

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Viticole ed Enologiche

Aumento delle temperature e impatto sugli
agroecosistemi: indici bioclimatici, migrazioni
viticole e possibili soluzioni

Relatore

Prof. Carmelo Maucieri

Correlatore

Dott. Francesco Morbidini

Laureando

Daide Rinaldi

Matricola n.

1220866

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

INDICE

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	7
INTRODUZIONE	8
1 IL CAMBIAMENTO CLIMATICO SUGLI AGROECOSISTEMI: ASPETTI E CONSEGUENZE	10
1.1 IL CAMBIAMENTO CLIMATICO	10
1.2 EFFETTO SERRA E GAS CLIMALTERANTI.....	14
1.2.1 <i>Anidride carbonica</i>	18
1.2.2 <i>Metano</i>	19
1.2.3 <i>Protossido di azoto</i>	20
1.2.4 <i>Vapore acqueo</i>	21
1.2.5 <i>Ozono</i>	22
1.3 CONSEGUENZE DELL’AUMENTO DELLE TEMPERATURE SUGLI AGROECOSISTEMI.....	23
1.3.1 <i>Riduzione della biodiversità</i>	26
1.3.2 <i>Diffusione di malattie e parassiti</i>	27
1.3.3 <i>Cambiamento dei cicli stagionali</i>	27
1.3.4 <i>Scioglimento dei ghiacciai e diminuzione della copertura nevosa</i>	28
1.3.5 <i>Innalzamento del livello dei mari</i>	29
1.3.6 <i>Migrazione dei vigneti</i>	30
1.4 L’ACCORDO DI PARIGI.....	30
2 LA VITE NEI SUOI ASPETTI E GLI INDICI BIOCLIMATICI PER LA VALUTAZIONE DELL’EFFETTO DELLE TEMPERATURE SULLE PIANTE	32
2.1 RISCALDAMENTO GLOBALE E VITE	32
2.2 ESIGENZE TERMICHE DELLA VITE.....	38

2.3	SOMMA TERMICA E INDICI BIOCLIMATICI.....	44
2.3.1	<i>Growing Degree Days (GDD)</i>	44
2.3.2	<i>Indici bioclimatici</i>	48
2.3.2.1	<i>Indice di Winkler</i>	48
2.3.2.2	<i>Indice di Huglin</i>	50
3	L'INFLUENZA DELLE TEMPERATURE SULLE FASCE CLIMATICHE COMPATIBILI CON LA VITICOLTURA: STRATEGIE DI ADATTAMENTO E MITIGAZIONE.....	54
3.1	L'INFLUENZA DEL RISCALDAMENTO GLOBALE SULLA COMPOSIZIONE DELL'UVA	55
3.2	CAMBIAMENTI E ANTICIPI DELLE FASI FENOLOGICHE	59
3.3	L'INFLUENZA DEL RISCALDAMENTO GLOBALE SULLE REGIONI VITICOLE: MIGRAZIONI VITICOLE.....	63
3.4	SOLUZIONI PER FRONTEGGIARE UN AUMENTO ECCESSIVO DELLE TEMPERATURE IN VIGNETO E IN CANTINA	76
	CONSIDERAZIONI FINALI.....	83
	BIBLIOGRAFIA	85
	SITOGRAFIA	99
	RINGRAZIAMENTI.....	101

RIASSUNTO

Il riscaldamento globale è causato principalmente dall'accumulo di gas serra in atmosfera. La grande preoccupazione rivolta al cambiamento climatico non è imputabile esclusivamente al fenomeno in sé, bensì alla rapidità con cui esso sta avvenendo. Sebbene il sistema terrestre risulti autostabilizzante e possa mantenere un equilibrio con le sole emissioni naturali, è stato dimostrato che l'effetto serra antropico rappresenta la causa principale dell'attuale riscaldamento globale. Si prevede che l'incremento termico si intensificherà nel corso di questo secolo, portando impatti significativi sulla biodiversità degli agroecosistemi; la temperatura, infatti, è il principale fattore che influenza la crescita e la produttività della vite. Gli indici bioclimatici, spesso basati sulla temperatura, come i gradi giorno di crescita, forniscono una valutazione dell'idoneità di una regione per la produzione di vino. Tra gli indici comuni utilizzati in viticoltura rientrano quelli di Winkler e di Huglin. Questi mutamenti climatici conducono a stagioni più calde, accorciando gli intervalli tra le diverse fasi fenologiche, anticipando la data di vendemmia, avendo così un impatto diretto su aspetti chiave come la vinificazione, la microbiologia, la chimica del vino e gli aspetti sensoriali. Tali trasformazioni introducono nuove sfide e modifiche significative nella crescita, nello sviluppo e nella resa della vite, comportando la necessità di rivalutare le varietà attualmente coltivate in specifiche condizioni climatiche. Al fine di adattarsi alle nuove condizioni, le aree viticole con temperature ideali per la crescita potrebbero spostarsi verso le coste e altitudini più elevate. Questa dinamica trasformerà aree vinicole non convenzionali in nuove regioni adatte alla coltivazione di uve da vino di alta qualità, mentre altre zone potrebbero perdere la loro idoneità. Risulta cruciale adattarsi ai cambiamenti climatici attuali e attuare strategie di adattamento sia in

vigneto che in cantina, al fine di assicurare la sostenibilità e la prosperità del settore
vinicolo futuro.

ABSTRACT

Global warming is mainly caused by the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere. The significant concern regarding climate change is not just attributed to this phenomenon, but rather to the speed at which it is occurring. Although the Earth's system is self-stabilizing and can maintain a balance with natural emissions alone, it has been demonstrated that the anthropogenic greenhouse effect is the primary cause of the current global warming. It is projected that the temperature increase will intensify over the course of this century, leading to significant impacts on the biodiversity of agroecosystems; temperature is indeed the primary factor influencing the growth and productivity of grapevines. Bioclimatic indices, often based on temperature, such as growing degree days, provide an assessment of a region's suitability for wine production. Commonly used indices in viticulture are Winkler and Huglin. These climate changes result in warmer seasons, shortening the intervals between different phenological stages, advancing the harvest date, thereby directly impacting key aspects like winemaking, microbiology, wine chemistry, and sensory attributes. Such transformations introduce new challenges and significant alterations in vine growth, development, and yield, requiring a reevaluation of currently cultivated varieties under specific climatic conditions. In order to adapt to the new conditions, grape-growing areas with ideal temperatures for growth might shift towards coastlines and higher altitudes. This dynamic will transform non-conventional wine regions into new areas suitable to cultivate high-quality wine grapes, while other areas may lose their suitability. Adapting to current climate changes and implementing adaptation strategies both in the vineyard and in the winery is crucial to ensure the sustainability and prosperity of the future wine industry.

INTRODUZIONE

L'agricoltura riveste un ruolo cruciale nel processo del cambiamento climatico, sia contribuendo che subendo i suoi effetti. Al giorno d'oggi, il fenomeno globale del cambiamento climatico si presenta come uno dei temi più rilevanti e, paradossalmente, anche uno dei più dibattuti nel mondo agricolo, rappresentando una sfida significativa per gli agroecosistemi, con conseguenze potenziali che si estendono oltre i confini ecologici. In questo contesto, la viticoltura risulta essere particolarmente vulnerabile agli effetti dell'aumento delle temperature.

In considerazione di quanto sopra riportato, la presente tesi si propone di esplorare gli effetti del cambiamento climatico sugli agroecosistemi, con un'attenzione mirata alla viticoltura. Lo studio fornirà una visione futura globale riguardo all'accelerazione e all'impatto sempre più significativo del cambiamento climatico, con un particolare approfondimento sulle attuali regioni viticole di maggiore importanza. Lo scopo di questa tesi è quello di fornire una panoramica degli effetti del cambiamento climatico sulla viticoltura, con uno sguardo ai possibili sviluppi futuri. Attraverso l'analisi delle implicazioni climatiche e delle possibili soluzioni, si auspica di contribuire alla comprensione delle sfide che il settore vitivinicolo dovrà affrontare e di fornire spunti concreti per adottare strategie adeguate a garantire la sostenibilità e l'eccellenza delle produzioni vinicole future.

Il primo capitolo di questa tesi si concentrerà sulle implicazioni del cambiamento climatico, fornendo una panoramica generale del fenomeno stesso, dei gas serra e del loro contributo al riscaldamento globale, nonché dei suoi effetti sugli agroecosistemi. Questo permetterà di comprendere il contesto in cui la viticoltura si trova ad affrontare le sfide del cambiamento climatico.

Il secondo capitolo sarà incentrato sull'impatto del riscaldamento globale sui vigneti. Saranno analizzati i cambiamenti nel bilancio radiativo della Terra, con una specifica attenzione alla radiazione solare e agli effetti delle radiazioni UV-B sulla vite. Verranno inoltre esplorate le esigenze termiche della vite durante le diverse fasi fenologiche, con un focus particolare sullo zero di vegetazione e sulla somma termica (GDD e SAT). Saranno discussi gli indici bioclimatici di Winkler e Huglin come strumenti per valutare l'effetto delle temperature sulla vite e avere così dei riferimenti chiari per comprendere la risposta della pianta alle variazioni climatiche.

Nel terzo capitolo, verrà analizzata l'influenza del riscaldamento globale sulla composizione dell'uva, considerando l'accorciamento della stagione di crescita, l'anticipo delle fasi fenologiche della vite. Verrà introdotto anche il concetto di migrazione viticola, analizzando gli spostamenti futuri previsti per le regioni viticole a causa dei cambiamenti climatici. Ciò includerà la potenziale perdita di idoneità nelle regioni viticole attuali e l'emergere di nuove aree viticole, presentando inoltre una serie di possibili soluzioni volte a mitigare gli effetti eccessivi dell'aumento delle temperature in viticoltura. Queste soluzioni riguarderanno sia le pratiche in vigneto, per adattare le coltivazioni agli impatti negativi del cambiamento climatico, sia le tecniche enologiche in cantina, per preservare la qualità dei vini prodotti, con l'obiettivo di contribuire alla resilienza e alla sostenibilità del settore vitivinicolo di fronte a un clima in evoluzione e temperature in costante aumento.

CAPITOLO PRIMO

IL CAMBIAMENTO CLIMATICO SUGLI AGROECOSISTEMI: ASPETTI E CONSEGUENZE

1.1 IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Il riscaldamento globale è definito come l'aumento della temperatura media della Terra (Venkataramanan, 2011) ed è prevalentemente dovuto ad un aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera. Ciò porta ad un mutamento dei modelli climatici che vengono definiti con il termine 'cambiamenti climatici' (Fawzy et al., 2020). Si osserva quindi una diversificazione in termini di frequenza, intensità, estensione spaziale, durata e tempistica degli eventi meteorologici estremi che avranno delle conseguenze per i sistemi umani e naturali (Thornton et al., 2014). Una stima fatta dal Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC) nel 2012 prevede per il resto del secolo un aumento della frequenza di stress da calore, siccità e inondazioni.

