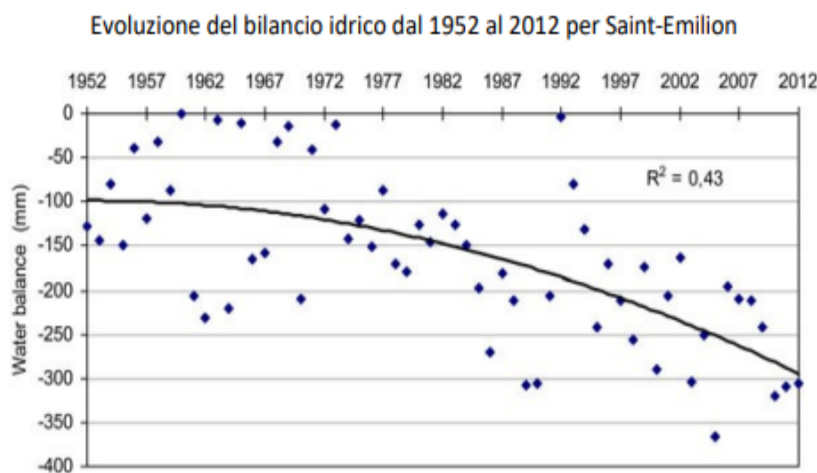


Figura 3. Evoluzione del bilancio idrico dal 1952 al 2012, calcolato tra il 1° aprile e il 3 settembre per la regione di Saint-Emilion (Francia) (Lebon et al.,2003).

Annate più secche sono dovute principalmente all'aumento dell'evapotraspirazione a causa delle alte temperature più che alla diminuzione della piovosità. Viene riportato inoltre che tra le 20 annate più secche in 61 anni, 10 si sono verificate nel periodo 2000-2012.

La vite è in grado di regolare il tasso di traspirazione attraverso il controllo dell'apertura degli stomi sulla pagina inferiore della foglia anche se non è in grado di impedire completamente la perdita di acqua. Il tasso di traspirazione viene determinato dalla conduttanza stomatica ed è influenzato anche dalle dimensioni della chioma.

Una chioma ridotta comporta un minor uso idrico giornaliero da parte della vite perché la domanda evaporativa diminuisce, anche se è soprattutto l'area della chioma esposta al sole a determinare la perdita di acqua per traspirazione, piuttosto che la superficie totale della chioma in sé (Louarn et al., 2008).

La strategia di difesa della pianta a breve termine è ridurre la conduttanza stomatica e nella vite questo meccanismo è molto efficace grazie alla notevole sensibilità allo stato idrico del terreno. Purtroppo, la resistenza cuticolare alla CO<sub>2</sub> è elevatissima (simile a quella per l'acqua), quindi la chiusura stomatica riduce anche la capacità della CO<sub>2</sub> di diffondere nella foglia, riducendo così la fotosintesi della vite.

A lungo termine, una vite sottoposta a stress idrico avrà una crescita e una dimensione della chioma ridotte anche nella stagione seguente. Una riduzione delle riserve di carboidrati della vite, infatti, può portare a una crescita primaverile limitata nella stagione successiva, anche quando l'acqua del suolo è disponibile (Edwards e Clingeleffer, 2011; Holzapfel et al., 2010). Un altro meccanismo che hanno le piante per controllare il proprio potenziale idrico è attraverso l'aggiustamento osmotico, ovvero l'abbassamento del potenziale osmotico attraverso la modifica della concentrazione di soluti nei tessuti della pianta. Questo è stato dimostrato nella vite (Düring et al., 1984; Patakas et al., 2002), con gli ioni Ca<sub>2+</sub> e il saccarosio che hanno mostrato l'aumento più significativo in risposta allo stress idrico per un periodo di alcune settimane (Degu et al., 2019).

Per quanto riguarda le previsioni sul bilancio idrico delle zone viticole sappiamo che con l'aumento delle temperature aumenterà l'evapotraspirazione ma non sappiamo prevedere con sufficiente approssimazione la variazione delle precipitazioni. È probabile che le precipitazioni siano soggette a grandi variazioni regionali e temporali. In alcune regioni, le precipitazioni saranno più abbondanti, mentre altre regioni potrebbero sperimentare periodi di siccità più lunghi. In questo contesto, è da rilevare che l'Italia settentrionale, dal punto di vista climatologico, è una regione di frontiera, per la quale le previsioni restano particolarmente difficili.

Anche la distribuzione delle precipitazioni nell'arco dell'anno potrebbe subire notevoli cambiamenti. È quindi difficile prevedere l'impatto dei cambiamenti climatici sul bilancio idrico. Tuttavia, sembra che le precipitazioni si riducano soprattutto in inverno e in particolare nell'Europa meridionale, nell'Australia meridionale, nell'Africa meridionale, in alcune parti degli Stati Uniti meridionali e in alcune parti del Sud America.

In questo caso è possibile che l'aridità del suolo durante l'inverno abbia un impatto sulle prestazioni della vite durante la stagione a venire, oltre agli effetti della scarsa disponibilità idrica del suolo durante la stagione di crescita.

Mendez-Costabel et al. (2014) hanno riscontrato che, quando le precipitazioni invernali sono state completamente escluse in un vigneto californiano, si sono verificati effetti a lungo termine sulla crescita e sulla produzione della vite, nonostante la piena irrigazione durante la stagione di crescita. La riduzione delle precipitazioni invernali ha avuto un impatto negativo sulla resa della vite, indipendentemente dalla disponibilità idrica stagionale, e questo è stato solo parzialmente compensato dall'irrigazione al momento del germogliamento.

#### CONCENTRAZIONE DI CO<sub>2</sub>

L'aumento della concentrazione di anidride carbonica è generalmente benefico per le piante perché porta a un aumento del tasso di fissazione del carbonio da parte delle foglie. La maggior parte degli studi sulla vite che studiano la CO<sub>2</sub> si sono concentrati sulla crescita vegetativa e sulla fotosintesi. Tutti gli studi riportano un aumento della fotosintesi che porta a un incremento della resa e della biomassa in presenza di elevata concentrazione di CO<sub>2</sub> (Goncalves et al., 2009; Moutinho-Pereira et al., 2009; Kizildeniz et al., 2015; Edwards et al., 2016, 2017; Wohlfahrt et al., 2018). Alte concentrazioni di CO<sub>2</sub>, tuttavia, tendenzialmente provocano una chiusura degli stomi, con conseguente riduzione della traspirazione e, conseguentemente, il possibile riscaldamento del fogliame.

#### STRESS DA CALORE E DA RADIAZIONI

La temperatura media del periodo vegetativo è un fattore importante per lo sviluppo delle radici, della chioma e dei frutti. La vite può essere coltivata a temperature medie del periodo vegetativo con una soglia inferiore e superiore di 12-13°C e 22-24°C (Schultz e Jones, 2010). Sebbene la vite necessiti di una quantità piuttosto rilevante di calore per la crescita e lo sviluppo fisiologico, temperature e radiazioni superiori a quelle considerate ottimali per una determinata cultivar possono portare a una maturazione squilibrata, a potenziali spostamenti del calendario di raccolta (Duchêne e Schneider, 2005) e compromettere il processo di fotosintesi. Finché l'acqua non è un fattore limitante, la fotosintesi della vite aumenta all'aumentare dell'intensità della luce. Con l'aumento delle temperature il ciclo vegetativo e riproduttivo della vite avanza e di conseguenza sposta le fasi di sviluppo degli acini verso i mesi più caldi della stagione di crescita (van Leeuwen e Destrac\_Irvine, 2017).

Ciò è stato ampiamente confermato da studi che analizzano le registrazioni storiche delle date di vendemmia in tutto il mondo, che mostrano un avanzamento complessivo di 1-2 settimane negli ultimi decenni (Jones e Davis, 2000; Chuine et al., 2004; Duchêne e Schneider, 2005; Jones et al., 2005; Petrie e Sadras, 2008; Webb et al., 2012; Cook e Wolkovich, 2016).

Quando le uve raggiungono la maturazione prima del tempo, possono contenere livelli di zucchero eccessivi, dando luogo a vini con un elevato contenuto alcolico, privi di freschezza e complessità aromatica (van Leeuwen e Destrac\_Irvine, 2017).

Si è osservato che anche lo sviluppo delle bacche risente delle elevate temperature, causandone un ritardo; questo rallentamento dello sviluppo delle bacche è stato attribuito alla mancanza di apporto di carbonio da parte della fotosintesi, che viene ostacolata e rallenta il tasso di divisione cellulare, il che può limitare le dimensioni delle bacche (Keller, 2010). Inoltre, periodi prolungati con temperature superiori a 30-35°C possono influenzare il metabolismo secondario, alterare l'accumulo di zuccheri, la concentrazione di acidi nelle bacche (Mori et al., 2005) e degli aminoacidi (Lecourieux et al., 2017), anche i metaboliti secondari responsabili degli attributi sensoriali risultano alterati. Rienth et al. (2021) indicano alcuni trascritti, geni e ormoni che risultano coinvolti nel rallentamento dello sviluppo delle bacche in condizioni di stress termico. Il momento in cui il grappolo risulta essere più sensibile agli stress biotici e abiotici è durante l'invasatura come riportato da alcuni studi (Rienth et al., 2014b, 2016; Torregrosa et al., 2019; Ghaffari et al., 2020).

L'esposizione dell'uva alla luce solare è normalmente associata a una maggiore qualità dell'acino, dovuta a livelli più elevati di solidi solubili totali, antociani e fenoli in generale, e a livelli più bassi di acidi e pH del succo, nonché a una minore incidenza di malattie dovuta a microclimi migliori (Dokoozlian e Kliewer, 1996; Bergqvist et al., 2001; Abeysinghe et al., 2019). Tuttavia, elevati livelli di radiazioni attorno al periodo di invasatura possono causare danni da scottatura sulle uve (Smart, 1987). Questo può avere effetti negativi sui composti organici dell'acino e quindi compromettere il potenziale qualitativo dell'uva sia per le varietà bianche che per quelle rosse. L'esposizione al sole e il microclima del grappolo determinano la temperatura degli acini e, pertanto, un'attenta manipolazione della chioma e la scelta del sistema di allevamento possono svolgere un ruolo importante per lo sviluppo degli acini e per la loro sopravvivenza durante un evento di temperatura estrema e con forti radiazioni.

## FENOLOGIA

La principale risposta della vite ai cambiamenti climatici che è stata osservata in molte regioni viticole è l'anticipo della fenologia e la causa principale è l'aumento della temperatura, compresa quella del suolo. Infatti, suoli più caldi possono indurre un germogliamento precoce (Rogiers et al., 2014).

Le osservazioni di 18 cultivar in Italia hanno mostrato tendenze di 13-19 giorni di anticipo per le date di fioritura, vendemmia e raccolto nel periodo 1964-2009 (Tomasi et al., 2011).

Le tendenze sono state simili per le cultivar a maturazione precoce, media e tardiva, anche se le cultivar a maturazione precoce sono cambiate a un tasso più elevato. Anche gli intervalli tra i principali eventi fenologici hanno mostrato tendenze significative verso intervalli più brevi di 15-18 giorni, ad esempio, l'intervallo tra il germogliamento e l'invasatura si è ridotto di 15 giorni in media per tutte le 18 varietà (Jones et al., 2005).

Alcuni studi hanno rilevato che la maturità dei frutti è avanzata di 8 giorni per decennio tra il 1985 e il 2009 nell'Australia meridionale (Webb et al., 2011; Webb et al., 2012). Nello Chardonnay, nello Shiraz e nel Cabernet Sauvignon del sud-est dell'Australia, la maturità precoce è determinata dall'inizio anticipato della maturazione e non da una maturazione più rapida (Sadras e Petrie, 2011).

Koch e Oehl (2018) in uno studio condotto nel Palatinato (Germania) hanno esaminato e correlato i dati relativi alla temperatura e alle precipitazioni degli ultimi 40 anni con i parametri di crescita della vite, lo sviluppo del germogliamento, la fioritura, le date di vendemmia, le rese e le concentrazioni zuccherine dell'uva di "Pinot grigio", "Pinot nero", "Riesling", "Silvaner" e "Müller-Thurgau". Dagli anni '70, il germogliamento, la fioritura e l'invasatura sono state anticipate rispettivamente di 11-15, 18-22 e 16-22 giorni; mentre le date di raccolta sono state anticipate di 25-40 giorni.

Nelle regioni viticole settentrionali (Alsazia) o atlantiche (Bordeaux) i coltivatori approfittano delle condizioni più calde per raccogliere i frutti in condizioni di maturazione migliori.

Invece, nelle zone mediterranee non è tipicamente necessario aumentare i livelli di maturazione delle uve o anticiparli. Questo spiega perché l'anticipo della data di raccolta è più marcato nell'area del Mediterraneo rispetto alle zone più fredde.

Anche la temperatura del suolo ha un ruolo significativo sulla fenologia. I suoli più caldi e secchi possono avviare un germogliamento più precoce (Rogiers et al., 2014) e, durante

l'estate, indurre la produzione di ABA da parte delle radici; questo ormone è stato associato all'anticipo della maturazione dell'uva (Webb et al., 2012).

È possibile modellare la fenologia prevista utilizzando le proiezioni delle temperature fino alla fine del secolo. Ad esempio, a Bordeaux (Francia) si è stimato che la fioritura sarà anticipata di 15 giorni nel prossimo futuro (2020-2050) e di 30 giorni alla fine del secolo (2070-2100); mentre la maturazione sarà anticipata rispettivamente di 25 e 45 giorni (Pieri, 2010).

Ciò significa che la raccolta avverrà nella prima settimana di settembre in due decenni e verso la metà di agosto alla fine del secolo. Questi raccolti anticipati sono incompatibili con la produzione di grandi vini di terroir (van Leeuwen e Seguin, 2006).

#### METABOLITI DELL'UVA

I cambiamenti climatici non si ripercuotono solamente sulla fisiologia e sulla fenologia della vite bensì influenzano anche lo sviluppo dei metaboliti nell'acino con effetti diretti e indiretti sulla loro composizione e concentrazione.

Tra i fattori ambientali la temperatura e lo stato idrico sono senza dubbio quelli che influenzano maggiormente lo sviluppo della pianta e la maturazione del frutto.

Come abbiamo detto l'aumento delle temperature provoca un avanzamento delle fasi fenologiche e quindi un anticipo della maturazione che avviene in condizioni più calde.

Lo stress da calore che può manifestarsi in queste condizioni si ripercuote sullo sviluppo degli acini, sulla loro corretta maturazione e sull'accumulo di metaboliti. La scarsa disponibilità idrica condiziona sia l'aspetto vegetativo che quello riproduttivo della vite con conseguenze sull'accumulo dei metaboliti nell'acino.