I gas serra hanno origine sia da sistemi naturali, che da attività umane (Fawzy et al., 2020; Schiavon e Zecchin, 2007) e secondo Baul e McDonald (2015), i principali rischi e impatti indesiderati dei cambiamenti climatici sono la scarsa disponibilità di acqua, la perdita di fertilità del suolo e le infestazioni di malattie e parassiti nelle colture.

Secondo Venkataramanan (2011), gli scienziati preferiscono parlare di cambiamento climatico piuttosto che di riscaldamento globale, poiché l'aumento della temperatura non sarà omogeneo e della stessa intensità a livello globale. Infatti, il riscaldamento è ad oggi maggiore ai poli e nelle regioni tropicali e continuerà ad esserlo (Malhi, 2021; Venkataramanan, 2011).

Il vero problema non è il cambiamento climatico in sé, ma la velocità con cui esso si sta verificando. Infatti, il clima del pianeta Terra è stato soggetto a cambiamenti continui sin dalla sua formazione. Nel passato, tali cambiamenti erano meno evidenti, avvenivano ad un ritmo molto lento e non erano percepibili all'interno di una sola generazione. Oggi, invece, i cambiamenti climatici avvengono in un arco temporale inferiore, consentendo così di comparare le condizioni climatiche del passato con quelle attuali. Secondo studi scientifici, la velocità dei cambiamenti climatici osservati è maggiore di quella potenzialmente causata da fattori naturali (Meyer et al., 2015), evidenziando il ruolo chiave esercitato dalle attività antropiche. Questi cambiamenti hanno impatti a livello globale, interessando tutti i continenti e gli oceani. Come suggerito da Fawzy et al. (2020), il sistema terrestre è autostabilizzante, ma le emissioni prodotte dall'uomo stanno mettendo ulteriore pressione sul sistema. Ciò è evidenziato dal fatto che molti dei cambiamenti registrati dagli anni '50 non hanno precedenti nei decenni o secoli passati (Meyer et al., 2015).

L'atmosfera e l'oceano si sono riscaldati, si stima che continuando con questo ritmo e senza intervenire, prima del 2100 lo squilibrio potrebbe raddoppiare. È confermato che abbiamo i mezzi per limitare il cambiamento climatico e le sue conseguenze, tuttavia, proseguendo di questo passo, come possiamo vedere in figura 1, si prevede un aumento delle temperature intorno ai 2°C rispetto ai livelli pre-industriali e questo richiede una partenza urgente nell'attuare dei modelli ambientali in grado di contrastare questa situazione. Più aspettiamo ad agire, più ci costerà e maggiori saranno le sfide tecnologiche, economiche, sociali ed istituzionali che dovremo affrontare (Meyer et al., 2015).

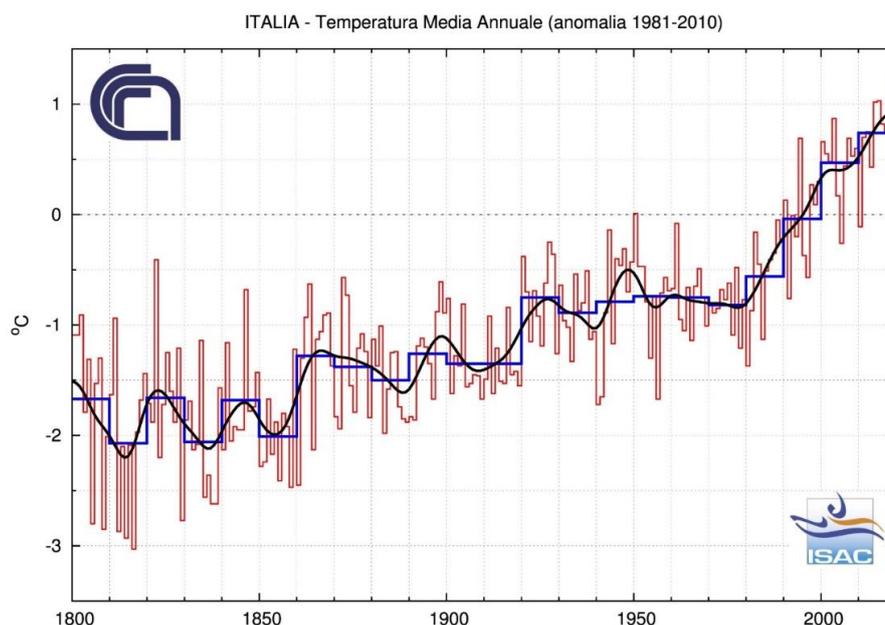


Figura1: Temperature medie annuali dal 1800 ad oggi (Fonte: Zamboni, 2020).

L'avvento dell'era industriale ha portato ad una crescente dipendenza dai combustibili fossili e alla diffusa eliminazione delle foreste (Mozell e Thach, 2014). Questo fenomeno si è verificato lentamente ma in modo costante, con un incremento della temperatura media globale di circa $1,41^{\circ}\text{C}$ dall'inizio del XX secolo, due terzi dei quali incrementati a partire dal 1960 (Mozell e Thach, 2014). Nell'ultimo mezzo secolo, con l'aumento vertiginoso della popolazione mondiale e del consumo di energia, il riscaldamento globale ha raggiunto livelli altissimi (Mozell e Thach, 2014). Secondo le stime, come possiamo vedere in figura 2, le attività umane hanno causato un aumento della temperatura media globale di circa $1,0^{\circ}\text{C}$ rispetto ai livelli pre-industriali (Fawzy et al., 2020; IPCC, 2018; Mozell e Thach, 2014). Nello specifico, tra il 2006 e il 2015, si stima che la temperatura media superficiale a livello globale è stata di circa $0,87^{\circ}\text{C}$ più alta rispetto alla media del periodo 1850-1900 (IPCC, 2018). È stato anche rilevato che se il riscaldamento globale dovesse continuare ad aumentare con il tasso attuale di $0,2^{\circ}\text{C}$ per decennio (IPCC, 2018; Malhi et al., 2021a), potrebbe raggiungere gli $1,5^{\circ}\text{C}$ tra il 2030 e il 2052 (IPCC, 2018).

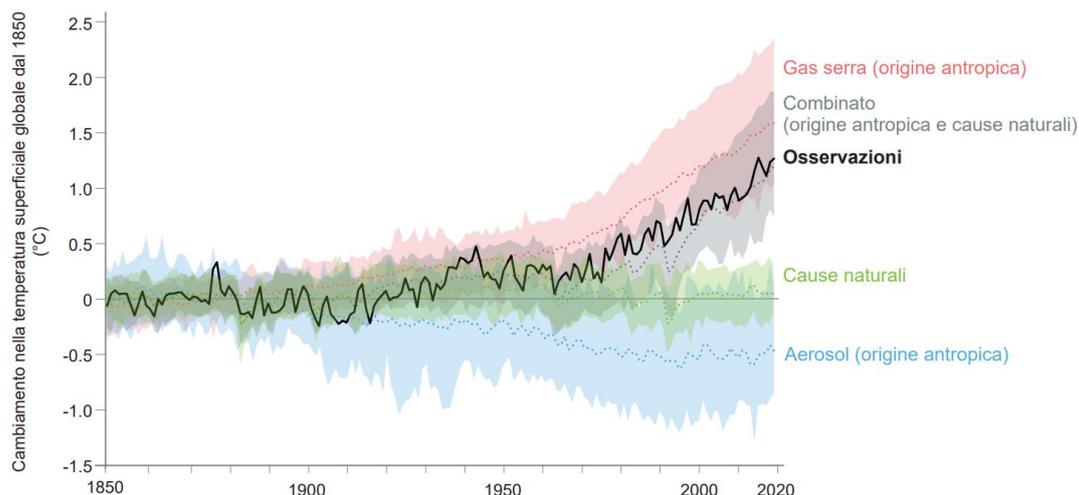


Figura 2: Le responsabilità degli esseri umani sul riscaldamento del clima.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Italian.pdf

Tra il 1850 e il 2007, il periodo in cui sono state registrate le temperature più alte di sempre è quello che va dal 1995 al 2006. Inoltre è stato documentato che il trend di aumento delle temperature è addirittura raddoppiato negli ultimi 50 anni, dimostrando così ulteriormente che l'effetto serra aggiuntivo di origine antropica è la causa principale del riscaldamento globale (Solomon et al., 2007). Per quanto riguarda il periodo 1990-2100 si prevede un aumento della temperatura media globale in un range che va dagli 1,5 ai 5,8°C per la superficie terrestre e la parte bassa dell'atmosfera. Per la parte superiore dell'atmosfera è invece previsto un raffreddamento (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). L'effetto serra però, è un fenomeno al quale la vita sulla Terra deve la sua esistenza, in quanto aumenta la temperatura media del nostro pianeta di circa 15 gradi sopra lo zero (Mikhaylov et al., 2020). Senza di esso, la temperatura sarebbe inferiore ai -18°C, rendendo impossibile qualsiasi forma di vita (Mikhaylov et al., 2020).

A partire dal 2001, le temperature hanno raggiunto i livelli più elevati degli ultimi 165 anni, con i massimi assoluti registrati nel 1998 e nel 2005. Attualmente, possiamo infatti già notare gli effetti che il cambiamento climatico globale ha causato sui sistemi ecologici terrestri e marini, come su alcuni dei servizi che essi offrono. Le conseguenze future del clima dipenderanno dalla velocità, dall'entità e dalla durata del riscaldamento. Alcuni effetti potrebbero durare a lungo o essere

irreversibili, come la scomparsa di alcuni ecosistemi (IPCC, 2018). Ricerche basate su diverse simulazioni dei modelli climatici suggeriscono che, nell'intervallo di tempo compreso tra il 2011 e il 2030, la temperatura potrebbe aumentare di ulteriori 0,64-0,7°C rispetto al periodo tra il 1980 e il 1999 (Zucaro e Pontrandolfi, 2007).

Le variazioni di temperatura sulle terre emerse risultano molto più notevoli rispetto a quelle degli oceani, con un aumento doppio per quanto riguarda la temperatura globale. Si rileva infatti un aumento di circa $1,32 \pm 0,04^\circ\text{C}$ per quanto riguarda la temperatura delle regioni continentali rispetto alla media 1951-1980, mentre il rialzo per la temperatura superficiale degli oceani è stato di $0,59 \pm 0,06^\circ\text{C}$ (Malhi et al., 2021).

Nel XX secolo, il cambiamento climatico ha avuto un impatto principalmente positivo sulla maggior parte dei Paesi fino al 1980, ma poi ha causato impatti negativi nei Paesi del Terzo Mondo, rimanendo però invariato per il mondo sviluppato (Tol, 2013). Nel XXI secolo, tuttavia, il cambiamento climatico si è trasformato in un grave problema che deve essere affrontato sia dai Paesi ricchi che da quelli in via di sviluppo, a causa dell'insorgere di esternalità negative (Tol, 2013). Il contributo al cambiamento climatico dall'inizio del 2005 è stato maggiore del 60-80% per i Paesi sviluppati, mentre i Paesi in via di sviluppo hanno contribuito solo per il 20-40%. Questo implica che il peso del cambiamento climatico è maggiormente imputabile ai Paesi sviluppati (Wei et al., 2012).

Il cambiamento climatico risulta quindi essere una delle principali sfide per la società del XXI secolo. Esiste infatti un ampio consenso all'interno della comunità scientifica internazionale sia sull'origine del fenomeno (attività umana) sia sull'entità e sul segno degli effetti da esso indotti (Merloni, 2017).

1.2 EFFETTO SERRA E GAS CLIMALTERANTI

L'effetto serra è causato dall'accumulo di gas serra che riscaldano gli strati inferiori dell'atmosfera, portando a un aumento della temperatura della superficie terrestre (Huang et al., 2016). Questi gas sono i maggiori responsabili del cambiamento

climatico (Aydinalp e Cresser, 2008; Mikhaylov et al., 2020; Mozell e Thach, 2014) in quanto sono in grado di bloccare la radiazione infrarossa che cerca di uscire dall'atmosfera intrappolando il calore così come in una 'serra'. Agiscono quindi come uno specchio e riflettono sulla Terra parte dell'energia termica che altrimenti andrebbe persa nello spazio (Venkataramanan, 2011). Allo stesso tempo però permettono il passaggio della radiazione appartenente allo spettro del visibile (Aydinalp e Cresser, 2008). Le emissioni globali di gas serra provengono sia da sistemi naturali come per esempio, terremoti, foreste, oceani, permafrost, zone umide e vulcani, che da attività antropiche, le quali sono prevalentemente correlate alla produzione di energia, all'uso di combustibili fossili, deforestazione, allevamento massivo di bovini e ovini, attività industriali e cambiamenti dell'uso del suolo (Edenhofer et al., 2014; Li Vigni et al., 2015; Mozell e Thach, 2014; Yue e Gao, 2018). È importante tuttavia considerare che sono le emissioni antropiche ad esercitare una maggiore pressione al sistema terrestre che potrebbe considerarsi bilanciato con le sole emissioni di origine naturale (Yue e Gao, 2018). Dall'inizio della rivoluzione industriale, le emissioni antropogeniche, in particolare le emissioni derivanti dall'alterazione dell'uso del suolo, hanno causato un significativo aumento di gas serra nell'atmosfera (Pais et al., 2020), provocando un aumento del forcing radiativo e un conseguente incremento della temperatura (Mozell e Thach, 2014). Ciò sta provocando cambiamenti climatici che si aggraveranno durante il corso del XXI secolo (Pais et al., 2020). Ne consegue che l'effetto serra sia dovuto alla minore fuoriuscita di energia dall'atmosfera rispetto a quella che entra grazie alla radiazione solare (Trenberth e Fasullo, 2009).

L'estrazione, la produzione e il consumo di risorse energetiche sono la principale fonte di emissioni di gas serra, costituendo dal 76% all'86% delle emissioni totali per il periodo compreso tra il 1990 e il 2007 (Mikhaylov et al., 2020). In particolare, l'uso di combustibili fossili, come petrolio, carbone e gas naturale, risulta essere il maggior responsabile dell'aumento di questi gas nell'atmosfera (Mozell e Thach, 2014). La lotta contro le emissioni di gas serra avviene oramai a livello internazionale, considerando l'importanza di questo problema per l'ambiente e la salute del pianeta (Mikhaylov et al., 2020).

L'atmosfera terrestre è costituita principalmente da una miscela di gas, vapore acqueo e particelle solide di origine organica e inorganica. Il 78% dell'atmosfera è composto da azoto, mentre l'ossigeno costituisce il 20% e l'argon l'1%. Tutto il restante (circa l'1%) è costituito da altre componenti, tra cui vapore acqueo, anidride carbonica, metano, idrogeno, elio, anidride solforosa ed altri gas. L'anidride carbonica è presente solo in piccole quantità, ma svolge un ruolo cruciale nel mantenere il calore vicino alla superficie terrestre grazie alla sua capacità di trattenere le radiazioni infrarosse. Pertanto, questi gas fungono da parete termoisolante nell'effetto serra (Daly, 2022).

I principali gas serra che si trovano naturalmente in atmosfera, rappresentati in figura 3, sono il vapore acqueo (che è causa del 36-70% dell'effetto serra), l'anidride carbonica (9-26%), il metano (4-9%), l'ozono (3-7%) e il protossido di azoto (7%) (Mozell e Thach, 2014).

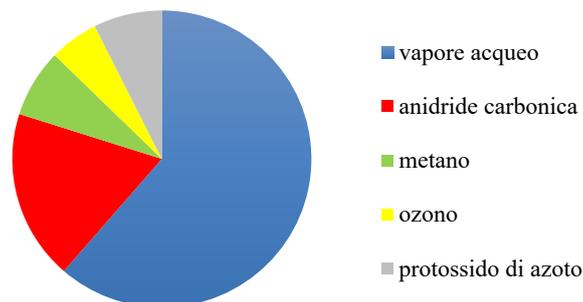


Figura 3: Grafico a torta dei principali gas serra presenti naturalmente in atmosfera.

Inoltre, altri gas a effetto serra presenti in percentuali minori sono la fuliggine, i gas fluororati come gli idrofluorocarburi, i perfluorocarburi e l'esaffluoruro di zolfo (Venkataramanan, 2011). L'aumento delle concentrazioni di questi gas serra potrebbe comportare un riscaldamento della Terra a causa dell'intensificazione della trattenuta di calore atmosferico (Mozell e Thach, 2014). La riduzione delle emissioni di questi gas serra diversi dall'anidride carbonica risulta importante per

limitare i cambiamenti climatici in futuro, poiché hanno una vita più breve e quindi un impatto temporaneo (Montzka et al., 2011).

“Nel 2018 si è registrato un aumento del 2% delle emissioni a fronte di un aumento annuale dell’1,5%” (Mozell e Thach, 2014). Visto l’attuale aumento delle emissioni, sebbene queste siano diminuite rispetto agli anni ’90, per mantenere un livello di riscaldamento globale di 2°C entro la fine del secolo, le emissioni dovrebbero diminuire di circa il 25% entro il 2030 (rispetto ai livelli del 2010) e le emissioni nette dovrebbero essere raggiunte entro il 2070 (IPCC, 2018). I cambiamenti climatici costituiscono quindi un’importante sfida di portata mondiale ed altrettanto importanti risultano le sue conseguenze. Tuttavia, non tutti i Paesi hanno lo stesso quantitativo di emissioni, vediamo ora una panoramica delle principali nazioni responsabili delle emissioni globali di gas serra.

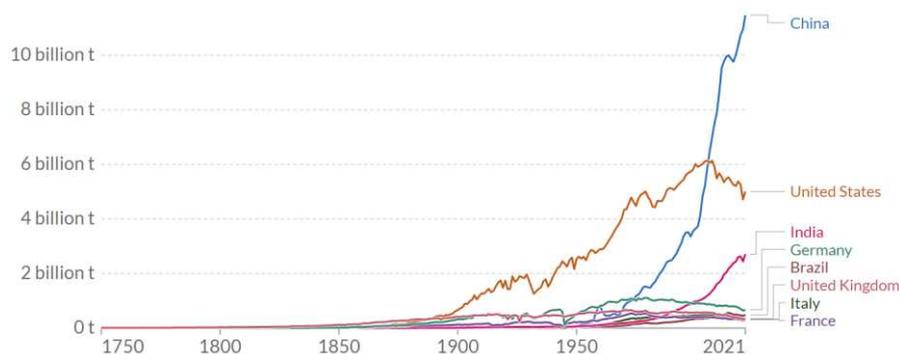


Figura 4: Grafico delle emissioni globali di CO₂ dal 1750 ad oggi.

<https://ilbolive.unipd.it/it/news/25-mega-citta-producono-52-emissioni-gas-serra>

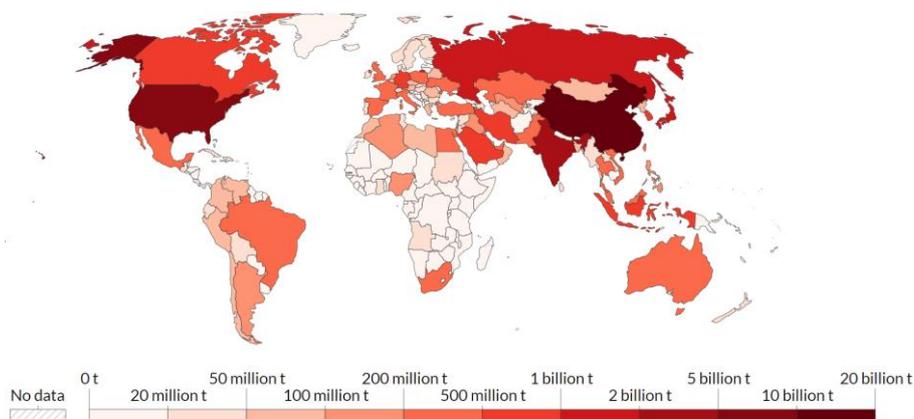


Figura 5: Mappa mondiale delle emissioni di CO₂ al giorno d’oggi.

<https://ilbolive.unipd.it/it/news/25-mega-citta-producono-52-emissioni-gas-serra>

Di seguito una breve descrizione dei principali gas serra precedentemente citati.