In questo capitolo andremo a descrivere come i fattori ambientali influenzano la composizione dell'acino. Ma è opportuna una panoramica sui composti principali che si trovano nell'uva. Zuccheri e acidi organici costituiscono i metaboliti primari dell'uva e la loro concentrazione cambia durante la maturazione. L'accumulo di zuccheri progredisce durante la maturazione fino a raggiungere un plateau; da questo punto, l'aumento di concentrazione degli zuccheri nell'uva è dovuto principalmente al processo di disidratazione dell'uva. Al contrario degli zuccheri, la concentrazione degli acidi organici, in particolare acido tartarico e malico, diminuisce durante la maturazione.

La maturità tecnologica dell'uva si raggiunge quando zuccheri e acidi sono in equilibrio.

I metaboliti secondari dell'uva comprendono i composti fenolici, i composti aromatici, minerali e i composti azotati. Questa categoria di metaboliti è fondamentale per determinare la qualità dell'uva e del vino prodotto, e il loro sviluppo durante la maturazione dipende da numerosi fattori, tra cui le condizioni ambientali.

#### IMPATTO DELLA TEMPERATURA SUI COMPOSTI ORGANICI

Moderati aumenti di temperatura durante la maturazione accelerano lo sviluppo delle bacche e l'accumulo di zuccheri, mentre nel periodo dall'allegagione all'invasatura aumenta l'accumulo di acido malico e tartarico (Rienth et al., 2016; Arrizabalaga et al., 2018).

Quando però lo stress termico diventa grave ( $>35$  °C) durante la maturazione, si verifica una diminuzione o un arresto dell'accumulo di zuccheri e anche una diminuzione della concentrazione di acido malico e tartarico (Ruffner et al., 1976; Ruffner e Hawker, 1977; Possner et al., 1983; Sweetman et al., 2009, 2014; Carbonell-Bejerano et al., 2013; Etienne et al., 2013; Rienth et al., 2016; Lecourieux et al., 2017; Brandt et al., 2019).

È generalmente riportato che l'acido tartarico non viene metabolizzato dalla bacca in maturazione e quindi il suo contenuto non è influenzato dalla temperatura (Duchêne, 2016), la variazione della concentrazione di acido tartarico osservata nella letteratura scientifica (Cholet et al., 2016) è pertanto una probabile conseguenza degli effetti di diluizione o di precipitazione durante l'elaborazione dei campioni (Rösti et al., 2018).

Mentre il contenuto di acido malico diminuisce in caso di alte temperature anche se non è ancora del tutto chiara la regolazione della sua degradazione. Sweetman et al. (2014) hanno riscontrato che le alte temperature accelerano l'attività dell'enzima malico dipendente dal NAD e diminuiscono le attività della fosfoenolpiruvato carbossilasi e della piruvato chinasi, accompagnate dall'accumulo di vari aminoacidi e dell'acido  $\gamma$  - aminobutirrico, suggerendo una maggiore capacità anaplerotica del ciclo TCA e la necessità di gestire la diminuzione del pH citosolico nelle bacche esposte ad alte temperature.

Questo studio ha anche riscontrato differenze a seconda dell'intervallo di oscillazione della temperatura diurna: cioè, la perdita di contenuto di acido malico in risposta all'aumento della temperatura diurna era minore se veniva aumentata anche la temperatura notturna. Oltre all'impatto sui metaboliti primari come gli zuccheri e acidi organici anche i metaboliti secondari responsabili degli attributi sensoriali risultano alterati dall'aumento della temperatura.



I composti fenolici che costituiscono un ampio gruppo di metaboliti secondari, sono ampiamente distribuiti in tutto il regno vegetale e funzionano come pigmenti, antiossidanti, molecole di segnalazione, elementi strutturali e componenti dei meccanismi di difesa (Rienth et al., 2019; Santos-Sánchez et al., 2019). Sono composti da una struttura principale di anello fenilico con un gruppo idrossile o altri sostituiti e sono generalmente classificati in non-flavonoidi e flavonoidi.

I non flavonoidi sono costituiti da fenoli semplici con struttura principale C<sub>6</sub>, come gli acidi idrossibenzoici, gli acidi idrossicinnamici e i fenoli volatili, e da composti con struttura C<sub>6</sub>-C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> come gli stilbeni.

I composti flavonoidi presenti nell'uva comprendono flavoni, flavonoli, flavanoni, flavan-3-oli e antociani. Le concentrazioni di composti fenolici non flavonoidi presenti nell'uva e nei vini sono relativamente basse (25-60 mg L<sup>-1</sup>), ad eccezione degli acidi idrossicinnamici (150-200 mg L<sup>-1</sup>) (Kennedy et al., 2006) e si trovano principalmente nella polpa.

I principali composti non-flavonoidi presenti nell'uva sono gli acidi idrossicinnamici: acido cumarico, acido caffeico, acido ferulico e le loro forme esterificate, acido cutarico, caftarico e fertarico (Zhang et al., 2013).

Tra i composti fenolici presenti in minori quantità ma che suscitano particolare interesse troviamo gli stilbeni, di cui fa parte il resveratrolo. Quest'ultimo, secondo numerosi studi, risulta avere proprietà antitumorali, antinfiammatorie, anticancerogene, cardioprotettive, vasorilassanti, fitoestrogeniche e neuroprotettive (Guerrero et al., 2009; Chalons et al., 2018; Ramírez-Garza et al., 2018; Salehi et al., 2018; Wurz, 2019).

Gli stilbeni sono stati trovati in quantità significative nelle foglie e negli acini e hanno una funzione di protezione della pianta da vari agenti patogeni. Pertanto, rappresentano importanti biomarcatori e un bersaglio molecolare per le strategie di selezione volte a sviluppare cultivar resistenti alle malattie (Gindro et al., 2012; Viret et al., 2018).

Gli stilbeni vengono accumulati principalmente negli acini dopo l'invasatura (Gatto et al., 2008) e la regolazione della loro biosintesi è fortemente modulata da fattori sia biotici che abiotici (Vannozzi et al., 2012; Savoi et al., 2017) oltre che dipendere dalla cultivar.

Le uve rosse presentano livelli di stilbeni più elevati rispetto alle uve bianche (Bavaresco et al., 2016). I livelli riportati nell'uva variano da da 0,2 a 1,8 mg/kg di peso fresco di uve sane per le cultivar classificate come basse produttrici di stilbene (per esempio, Nebbiolo o Aglianico), ma

può raggiungere livelli fino a 33,4 mg/kg nei produttori di stilbeni elevati (> 2,3 mg/kg) come il Pinot Nero (Gatto et al., 2008) o il Syrah (Favre et al., 2020).

I flavonoidi sono composti polifenolici C6-C3-C6, in cui i due anelli benzenici idrossilati sono uniti da una catena a tre carboni. In base allo stato di ossidazione dell'anello C3, questi composti si dividono in flavonoli, flavan-3-oli (che comprendono i flavan-3-oli semplici e le loro forme polimeriche proantocianidine, note anche come tannini) e antociani (Castellarin et al., 2012).

I flavonoidi sono localizzati principalmente negli strati periferici del pericarpo della bacca e nel rivestimento dei vinaccioli (Teixeira et al., 2013). I flavonoidi sono presenti in notevoli quantità nell'uva rossa (1.000-1.800 mg/L) e sono uno dei parametri che determinano la qualità del vino rosso in quanto contribuiscono al colore, al sapore, alla consistenza e all'astringenza del vino.

I composti fenolici sono influenzati dalle alte temperature, ma i risultati dipendono dall'intensità del calore, dalla durata, dallo stadio fenologico e dal genotipo (Gouot et al., 2019). È stato dimostrato che lo stress termico reprime i principali regolatori della biosintesi degli antociani anche se l'effetto è fortemente legato al genotipo. Non solo la biosintesi degli antociani viene arrestata ma un'elevata temperatura può promuoverne anche la degradazione, forse attraverso l'aumento dell'attività delle perossidasi (Mori et al., 2007).

Ciò è dimostrato dall'upregulation di un gene che codifica per una perossidasi, VviPrx31, nelle bacche esposte ad alte temperature (Movahed et al., 2016).

Invece, è stato dimostrato che basse temperature notturne sono associate ad un aumento della pigmentazione delle bacche.

Per quanto riguarda i tannini l'effetto della temperatura su questi non è ancora ben compreso. La sintesi dei monomeri dei tannini, i flavan-3-oli, è aumentata in presenza di temperature elevate (Cohen et al., 2012a,b), anche se in entrambi gli studi le differenze non erano più significative alla vendemmia. I tannini non sono stati influenzati dallo stress termico nel Sangiovese (Pastore et al., 2017), così come nello studio di Gouot et al. (2019) che hanno riportato un'assenza di effetti sui livelli dei tannini. Per quanto riguarda la sintesi degli stilbeni, lo stress da caldo ha inibito l'espressione dei componenti della via biosintetica STS (stilbene sintasi) (Rienth et al., 2014b), mentre l'esposizione dell'uva a basse temperature ha fatto aumentare i trascritti STS, indicando una maggiore biosintesi di stilbeni a basse temperature (Pastore et al., 2017).

I principali gruppi di composti aromatici dell'uva e del vino sono i terpeni, le metossipirazine, i derivati del furano, i prodotti della via della lipossigenasi, i prodotti della via dei fenilpropanoidi, i norisoprenoidi e i composti volatili dello zolfo come i tioli.

Quasi tutti i composti aromatici trovano principalmente come precursori non volatili nella bacca e richiedono ulteriori modifiche per essere percepiti (Dunlevy et al., 2013; Parker et al., 2018; Lin et al., 2019).

I terpeni conferiscono note floreali e fruttate ai vini e svolgono ruoli come fitormoni, modifica delle proteine reagenti, antiossidanti, repellenti per gli erbivori e attrattivi per i predatori e i parassitoidi degli erbivori (Pichersky e Raguso, 2018). I terpenoidi dell'uva di maggiore importanza aromatica possono essere suddivisi in base alla loro struttura chimica in monoterpeni (C10) e sesquiterpeni (C15). Inoltre, i carotenoidi (C40) possono essere inclusi in questo elenco come precursori di aroma (Dunlevy et al., 2013; Ilc et al., 2016). I principali monoterpeni presenti nell'uva sono il linalolo, il geraniolo, il nerolo e il citronellolo.

La biosintesi dei terpeni dell'uva è regolata principalmente dagli ormoni acido jasmonico e metiljasmonato.

Le metossipirazine sono composti eterociclici azotati appartenenti al gruppo pirazinico e le troviamo sia negli animali che nelle piante (Maga, 1992). Tra le varie metossipirazine, alcune metossipirazine alchilate, come la 2-metossi-3-isobutilpirazina (IBMP), la 3-sec-butil-2-l-metossipirazina (SBMP) e la 2-metossi-3-isopropilpirazina (IPMP) sono estremamente odorose, con soglie olfattive molto basse (nanogrammi per litro in acqua) (Sidhu et al., 2015). Nelle cultivar della famiglia del Carmenet, come il Sauvignon blanc, il Cabernet Sauvignon, il Cabernet Franc e il Merlot gli aromi vegetali ricordano i baccelli dei piselli e i peperoni verdi e, a seconda della concentrazione, possono contribuire a creare sfumature terrose (Geffroy et al., 2020). Negli acini d'uva, le metossipirazine si accumulano rapidamente tra l'allegagione e l'invasatura, raggiungono un picco da 2 a 3 settimane prima della vendemmia per poi diminuire continuamente durante la maturazione fino alla raccolta (Ryona et al., 2008, 2010; Gregan e Jordan, 2016).

Gli acidi grassi insaturi C18 acido linoleico e acido linolenico sono i precursori di altri composti organici volatili come le aldeidi C6 e gli alcoli come l'esanale e l'esanolo (Kalua e Boss, 2009). La loro sintesi avviene principalmente prima dell'invasatura (Kalua e Boss, 2009) e hanno aromi verdi erbacei anche se, considerando la loro soglia olfattiva, raramente contribuiscono al carattere erbaceo dei vini. I livelli di questi composti nei vini sono modulati principalmente dai

processi di vinificazione; le aldeidi C6 più odorose (esanale, esenali) sono ridotte ad alcoli C6 meno odorosi da *Saccharomyces cerevisiae* durante la fermentazione alcolica (Ferreira et al., 1995).

I norisoprenoidi sono un gruppo eterogeneo di sostanze molto diffuse, sono composti derivanti dalla degradazione ossidativa dei carotenoidi, pigmenti che contribuiscono all'assorbimento della luce e alla protezione dell'apparato fotosintetico dalla foto ossidazione (Rodríguez-Concepción et al., 2001). I composti C13-norisoprenoidi si formano in ambiente acido alla fine della vinificazione, durante la maturazione e l'invecchiamento del vino, attraverso reazioni chimiche a partire da diversi precursori volatili e non volatili (Darriet et al., 2012). I norisoprenoidi più comuni sono il  $\beta$ -ionone (aroma simile alla violetta), il  $\beta$ -damascenone (aroma di rosa) e il 1,1,6-trimetil1,2-diidronaftalene TDN tipico del Riesling (aroma di nafta).

I tioli sono composti volatili dello zolfo e si trovano sottoforma di precursori nell'acino di cultivar di vino bianco come Sauvignon Blanc, Semillon, Petite Arvine, Riesling, Chenin Blanc, Muscat blanc, Colombard e Alvarino (Tominaga et al., 2000; Fretz et al., 2005), ma è stato riscontrato anche un contributo al fruttato percepito nei vini rossi ottenuti da Cabernet Sauvignon e Merlot (Bouchilloux et al., 1998). I tioli sono generalmente legati agli aromi che ricordano il frutto della passione, il bosso, il ribes nero, l'aglio e gli asparagi (Tominaga et al., 1998). I tioli vengono accumulati durante la maturazione dell'acino nella loro forma non volatile, legati alla S-cisteina o al S-glutatione. L'enzima  $\beta$ -liasi del lievito, codificato dal gene IRC7 (Howell et al., 2005; Roncoroni et al., 2011; Santiago e Gardner, 2015), scinde i precursori dei tioli durante la fermentazione alcolica. Diversi altri fattori, come il trasporto attivo della S-cisteina e dei coniugati di S-glutatione attraverso la membrana plasmatica, influenzano il rilascio di tioli durante la fermentazione e contribuiscono all'espressione varietale delle cultivar contenenti tioli, che a volte possono essere considerati troppo intensi o off flavours, a seconda della concentrazione.

Come abbiamo visto, un lieve aumento della temperatura favorisce la produzione di composti aromatici, ma se si supera quella soglia per cui la pianta e il grappolo entrano in condizioni di stress termico ecco che i livelli di aromi si riducono. Nel Sangiovese, Pastore et al. (2017) hanno riportato un aumento dell'espressione di TPS in presenza di temperature più elevate prima della maturazione e una repressione dell'attività enzimatica di linalolo sintasi, delta-cadinene sintasi, vetispiradiene sintasi e germacrene durante la maturazione.