1.2.1 Anidride carbonica

Tra le principali fonti antropogeniche di anidride carbonica si distingue sicuramente l'impiego di combustibili fossili (Venkataramanan, 2011). La CO₂ rappresenta la maggioranza dei gas serra nell'atmosfera, con il 76% del totale proveniente da fonti antropiche come combustibili fossili e processi industriali, mentre l'11% deriva da pratiche di silvicoltura e altre attività legate all'uso del suolo (Malhi et al., 2021). L'esposizione al calore e la pressione della crosta terrestre hanno trasformato i resti sepolti di piante e animali in combustibili fossili (Duxbury et al., 1994) la cui combustione rappresenta sicuramente la maggior fonte di emissione di CO₂ (Mozell e Thach, 2014). Tuttavia anche la deforestazione e quindi la conversione dei terreni all'agricoltura è un'importante fonte di emissione di CO₂ (Mozell e Thach, 2014; Perugini, 2023) che risulta essere responsabile di circa un terzo del totale delle emissioni di questo gas (Aydinalp e Cresser, 2008). Le piante viventi, essendo a base di carbonio, quando muoiono si decompongono rilasciando CO₂ nell'atmosfera (Venkataramanan, 2011). Inoltre questo gas viene anche emesso in seguito alla combustione di prodotti agricoli secondari quali paglia di cereali e stoppie di canna da zucchero (Aydinalp e Cresser, 2008). Tra il 1960 e il 2010, i livelli di CO₂ nell'atmosfera sono aumentati di quasi tre volte rispetto ai livelli pre-industriali (Scherer et al., 2022). Ciò è stato osservato anche da Li Vigni et al. (2015) i quali hanno misurato un aumento di questo gas del 142% dal livello pre-industriale al 2013. Un suo aumento non solo, accelera il cambiamento climatico (Scherer et al., 2022), ma porta anche a delle conseguenze sull'equilibrio chimico degli oceani, rendendoli più acidi a causa dell'eccesso di CO₂ assorbita dall'acqua, abbassandone così il pH e alterando di conseguenza gli ecosistemi marini (Scherer et al., 2022), vegetali e animali (Huang et al., 2023). Anche se l'aumento di CO₂ può migliorare l'efficienza della fotosintesi, i benefici diretti sarebbero solo parziali e non sufficienti a compensare gli effetti negativi dell'aumento delle temperature. Tuttavia, altri studi hanno dimostrato che un aumento delle concentrazioni di CO₂

possono portare ad un aumento della resa dei raccolti, ad esempio del 10-15% nel frumento e del 15-20% nella vite (Zucaro e Pontrandolfi, 2007) e ad una diminuzione del fabbisogno energetico a causa del riscaldamento (Tol, 2013). Si stima che la riduzione della quantità di CO₂ assorbita dalla fotosintesi incida circa per il 25% delle emissioni di carbonio causate dall'uomo in tutto il mondo (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Secondo i modelli attuali, entro il 2100 si potrebbe assistere ad un aumento della concentrazione atmosferica di CO₂ fino a 970 ppm, rappresentando un aumento del 250% rispetto ai livelli del XVIII secolo (Mozell e Thach, 2014).

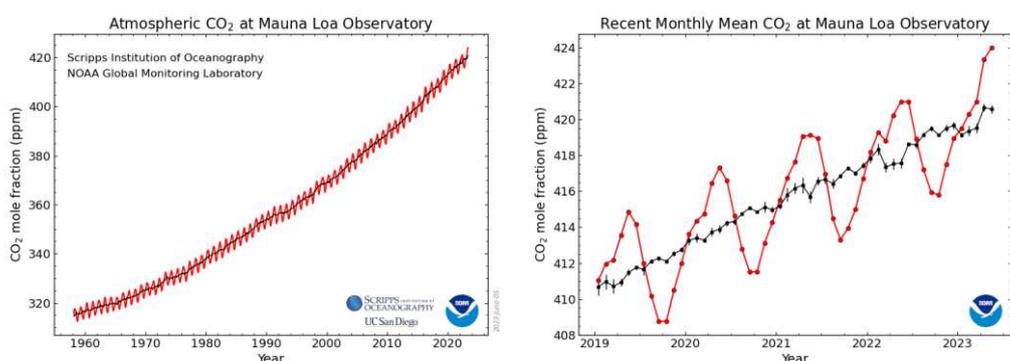


Figura 6: Andamento crescente dell'anidride carbonica dal 1960 ad oggi.

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

1.2.2 Metano

Il metano è un gas serra molto importante (Watson et al., 1992). “La sua concentrazione globale in atmosfera è cresciuta da un valore pre-industriale di circa 715 ppb ai circa 1732 ppb nei primi anni novanta, fino a raggiungere un valore di 1774 ppb nel 2005” (Iliceto, 2009). Considerando questo gas, l'agricoltura, compresa la zootecnia, contribuisce al riscaldamento globale del pianeta per il 14%, mentre in termini assoluti il CH₄ rappresenta mediamente il 18% dei gas serra che causano il riscaldamento globale (Crovetto, 2020). Risulta essere quindi una molecola estremamente efficiente nell'assorbire il calore (Li Vigni et al., 2015). Le principali fonti di emissione sono maggiormente le risaie a cui seguono l'allevamento dei bovini e la combustione di rifiuti agricoli. Per quanto riguarda le

risaie, nonostante la quantificazione delle emissioni di CH₄ da questa fonte sia molto variabile, in quanto molto influenzata dalle pratiche agricole effettuate (fertilizzazione, gestione acqua e densità piante), esse sono responsabili di circa il 91% delle emissioni totali di CH₄. Riferendosi ad un arco temporale di 100 anni, il CH₄ ha un impatto sul riscaldamento 28 volte maggiore a quello della CO₂ (Crovetto, 2020), ma ha un tempo di residenza in atmosfera breve, di soli 9 anni e una concentrazione atmosferica bassa (Montzka et al., 2011). Il processo di ossidazione del CH₄ nella troposfera può causare la produzione di ozono, mentre nella stratosfera, la sua reazione con l'idrossile produce vapore acqueo (Watson et al., 1992). Nel 2018, l'emissione di CH₄ è aumentata dell'1,7%, un tasso superiore all'incremento annuale dell'1,3% verificatosi nell'ultimo decennio, affermando così che le emissioni di CH₄ stanno crescendo ad un ritmo più veloce rispetto a quello degli anni precedenti (Fawzy et al., 2020). Secondo Mozell e Thach (2014) le concentrazioni di CH₄ sono aumentate del 148% dal 1750 al 2007.

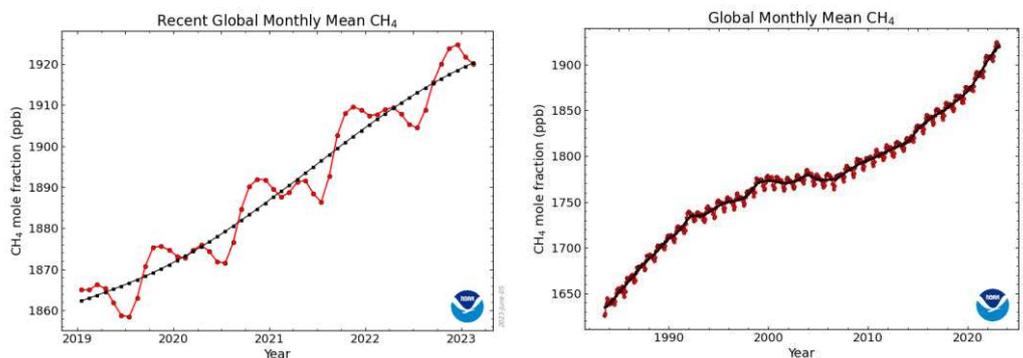


Figura 7: Andamento crescente del metano dal 1980 ad oggi.

https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

1.2.3 Protossido di azoto

È uno dei principali gas serra emessi dai processi agricoli, in particolare dal suolo, con il riscaldamento globale che ne ha aumentato le emissioni (Wang et al., 2022). Viene largamente prodotto dall'agricoltura attraverso lo spandimento di fertilizzanti azotati sui terreni, che possono causare un aumento significativo delle

emissioni di N_2O dal suolo a causa della conversione microbica del nitrato, molecola comunemente presente nei fertilizzanti azotati. Tuttavia, è importante sottolineare che il N_2O ha un potenziale di riscaldamento globale 298 volte superiore a quello della CO_2 (Wang et al., 2022) e la sua rimozione dall'atmosfera avviene ad un ritmo più lento rispetto al CH_4 , poiché ha una vita media di circa 120 anni nello stato stazionario (Montzka et al., 2011). In diversi paesi, l'utilizzo troppo abbondante di fertilizzanti, soprattutto quelli contenenti azoto, ha causato l'inquinamento del suolo e dell'acqua, portando alla liberazione di azoto nell'atmosfera (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Nel 2018, si è osservato un incremento dello 0,8% delle emissioni di N_2O che derivano principalmente da attività agricole e industriali (Fawzy et al., 2020). Negli ultimi dieci anni, invece, l'incremento delle emissioni annue di questo gas è stato dell'1% (Fawzy et al., 2020).

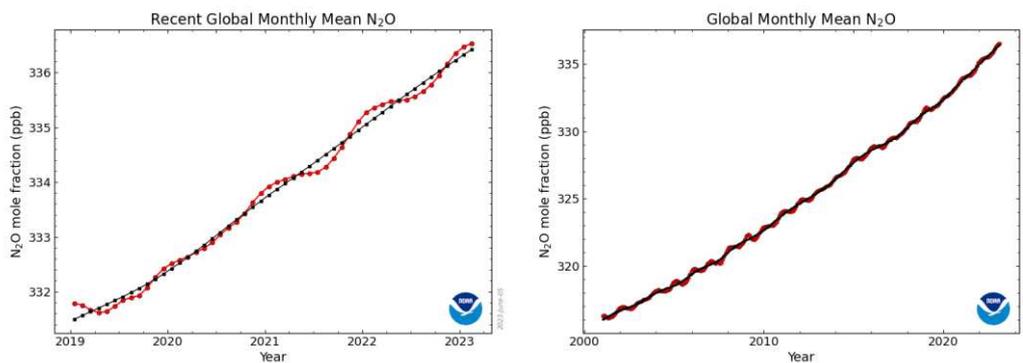


Figura 8: Andamento crescente del protossido di azoto dal 2000 ad oggi.

https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_n2o/

1.2.4 Vapore acqueo

Il vapore acqueo gioca un ruolo fondamentale nel mantenere la temperatura della Terra adatta alla vita, in particolare trattiene il calore proveniente dal sole che altrimenti verrebbe riflesso nello spazio e difatti “rappresenta lo 0,33% dei gas atmosferici e contribuisce per circa il 50% ai gas serra” (Illiceto, 2009). Negli agroecosistemi viene emesso in atmosfera attraverso processi di evaporazione dal

suolo e traspirazione dalle piante. Il riscaldamento globale inoltre può causare un aumento delle temperature e una diminuzione dell'umidità del suolo, portando ad una maggiore evaporazione e di conseguenza ad una maggior quantità di vapore acqueo in atmosfera. L'aumento del vapore acqueo in atmosfera aumenta anche la probabilità e l'intensità di eventi meteorologici estremi, che possono avere impatti significativi sull'agricoltura e sulle comunità rurali. In seguito alla condensazione di questo gas infatti l'effetto serra può subire un aumento del 20% e aumenta anche l'energia del sole riflessa prima che raggiunga la Terra (Iliceto, 2009). I sistemi vulcanici attivi emettono ogni anno una grande quantità di vapore acqueo nell'atmosfera (oltre che di anidride carbonica), sia nei periodi di attività che di inattività. Questo contribuisce ad una costante presenza di tali gas nell'ambiente (Li Vigni et al., 2015). Le emissioni di vapore acqueo prodotte dall'uomo invece risultano avere un impatto abbastanza trascurabile sul forcing radiativo complessivo (Mikhaylov et al., 2020). Tuttavia, vale la pena notare che le reazioni tra il metano e il radicale idrossile (OH) nella stratosfera possono generare vapore acqueo (Watson et al., 1992).