Il contenuto di linalolo nelle bacche viene compromesso dalle alte temperature, mentre non si riscontrano effetti negativi sul contenuto di geraniolo. Nel Sauvignon blanc esposto a una temperatura più elevata delle bacche attraverso la rimozione delle foglie, la concentrazione di precursori tiolici nelle bacche al momento della raccolta non è stata significativamente modificata (Sivilotti et al., 2017). Tuttavia, Wu et al. (2019) hanno riscontrato una minore concentrazione del precursore glutatione aldeidico di 3SH (Glut-3SH-Al) in uve di Cabernet Sauvignon e Sauvignon Blanc in presenza di un aumento della temperatura di 1,5°C.

Livelli di carotenoidi più elevati sono stati riscontrati nel Riesling e nello Chenin Blanc coltivati in regioni più calde (Marais et al., 1991). Fernandes de Oliveira et al. (2015) hanno riscontrato un contenuto di carotenoidi costantemente più elevato nelle uve ombreggiate rispetto a quelle esposte alla luce diretta del sole. Tuttavia, la rimozione delle foglie nella zona di fruttificazione, che generalmente aumenta la temperatura intorno agli acini, non ha alterato i carotenoidi totali nel Riesling (Kwasniewski et al., 2010).

La concentrazione del C13 norisoprenoide 1,1,6-trimetil1,2-diidronaftalene (TDN), che determina le note di cherosene del Riesling invecchiato, è generalmente più elevata nei climi caldi (Marais et al., 1992; Schüttler et al., 2015).

Per quanto riguarda le metossipirazine i vini prodotti in regioni più fresche hanno concentrazioni più elevate e mostrano un odore più vegetale, come dimostrato per il Cabernet Sauvignon e il Sauvignon Blanc (Allen et al., 1991; Falcão et al., 2007). Tuttavia, non è ancora chiaro in che misura la temperatura contribuisca alla diminuzione delle metossipirazine prima e durante la maturazione e in che misura la diminuzione sia dovuta alla radiazione (Darriet et al., 2012; Lei et al., 2018). Le concentrazioni di 2-metossi-3-isobutylmetossipirazina (IBMP, responsabile dell'aroma di peperone nel vino) nelle uve diminuiscono con la temperatura (Falcão et al., 2007).

Recenti studi hanno caratterizzato altri componenti aromatici che contribuiscono alle sfumature aromatiche di surmaturazione in uve e vini di cultivar rosse (ad esempio, sfumature di frutta in confettura e prugna secca nei vini Merlot e Cabernet Sauvignon) (Pons et al., 2017a; Allamy et al., 2018). Questo porta a ipotizzare che l'aumento delle temperature dovuto al cambiamento climatico aumenterà la percezione di note fruttate troppo mature, come accade ora nelle annate calde (Pons et al., 2017a).

## IMPATTO DELLE RADIAZIONI SUI COMPOSTI ORGANICI

Ora vedremo l'impatto che hanno le radiazioni sui composti organici dell'uva. Per quanto riguarda i fenoli, i più reattivi alla luce sono i flavonoidi e il loro livello aumenta con l'esposizione alla luce come dimostrato, ad esempio, nel Riesling (Brandt et al., 2019), nel Pinot Nero (Song et al., 2015) e nel Cabernet Sauvignon (Blancquaert et al., 2019).

Non è del tutto chiaro in che misura la luce visibile e i raggi UV contribuiscano alla stimolazione della sintesi dei composti fenolici (Keller e Torres-Martinez, 2004; Schreiner et al., 2012; Teixeira et al., 2013). Tuttavia, sulla base di studi recenti, sembra che sia soprattutto la frazione UV-B della radiazione solare la responsabile dell'aumento dell'espressione dei geni chiave dei flavonoidi (Koyama et al., 2012; Teixeira et al., 2013; Carbonell-Bejerano et al., 2014; Martínez-Lüscher et al., 2014; Liu et al., 2015; Loyola et al., 2016).

L'esposizione dei grappoli d'uva alla luce fa aumentare significativamente l'accumulo di antociani, mentre l'ombreggiamento lo riduce (Spayd et al., 2002; Downey et al., 2004; Matus et al., 2009; Song et al., 2015; Guan et al., 2016).

In uno studio completo *in vitro* che ha preso in considerazione l'effetto dell'esposizione degli acini ai trattamenti di luce e temperatura, Azuma et al. (2012) hanno riportato livelli di antociani più elevati nelle uve esposte a livelli di luce più alti. È generalmente noto che l'esposizione alla luce aumenta la concentrazione della maggior parte dei composti aromatici negli acini d'uva, ma che un'eccessiva luce solare, così come la sua totale esclusione, ne inibisce l'accumulo (Bureau et al., 2000; Zhang et al., 2014; Young et al., 2016). Poiché i carotenoidi sono pigmenti con funzione fotoprotettiva, la loro biosintesi è generalmente aumentata in presenza di radiazioni elevate, così come i loro prodotti di degradazione.

Anche i livelli di norisoprenoidi C13 sono altamente correlati all'esposizione prolungata al sole (Kwasniewski et al., 2010; Schüttler et al., 2015; Young et al., 2016). I monoterpeni, e in particolare il linalolo, sono altamente sensibili alla luce solare, come dimostrato, ad esempio, nel Sauvignon Blanc e nel Riesling (Sasaki et al., 2016).

Young et al. (2016) hanno dimostrato che l'aumento della radiazione fotosinteticamente attiva (+52%) ha portato a livelli più elevati di terpenoidi volatili nelle bacche di Sauvignon Blanc esposte; tuttavia, si sono riscontrate chiare differenze nelle risposte in base alla fase di sviluppo considerata.

Analogamente, Šuklje et al. (2014) hanno riscontrato un aumento della concentrazione di tioli nei grappoli esposti alla luce del sole, mentre è generalmente noto che l'esposizione alla luce

durante la maturazione riduce il contenuto di metossipirazine nelle bacche (Roujou de Boubee et al., 2000; Sala et al., 2004; Stummer et al., 2005; Darriet et al., 2012; Sidhu et al., 2015; Martin et al., 2016; Cassandra et al., 2019; Torres et al., 2020a).

Si evince che la risposta dei composti aromatici all'aumento delle radiazioni dipende dalla natura stessa del composto e dalla fase di sviluppo in cui si trova l'acino.

#### IMPATTO DELLO STATO IDRICO SUI COMPOSTI ORGANICI

Lo stato idrico del sistema svolge un ruolo fondamentale, ad esempio una siccità prolungata avrà un impatto sull'infiltrazione dell'acqua e sulla materia organica del suolo.

Inoltre, la scarsa umidità del suolo riduce la disponibilità di azoto negli orizzonti superiori del terreno (Curtin et al., 2012). L'azoto è importante per la crescita complessiva e la composizione delle bacche, come i metaboliti secondari aromatici e l'azoto prontamente assimilabile, fondamentale per la nutrizione azotata dei lieviti durante la fermentazione in cantina.

È generalmente noto che un moderato deficit idrico (potenziale idrico fogliare prima dell'alba compreso tra -0,3 e -0,5 MPa) è benefico per la qualità finale del vino, in particolare nelle cultivar rosse (Van Leeuwen et al., 2009; Zufferey et al., 2017).

L'impatto del deficit idrico sul contenuto zuccherino delle bacche dipende dalla sua intensità (van Leeuwen et al., 2009). Se il deficit idrico è lieve, il contenuto zuccherino delle bacche aumenta a causa della ridotta competizione per gli zuccheri tra la maturazione delle bacche e la crescita dei germogli. Se il deficit idrico è grave, l'accumulo di zuccheri nelle bacche può essere interrotto a causa della riduzione della fotosintesi. Quando le viti sono fortemente stressate, la qualità del vino può essere compromessa. Questo è particolarmente vero nella produzione di vino bianco (Peyrot des Gachons et al., 2005).

Poiché il deficit idrico riduce il volume dell'acino, gli effetti positivi possono essere in parte attribuiti alla maggiore concentrazione di composti; tuttavia, gli effetti più benefici si osservano quando il deficit idrico si verifica durante tutta la fase di maturazione.

Oltre a un aumento generale dell'accumulo di fenilpropanoidi e flavonoidi (Chorti et al., 2016; Koundouras, 2018), diversi studi hanno mostrato una modifica nella composizione degli antociani verso un aumento relativo delle antocianine (Castellarin et al., 2007a; Ollé et al., 2011; Cook et al., 2015).

Anche se i cambiamenti nel profilo degli antociani in risposta al deficit idrico sembrano essere fortemente dipendenti dalla varietà (Niculcea et al., 2014; Theodorou et al., 2019).

Gli effetti dello stato idrico sui composti aromatici sono meno evidenti rispetto ai composti fenolici. La maggior parte degli studi sul deficit idrico dei composti aromatici dell'uva mostra risultati molto eterogenei, a seconda del tipo di composti aromatici considerati (Alem et al., 2019) e delle cultivar. Uno dei pochi composti aromatici la cui concentrazione nella bacca è correlata negativamente ad un deficit idrico moderato è il sesquiterpene rotundone (Wood et al., 2008; Geffroy et al., 2014, 2018) associato alle note di pepe nero.

Mentre i precursori dei tioli volatili presenti nelle bacche (Tominaga et al., 2000; Fretz et al., 2005) aumentano in caso di deficit idrico lieve e diminuiscono in caso di deficit idrico grave. Tuttavia, l'assorbimento di azoto può essere limitato dal deficit idrico (Celette e Gary, 2013) con conseguenze sull'accumulo di composti aromatici legati all'azoto come appunto i tioli. Sembra che un moderato deficit idrico aumenti la concentrazione di C13- norisoprenoidi, probabilmente a causa della maggiore esposizione al sole dovuta alla riduzione della chioma (Koundouras et al., 2009). D'altra parte, la riduzione della chioma causata dal deficit idrico potrebbe favorire la degradazione della metossipirazina (Brillante et al. 2018 e Harris et al. 2012).

#### IMPATTO DELLA CO<sub>2</sub> SUI COMPOSTI ORGANICI

Nelle colture frutticole e orticole, l'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> ha generalmente aumentato la capacità antiossidante totale e le concentrazioni di fruttosio, glucosio, zuccheri solubili totali, fenoli totali, flavonoidi totali, acido ascorbico e calcio nelle parti commestibili (Sun et al., 2017).

La maggior parte degli studi sulla vite che si occupano di concentrazione di CO<sub>2</sub> si sono concentrati sulla crescita vegetativa e sulla fotosintesi, mentre gli studi fisiologici e molecolari sul metabolismo delle bacche sono relativamente scarsi. Solo alcuni attributi dell'uva sono stati influenzati dall'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>. In particolare, zuccheri, acidi e dimensioni degli acini sono aumentati in queste condizioni (Bindi et al., 2001; Kizildeniz et al., 2015). Tuttavia, in uno studio che ha preso in considerazione viti di Riesling e Cabernet Sauvignon esposte a moderati aumenti di CO<sub>2</sub> atmosferica, la concentrazione di zuccheri non è stata influenzata anche se le rese sono aumentate (Wohlfahrt et al., 2018).



Nei vini ottenuti da quest'ultimo esperimento, la qualità e la composizione non sono state influenzate negativamente da un aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> (Wohlfahrt et al., 2021). Gli antociani e le proantocianidine non sono stati influenzati dall'aumento di concentrazione di CO<sub>2</sub> nella maggior parte degli studi (Goncalves et al., 2009; Salazar-Parra et al., 2012; Kizildeniz et al., 2015).

L'elevata concentrazione di CO<sub>2</sub> in combinazione con l'alta temperatura ha accelerato la maturazione delle bacche, l'accumulo di zuccheri, la degradazione dell'acido malico e ha ridotto il disaccoppiamento antocianina-zucchero indotto dall'alta temperatura (Arrizabalaga-Arriazu et al., 2020a).

L'effetto dell'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> sui composti aromatici deve ancora essere chiarito. Goncalves et al. (2009) non hanno riscontrato alcun impatto sui composti dell'aroma quali alcoli C<sub>6</sub>, alcoli, esteri, terpenoli, composti carbonilici, acidi, fenoli volatili e norisoprenoidi C<sub>13</sub> in condizioni di concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> di 500 ppm.

#### RAPPORTO TRA MATURAZIONE ZUCCHERINA E MATURAZIONE FENOLICA

I livelli ottimali di zucchero in queste stagioni più calde non sempre coincidono con la maturità in termini di colore, sapore e aroma (Kliewer e Torres, 1972; Sadras e Moran, 2012; Sadras et al., 2013), tanto da far pensare che la "maturazione zuccherina" non sia più coordinata con la "maturazione fenolica" (Van Leeuwen e Seguin, 2006; Goode, 2012).

In altre parole, con l'aumento delle temperature il massimo accumulo di zuccheri si raggiunge prima ma la maturazione dei composti fenolici ha un andamento diverso, richiede più tempo e dipende da altri fattori ambientali oltre che dalla temperatura, come abbiamo visto in precedenza. Questo problema rende difficile scegliere il momento giusto per la raccolta e non garantisce il giusto equilibrio nella maturazione, questo si ripercuote sulla qualità dell'uva stessa e sulla gestione della vinificazione.

#### STRATEGIE DI ADATTAMENTO

Le strategie di adattamento di cui discuteremo riguardano l'irrigazione e la gestione del bilancio idrico, la gestione della chioma, del suolo, la potatura e la scelta del materiale vegetale. Gli adattamenti che hanno un impatto minimo sulla tipicità del vino devono essere attuati per primi e solo se si rivelano insufficienti, si possono prevedere altri metodi più invasivi.

Queste strategie dovranno essere specifiche per il vigneto, in modo da adattarsi alla topografia, alle condizioni ambientali, alla cultivar e allo stile di vino desiderato. Qualsiasi misura di adattamento dovrà considerare i potenziali impatti a breve e lungo termine sull'ambiente. Una produzione sostenibile richiede un approccio equilibrato tra benessere del vigneto e la conservazione delle risorse idriche.

#### IRRIGAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE

La riduzione delle precipitazioni e l'aumento dell'evapotraspirazione a seguito del cambiamento climatico richiedono l'apporto di acqua di irrigazione, che deve essere accoppiata ad un miglioramento dell'efficienza nell'uso dell'acqua per garantire la produzione nei vigneti e la massima sostenibilità.

A causa dei cambiamenti climatici i vigneti non irrigui dovranno sopportare ondate di calore più frequenti e una maggiore durata del deficit idrico del suolo rispetto al passato.

Inoltre, gli stress idrici eccessivi durante i periodi fenologici chiave, come l'antesi, saranno potenzialmente più frequenti. Per gli impianti esistenti, le opzioni migliori sono ridurre il consumo idrico della vite e migliorare la capacità di ritenzione idrica del suolo.

La riduzione delle dimensioni della chioma permette di limitare la domanda di acqua anche se a scapito di una resa ridotta e di un maggior rischio di scottature sui frutti.

La risposta più immediata e ovvia alla siccità è quella di incrementare l'uso dell'irrigazione.

In effetti, questa è stata la risposta dei coltivatori alla mancanza di precipitazioni adeguate per più di 7000 anni (Helbaek, 1969) e l'irrigazione è stata probabilmente utilizzata in viticoltura per almeno 4000 anni (Bard, 2005; Murray et al., 2009). Mentre lo sviluppo della viticoltura in Australia, Sud Africa, Nord e Sud America dipende dall'irrigazione, in Europa la viticoltura irrigua fino ai tempi recenti è stata gestita diversamente: in alcune zone è consentita solo per soccorso e in altre è addirittura vietata.

Nonostante ciò, l'irrigazione viene sempre più utilizzata per compensare la diminuzione delle precipitazioni e l'aumento dell'evapotraspirazione, tanto che si è reso necessario modificare, rendendo più permissive, le norme che regolamentano l'irrigazione in tali zone.

L'uso dell'irrigazione è passato da un valore praticamente nullo al 25% della superficie viticola totale in soli 10 anni, al 34% nel 2012 (MAAMA, 2013) e continua ad aumentare, avendo raggiunto oltre il 41% nel 2019 (MAPA, 2019). In Italia, i vigneti rappresentavano l'8% della superficie totale irrigata nel 2010, ~29% della superficie viticola (EUROSTAT, 2018).

Anche in Francia, l'irrigazione è consentita in alcuni momenti della stagione dal 2006 (Journal Officiel de la République Française, 2006).

L'irrigazione è una soluzione a breve termine e non è una misura sostenibile se le precipitazioni continuano a diminuire, inoltre, prevede l'impiego di infrastrutture per distribuire l'acqua e richiede energia per distribuirla e metterla in pressione. La modalità e la tempistica di irrigazione sono altrettanto importanti per migliorare lo stato idrico del sistema e per ottimizzare le riserve idriche, ad esempio scegliere il tipo di irrigazione, a goccia o (sempre più raramente) a scorrimento, sottosuolo o fuori terra, di notte o di giorno. L'obiettivo deve essere quello di minimizzare la perdita di acqua rispetto alla produzione.

Una pratica diffusa è l'irrigazione deficitaria che consiste nel fornire alla vite una quantità d'acqua inferiore a quella necessaria per soddisfare pienamente la domanda atmosferica, che può essere sostenuta per tutta la stagione (per scelta o a causa di una disponibilità idrica inadeguata) o regolata per un risultato viticolo specifico in base alla fisiologia della vite.

Il metodo, se applicato con rigore, non ha alcun effetto sulla resa potenziale della stagione, ma riduce il vigore della vite e deve essere modulato in base alla cultivar e all'obiettivo produttivo. In genere, l'irrigazione deficitaria riduce il consumo idrico stagionale in misura maggiore rispetto alla resa, che viene migliorata per unità di irrigazione applicata (Edwards & Clingeleffer, 2013; McCarthy, 1997; Shellie, 2019) e per unità di acqua traspirata (Edwards & Clingeleffer, 2013).

Anche le caratteristiche del portainnesto vanno considerate perché influenzano la resa dei frutti per unità di acqua traspirata. Diversi genotipi di portainnesto combinati con la stessa marza nello stesso ambiente e gestiti allo stesso modo possono determinare differenze consistenti nelle dimensioni dei germogli e della chioma.

In caso di un'ondata di calore è consigliata l'irrigazione prima e durante l'ondata di calore per mantenere uno stato idrico del terreno che faciliti l'assorbimento dell'acqua.

Durante l'ondata di calore, le viti dovrebbero continuare a essere irrigate a intervalli regolari, assicurando che la traspirazione non si blocchi per poter raffreddare la chioma e i grappoli (Hayman et al., 2012). L'irrigazione a pioggia e la nebulizzazione possono ridurre efficacemente lo stress termico e idrico, in quanto sono in grado di raffreddare sia le chiome che gli acini. L'hydrocooling viene attivato a una temperatura soglia di 35°C e contribuisce all'abbassamento delle temperature della chioma e dei grappoli, inoltre aumenta l'assimilazione netta di CO<sub>2</sub> (Greer e Weedon, 2014).

Un'irrigazione può essere effettuata anche post raccolta per prolungare la vitalità delle foglie e sostenere il rifornimento di carboidrati alla vite (Loescher et al., 1990).

La dinamica della senescenza fogliare determina in qualche misura la durata dell'accumulo di riserve di carboidrati nel periodo post-raccolta e questo può essere utile da considerare in viticoltura nell'ottica di riscaldamento globale.

Bonada et al. (2017) raccomandano di mantenere il profilo del terreno sufficientemente idratato durante l'inverno, invece di aspettare la primavera per irrigare.

Infine, è da precisare che l'abuso dell'irrigazione può portare all'accumulo di sali nel terreno, rendendolo inadatto alla coltivazione della vite (Walker et al., 2010). Si tratta di un processo che si esplica in diversi decenni e dipende dalla quantità di pioggia invernale. Solo le regioni con scarse precipitazioni invernali sono soggette a questo processo.

La tecnologia, attraverso l'uso di sensori per monitorare lo stato idrico del sistema, in combinazione con i dati meteorologici, è utile per assicurare un uso sostenibile dell'acqua e un potenziale risparmio idrico in caso di stress idrico.

#### GESTIONE DELLA CHIOMA

La geometria della chioma può essere manipolata per garantire che il microclima nella zona del grappolo sia adatto al corretto sviluppo delle bacche. Un'adeguata radiazione solare è necessaria per una fotosintesi ottimale, per la fertilità delle gemme e per lo sviluppo degli acini, compreso l'accumulo di polifenoli (Berli et al., 2008).

Dal punto di vista dell'equilibrio tra gestione della chioma ed efficienza nell'uso dell'acqua, anche se il risparmio idrico è generalmente vantaggioso se lo sviluppo della chioma è ridotto si suggerisce di apportare acqua sufficiente all'inizio della stagione per consentire il pieno sviluppo della chioma. Il microclima più fresco, grazie all'ombreggiamento, riduce il rischio di scottature ed evita il surriscaldamento dei grappoli.

In fase di progettazione del vigneto si può valutare di orientare i filari da est a ovest invece che nord sud per proteggere il vigneto dal sole pomeridiano. Diminuire la densità d'impianto contribuisce a ridurre il consumo di acqua in quanto diminuendo l'area fogliare per ettaro si riduce anche la traspirazione.

Sempre in fase di progettazione del vigneto si possono considerare sistemi di allevamento specifici a determinate esigenze. Se l'obiettivo è la resistenza alla siccità allora è da prediligere un sistema di allevamento con minor superficie fogliare possibile per ridurre la

traspirazione, viene indicato come sistema di allevamento particolarmente resistente alla siccità quello a cespuglio mediterraneo, o *gobelet* (Santesteban et al., 2016).

Questo sistema di allevamento mostra anche ottime prestazioni qualitative; gli svantaggi sono che è difficilmente meccanizzabile ma offre comunque rese discrete.

Se invece l'obiettivo è proteggere il grappolo dalle temperature e dalle radiazioni elevate e si ha una buona disponibilità idrica allora è bene orientarsi verso un sistema di allevamento dotato di ampia area fogliare che permette una migliore ombreggiatura e ventilazione nella zona del grappolo come può essere la pergola.

L'utilizzo di film di tessuto vegetale, che sono disponibili per la viticoltura da diversi decenni, può essere utile per la loro capacità di mantenere l'idratazione dei tessuti (Palliotti et al, 2013; Gatti et al., 2016; Rogiers e Fahey, 2019), prevenire le scottature solari (es. caolino: Dinis et al., 2016; Conde et al., 2016; Conde et al., 2018) e diminuire l'incidenza di malattie (es. chitosano: Meng et al., 2008). I film particellari, come le argille di caolino, sono spesso definiti antitraspiranti, anche se non sono destinati a bloccare i pori stomatici. Questi agiscono riducendo il carico termico sulla foglia attraverso la riflessione di una parte della luce solare ricevuta, piuttosto che con un effetto diretto sulla perdita di acqua.

Gli antitraspiranti diretti, da non confondere con i film particellari, sono prodotti a base di pinolene, o polimeri simili, che formano una pellicola trasparente sulla foglia e bloccano la perdita di acqua. Questi prodotti hanno l'effetto di ridurre la fotosintesi della vite e quindi di ritardare la maturazione (di Vaio Marallo et al., 2019; Possingham et al., 1969) ma non riflettono la luce solare e quindi determinano una temperatura fogliare più elevata, esaltata a sua volta dal deficit idrico (Faralli et al., 2016). Di conseguenza, aumenta potenzialmente il rischio di danni da calore durante gli eventi climatici estremi e quindi dovrebbero essere utilizzati con attenzione.

## GESTIONE DEL SUOLO

La lavorazione del terreno può essere effettuata per migliorare l'assorbimento idrico del suolo (Wheaton, et al., 2008) e ridurre il ruscellamento, ma lascia la superficie del suolo nuda.

Il suolo nudo aumenta il rischio di riscaldamento del vigneto, di perdita di acqua e di carbonio, di erosione e di emissioni di gas serra (Santos et al., 2020). Lasciare crescere la vegetazione spontanea o seminare colture di copertura può migliorare le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche del terreno (Celette et al., 2008; Steenwerth e Belina, 2008).

La vegetazione interfilare e sottofila può favorire la biodiversità del suolo e ridurre la pressione delle malattie (Garcia et al., 2018). Per ridurre al minimo la competizione per l'acqua tra le viti e la vegetazione, quest'ultima può essere controllata tramite lo sfalcio o l'allettamento (Webb et al., 2010). Le leguminose come colture di copertura possono fornire materia organica e azoto (Ball et al., 2020). Questo può essere utile a limitare l'apporto di azoto sotto forma di fertilizzanti sintetici, i quali aumentano le probabilità di emissioni di protossido di azoto, un gas serra particolarmente potente (Longbottom e Petrie, 2015).

L'uso di pacciamature è relativamente comune in molte regioni, spesso per migliorare la ritenzione dei nutrienti o ridurre l'incidenza delle erbe infestanti. Tuttavia, le pacciamature hanno anche un impatto sull'umidità del suolo riducendone l'evaporazione, inoltre, contribuiscono al miglioramento del contenuto di carbonio nel suolo (Pinamonti, 1998; Van Huyssteen e Weber, 1980).

#### POTATURA TARDIVA

La potatura tardiva viene effettuata dopo il germogliamento e ha la funzione di posticipare tutte le fasi fenologiche. Questo permette di posizionare il periodo di maturazione in un momento in cui le temperature sono più fresche, con effetti positivi sull'accumulo di tannini, sull'intensità del colore e sulla componente aromatica, permette anche di facilitare il raggiungimento di un'equilibrata maturazione zuccherina e fenolica.

Inoltre, una potatura ritardata può ridurre al minimo il rischio di danni da gelate primaverili ai giovani germogli (Friend e Trought, 2007), migliora l'impollinazione e la fecondazione, che avvengono in un momento con temperature più favorevoli, e ritarda la vendemmia. Le bacche di Shiraz provenienti da viti potate allo stadio di 2-3 foglie hanno raggiunto la maturazione degli zuccheri fino a due settimane più tardi rispetto a quelle con potatura invernale applicata e hanno ottenuto un migliore rapporto antociani/zuccheri (Moran et al., 2017).

Questo effetto è dovuto alla combinazione di un ritardo nell'inizio dell'accumulo di zuccheri e di una riduzione del tasso di accumulo di zuccheri durante la maturazione tardiva. L'effetto cumulativo delle diverse strategie può raggiungere circa tre settimane di ritardo nella maturazione dell'uva.

## SCelta DEL MATERIALE VEGETALE

La scelta del materiale vegetale è uno strumento importante per adattare i vigneti ai maggiori stress. La selezione si concentra su cloni a maturazione tardiva e resistenti alla siccità.

La resistenza alla siccità di una cultivar dipende dalla sua sensibilità stomatica al deficit idrico del suolo e in base a questa caratteristica possiamo suddividere le cultivar in due gruppi: isoidriche e anisoidriche. Una vite isoidrica teoricamente perfetta è quella che mantiene stabile un determinato potenziale idrico fogliare al variare del contenuto idrico del suolo, mentre una vite anisoidrica è quella che mantiene i tassi fotosintetici (attraverso il mantenimento della conduttanza stomatica) a spese di un potenziale idrico fogliare altamente variabile, indipendentemente dal contenuto idrico del suolo.

Una cultivar quasi-isoidrica sarà più tollerante al deficit idrico e avrà una efficienza nell'uso dell'acqua più alta rispetto a una cultivar quasi-anisoidrica. Questo può o meno tradursi in una migliore resa dei frutti per unità di acqua traspirata in un ambiente irriguo, a causa del maggiore impatto della chiusura stomatica sul guadagno di carbonio fotosintetico (Jones et al., 2022).

La resistenza dei portainnesti al deficit idrico è molto variabile (Carbonneau, 1985). Alcuni portainnesti esistenti, come il 140 Ruggeri o il 110 Richter, sono altamente resistenti alla siccità.

Una delle priorità dell'attuale ricerca viticola è la creazione di nuovi portainnesti che mostrino una resistenza alla siccità ancora maggiore e che hanno un apparato radicale profondo e a lungo raggio che potrebbe essere particolarmente vantaggioso per accedere all'acqua non disponibile per le viti con radici più superficiali. Il grande vantaggio di adattare i vigneti all'aumento dello stress da siccità attraverso la scelta del materiale vegetale (portainnesto e cultivar) è che è ecologico, non aumenta i costi di produzione ed è soprattutto efficace.

## CONCLUSIONI

Un clima che cambia richiede una profonda conoscenza di come i fattori abiotici modulino i diversi composti che determinano la qualità dell'acino d'uva, al fine di implementare appropriate strategie di mitigazione viticola (van Leeuwen e Destrac- Irvine, 2017; Rienth et al, 2020), selezionare varietà, cloni (Wolkovich et al., 2018) e portainnesti (Ollat et al., 2016) e identificare tratti, geni o QTL per la selezione di nuove cultivar più adatte alle condizioni future (Duchêne, 2016).

Per l'agricoltura in generale, le osservazioni storiche e i futuri sforzi di modellazione relativi al cambiamento climatico rivelano che i cambiamenti hanno avuto e continueranno probabilmente ad avere ulteriori impatti e sfide per la sostenibilità complessiva degli attuali sistemi di produzione.