1.2.5 Ozono

L'ozono è un gas serra formato da tre atomi di ossigeno che si trova naturalmente nell'atmosfera terrestre e risulta essere particolarmente efficace nella troposfera superiore come schermo per i raggi UV (Daly, 2022; Watson et al., 1992). Svolge un ruolo importante nell'effetto serra e un aumento della sua concentrazione in atmosfera può contribuire all'aumento della temperatura media globale portando quindi ad un peggioramento degli effetti del cambiamento climatico. In particolare, l'ozono troposferico prodotto dalle emissioni di gas e da reazioni chimiche tra gas e sostanze inquinanti, può danneggiare le piante riducendone la capacità di assorbire la luce solare e quindi di produrre energia attraverso la fotosintesi, compromettendo così la stabilità degli agroecosistemi. Questo gas svolge tuttavia un ruolo cruciale come filtro delle radiazioni ultraviolette solari grazie alla sua capacità di trattenuta ed assorbimento di quest'ultime (Daly, 2022;

Watson et al., 1992). Nel corso degli ultimi 50 anni, la quantità di ozono presente nella stratosfera si è ridotta del 3-6%, principalmente a causa dell'emissione antropica nell'atmosfera di sostanze chimiche alogenate, in particolare di composti contenenti cloro e bromo, come i clorofluorocarburi (Martínez-Lüscher et al., 2013). L'indebolimento della colonna di ozono osservato a partire dal 1980 ha comportato un incremento del 6-14% della radiazione UV-B che raggiunge la superficie terrestre (Martínez-Lüscher et al., 2013). Questi raggi causano danni all'uomo, agli animali e alle piante, riducendo in quest'ultime la capacità di assorbire la luce solare e quindi di produrre energia attraverso la fotosintesi, compromettendo così la stabilità degli agroecosistemi (Pitari et al., 2016). Potrebbe essere possibile ristabilire i livelli pre-1980 entro il 2040-2070 se tutti i Paesi aderiranno al protocollo di Montreal (trattato internazionale che mira ad attenuare la generazione e l'impiego di composti nocivi per lo strato di ozono stratosferico) e adotteranno i relativi accorgimenti per prevenire ulteriori danni alla stratosfera (Martínez-Lüscher et al., 2013; Pitari et al., 2016).

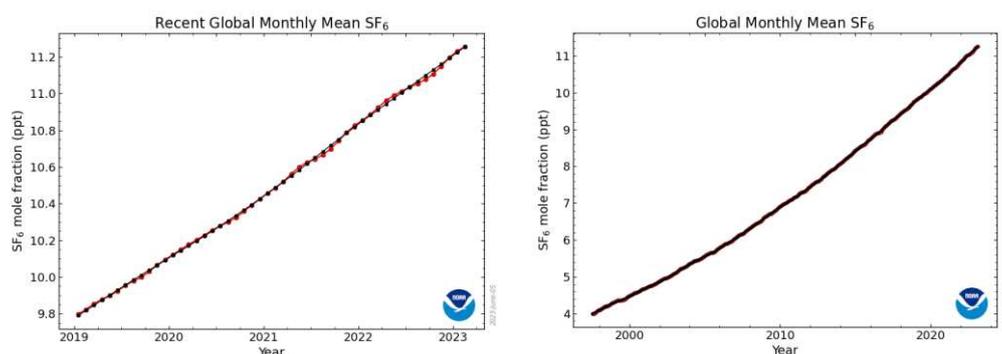


Figura 9: Andamento crescente dell'ozono dal 2000 ad oggi.

https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_sf6/

1.3 CONSEGUENZE DELL'AUMENTO DELLE TEMPERATURE SUGLI AGROECOSISTEMI

La natura dei cambiamenti climatici previsti, il loro impatto sulla produzione vegetale e animale e le risposte di mitigazione da dover fornire sono delle

importanti questioni che l'agricoltura deve affrontare per far fronte ai cambiamenti climatici. Il cambiamento delle precipitazioni e l'aumento della temperatura che portano a dei cambiamenti del ciclo idrologico e quindi ad un aumento dell'evapotraspirazione potenziale sono due aspetti di particolare importanza per l'agricoltura (Parry et al., 1990). È stato stimato un aumento medio delle temperature di 0,3°C circa ogni 10 anni (Zucaro e Pontrandolfi, 2007) e in particolare per l'Europa si prevede entro il 2100 un aumento delle temperature che va dai 2,3 ai 5,3°C nel Nord Europa e dai 2,2 ai 5,1°C nel Sud Europa (Fraga et al., 2012). L'incremento delle temperature può provocare un'accelerazione di alcune fasi fenologiche, come la fioritura e la maturazione delle colture, con conseguenze sulla produzione agricola (IPCC, 2018). Gli agroecosistemi in particolare, sono fragili al cambiamento climatico, il quale può influire sulla loro biodiversità, portando alla perdita di specie animali, di specie vegetali e alla riduzione della resilienza degli agroecosistemi.

L'aumento delle temperature ha diverse conseguenze che variano a seconda della regione geografica e del settore interessato, tuttavia non esiste alcuna parte del mondo che non sia influenzata da tali fenomeni (Pirani, 2023). Per affrontare queste conseguenze del cambiamento climatico sugli agroecosistemi, sono necessarie misure di adattamento e di mitigazione, le quali possono includere l'adozione di pratiche agricole sostenibili e la diversificazione delle colture per aumentare la resilienza degli agroecosistemi, ma anche l'adozione di tecnologie a basse emissioni di carbonio e l'implementazione di politiche di mitigazione del cambiamento climatico a livello globale.

L'agricoltura e gli agroecosistemi, contribuiscono al cambiamento climatico, ma a loro volta ne subiscono anche gli effetti, essendo così connessi tra loro. Da una parte il cambiamento climatico provoca effetti sull'agricoltura variando le componenti ambientali, dall'altra, l'attività agricola influisce sul cambiamento climatico a livello di emissioni di gas a effetto serra (Cole et al., 1997). Nel lungo periodo, i cambiamenti climatici potrebbero avere un impatto negativo sulla produzione agricola, influenzando la quantità e la qualità delle colture in termini di produttività, tassi di crescita, tassi di fotosintesi e traspirazione, disponibilità di umidità, ecc.

(Mahato, 2014; Malhi et al, 2021a). Ad esempio, si prevede una diminuzione della produzione cerealicola mondiale di mais e grano rispettivamente del 3,8% e del 5,5% (Malhi et al., 2021a). In generale quindi, il cambiamento climatico, soprattutto negli ultimi decenni, sta avendo un impatto significativo sugli agroecosistemi e richiede un'attenzione continua da parte dei produttori, dei consumatori e degli altri attori della filiera per garantire la sostenibilità a lungo termine di questo importante settore.

L'agricoltura risulta essere uno dei settori più vulnerabili ai cambiamenti climatici (Mendelsohn, 2009) e ciò è dovuto alle enormi dimensioni del settore e alla sua sensibilità alle variabili meteorologiche, che comportano enormi impatti economici (Mendelsohn, 2009; Pais et al., 2020). In particolare ciò comporta impatti che variano fortemente da una regione all'altra, a seconda delle differenze nelle risorse biofisiche, nella gestione e in altri fattori (Pais et al., 2020). Sebbene l'adattamento attenuerà alcuni dei peggiori risultati previsti, il riscaldamento provocherà ingenti danni all'agricoltura dei Paesi in via di sviluppo nel corso del prossimo secolo (Mendelsohn, 2009), soprattutto perché in questi Paesi molte aziende agricole sono situate nelle basse latitudini e sopportano già climi troppo caldi (Mendelsohn, 2009). Entro i prossimi 30 anni, è probabile che si raggiunga la soglia critica di 1,5°C e oltre questo punto, i pericoli del riscaldamento globale aumenterebbero esponenzialmente (Mozell e Thach, 2014). Nonostante ciò, ci sono alcune aree in cui i cambiamenti climatici hanno avuto un impatto positivo sulla produzione agricola (Malhi et al., 2021a). Occorre sottolineare comunque che gli impatti negativi sui raccolti sono stati più frequenti rispetto a quelli positivi e che questi ultimi si sono verificati quasi esclusivamente nelle regioni a latitudine elevata (Pais et al., 2020).

Tuttavia, anche il settore agricolo riveste un ruolo significativo nella mitigazione dei cambiamenti climatici. L'agricoltura, la silvicoltura e il mutamento degli usi del suolo che contribuiscono al 20-24% delle emissioni globali di gas serra complessive (Pais et al., 2020), soprattutto di metano e protossido di azoto (Malhi et al., 2021). Le principali fonti di gas di questo settore sono i fertilizzanti azotati, le risaie allagate, la gestione del suolo, la conversione dei terreni, la combustione di biomasse e la produzione di bestiame e la relativa gestione del letame. L'industria

zootecnica rappresenta circa il 5%-10% del contributo complessivo al riscaldamento globale (Cole et al., 1997).

Di seguito sono elencati e brevemente descritti i principali effetti del cambiamento climatico sugli agroecosistemi.

1.3.1 Riduzione della biodiversità

Le variazioni climatiche possono avere un impatto sulla diversità biologica degli agroecosistemi, riducendo la loro capacità di adattamento e aumentando la vulnerabilità a malattie e parassiti (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Gli organismi vegetali e animali sono esposti a numerose fonti di stress ambientale, come la salinizzazione, la siccità, il calore o il freddo (Malhi et al., 2021b), che possono alterare la loro distribuzione geografica e accelerare i processi riproduttivi o di crescita. I cambiamenti climatici possono anche aumentare la sopravvivenza degli insetti dannosi, cambiare le relazioni tra le specie ospiti e i parassiti, modificare il fenomeno di svernamento e lo sviluppo stagionale, così come l'attività e la presenza dei predatori naturali (Reddy, 2013). Nel dettaglio, è stato stimato che un aumento di pochi gradi centigradi delle temperature medie porterà ad uno spostamento delle specie di 400-600 km verso regioni geografiche più settentrionali e fresche, oltre che alla scomparsa di alcuni sistemi e specie, che non riusciranno ad adattarsi al cambiamento o di cui verrà distrutto l'habitat (Mikhaylov et al., 2020; Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Gli effetti della scomparsa di alcune piante, animali, uccelli e di altri esseri viventi includono la variazione delle catene alimentari e dell'equilibrio degli ecosistemi, con conseguenze particolarmente gravi per gli ecosistemi acquatici e la biodiversità, sia ad alte che a basse latitudini (Mikhaylov et al., 2020; Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Questi cambiamenti avranno anche un impatto sulla produzione di colture, poiché l'aumento della temperatura potrebbe ridurre le rese, accorciare alcune fasi fenologiche e influenzare i processi di impollinazione e fioritura (Mahato, 2014; Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Inoltre, il riscaldamento globale determina un incremento dell'acidificazione degli oceani poiché l'anidride carbonica reagendo con l'acqua porta alla formazione di acido carbonico (Venkataramanan, 2011). Ciò causa la morte delle riserve di fitoplancton e una diminuzione delle sue capacità di immagazzinare carbonio (Mozell e Thach, 2014;

Venkataramanan, 2011). Secondo Mozell e Thach (2014), infatti, il pH della superficie oceanica è già sceso a 8,2, il valore più basso degli ultimi due milioni di anni.

1.3.2 Diffusione di malattie e parassiti

Il cambiamento climatico, principalmente a causa di variazioni di temperatura e umidità può avere conseguenze sull'insorgenza di malattie, parassiti, microrganismi ed erbe infestanti, che potrebbero arrecare danni a colture e animali (Malhi et al., 2021a; Parry et al., 1990; Reddy, 2013). In particolare, il riscaldamento globale può favorire la diffusione di insetti dannosi, come ad esempio la cicalina della vite o la cimice asiatica, che possono danneggiare le uve compromettendo così la qualità del vino. Un eventuale aumento dell'umidità nel microclima del vigneto invece, porterebbe ad un maggior problema di peronospora (Fraga et al., 2014), la quale sarebbe facilitata dal fatto che le temperature potrebbero modulare in modo variabile le caratteristiche delle piante, abbassandone le difese (Iltis et al., 2018). La peronospora e l'oidio in particolare, due delle principali malattie della vite, sono molto influenzate dalle condizioni meteorologiche. Temperature molto elevate potrebbero limitarle ma maggiori precipitazioni potrebbero aumentarne la loro diffusione e pericolosità (Merloni, 2017). L'avvicinarsi di climi più caldi e umidi porterà probabilmente ad un peggioramento dell'infestazione di parassiti, anche se le condizioni di volta in volta varieranno in base alla regione e alla capacità di adattamento dei parassiti stessi (Malhi et al., 2021a).

1.3.3 Cambiamento dei cicli stagionali

La produzione agricola risulta essere molto influenzata dal cambiamento dei cicli stagionali. La riduzione della produzione, dovuta alla siccità, subirà un aumento del 50% entro il 2050 e del 90% entro il 2100 per le principali colture (Li et al., 2009). Il cambiamento climatico può influenzare la disponibilità di acqua per l'irrigazione e per la produzione agricola, ma può anche influenzare la distribuzione delle piogge

nelle diverse regioni del mondo portando impatti significativi sia sull'ambiente che sulla comunità locale (Cordini e Stroppa, 2006). La riduzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature possono causare un aumento della siccità e una riduzione della disponibilità di acqua per le colture velocizzando quindi il processo di desertificazione. In relazione al suolo agricolo, l'aumento dei processi di erosione potrebbero portare a perdite di fertilità e alla riduzione della superficie utilizzabile per le attività produttive in quanto viene ridotta la capacità del terreno di trattenere acqua e sostanza organica, e ciò è direttamente correlato alla frequenza di eventi siccitosi alternati a piogge torrenziali ad alto potere erosivo rispetto alle normali precipitazioni (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). La disponibilità di acqua è un fattore critico nel determinare se il cambiamento climatico influenza positivamente o negativamente l'agricoltura. Attualmente, in Europa, è già possibile notare un cambiamento nella distribuzione degli eventi meteorologici con le precipitazioni che sono aumentate nella parte settentrionale e diminuite nella parte meridionale (Pirani, 2023). Questa differenza è evidente se si confrontano i 3000 mm/anno delle zone più occidentali della Norvegia con i 25 mm/anno di alcune aree a Sud della Spagna (Cordini e Stroppa, 2006). Anche i cicli stagionali possono quindi essere influenzati dal cambiamento climatico (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). L'aumento della temperatura, la diminuzione della disponibilità d'acqua e l'alterazione della distribuzione delle piogge, portano ad un incremento della frequenza, della lunghezza e dell'intensità di fenomeni meteorologici estremi (Venkataramanan, 2011).

1.3.4 Scioglimento dei ghiacciai e diminuzione della copertura nevosa

Negli ultimi decenni, a seguito dell'aumento delle temperature, si sta inoltre assistendo ad una diminuzione generale delle precipitazioni di carattere nevoso (Pirani, 2023), sia nell'emisfero boreale che australe (Venkataramanan, 2011). Di particolare rilievo è anche il fenomeno irreversibile di scioglimento dei ghiacciai e delle calotte polari nella zona artica, calata del 7,4% dal 1978 al 2003 (Cordini e Stroppa, 2006). A partire dalla metà degli anni '50, i ghiacci dell'Artico hanno subito

un cambiamento nella loro posizione di circa 2,8° di latitudine verso sud (Daly, 2022) e in particolare, tra il 1993 e il 2016, le rilevazioni della NASA hanno mostrato che la Groenlandia ha perso in media circa 281.000 milioni di tonnellate di ghiaccio all'anno, mentre l'Antartide ha subito una diminuzione di circa 119.000 milioni di tonnellate all'anno (Pais et al., 2020). Tuttavia, dal 2012 in poi, la perdita di massa dell'Antartide ha subito un aumento triplo rispetto al periodo precedente (Pais et al., 2020). È stato stimato che la perdita di acqua proveniente dai ghiacciai potrebbe portare ad una diminuzione della portata del fiume Gange del 67% nel periodo giugno-settembre, portando a forti carenze di acqua per 500 milioni di persone e addirittura per il 37% delle terre coltivate in India (Cordini e Stroppa, 2006).

1.3.5 Innalzamento del livello dei mari

L'innalzamento del livello dei mari, dovuto in parte allo scioglimento dei ghiacciai (Mikhaylov et al., 2020), porta ad una modifica della biodiversità degli ecosistemi oceanici e a perdite di territorio non solo a causa dei fenomeni erosivi (Zucaro e Pontrandolfi, 2007) ma anche in seguito all'intrusione di acqua salina all'interno delle riserve idriche di acqua dolce. Per quanto riguarda l'Italia, è stato previsto entro il 2050 un innalzamento del livello del mare di circa 25-30 cm e questo potrebbe causare l'inondazione di circa 4.000 km quadrati di aree costiere e pianure, con particolare riguardo per la Pianura Padana e Veneta (Zucaro e Pontrandolfi, 2007). Entro i prossimi 15 anni c'è la possibilità che i livelli degli oceani possano elevarsi di un ulteriore intervallo compreso tra 0,1 e 0,3 m, ed entro la fine del XXI secolo di 0,3-1 m (Mikhaylov et al., 2020). L'innalzamento del livello dei mari potrebbe rappresentare una grave minaccia per il settore agricolo in quanto le colture potrebbero venire sommerse, i pascoli potrebbero ridursi e le fonti di acqua dolce nelle aree costiere risulterebbero compromesse (Mikhaylov et al., 2020). In un prossimo futuro territori come i Paesi Bassi e alcune metropoli come New York, San Pietroburgo (Mikhaylov et al., 2020), New Orleans, Shangai, Venezia e il Cairo, potrebbero essere soggette a forti inondazioni o sommersioni, mentre interi

arcipelaghi come le Maldive e le Isole Marshall potrebbero addirittura scomparire (Zucaro e Pontrandolfi, 2007), rendendo così necessario un massiccio spostamento degli insediamenti umani (Mikhaylov et al., 2020). Ciò potrebbe creare una competizione per l'uso di territori oggi coltivati.

1.3.6 Migrazione dei vigneti

L'effetto del clima sull'industria vitivinicola è comunemente legato alla variazione della temperatura e ci si aspetta che l'aumento di quest'ultima, derivante dal riscaldamento globale, abbia un impatto rilevante sulla produzione di vino (Hall e Jones, 2009). Si prevede che il cambiamento climatico possa portare ad un anticipo delle fasi fenologiche della vite (Duchêne et al., 2010). Nelle regioni vitivinicole, la coltivazione di alcune varietà di uva tradizionali risulta essere sempre più difficile a causa del cambiamento climatico. Alcuni produttori stanno quindi cercando nuovi siti di coltivazione, magari a quote più elevate, più vicine alla costa o in zone più fresche, che potrebbero risultare più adatti alla produzione di vino di alta qualità (Proverbio e Gerbi, 2016; Ramos et al., 2018). Tuttavia, il clima ideale per coltivare specifiche varietà d'uva è geograficamente limitato e qualsiasi variazione dalla condizione ottimale potrebbe causare una significativa perdita per l'intera zona geografica, costituendo un'ulteriore pressione per i produttori a cambiare le varietà coltivate (Proverbio e Gerbi, 2016). Questo argomento, di rilevante importanza per il settore vitivinicolo, sarà sviluppato più in dettaglio nel terzo capitolo.

1.4 L'ACCORDO DI PARIGI

Dal 1979, quando l'Organizzazione meteorologica mondiale ha istituito la prima conferenza sul clima mondiale a Ginevra, il cambiamento climatico è stato ufficialmente riconosciuto come un argomento di rilevanza globale. Nel 1988, l'UNEP e l'Organizzazione Meteorologica Mondiale hanno collaborato per creare l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), un organismo internazionale incaricato di indagare sul cambiamento climatico. Nel 1994, è stata avviata la

Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), che ha stabilito gli obblighi di tutte le parti coinvolte, chiedendo alle nazioni industrializzate di mettere in atto strategie nazionali per alleviare l'inquinamento e rafforzare i sistemi di cattura del carbonio. Questo aveva l'obiettivo di ridurre le emissioni entro sei anni, tornando ai livelli registrati nel decennio precedente. L'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto nel 2005 ha comportato una significativa riduzione delle emissioni di gas serra, anche grazie alla promozione di fonti di energia pulita, al miglioramento dell'efficienza energetica e a programmi di riforestazione. Successivamente, nel 2015, durante la ventunesima conferenza delle parti dell'UNFCCC tenutasi a Parigi, è stato adottato da 195 paesi l'Accordo di Parigi, entrato poi in vigore nel 2016 (Fawzy et al., 2020).