Per la viticoltura e la produzione di vino, la struttura climatica delle varie regioni vitivinicole del mondo è un fattore critico che determina l'idoneità di queste regioni a determinate cultivar, il loro potenziale stile di vino e la produttività complessiva della regione.

I dati suggeriscono anche che i cambiamenti climatici si esprimono soprattutto in una crescita più rapida delle piante e da profili di maturazione sbilanciati. La prova di questi cambiamenti è stata registrata in alcune regioni dove le condizioni di riscaldamento hanno portato a una fenologia più precoce correlata a livelli di zucchero più elevati e più bassi di acidi.

Il ruolo del cambiamento climatico sulla qualità e sulla produzione di vino è ora oggetto di maggiori studi a causa degli impatti economici che hanno e/o potrebbero avere sul settore.

I dati di campo sull'impatto degli stress abiotici sul metabolismo delle bacche devono essere ulteriormente studiati.

Un aspetto importante da sottolineare è che gli impatti dei cambiamenti climatici sulla viticoltura e sulla produzione di vino sono stati e probabilmente continueranno ad essere molto variabili, sia a livello geografico che di cultivar. Pertanto, è necessaria una maggiore ricerca, applicata a livello regionale, per comprendere meglio la variabilità della resa e delle caratteristiche qualitative per ogni singola cultivar in una determinata regione, con l'obiettivo di minimizzare questa variabilità (Keller, 2010b).

Infine, lo sviluppo della tecnologia, il miglioramento del materiale vegetale e la migliore gestione del vigneto hanno permesso ai coltivatori di affrontare positivamente alcune delle sfide presentate dai cambiamenti climatici. Tuttavia, le proiezioni dei futuri cambiamenti climatici indicano che probabilmente saranno più rapidi e di maggiore entità rispetto alla



nostra capacità di adattamento, rendendo necessaria una maggiore comprensione dell'evoluzione di tali cambiamenti e progressi significativi nella selezione genetica delle piante (Bisson et al., 2002).

Pertanto, l'industria vinicola dovrà essere proattiva nel monitorare il clima locale e regionale valutando impatti sul sistema vegetale e sulla produttività e qualità dei frutti ed essere pronta ad attuare le strategie di adattamento appropriate.

## BIBLIOGRAFIA

- Abeyasinghe, M. S., Greer, D., and Rogiers, S. (2019). The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis Vinifera* "Shiraz" under vineyard conditions. *Vitis* 58, 7–16. doi: 10.5073/vitis.2019.58.7-16
- Alem, H., Rigou, P., Schneider, R., Ojeda, H., and Torregrosa, L. (2019). Impact of agronomic practices on grape aroma composition: a review. *J. Sci. Food Agric.* 99, 975–985. doi: 10.1002/jsfa.9327
- Allamy, L., Darriet, P., and Pons, A. (2018). Molecular interpretation of driedfruit aromas in merlot and cabernet sauvignon musts and young wines: impact of over-ripening. *Food Chem.* 266, 245–253. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.06.022
- Allen, M. S., Lacey, M. J., Harris, R. L. N., and Brown, W. V. (1991). Contribution of methoxypyrazines to sauvignon blanc wine aroma. *Am. J. Enol. Viticult.* 42, 109–112.
- Arrizabalaga, M., Morales, F., Oyarzun, M., Delrot, S., Gomes, E., Irigoyen, J. J., et al. (2018). Tempranillo clones differ in the response of berry sugar and anthocyanin accumulation to elevated temperature. *Plant Science*, 267, 74–83.
- Arrizabalaga-Arriazu, M., Gomès, E., Morales, F., Irigoyen, J. J., Pascual, I., and Hilbert, G. (2020a). High temperature and elevated carbon dioxide modify berry composition of different clones of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. tempranillo. *Front. Plant Sci.* 11:603687. doi: 10.3389/fpls.2020.603687
- Azuma, A., Yakushiji, H., Koshita, Y., and Kobayashi, S. (2012). Flavonoid biosynthesis-related genes in grape skin are differentially regulated by temperature and light conditions. *Planta* 236, 1067–1080. doi: 10.1007/s00425-012-1650-x
- Ball, K. R., Baldock, J. A., Penfold, C., Power, S. A., Woodin, S. J., Smith, P., et al. (2020). Soil organic carbon and nitrogen pools are increased by mixed grass and legume cover crops in vineyard agroecosystems: Detecting short-term management effects using infrared spectroscopy. *Geoderma* 379, 114619. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114619
- Bard, K. A. (2005). *Encyclopedia of the archaeology of ancient Egypt*. London, UK: Routledge.
- Bavaresco, L., Lucini, L., Busconi, M., Flamini, R., and De Rosso, M. (2016). Wine resveratrol: from the ground up. *Nutrients* 8:222. doi: 10.3390/nu8040222
- Bergqvist, J., Dokoozlian, N., and Ebisuda, N. (2001). Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *Am. J. Enol. Vitic.* 52, 1–7.
- Berli, F., D'Angelo, J., Cavagnaro, B., Bottini, R., Weilloud, R., and Silva, M. (2008). Phenolic composition in grape (*Vitis vinifera* L. Cv. Malbec) ripened with different solar UV-B radiation levels by capillary zone electrophoresis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(9), 2892–2898.
- Bindi, M., Fibbi, L., and Miglietta, F. (2001). Free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO<sub>2</sub> concentrations. *Eur. J. Agron.* 14, 145–155. doi: 10.1016/S1161-0301(00)00093-9
- Bisson, L. F., Waterhouse, A. L., Ebeler, S. E., Walker, M. A., & Lapsley, J. T. (2002). The present and future of the international wine industry. *Nature*, 418, 696–699
- Blancquaert, E. H., Oberholster, A., Ricardo-da-Silva, J. M., and Deloire, A. J. (2019). Grape flavonoid evolution and composition under altered light and temperature conditions in cabernet sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Front. Plant Sci.* 10:1062. doi: 10.3389/fpls.2019.01062

- Bonada, M., Petrie, P. R., Edwards, E. J., and McCarthy, M. G. (2017). The impact of winter drought on vine growth and wine quality. *Aust. N.Z. Grapegrow. Winemak.* 644, 41.
- Bouchilloux, P., Darriet, P., Henry, R., Lavigne-Cruège, V., and Dubourdieu, D. (1998). Identification of volatile and powerful odorous thiols in bordeaux red wine varieties. *J. Agric. Food Chem.* 46, 3095–3099. doi: 10.1021/jf971027d
- Brandt, M., Scheidweiler, M., Rauhut, D., Claus-Dieter, P., Will, F., et al. (2019). The influence of temperature and solar radiation on phenols in berry skin and maturity parameters of *Vitis vinifera* L. cv. riesling. *OENO One* 53, 261–276. doi: 10.20870/oeno-one.2019.53.2.2424
- Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., and Kurtural, S. K. (2018). Applied water and mechanical canopy management affect berry and wine phenolic and aroma composition of grapevine (*Vitis vinifera* L., cv. Syrah) in Central California. *Sci. Hortic.* 227, 261–271. doi: 10.1016/j.scienta.2017.09.048
- Bureau, S. M., Razungles, A. J., and Baumes, R. L. (2000). The aroma of muscat of frontignan grapes: effect of the light environment of vine or bunch on volatiles and glycoconjugates. *J. Sci. Food Agric.* 80, 2012–2020. doi: 10.1002/1097-0010(200011)80:143.0.CO;2-X
- Carbonell-Bejerano, P., Diago, M. P., Martinez-Abaigar, J., Martinez-Zapater, J. M., Tardaguila, J., and Nunez-Olivera, E. (2014). Solar ultraviolet radiation is necessary to enhance grapevine fruit ripening transcriptional and phenolic responses. *BMC Plant Biol.* 14:183. doi: 10.1186/1471-2229-14-183
- Carbonell-Bejerano, P., Santa Maria, E., Torres-Perez, R., Royo, C., Lijavetzky, D., Bravo, G., et al. (2013). Thermotolerance responses in ripening berries of *Vitis vinifera* L. cv Muscat Hamburg. *Plant Cell Physiol.* 54, 1200–1216. doi: 10.1093/pcp/pct071
- Carbonneau, A. (1985). The early selection of grapevine rootstocks for resistance to drought conditions. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36(3), 195–198
- Cassandra, M. P., Edward, W. H., and Thayne, M. (2019). Light and temperature independently influence methoxypyrazine content of *Vitis vinifera* (cv. Cabernet Sauvignon) Berries. *HortSci. Horts* 54, 282–288. doi: 10.21273/HORTSCI13634-18
- Castellarin, S. D., Bavaresco, L., Falginella, L., Gonçalves, M. I. V. Z., and di Gaspero, G., (2012). “Phenolics in grape berry and key antioxidants,” in *In The Biochemistry of the Grape Berry*, eds H. Gerós, M. Chaves, and S. Delrot (Bussum: Bentham Science), 89–110. doi: 10.2174/978160805360511201010089
- Castellarin, S. D., Matthews, M. A., Di Gaspero, G., and Gambetta, G. A. (2007a). Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta* 227, 101–112. doi: 10.1007/s00425-007-0598-8
- Celette, F., and Gary, C. (2013). Dynamics of water and nitrogen stress along the grapevine cycle as affected by cover cropping. *Eur. J. Agron.* 45, 142–152. doi: 10.1016/j.eja.2012.10.001
- Celette, F., Gaudin, R., and Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *Eur. J. Agron.* 29, 153–162. doi: 10.1016/j.eja.2008.04.007
- Chalons, P., Amor, S., Courtaut, F., Cantos-Villar, E., Richard, T., Auger, C., et al. (2018). Study of potential anti-inflammatory effects of red wine extract and resveratrol through a modulation of interleukin-1-beta in macrophages. *Nutrients* 10:1856. doi: 10.3390/nu10121856.
- Cholet, C., Claverol, S., Claisse, O., Rabot, A., Osowsky, A., Dumot, V., et al. (2016). Tartaric acid pathways in *Vitis vinifera* L. (cv. Ugni blanc): a comparative study of two vintages with contrasted climatic conditions. *BMC Plant Biol.* 16:144. doi: 10.1186/s12870-016-0833-1

- Chorti, E., Kyraleou, M., Kallitharaka, S., Pavlidis, M., Koundouras, S., and Kotseridis, Y. (2016). Irrigation and leaf removal effects on polyphenolic content of grapes and wines produced from cv. "Agiorgitiko" (*Vitis vinifera* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 44, 133–139. doi: 10.15835/nbha44110254
- Chuine, I., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Daux, V., and Ladurie, E. L. R. (2004). Grape ripening as a past climate indicator. *Nature* 432, 289–290. doi: 10.1038/432289.
- Cohen, S. D., Tarara, J. M., Gambetta, G. A., Matthews, M. A., and Kennedy, J. A. (2012a). Impact of diurnal temperature variation on grape berry development, proanthocyanidin accumulation, and the expression of flavonoid pathway genes. *J. Exp. Bot.* 63, 2655–2665. doi: 10.1093/jxb/err449
- Cohen, S. D., Tarara, J. M., and Kennedy, J. A. (2012b). Diurnal temperature range compression hastens berry development and modifies flavonoid partitioning in grapes. *Am. J. Enol. Vitic.* 63, 112–120. doi: 10.5344/ajev.2011.11015
- Conde, A., Neves, A., Breia, R., Pimentel, D., Dinis, L. T., Bernardo, S., et al. (2018). Kaolin particle film application stimulates photoassimilate synthesis and modifies the primary metabolome of grape leaves. *J. Plant Physiol.* 223, 47–56. doi: 10.1016/j.jplph.2018.02.004
- Conde, A., Pimentel, D., Neves, A., Dinis, L. T., Bernardo, S., Correia, C. M., et al. (2016). Kaolin foliar application has a stimulatory effect on phenylpropanoid and flavonoid pathways in grape berries. *Front. Plant Sci.* 7. doi: 10.3389/fpls.2016.01150
- Cook, B. I., and Wolkovich, E. M. (2016). Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *Nat. Clim. Chang.* 6:715. doi: 10.1038/nclimate2960.
- Cook, M. G., Zhang, Y., Nelson, C. J., Gambetta, G., Kennedy, J. A., and Kurtural, S. K. (2015). Anthocyanin composition of merlot is ameliorated by light microclimate and irrigation in Central California. *Am. J. Enol. Vitic.* 66, 266–278. doi: 10.5344/ajev.2015.15006
- Curtin, D., Beare, M. H., and Hernandez-Ramirez, G. (2012). Temperature and moisture effects on microbial biomass and soil organic matter mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 2055–2067. doi: 10.2136/sssaj2012.0011
- Darriet, P., Thibon, C., and Dubourdieu, D. (2012). "Aroma and aroma precursors in grape," in *The Biochemistry of the Grape Berry*, eds H. Gerós, M. Chaves, and S. Delrot (Bussum, NLD: Bentham Science Publishers Ltd.), 111–136. doi: 10.2174/978160805360511201010111
- Degu, A., Hochberg, U., Wong, D. C. J., Alberti, G., Lazarovitch, N., Peterlunger, E., et al. (2019). Swift metabolite changes and leaf shedding are milestones in the acclimation process of grapevine under prolonged water stress. *BMC Plant Biology*, 19, 69. 1.
- Dinis, L. T., Ferreira, H., Pinto, G., Bernardo, S., Correia, C. M., and MoutinhoPereira, J. (2016). Kaolin-based, foliar reflective film protects photosystem II structure and function in grapevine leaves exposed to heat and high solar radiation. *Photosynthetica* 54, 47–55. doi: 10.1007/s11099-015-0156-8
- di Vaio, C., Marallo, N., di Lorenzo, R., & Pisciotta, A. (2019). Anti-transpirant effects on vine physiology, berry and wine composition of cv. Aglianico (*Vitis vinifera* L.) grown in South Italy. *Agronomy*, 9, 244. 15 pp
- Dokoozlian, N., and Kliewer, W. M. (1996). Influence of light on grape berry growth and composition varies during fruit development *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121, 869–874. doi: 10.21273/JASHS.121.5.869.