Il raggiungimento dell'obiettivo del protocollo di Parigi presenta diverse sfide significative per tutti i Paesi partecipanti (Mikhaylov et al., 2020). Queste sfide includono la transizione verso fonti energetiche alternative ai combustibili fossili, lo sviluppo di tecnologie capaci di ridurre le emissioni di carbonio (Mikhaylov et al., 2020) e la messa in atto di meccanismi di supporto al quadro di lotta al cambiamento climatico esistente (Fawzy et al., 2020). L'obiettivo principale dell'accordo consiste nel limitare l'aumento della temperatura globale entro il 2100 a non oltre 2°C, oltre a perseguire ulteriori azioni tese a raggiungere un limite ancora più ambizioso di 1,5°C (Fawzy et al., 2020). Nello specifico è importante ridurre al minimo l'impatto dei gas serra nel mondo, raggiungendo il picco globale di emissione il prima possibile e realizzando un equilibrio tra le fonti di emissione umane e i pozzi di gas serra entro il periodo compreso tra il 2050 e il 2100 (Fawzy et al., 2020).

Attualmente non si è in linea con l'accordo, tuttavia, dai dati scientifici emerge che le tecnologie e le soluzioni necessarie per affrontare il cambiamento climatico sono già a disposizione. Questo consentirebbe di raggiungere gli obiettivi prestabiliti e ridurre le emissioni di gas serra nell'atmosfera (Verdolini, 2023).

CAPITOLO SECONDO

LA VITE NEI SUOI ASPETTI E GLI INDICI BIOCLIMATICI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DELLE TEMPERATURE SULLE PIANTE

2.1 RISCALDAMENTO GLOBALE E VITE

Capire i cambiamenti climatici e i loro possibili effetti sui sistemi naturali e antropici è diventato cruciale. Questa importanza deriva dalle variazioni nei livelli di gas serra e dalle alterazioni delle caratteristiche del territorio, che influenzano il bilancio energetico e radiativo del pianeta, la circolazione dell'aria e il ciclo dell'acqua (Jones et al., 2005).

Uno degli elementi chiave che influenzano l'attività biologica all'interno degli agroecosistemi è quindi la radiazione solare, che rappresenta la principale fonte di energia per il pianeta. Nell'emisfero nord, la Terra riceve quantità diverse di energia solare a seconda delle stagioni: in inverno, nonostante la sua prossimità al sole, riceve meno energia, mentre in estate, quando è più lontana, ne riceve di più. Questa variazione è dovuta all'angolazione con cui i raggi solari colpiscono la superficie terrestre, alla presenza di nuvole e, in misura minore, alla latitudine. Quando i raggi solari incidono perpendicolarmente sulla superficie, trasmettono una maggiore quantità di energia. Durante l'inverno, nonostante la vicinanza al sole, i raggi

arrivano con un angolo più obliquo e quindi trasmettono meno energia, riscaldando e illuminando in modo più modesto rispetto all'estate. Nel solstizio d'estate, il 22 giugno, l'angolazione del sole risulta infatti diversa rispetto a quella dell'equinozio d'autunno, il 23 settembre.

La quantità di energia che raggiunge la superficie terrestre è influenzata da diversi fattori, tra cui l'intensità della sorgente solare, l'altezza sull'orizzonte, l'assorbimento, la trasmissione e la riflessione. Il flusso della radiazione solare, rappresentato in figura 10, parte dal sole con un'energia di 1.367 kW/m^2 (nota come costante solare) e si riduce man mano che attraversa l'atmosfera. Parte di questa radiazione viene riflessa immediatamente dalla parte esterna dell'atmosfera, una parte penetra attraverso l'atmosfera e raggiunge il suolo, colpendo vegetazione e acqua, mentre un'altra parte subisce assorbimento atmosferico (Sperandio, 2013). Quando la Terra emette energia verso lo spazio, lo fa in lunghezze d'onda più lunghe rispetto a quelle della radiazione solare ricevuta gradualmente (Mozell e Thach, 2014). Alcune di queste lunghezze d'onda maggiori vengono assorbite dai gas serra presenti nell'atmosfera prima di essere dissipate nello spazio, contribuendo così al riscaldamento dell'atmosfera. Inoltre, una parte di questa energia viene riflessa nuovamente verso la superficie terrestre dai gas serra, contribuendo a riscaldarla gradualmente (Mozell e Thach, 2014). La Terra è costantemente esposta alle radiazioni elettromagnetiche del sole, ma non tutte raggiungono la superficie. Circa il 25% viene riflesso nello spazio dal pulviscolo atmosferico e dalle nuvole e un altro 25% viene assorbito dall'atmosfera stessa. Solo il 50% circa della radiazione solare raggiunge e riscalda direttamente la superficie terrestre, attraversando l'atmosfera, per poi venire nuovamente riflessa sotto forma di raggi infrarossi, cioè energia termica (Daly, 2022). La temperatura della Terra dipende quindi dal bilancio termico tra l'energia ricevuta dal sole e quella riflessa nello spazio, il tutto influenzato dagli effetti di assorbimento, trasmissione e riflessione (Daly, 2022).

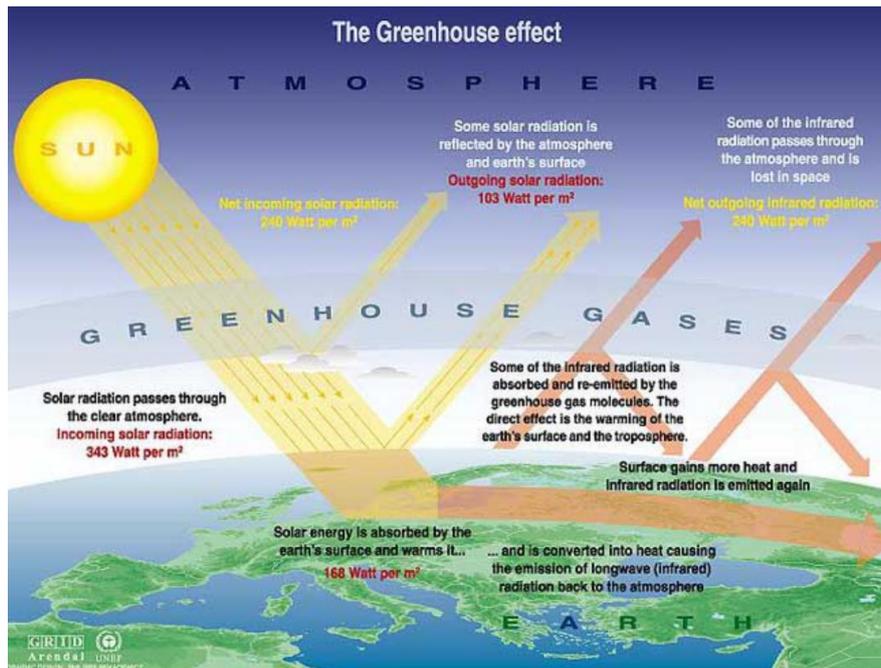


Figura 10: Flusso della radiazione solare (Fonte: Cristofalo, 2016).

La principale causa del riscaldamento nel bilancio energetico è quindi l'aumento dell'assorbimento della radiazione solare, il quale in particolar modo risulta essere direttamente influenzato dalla diminuzione delle nuvole. Le nuvole, infatti, hanno principalmente un effetto serra che contribuisce al riscaldamento dell'atmosfera. Quindi, una riduzione delle nuvole porta ad un maggiore assorbimento della radiazione solare e, di conseguenza, ad un riscaldamento (Trenberth e Fasullo, 2009).

Secondo le previsioni climatiche future, i modelli nuvolosi subiranno dei cambiamenti, portando ad un aumento dei periodi di irraggiamento nelle regioni mediterranee (Trenberth e Fasullo, 2009). Ad esempio, in California, l'aumento del vapore acqueo atmosferico ha portato ad un aumento asimmetrico della copertura nuvolosa nel periodo compreso tra il 1960 e il 2000: la copertura notturna in particolare è aumentata del 3,4%, mentre non sono stati registrati cambiamenti significativi nella copertura diurna (Nemani et al., 2001). Questo incremento della copertura notturna potrebbe così aver contribuito all'aumento delle temperature minime attraverso un processo di ri-irradiazione di energia a onde lunghe (Nemani et al., 2001).

Lo spettro elettromagnetico, riportato in figura 11, rappresenta l'insieme completo delle frequenze elettromagnetiche. Tra queste, di particolare interesse, è la luce UV, la quale è un tipo di radiazione elettromagnetica che ha una lunghezza d'onda più corta rispetto alla luce visibile ed è suddivisa in diverse categorie, tra cui UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) e UV-C (< 280 nm). Tuttavia, la maggior parte degli UV-B (~ 97%) e tutti gli UV-C vengono assorbiti dall'ozono presente nella stratosfera e non raggiungono mai la superficie terrestre (Jug e Rusjan, 2012). Gli UV-B si riferiscono a onde con una lunghezza d'onda compresa tra 280 e 320 nm, ma le uniche che riescono a raggiungere la superficie terrestre sono quelle con lunghezza d'onda superiori a 290 nm (Schultz, 2000).

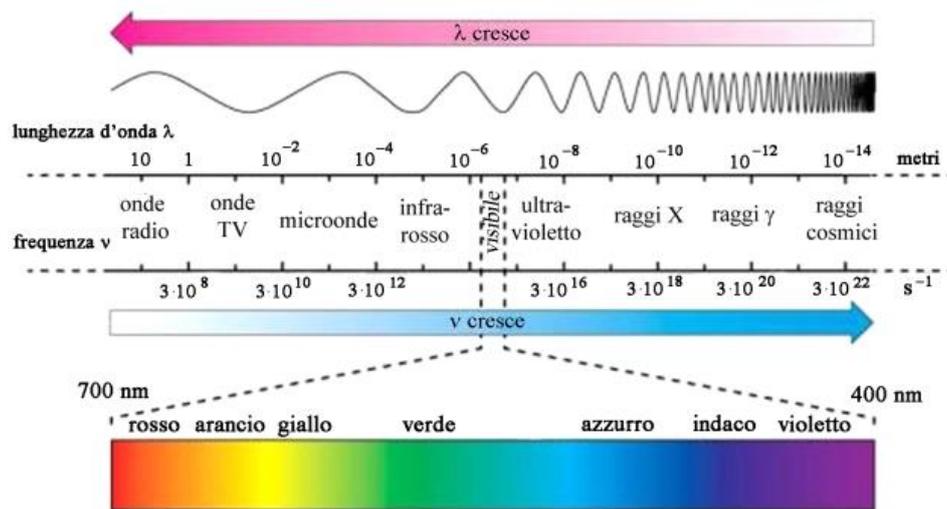


Figura 11: Rappresentazione dello spettro elettromagnetico.