- Downey, M. O., Harvey, J. S., and Robinson, S. P. (2004). The effect of bunch shading on berry development and flavonoid accumulation in Shiraz grapes. *Aust. J. Grape Wine Res.* 10, 55–73. doi: 10.1111/j.1755-0238.2004.tb00008.x
- Duchêne, E. (2016). How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change? *OENO One* 50, 113–119. doi: 10.20870/oeno-one.2016.50.3.98
- Duchêne, E., and Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain. Dev.* 25, 93–99. doi: 10.1051/agro:2004057.
- Dunlevy, J. D., Dennis, E. G., Soole, K. L., Perkins, M. V., Davies, C., and Boss, P. K. (2013). A methyltransferase essential for the methoxypyrazine-derived flavour of wine. *Plant J.* 75, 606–617. doi: 10.1111/tpj.12224
- Düring, H. (1984). Evidence for osmotic adjustment to drought in grapevines. *Vitis*, 23, 1–10.
- Duteau, J., Guilloux, M., and Seguin, G. (1981). Influence des facteurs naturels sur la maturation du raisin, en 1979, à Pomerol et Saint-Emilion. *Connaissances de la Vigne et du Vin*, 15(3), 1–27.
- Edwards, E. J., & Clingeleffer, P. R. (2011). Optimising canopy function to increase yield while maintaining wine quality with efficient use of resources. Final report to the Australian Grape and Wine Research Development Corporation, Adelaide, SA.
- Edwards, E. J., & Clingeleffer, P. R. (2013). Interseasonal effects of regulated deficit irrigation on growth, yield, water use, berry composition and wine attributes of Cabernet Sauvignon grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19, 261–276
- Edwards, E. J., Unwin, D., Kilmister, R., and Treeby, M. (2017). Multi-seasonal effects of warming and elevated CO<sub>2</sub>; on the physiology, growth and production of mature, field grown, Shiraz grapevines. *OENO One* 51, 127–132.
- Edwards, E. J., Unwin, D. J., Sommer, K. J., Downey, M. O., and Mollah, M. (2016). The response of commercially managed, field grown, grapevines (*Vitis vinifera* L.) to a simulated future climate consisting of elevated CO<sub>2</sub> in combination with elevated air temperature. *Acta Hort.* 1115, 103–110.
- Etienne, A., Genard, M., Lobit, P., Mbeguie-A-Mbeguie, D., and Bugaud, C. (2013). What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells. *J. Exp. Bot.* 64, 1451–1469. doi: 10.1093/jxb/ert035.
- European Environment Agency. (2017). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. EEA Report No 1/2017.
- EUROSTAT. (2018). Agricultural census in Italy: Statistics explained.
- Falcão, L. D., de Revel, G., Perello, M. C., Moutsiou, A., Zanús, M. C., and Bordignon-Luiz, M. T. (2007). A Survey of seasonal temperatures and vineyard altitude influences on 2-methoxy-3-isobutylpyrazine, C13-norisoprenoids, and the sensory Profile of Brazilian Cabernet Sauvignon wines. *J. Agric. Food Chem.* 55, 3605–3612. doi: 10.1021/jf070185u
- Faralli, M., Grove, I. G., Hare, M. C., Boyle, R. D., Williams, K. S., Corke, F. M. K., et al. (2016). Canopy application of film antitranspirants over the reproductive phase enhances yield and yield-related physiological traits of water-stressed oilseed rape (*Brassica napus*). *Crop and Pasture Science*, 67, 751–765
- Favre, G., Piccardo, D., Sergio, G.-A., Pérez-Navarro, J., García-Romero, E., Mena-Morales, A., et al. (2020). Stilbenes in grapes and wines of Tannat, Marselan and Syrah from Uruguay. *OENO One* 54, 27–36. doi: 10.20870/oeno-one.2020.54.1.2576

- Fernandes de Oliveira, A., Mercenaro, L., Del Caro, A., Pretti, L., and Nieddu, G. (2015). Distinctive anthocyanin accumulation responses to temperature and natural UV radiation of two field-grown (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Molecules* 20, 2061–2080. doi: 10.3390/molecules20022061
- Ferreira, B., Hory, C., Bard, M. H., Taisant, C., Olsson, A., and Le Fur, Y. (1995). Effects of skin contact and settling on the level of the C18:2, C18:3 fatty acids and C6 compounds in burgundy chardonnay musts and wines. *Food Qual. Prefer.* 6, 35–41. doi: 10.1016/0950-3293(94)P4210-W
- Fretz, C., Kanel, S., Luisier, J. L., and Amado, R. (2005). Analysis of volatile components of petite arvine wine. *Eur. Food Res. Technol.* 221, 504–510. doi: 10.1007/s00217-005-1163-y
- Friend, A. P., and Trought, M. C. (2007). Delayed winter spur-pruning in new Zealand can alter yield components of merlot grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res.* 13, 157–164. doi: 10.1111/j.1755-0238.2007.tb00246.x
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H., and Metay, A. (2018). Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 251, 158–170. doi: 10.1016/j.agee.2017.09.030
- Gatti, M., Galbignani, M., Garavani, A., Bernizzoni, F., Tombesi, S., Palliotti, A., et al. (2016). Manipulation of ripening via antitranspirants in cv. barbera (*Vitis vinifera* L.). *Aust. J. Grape Wine Res.* 22, 245–255. doi: 10.1111/ajgw.12212
- Gatto, P., Vrhovsek, U., Muth, J., Segala, C., Romualdi, C., Fontana, P., et al. (2008). Ripening and genotype control stilbene accumulation in healthy grapes. *J. Agric. Food Chem.* 56, 11773–11785. doi: 10.1021/jf8017707
- Geffroy, O., Armario, M., Fontaine, A., Fourure, M., Pasquier, G., Semadeni, T., et al. (2020). 3-Isobutyl-2-methoxypyrazine is neutrally perceived by consumers at usual concentrations in French Sauvignon and Fer wines from the Gaillac area. *OENO One* 54, 1133–1142. doi: 10.20870/oenone.2020.54.4.4492
- Geffroy, O., Descôtes, J., Serrano, E., Li Calzi, M., Dagan, L., and Schneider, R. (2018). Can a certain concentration of rotundone be undesirable in Duras red wine? A study to estimate a consumer rejection threshold for the pepper aroma compound. *Aust. J. Grape Wine Res.* 24, 88–95. doi: 10.1111/ajgw.12299
- Geffroy, O., Dufourcq, T., Carcenac, D., Siebert, T., Herderich, M., and Serrano, E. (2014). Effect of ripeness and viticultural techniques on the rotundone concentration in red wine made from *Vitis vinifera* L. cv. Duras. *Food Res. Technol.* 20, 401–408. doi: 10.1111/ajgw.12084
- Ghaffari, S., Reynard, J. S., and Rienth, M. (2020). Single berry sampling reveals new insights into transcriptomic reprogramming of grapevine (*V. vinifera*) berries caused by leafroll virus infections *Sci. Rep.* 10:12905. doi: 10.1038/s41598-020-69779-1.
- Gindro, K., Alonso-Villaverde, V., Viret, O., Spring, J.-L., Marti, G., Wolfender, J.-L., et al. (2012). “Stilbenes: biomarkers of grapevine resistance to disease of high relevance for agronomy, oenology and human health,” in *Plant Defence: Biological Control*, eds J. M. Méridon, and K. G. Ramawat (Dordrecht: Springer Netherlands), 25–54. doi: 10.1007/978-94-007-1933-0\_2.
- Goncalves, B., Falco, V., Moutinho-Pereira, J., Bacelar, E., Peixoto, F., and Correia, C. (2009). Effects of elevated CO<sub>2</sub> on grapevine (*Vitis vinifera* L.): volatile composition, phenolic content, and in vitro antioxidant activity of red wine. *J. Agric. Food Chem.* 57, 265–273.
- Goode, J. (2012). Viticulture: fruity with a hint of drought. *Nature* 492 (7429), 351. doi: 10.1038/492351a

- Gouot, J. C., Smith, J. P., Holzapfel, B. P., and Barril, C. (2019). Impact of short temperature exposure of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz grapevine bunches on berry development, primary metabolism and tannin accumulation. *Environ. Exp. Bot.* 168:103866. doi: 10.1016/j.envexpbot.2019.103866
- Greer, D. H., and Weedon, M. M. (2014). Does the hydrocooling of *vitis vinifera* cv. semillon vines protect the vegetative and reproductive growth processes and vine performance against high summer temperatures? *Funct. Plant Biol.* 41, 620–633. doi: 10.1071/FP13286
- Gregan, S. M., and Jordan, B. (2016). Methoxypyrazine accumulation and Omethyltransferase gene expression in Sauvignon blanc grapes: the role of leaf removal, light exposure, and berry development. *J. Agric. Food Chem.* 64, 2200–2208. doi: 10.1021/acs.jafc.5b05806
- Guan, L., Dai, Z., Wu, B.-H., Wu, J., Merlin, I., Hilbert, G., et al. (2016). Anthocyanin biosynthesis is differentially regulated by light in the skin and flesh of white-fleshed and teinturier grape berries. *Planta* 243, 23–41. doi: 10.1007/s00425-015-2391-4
- Guerrero, R. F., Garcia-Parrilla, M. C., Puertas, B., and Cantos-Villar, E. (2009). Wine, resveratrol and health: a review. *Nat. Prod. Commun.* 4, 635–658. doi: 10.1177/1934578X0900400503.
- Guilpart, N., Metay, A., and Gary, C. (2014). Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *European Journal of Agronomy*, 54, 9–20.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—The CRU TS3.10 dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623–642.
- Harris, S. A., Ryona, I., and Sacks, G. L. (2012). Behavior of 3-Isobutyl-2-hydroxypyrazine (IBHP), a key intermediate in 3-isobutyl-2-methoxypyrazine (IBMP) metabolism, in ripening wine grapes. *J. Agric. Food Chem.* 60, 11901–11908. doi: 10.1021/jf302990m
- Hayman, P., Longbottom, M., McCarthy, M., and Thomas, D. (2012) Managing grapevines during heatwaves. GWRDC pp.1-6
- Helbaek, H. (1969). Plant collecting, dry-farming, and irrigation agriculture in prehistoric Deh Luran. In F. Hole, K. V. Flannery, & J. A. Neely (Eds.), *Prehistory and human ecology of the Deh Luran plain. An early village sequence from Khuzistan, Iran* (pp. 383–426). Ann Arbor, MI, USA: *Memoirs of the Museum of Anthropology*. No. 1.
- Holzapfel, B. P., Smith, J. P., Field, S. K., & Hardie, W. J. (2010). Dynamics of carbohydrate reserves in cultivated grapevines. In J. Janick (Ed.), *Horticultural reviews: Vol. 37* (pp. 143–211).
- Howell, K. S., Klein, M., Swiegers, J. H., Hayasaka, Y., Elsey, G. M., Fleet, G. H., et al. (2005). Genetic determinants of volatile-thiol release by *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation. *Appl. Environ. Microbiol.* 71, 5420–5426. doi: 10.1128/AEM.71.9.5420-5426.2005
- Hsiao, T. (1973). Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24, 519–570.
- Ilc, T., Werck-Reichhart, D., and Navrot, N. (2016). Meta-analysis of the core aroma components of grape and wine aroma. *Front. Plant Sci.* 7:1472. doi: 10.3389/fpls.2016.01472
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. In Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer (Eds.), *Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC. 151 pp.
- Jones, G. V., and Davis, R. E. (2000). Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *Am. J. Enol. Vitic.* 51, 249–261. doi: 10.5344/ajev.2000.51.3.249.

- Jones, G.V., Edwards, E.J., Bonada, M., Sadras, V.O., Krstic, M.P., Herderich, M.J., 2022. 17 - Climate change and its consequences for viticulture. In: Reynolds, A.G. (Ed.), *Managing Wine Quality* (Second Edition). Woodhead Publishing, pp. 727-778.
- Jones, G.V., Webb, L.B., 2010. Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research* 21, 103-106.
- Journal Officiel de La Republique Française. (2006). Decret n° 2006-1527 du 4 decembre 2006 relatif a` l'irrigation des vignobles aptes a` la production de vins a` appellation d'origine. *Journal Officiel de La Republique Française*, 2
- Kalua, C. M., and Boss, P. K. (2009). Evolution of volatile compounds during the development of cabernet sauvignon grapes (*Vitis vinifera* L.). *J. Agric. Food Chem.* 57, 3818–3830. doi: 10.1021/jf803471n
- Keller, M. (2010b). Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Aust. J. Grape Wine Res.* 16, 56–69. doi: 10.1111/j.1755-0238.2009.0 0077.x.
- Keller, M., and Torres-Martinez, N. (2004). Does UV radiation affect winegrape composition? *Acta Hortic.* 640, 313–319. doi: 10.17660/ActaHortic.2004.640.36
- Kennedy, J. A., Saucier, C., and Glories, Y. (2006). Grape and wine phenolics: history and perspective. *Am. J. Enol. Vitic.* 57, 239–248
- Kizildeniz, T., Mekni, I., Santesteban, H., Pascual, I., Morales, F., and Irigoyen, J. J. (2015). Effects of climate change including elevated CO<sub>2</sub> concentration, temperature and water deficit on growth, water status, and yield quality of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Agric. Water Manage.* 159, 155–164.
- Kliwer, W. M., and Torres, R. E. (1972). Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *Am. J. Enol. Vitic.* 23, 71–77.
- Koch, B., Oehl, F., 2018. Climate Change Favors Grapevine Production in Temperate Zones. *Agricultural Sciences* 9, 247-263.
- Koundouras, S. (2018). Environmental and viticultural effects on grape composition and wine sensory properties. *Elements* 14, 173–178. doi: 10.2138/gselements.14.3.173
- Koundouras, S., Hatzidimitriou, E., Karamolegkou, M., Dimopoulou, E., Kallithraka, S., Tsialtas, J. T., et al. (2009). Irrigation and rootstock effects on the phenolic concentration and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon grapes. *J. Agric. Food Chem.* 57, 7805–7813. doi: 10.1021/jf901063a
- Koyama, K., Ikeda, H., Poudel, P. R., and Goto-Yamamoto, N. (2012). Light quality affects flavonoid biosynthesis in young berries of Cabernet Sauvignon grape. *Phytochemistry* 78, 54–64. doi: 10.1016/j.phytochem.2012.02.026
- Kwasniewski, M. T., Vanden Heuvel, J. E., Pan, B. S., and Sacks, G. L. (2010). Timing of cluster light environment manipulation during grape development affects C13 norisoprenoid and carotenoid concentrations in riesling. *J. Agric. Food Chem.* 58, 6841–6849. doi: 10.1021/jf904555p
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., and Schultz, H. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30(6), 699–710.
- Lebon, E., Pellegrino, A., Louarn, G., and Lecoeur, J. (2006). Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera*) growing in drying soil. *Annals of Botany*, 98(1), 175–185.



- Lei, Y., Xie, S., Guan, X., Song, C., Zhang, Z., and Meng, J. (2018). Methoxypyrazines biosynthesis and metabolism in grape: a review. *Food Chem.* 245, 1141–1147. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.11.056
- Lecourieux, F., Kappel, C., Pieri, P., Charon, J., Pillet, J., Hilbert, G., et al. (2017). Dissecting the biochemical and transcriptomic effects of a locally applied heat treatment on developing cabernet sauvignon grape berries. *Front. Plant Sci.* 8:53. doi: 10.3389/fpls.2017.00053.
- Lin, J., Massonnet, M., and Cantu, D. (2019). The genetic basis of grape and wine aroma. *Hortic. Res.* 6:81. doi: 10.1038/s41438-019-0163-1
- Liu, L., Gregan, S., Winefield, C., and Jordan, B. (2015). From UVR8 to flavonol synthase: UV-B-induced gene expression in Sauvignon blanc grape berry. *Plant Cell Environ.* 38, 905–919. doi: 10.1111/pce.12349
- Loescher, W. H., McCamant, T., and Keller, J. D. (1990). Carbohydrate reserves, translocation, and storage in woody plant roots. *HortSci* 25, 274–281
- Longbottom, M. L., and Petrie, P. R. (2015). Role of vineyard practices in generating and mitigating greenhouse gas emissions. *Aust. J. Grape Wine Res.* 21, 522–536. doi: 10.1111/ajgw.12197
- Louarn, G., Lecoeur, J., & Lebon, E. (2008). A three-dimensional statistical reconstruction model of grapevine (*Vitis vinifera*) simulating canopy structure variability within and between cultivar/training system pairs. *Annals of Botany*, 101, 1167–1184.
- Loyola, R., Herrera, D., Mas, A., Wong, D. C., Holl, J., Cavallini, E., et al. (2016). The photomorphogenic factors UV-B RECEPTOR 1, ELONGATED HYPOCOTYL 5, and HY5 HOMOLOGUE are part of the UV-B signalling pathway in grapevine and mediate flavonol accumulation in response to the environment. *J. Exp. Bot.* 67, 5429–5445. doi: 10.1093/jxb/erw307
- MAAMA. (2013). Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos en España (ESYRCE 2012). Madrid, Spain: Ministerio De Agricultura, Alimentación Y Medio Ambiente
- Maga, J. A. (1992). Pyrazine update. *Food Rev. Int.* 8, 479–558. doi: 10.1080/87559129209540951
- MAPA. (2019). Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos: Informe Sobre Regadíos en España. Madrid, Spain: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
- Marais, J., Van Wyk, C. J., and Rapp, A. (1991). Carotenoid levels in maturing grapes as affected by climatic regions, sunlight and shade. *S. Afr.J. Enol. Vitic.* 12, 64–69. doi: 10.21548/12-2-2209
- Marais, J., van Wyk, C. J., and Rapp, A. (1992). Effect of storage time, temperature and region on the levels of 1,l,6-Trimethyl-1,2-dihydronaphthalene and other volatiles, and on quality of weisser riesling wines. *S. Afr.J. Enol. Vitic.* 13, 33–44. doi: 10.21548/13-1-2197
- Martin, D., Grose, C., Fedrizzi, B., Stuart, L., Albright, A., and McLachlan, A. (2016). Grape cluster microclimate influences the aroma composition of Sauvignon blanc wine. *Food Chem.* 210, 640–647. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.010
- Martínez-Lüscher, J., Torres, N., Hilbert, G., Richard, T., Sánchez-Díaz, M., Delrot, S., et al. (2014). Ultraviolet-B radiation modifies the quantitative and qualitative profile of flavonoids and amino acids in grape berries. *Phytochemistry* 102, 106–114. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.03.014
- Matthews, M., and Anderson, M. (1988). Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture.* 39(4), 313–320.
- Matus, J. T., Loyola, R., Vega, A., Peña-Neira, A., Bordeu, E., Arce-Johnson, P., et al. (2009). Post-veraison sunlight exposure induces MYB-mediated transcriptional regulation of anthocyanin

- and flavonol synthesis in berry skins of *Vitis vinifera*. *J. Exp. Bot.*, 60, 853–867. doi: 10.1093/jxb/ern336
- McCarthy, M. G. (1997). Effect of timing of water deficit on fruit development and composition of *Vitis vinifera* cv. Shiraz (Ph.D. thesis). SA, Australia: University of Adelaide
- Mendez-Costabel, M. P., Wilkinson, K. L., Bastian, S. E. P., Jordans, C., McCarthy, M., Ford, C. M., et al. (2014). Effect of winter rainfall on yield components and fruit green aromas of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot in California. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20, 100–110.
- Meng, X., Li, B., Liu, J., and Tian, S. (2008). Physiological responses and quality attributes of table grape fruit to chitosan preharvest spray and postharvest coating during storage. *Food Chem.* 106, 501–508. doi: 10.1016/j.foodchem.2007.06.012
- Mira de Orduna, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* 43, 1844–1855. doi: 10.1016/j.foodres.2010.05.001.
- Moran, M. A., Sadras, V. O., and Petrie, P. R. (2017). Late pruning and carryover effects on phenology, yield components and berry traits in Shiraz. *Aust. J. Grape Wine Res.* 23, 390–398. doi: 10.1111/ajgw.12298
- Moreno, J. M., Aguilo', E., Alonso, S., A' lvarez Cobelas, M., Anado'n, R., Ballester, F., et al. (2005). Main conclusions from the preliminary assessment of the impacts in Spain due Climate change and its consequences for viticulture 739 to the effects of climate change. Project ECCE. Ministry of the Environment and the University of Castilla-La Mancha (Spain).
- Mori, K., Goto-Yamamoto, N., Kitayama, M., and Hashizume, K. (2007). Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *J. Exp. Bot.* 58, 1935–1945. doi: 10.1093/jxb/erm055
- Mori, K., Sugaya, S., and Gemma, H. (2005). Decreased anthocyanin biosynthesis in grape berries grown under elevated night temperature condition. *Sci. Hortic.* 105, 319–330. doi: 10.1016/j.scienta.2005.01.032.
- Moutinho-Pereira, J., Goncalves, B., Bacelar, E., Boaventura Cunha, J., Coutinho, J. C., and Correia, M. C. (2009). Effects of elevated CO<sub>2</sub> on grapevine (*Vitis vinifera* L.): physiological and yield attributes. *Vitis* 48, 159–165.
- Movahed, N., Pastore, C., Cellini, A., Allegro, G., Valentini, G., Zenoni, S., et al. (2016). The grapevine VviPrx31 peroxidase as a candidate gene involved in anthocyanin degradation in ripening berries under high temperature. *J. Plant Res.* 129, 513–526. doi: 10.1007/s10265-016-0786-3
- Murray, M. A., Boulton, N., & Heron, C. (2009). Viticulture and wine production. In P. T. Nicholson, & I. Shaw (Eds.), *Ancient Egyptian materials and technology* (pp. 577–608). Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Niculcea, M., López, J., Sánchez-Díaz, M., and Carmen Antolín, M. (2014). Involvement of berry hormonal content in the response to pre- and postveraison water deficit in different grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Aust. J. Grape Wine Res.* 20, 281–291. doi: 10.1111/ajgw.12064
- Ollat, N., Peccoux, A., Papura, D., Esmenjaud, D., Marguerit, E., Tandonnet, J., et al. (2016). “Rootstocks as a component of adaptation to environment,” in *Grapevine in a Changing Environment*, eds M. M. C. H. Gerós, H. M. Gil, and S. Delrot (John Wiley & Sons) 68–108. doi: 10.1002/9781118735985.ch4
- Ollé, D., Guiraud, J. L., Souquet, J. M., Terrier, N., Ageorges, A., Cheynier, V., et al. (2011). Effect of pre- and post-veraison water deficit on proanthocyanidin and anthocyanin accumulation during Shiraz berry development. *Aust J Grape Wine Res.* 17, 90–100. doi: 10.1111/j.1755-0238.2010.0 0121.x

- Palliotti, A., Panara, F., Famiani, F., Sabbatini, P., Howell, G. S., Silvestroni, O., et al. (2013). Postveraison application of antitranspirant di-1-p-menthene to control sugar accumulation in sangiovese grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 64, 378–385. doi: 10.5344/ajev.2013.13015
- Parker, M., Capone, D. L., Francis, I. L., and Herderich, M. J. (2018). Aroma precursors in grapes and wine: flavor release during wine production and consumption. *J. Agric. Food Chem.* 66, 2281–2286. doi: 10.1021/acs.jafc.6b05255
- Pastore, C., Dal Santo, S., Zenoni, S., Movahed, N., Allegro, G., Valentini, G., et al. (2017). Whole plant temperature manipulation affects flavonoid metabolism and the transcriptome of grapevine berries. *Front. Plant Sci.* 8:929. doi: 10.3389/fpls.2017.00929
- Patakas, A., Nikolaou, N., Zioziou, E., Radoglou, K., & Noitsakis, B. (2002). The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Science*, 163, 361–367.
- Petrie, P. R., and Sadras, V. O. (2008). Advancement of grapevine maturity in Australia between 1993 and 2006: putative causes, magnitude of trends and viticultural consequences. *Aust. J. Grape Wine Res.* 14, 33–45. doi: 10.1111/j.1755-0238.2008.00005.x
- Peyrot des Gachons, C., van Leeuwen, C., Tominaga, T., Soyer, J.-P., Gaudillere, J.-P., and Dubourdieu, D. (2005). Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv Sauvignon blanc in field conditions. *Science of Food and Agriculture*, 85(1), 73–85.
- Pichersky, E., and Raguso, R. A. (2018). Why do plants produce so many terpenoid compounds? *New Phytol.* 220, 692–702. doi: 10.1111/nph.14178
- Pieri, P. (2010). Changement climatique et culture de la vigne: l'essentiel des impacts. In N. Brisson and F. Levrault (eds.), *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 213–224.
- Pieri, P., Zott, K., Gomès, E., Hilbert, G., 2016. Nested effects of berry half, berry and bunch microclimate on biochemical composition in grape. *OENO One* 50, 11
- Pinamonti, F. (1998). Compost mulch effects on soil fertility, nutritional status and performance of grapevine. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 239–248
- Pons, A., Allamy, L., Lavigne, V., Dubourdieu, D., and Darriet, P. (2017a). Study of the contribution of massoia lactone to the aroma of Merlot and Cabernet Sauvignon musts and wines. *Food Chem.* 232, 229–236. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.151
- Possingham, J., Kerridge, G., & Bottrill, D. (1969). Studies with antitranspirants on grapevines (*Vitis vinifera* var. Sultana). *Australian Journal of Agricultural Research*, 20, 57
- Possner, D., Ruffner, H. P., and Rast, D. M. (1983). Regulation of malic acid metabolism in berries of *Vitis vinifera*. *Acta Hort.* 139, 117–122. doi: 10.17660/ActaHortic.1983.139.16
- Ramírez-Garza, S. L., Laveriano-Santos, E. P., Marhuenda-Muñoz, M., Storniolo, C. E., Tresserra-Rimbau, A., Vallverdú-Queralt, A., et al. (2018). Health effects of resveratrol: results from human intervention trials. *Nutrients* 10:1892. doi: 10.3390/nu10121892
- Ramos, M. C., Jones, G. V., & Martinez-Casasnovas, J. A. (2008). Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in Northeast Spain. *Climate Research*, 38, 1–15.
- Rienth, M., Crovadore, M., Ghaffari, S., and Lefort, F. (2019). Oregano essential oil vapour prevents *Plasmopora viticola* infection in grapevine (*Vitis vinifera*) by triggering autoimmune metabolic pathway. *PLoS ONE* 14:e0222854. doi: 10.1371/journal.pone.0222854
- Rienth, M., Lamy, F., Schoenenberger, P., Noll, D., Lorenzini, F., Viret, O., et al. (2020). A vine physiology-based terroir study in the AOC-Lavaux region in Switzerland: This article is

- published in cooperation with the XIIIth International Terroir Congress November 17-18 2020, Adelaide, Australia. *OENO One* 54, 863–880. doi: 10.20870/oenone.2020.54.4.3756
- Rienth, M., Torregrosa, L., Luchaire, N., Chatbanyong, R., Lecourieux, D., Kelly, M., et al. (2014b). Day and night heat stress trigger different transcriptomic responses in green and ripening grapevine (*Vitis vinifera*) fruit. *BMC Plant Biol.* 14:108. doi: 10.1186/1471-2229-14-108
- Rienth, M., Vigneron, N., Darriet, P., Sweetman, C., Burbidge, C., Bonghi, C., Walker, R.P., Famiani, F., Castellarin, S.D., 2021. Grape Berry Secondary Metabolites and Their Modulation by Abiotic Factors in a Climate Change Scenario—A Review. *Frontiers in Plant Science* 12
- Rogiers, S. Y., Clarke, S. J., and Schmidtke, L. M. (2014). Elevated root-zone temperature hastens vegetative and reproductive development in Shiraz grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res.* 20, 123–133. doi: 10.1111/ajgw.12053.
- Rogiers, S.Y., Greer, D.H., Liu, Y., Baby, T., Xiao, Z., 2022. Impact of climate change on grape berry ripening: An assessment of adaptation strategies for the Australian vineyard. *Frontiers in Plant Science* 13
- Rogiers, S. Y., and Fahey, D. J. (2019). Di-1-p-menthene reduces grape leaf and bunch transpiration. *Aust. J. Grape Wine Res.* 25, 134–141. doi: 10.1111/ajgw.12371
- Roncoroni, M., Santiago, M., Hooks, D. O., Moroney, S., Harsch, M. J., Lee, S. A., et al. (2011). The yeast IRC7 gene encodes a  $\beta$ -lyase responsible for production of the varietal thiol 4-mercapto-4-methylpentan-2-one in wine. *Food Microbiol.* 28, 926–935. doi: 10.1016/j.fm.2011.01.002
- Rösti, J., Schumann, M., Cleroux, M., Lorenzini, F., Zufferey, V., and Rienth, M. (2018). Effect of drying on tartaric acid and malic acid in Shiraz and Merlot berries. *Aust. J. Grape Wine Res.* 24, 421–429. doi: 10.1111/ajgw.12344
- Roujou de Boubée, D., Van Leeuwen, C., and Dubourdieu, D. (2000). Organoleptic impact of 2-methoxy-3-isobutylpyrazine on red bordeaux and loire wines. Effect of environmental conditions on concentrations in grapes during ripening. *J. Agric. Food Chem.* 48, 4830–4834. doi: 10.1021/jf000181o
- Ruffner, H. P., and Hawker, J. S. (1977). Control of glycolysis in ripening berries of *Vitis vinifera*. *Phytochemistry* 16, 1171–1175. doi: 10.1016/S0031-9422(00)94354-1
- Ruffner, H. P., Hawker, J. S., and Hale, C. R. (1976). Temperature and enzymic control of malate metabolism in berries of *Vitis vinifera*. *Phytochemistry* 15, 1877–1880. doi: 10.1016/S0031-9422(00)88835-4
- Ryona, I., Pan, B. S., Intrigliolo, D. S., Lakso, A. N., and Sacks, G. L. (2008). Effects of cluster light exposure on 3-isobutyl-2-methoxypyrazine accumulation and degradation patterns in red wine grapes (*Vitis vinifera* L. Cv. Cabernet Franc). *J. Agric. Food Chem.* 56, 10838–10846. doi: 10.1021/jf801877y
- Sadras, V. O., and Moran, M. A. (2012). Elevated temperature decouples anthocyanins and sugars in berries of Shiraz and Cabernet Franc. *Aust. J. Grape Wine Res.* 18, 115–122. doi: 10.1111/j.1755-0238.2012.00180.x
- Sadras, V. O., and Petrie, P. R. (2011). Climate shifts in south-eastern Australia: early maturity of Chardonnay, Shiraz and Cabernet sauvignon is associated with early onset rather than faster ripening. *Aust. J. Grape Wine Res.* 17, 199–205. doi: 10.1111/j.1755-0238.2011.00138.x
- Sala, C., Busto, O., Guasch, J., and Zamora, F. (2004). Influence of vine training and sunlight exposure on the 3-alkyl-2-methoxypyrazines content in musts and wines from the *Vitis vinifera* variety cabernet sauvignon. *J. Agric. Food Chem.* 52, 3492–3497. doi: 10.1021/jf049927z

- Salazar-Parra, C., Aguirreolea, J., Sanchez-Diaz, M., Irigoyen, J. J., and Morales, F. (2012). Climate change (elevated CO<sub>2</sub>), elevated temperature and moderate drought) triggers the antioxidant enzymes' response of grapevine cv. Tempranillo, avoiding oxidative damage. *Physiol Plant* 144, 99–110. doi: 10.1111/j.1399-3054.2011.01524.x
- Salehi, B., Mishra, A. P., Nigam, M., Sener, B., Kilic, M., Sharifi-Rad, M., et al. (2018). Resveratrol: a double-edged sword in health benefits. *Biomedicines* 6:91. doi: 10.3390/biomedicines6030091
- Santesteban L., Miranda C., Urrestarazu J., Loidi M. and Royo J.B., 2016. Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semiarid conditions. *OENO One*, 50, in press.
- Santiago, M., and Gardner, R. C. (2015). Yeast genes required for conversion of grape precursors to varietal thiols in wine. *FEMS Yeast Res.* 15:fov034. doi: 10.1093/femsyr/fov034
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., et al. (2020). A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture. *Applied Science*, 10, 3092. 28 pp
- Santos-Sánchez, F., Salas-Coronado, R., Hernández-Carlos, B., and VillanuevaCañongo, C. (2019). "Shikimic acid pathway in biosynthesis of phenolic compounds," in *Plant Physiological Aspects of Phenolic Compounds*, ed M. Soto-Hernández (Intechopen) 1–15. doi: 10.5772/intechopen.83815
- Sasaki, K., Takase, H., Matsuyama, S., Kobayashi, H., Matsuo, H., Ikoma, G., et al. (2016). Effect of light exposure on linalool biosynthesis and accumulation in grape berries. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 80, 2376–2382. doi: 10.1080/09168451.2016.1217148
- Savoi, S., Wong, D. C. J., Degu, A., Herrera, J. C., Bucchetti, B., Peterlunger, E., et al. (2017). Multi-omics and integrated network analyses reveal new insights into the systems relationships between metabolites, structural genes, and transcriptional regulators in developing grape berries (*Vitis vinifera* L.) exposed to water deficit. *Front. Plant Sci.* 8:1124. doi: 10.3389/fpls.2017.01124
- Schultz, H. R. (2000). Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6, 2–12. doi: 10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x.
- Schultz, H. R., and Jones, G. V. (2010). Climate induced historic and future changes in viticulture. *J. Wine Res.* 21, 137–145. doi: 10.1080/09571264.2010.530098.
- Schüttler, A., Guthier, C., Stoll, M., Darriet, P., and Rauhut, D. (2015). "Impact of grape cluster defoliation on TDN potential in cool climate Riesling wines," in Paper presented at the 38th World Congress of Vine and Wine (Mainz). doi: 10.1051/bioconf/20150501006
- Sidhu, D., Lund, J., Kotseridis, Y., and Saucier, C. (2015). Methoxypyrazine analysis and influence of viticultural and enological procedures on their levels in grapes, musts, and wines. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 55, 485–502. doi: 10.1080/10408398.2012.658587
- Shellie, K. C. (2019). Comparison of sustained deficit and pre- and postveraison regulated deficit irrigation on Malbec and Syrah grapevines. *American Journal of Enology & Viticulture*, 70, 382–389
- Sivilotti, P., Falchi, R., Herrera, J. C., Skvarc, B., Butinar, L., Sternad Lemut, M., et al. (2017). Combined effects of early season leaf removal and climatic conditions on aroma precursors in Sauvignon Blanc grapes. *J. Agric. Food Chem.* 65, 8426–8434. doi: 10.1021/acs.jafc.7b03508
- Smart R., 1987. Influence of light on composition and quality of grapes. *Acta Hort.*, 206, 37-48.

- Song, J., Smart, R., Wang, H., Damberg, B., Sparrow, A., and Qian, M. C. (2015). Effect of grape bunch sunlight exposure and UV radiation on phenolics and volatile composition of *Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir wine. *Food Chem.* 173, 424–431. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.09.150
- Spayd, S. E., Tarara, J. M., Mee, D. L., and Ferguson, J. C. (2002). Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot Berries. *Am. J. Enology Viticult.* 53, 171–182. Available online at: <https://www.ajevonline.org/content/53/3/171>
- Steenwerth, K., and Belina, K. M. (2008). Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. *Appl. Soil Ecol.* 40, 359–369. doi: 10.1016/j.apsoil.2008.06.006
- Stummer, B., Francis, I., Zanker, T., Lattey, K., and Scott, E. (2005). Effects of powdery mildew on the sensory properties and composition of Chardonnay juice and wine when grape sugar ripeness is standardised. *Aust. J. Grape Wine Res.* 11, 66–76. doi: 10.1111/j.1755-0238.2005.tb00280.x
- Šuklje, K., Antalick, G., Coetzee, Z., Schmidtke, L. M., Baša Cesnik, H., Brandt, J., et al. (2014). Effect of leaf removal and ultraviolet radiation on the composition and sensory perception of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon Blanc wine. *Aust. J. Grape Wine Res.* 20, 223–233. doi: 10.1111/ajgw.12083
- Sun, R. Z., Cheng, G., Li, Q., He, Y. N., Wang, Y., Lan, Y. B., et al. (2017). Light-induced variation in phenolic compounds in cabernet sauvignon grapes (*Vitis vinifera* L.) involves extensive transcriptome reprogramming of biosynthetic enzymes, transcription factors, and phytohormonal regulators. *Front. Plant Sci.* 8:547. doi: 10.3389/fpls.2017.00547
- Sweetman, C., Deluc, L. G., Cramer, G. R., Ford, C. M., and Soole, K. L. (2009). Regulation of malate metabolism in grape berry and other developing fruits. *Phytochemistry* 70, 1329–1344. doi: 10.1016/j.phytochem.2009.08.006
- Sweetman, C., Sadras, V. O., Hancock, R. D., Soole, K. L., and Ford, C. M. (2014). Metabolic effects of elevated temperature on organic acid degradation in ripening *Vitis vinifera* fruit. *J. Exp. Bot.* 65, 5975–5988. doi: 10.1093/jxb/eru343
- Teixeira, A., Eiras-Dias, J., Castellarin, S., and Geros, H. (2013). Berry phenolics of grapevine under challenging environments. *Int. J. Mol. Sci.* 14, 18711–18739. doi: 10.3390/ijms140918711
- Theodorou, N., Nikolaou, N., Zioziou, E., Kyrleou, M., Stamatina, K., Kotseridis, Y., et al. (2019). Anthocyanin content and composition in four red winegrape cultivars (*Vitis vinifera* L.) under variable irrigation. *OENO One* 53, 39–51. doi: 10.20870/oeno-one.2019.53.1.2366
- Tomasi, D., Jones, G. V., Giust, M., Lovat, L., & Gaiotti, F. (2011). Grapevine phenology and climate change: Relationships and trends in the Veneto region of Italy for 1964–2009. *American Journal of Enology and Viticulture*, 62, 329–339.
- Tominaga, T., Baltenweck-Guyot, R., Gachons, C. P. D., and Dubourdieu, D. (2000). Contribution of volatile thiols to the aromas of white wines made from several *Vitis vinifera* grape varieties. 51, 178–181.
- Tominaga, T., Furrer, A., Henry, R., and Dubourdieu, D. (1998). Identification of new volatile thiols in the aroma of *Vitis vinifera* L. var. Sauvignon blanc wines. *Flav. Frag. J.* 13, 159–162. doi: 10.1002/(SICI)1099-1026(199805/06)13:33.0.CO;2-7
- Torregrosa, L., Rienth, M., Romieu, C., and Pellegrino, A. (2019). The microvine, a model for studies in grapevine physiology and genetics. *OENO One* 3, 373–391. doi: 10.20870/oeno-one.2019.53.3.2409.

- Torres, N., Martínez-Lüscher, J., Porte, E., and Kurtural, S. K. (2020a). Optimal ranges and thresholds of grape berry solar radiation for flavonoid biosynthesis in warm climates. *Front. Plant Sci.* 11:931. doi: 10.3389/fpls.2020.00931
- Tregat, O., van Leeuwen, C., Choné, X., and Gaudillere, J.-P. (2002). Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques: influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* L. cv Merlot, 2000, Bordeaux). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 36(3), 133–142.
- USGCRP. (2017). In D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart, & T. K. Maycock (Eds.), *Climate science special report: Fourth national climate assessment, volume I*. Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program. 470 pp.
- van Leeuwen, C., Darriet, P., 2016. The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics* 11, 150-167.
- Van Leeuwen, C., and Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *Oeno One* 51, 147–154. doi: 10.20870/oeno-one.2016.0.0.1647.
- van Leeuwen, C., and Seguin, G. (1994). Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 28(2), 81–110.
- van Leeuwen, C., and Seguin, G. (2006). The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17(1), 1–10.
- Van Leeuwen, C., Tregat, O., Chone, X., Bois, B., Pernet, D., and Gaudillere, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. Sci. Vigne Vin.* 43, 121–134. doi: 10.20870/oeno-one.2009.43.3.798
- Van Huyssteen, L., & Weber, H. W. (1980). Soil moisture conservation in dryland viticulture as affected by conventional and minimum tillage practices. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 1, 67–75
- Vannozzi, A., Dry, I. B., Fasoli, M., Zenoni, S., and Lucchin, M. (2012). Genomewide analysis of the grapevine stilbene synthase multigenic family: genomic organization and expression profiles upon biotic and abiotic stresses. *BMC Plant Biol.* 12:130. doi: 10.1186/1471-2229-12-130
- Viret, O., Spring, J.-L., and Gindro, K. (2018). Stilbenes: biomarkers of grapevine resistance to fungal diseases. *OENO One* 52, 235–241. doi: 10.20870/oeno-one.2018.52.3.2033
- Walker R., Blackmore D. and Clingeffer P., 2010. Impact of rootstock on yield and ion concentrations in petioles, juice and wine of Shiraz and Chardonnay in different viticultural environments with different irrigation water salinity. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 16, 243-257.
- Webb, L. B., Whetton, P. H., and Barlow, E. W. R. (2011). Observed trends in winegrape maturity in Australia. *Glob. Change Biol.* 17, 2707–2719. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02434.x.
- Webb, L. B., Whetton, P. H., Bhend, J., Darbyshire, R., Briggs, P. R., and Barlow, E. W. R. (2012). Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices. *Nat. Clim. Chang.* 2:259. doi: 10.1038/nclimate1417.
- Webb, L., Whiting, J., Watt, A., Hill, T., Wigg, F., Dunn, G., et al. (2010). Managing grapevines through severe heat: A survey of growers after the 2009 summer heatwave in south-eastern Australia. *J. Wine Res.* 21, 147–165. doi: 10.1080/09571264.2010.530106

- Wheaton, A. D., McKenzie, B. M., & Tisdall, J. M. (2008). Management to increase the depth of soft soil improves soil conditions and grapevine performance in an irrigated vineyard. *Soil and Tillage Research*, 98, 68–80
- Wohlfahrt, Y., Patz, C. D., Schmidt, D., Rauhut, D., Honermeier, B., and Stoll, M. (2021). Responses on must and wine composition of *Vitis vinifera* L. cvs. Riesling and Cabernet Sauvignon under a free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE). *Foods* 10:145. doi: 10.3390/foods10010145
- Wohlfahrt, Y., Smith, J. P., Tittmann, S., Honermeier, B., and Stoll, M. (2018). Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under free air carbon dioxide enrichment (FACE). *Eur. J. Agron.* 101, 149–162.
- Wolkovich, E. M., García de Cortázar-Atauri, I., Morales-Castilla, I., Nicholas, K. A., and Lacombe, T. (2018). From pinot to xinomavro in the world's future wine-growing regions. *Nat. Clim. Chang.* 8, 29–37. doi: 10.1038/s41558-017-0016-6
- Wood, C., Siebert, T. E., Parker, M., Capone, D. L., Eelsey, G. M., Pollnitz, A. P., et al. (2008). From wine to pepper: rotundone, an obscure sesquiterpene, is a potent spicy aroma compound. *J. Agric. Food Chem.* 56, 3738–3744. doi: 10.1021/jf800183k
- Wu, J., Drappier, J., Hilbert, G., Guillaumie, H., Dai, Z., Geny, L., et al. (2019). The effects of a moderate grape temperature increase on berry secondary metabolites. *OENO One* 53, 321–333. doi: 10.20870/oeno-one.2019.53.2.2434
- Wurz, D. A. (2019). Wine and health: a review of its benefits to human health. *BIO Web Conf.* 12:04001. doi: 10.1051/bioconf/20191204001
- Young, P. R., Eyeghe-Bickong, H. A., du Plessis, K., Alexandersson, E., Jacobson, D. A., Coetzee, Z., et al. (2016). Grapevine plasticity in response to an altered microclimate: Sauvignon Blanc modulates specific metabolites in response to increased berry exposure. *Plant Physiol.* 170, 1235–1254. doi: 10.1104/pp.15.01775
- Zhang, H., Fan, P., Liu, C., Wu, B., Li, S., and Liang, Z. (2014). Sunlight exclusion from muscat grape alters volatile profiles during berry development. *Food Chem.* 164, 242–250. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.05.012
- Zhang, L., Wang, Z., and Zhang, W. (2013). Determination of caftaric acid, p-coutaric acid and fertaric acid in grape juice, peel and seeds by ultra-high performance liquid chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry. *Se Pu* 31, 122–126. doi: 10.3724/SP.J.1123.2012.09047
- Zufferey, V., Spring, J.-L., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., et al. (2017). The influence of water stress on plant hydraulics, gas exchange, berry composition and quality of pinot noir wines in Switzerland. *OENO One* 51, 17–27. doi: 10.20870/oeno-one.2017.51.1.1314