<https://medicinaonline.co/2017/03/09/differenza-tra-raggi-infrarossi-ultravioletti-e-visibili/>

“I raggi UV-B sono quelli che influenzano maggiormente la vite” (Jug e Rusjan, 2012). È stato infatti dimostrato come essi inducano una risposta di adattamento nella vite (Martínez-Lüscher et al., 2016). Questa risposta si manifesta con una diminuzione iniziale della fotosintesi seguita da un successivo recupero. Questo adattamento è il risultato di un aumento dei composti che assorbono gli UV-B e dell'attività degli enzimi antiossidanti. In sostanza, la vite sviluppa meccanismi di difesa e protezione per far fronte agli effetti dannosi degli UV-B, consentendo di adattarsi all'esposizione a questa radiazione (Martínez-Lüscher et al., 2016).

La radiazione UV-B varia nella sua quantità e intensità in base a diversi fattori tra cui la latitudine, l'altitudine, la posizione del sole, il periodo dell'anno, la disposizione del vigneto, la copertura nuvolosa e lo spessore dello strato di ozono. Riguardo quest'ultimo è stato dimostrato che la diminuzione dell'ozono nella stratosfera comporta un aumento della radiazione UV-B che raggiunge la superficie terrestre (Jug e Rusjan, 2012). Il cambiamento climatico può quindi aumentare l'esposizione della vite alla radiazione UV-B (Martínez-Lüscher et al., 2015).

L'indebolimento dello strato di ozono è causato dalle emissioni di sostanze chimiche alogenate, come i clorofluorocarburi. Questa riduzione della protezione dello strato di ozono comporta una diminuzione della schermatura degli UV-B, aumentando il rischio di danni per gli organismi terrestri (Schultz, 2000). L'assottigliamento dello strato di ozono provoca infatti un cambiamento nella posizione spettrale dei raggi UV, spostandoli verso lunghezze d'onda più corte, che sono più nocive da un punto di vista biologico (Jansen et al., 1998). Durante gli episodi di buco nell'ozono, le radiazioni biologicamente dannose misurate a Palmer Station, in Antartide (64°S), si sono avvicinate o hanno addirittura superato i valori massimi estivi di San Diego, California, USA (32°N) (Madronich et al., 1998). Questo dimostra come la riduzione dello strato di ozono possa aumentare significativamente l'esposizione a raggi UV nocivi, con conseguenze potenzialmente dannose per gli organismi terrestri.

I cambiamenti climatici insieme alla concentrazione di ozono stratosferico possono quindi avere un impatto sull'esposizione delle regioni viticole ai raggi UV-B (Martínez-Lüscher et al., 2016). Le proiezioni a lungo termine riguardo ai futuri livelli di UV-B risultano essere però complesse e incerte. Tuttavia, le migliori previsioni attuali suggeriscono che entro il 2050 si potrebbe assistere ad un graduale recupero dei livelli precedenti alla riduzione dello strato di ozono (Madronich et al., 1998).

Riguardo lo sviluppo morfologico l'induzione a fiore di una pianta può essere influenzata dal fotoperiodo, ovvero la lunghezza e la continuità delle ore di luce. Nella vite, oltre agli effetti quantitativi, la radiazione solare ha un'influenza sulla composizione e sugli effetti qualitativi del prodotto ottenuto, difatti la diminuzione

delle ore di sole può ritardare il processo di maturazione (Lough et al., 1983). Nonostante gli studi iniziali descrivessero la vite come relativamente insensibile al fotoperiodo, ricerche recenti hanno dimostrato che questo fattore ha un effettivo impatto sulla fisiologia e fenologia della vite, come avviene per la maggior parte delle piante (Molitor et al., 2014). La vite è una specie longigiurna quantitativa per cui, se esposta a condizioni di giorno lungo, la sua fertilità aumenta, con un incremento nel numero di grappoli per tralcio. Per un corretto sviluppo, la vite richiede almeno 12 ore di luce al giorno, infatti, in alcune varietà di vite è stato dimostrato che il numero di primordi di infiorescenze per gemma aumenta quando le giornate sono più lunghe rispetto a quelle più corte. Le specie di vite di origine americana, come *Vitis lambrusca*, sono più sensibili alla durata delle giornate rispetto alla specie *Vitis vinifera*. Il fotoperiodo gioca quindi un ruolo cruciale nella fisiologia e nella produttività della vite, con conseguenze differenti tra diverse varietà e specie (Srinivasan e Mullins, 1981). Ciononostante, ricerche scientifiche hanno evidenziato che una luminosità pari a solo un quarto della luce solare diretta è adeguata per massimizzare la fruttificazione in piante di Moscato d'Alessandria (Srinivasan e Mullins, 1981).

L'esposizione della chioma della vite alla radiazione solare rappresenta una base importante per prendere decisioni agronomiche, poiché una maggiore intercettazione di luce solare porta ad una maggiore fotosintesi e, di conseguenza, ad una maggiore resa complessiva. Diverse pratiche viticole possono influenzare l'esposizione dei grappoli d'uva al sole, determinando una maggiore temperatura degli acini esposti al sole (5-13°C in più) rispetto a quelli ombreggiati della stessa vite (Mira de Orduña, 2010). Una vite coltivata all'ombra produrrà meno di una esposta al sole, poiché l'ombreggiamento riduce il processo di fruttificazione (Srinivasan e Mullins, 1981). È frequente inoltre, osservare una differenza nella fruttificazione delle gemme all'interno della chioma delle viti rispetto a quelle posizionate all'esterno, dove godono di una maggiore illuminazione. L'adozione di tralci e la pratica di separare le chiome, come è stato osservato nel sistema di allevamento a doppia cortina utilizzato a Ginevra, consente un significativo miglioramento della fruttificazione delle gemme e un aumento complessivo della produttività del 50-90% (Srinivasan e Mullins, 1981).

Durante le ore pomeridiane, quando l'intensità solare è maggiore, la direzione dei filari in vigneto diventa meno rilevante. Tuttavia, a 35 gradi di latitudine, in piena estate, le file di vigneti orientate nord-sud permettono di intercettare circa il 17% in più di radiazione solare rispetto alle file orientate nord-est o nord-ovest. Nell'emisfero settentrionale, il sole si trova nella parte meridionale del cielo per gran parte dei giorni estivi, risultando così vantaggioso per i frutti posizionati sul lato meridionale dell'asse ovest-est, i quali ricevono maggiore esposizione alla luce solare. Tuttavia, l'orientamento nord-sud può avere svantaggi in climi caldi, poiché i frutti sul lato occidentale ricevono luce diretta a mezzogiorno (Zoecklein e Gump, 2022). La decisione riguardante l'orientamento dei filari, infatti, ha un impatto rilevante sul microclima dell'area di coltivazione (Hunter et al., 2016) e sembrerebbe che l'orientamento nord-est/sud-ovest sia il più appropriato in caso di temperature estreme (Hayman et al., 2012). Anche la forma di allevamento del vigneto influisce notevolmente sulla quantità di radiazione solare che le piante di vite possono intercettare. Risulta quindi fondamentale bilanciare la crescita della chioma con le specifiche condizioni del terroir, come l'orientamento delle file, la distanza tra i filari, il tipo di allevamento, la tipologia di terreno e le condizioni climatiche. Risulta quindi cruciale pianificare fin dall'inizio un adeguato sistema di allevamento, considerando tutte queste caratteristiche, al fine di sfruttare al meglio il potenziale del vigneto (Hendrickson et al., 2004). In questo modo, sarà possibile ottimizzare la fotosintesi della vite e di conseguenza massimizzare la qualità e la resa delle uve. Anche la tipologia di cultivar determina una diversa risposta alle diverse intensità di luce (Srinivasan e Mullins, 1981).

2.2 ESIGENZE TERMICHE DELLA VITE

La radiazione che colpisce il terreno ha un notevole impatto sull'aumento della temperatura, influenzando in modo significativo tutti i processi biologici della pianta. Il clima gioca infatti un ruolo fondamentale nella maturazione dei frutti per ottenere le caratteristiche ideali per produrre specifici tipi di vino, rendendolo uno degli aspetti più critici nel processo. Come elemento chiave del terroir, il clima

esercita un'influenza profonda sulla capacità di una regione o di un sito di produrre uve di alta qualità, e di conseguenza, vini pregiati. In tutto il mondo, le condizioni climatiche medie delle zone vinicole svolgono un ruolo determinante nella scelta delle varietà di uva coltivate, mentre la produzione e la qualità del vino sono influenzate da fattori specifici del sito, decisioni di allevamento e fluttuazioni climatiche a breve termine. Questo rende il clima un elemento chiave nel definire l'unicità di ogni regione nel suo potenziale per produrre vini distinti e di alta qualità (Jones et al., 2012).

La vite è un organismo pecilotermo, ovvero il suo ciclo vegetativo e il suo metabolismo sono influenzati dalla temperatura dell'ambiente circostante; infatti, le attività metaboliche all'interno delle cellule vegetali sono principalmente guidate dalla temperatura dell'ambiente in cui la pianta si trova. La vite non è in grado di regolare autonomamente la sua temperatura e il suo metabolismo, ma risponde alle variazioni climatiche esterne per supportare le sue funzioni vitali (Wiforagri, 2020). Di conseguenza, le variazioni estreme di temperatura, sia verso l'eccesso di caldo che di freddo, possono causare danni significativi alla vite, influenzando la sua fisiologia e la produzione di uva. Tuttavia, alcune varietà di vite possono tollerare meglio le temperature estreme rispetto ad altre (Santos et al., 2020). Nonostante la vite sia tollerante alla siccità in misura considerevole, condizioni di estrema siccità possono avere un impatto negativo sul suo sviluppo (Santos et al., 2012). Inoltre, quando la vite è sottoposta a forti stress termici, la sua capacità fotosintetica può subire una significativa riduzione, oltre a provocare danni ad altri processi biochimici (Santos et al., 2020).

Secondo gli studi condotti da Jones e Alves (2012), “la temperatura è il principale fattore che influenza la crescita e la produttività complessiva della vite”. Questa coltura risulta infatti particolarmente esigente dal punto di vista termico, come evidenziato anche dalle ricerche di Fraga et al. (2013). In particolare, ci sono 5 punti cardinali termici (Maucieri, 2021a):

- temperatura minima letale: è la temperatura alla quale si verificano danni irreversibili alle piante e se esposte a lungo a questa condizione, può portare

alla loro morte. Per la maggior parte delle colture, questa soglia si situa tra 0°C e -2°C;

- temperatura minima biologica o zero di vegetazione: segna il punto in cui la pianta interrompe l'attività vegetativa;
- temperatura ottimale: si raggiunge quando le temperature notturne e diurne consentono il massimo accrescimento della pianta, risultando in una maggiore produzione e un minor consumo di risorse;
- temperatura massima biologica: indica il limite massimo sopportabile dalla coltura, al di sopra del quale si manifestano squilibri fisiologici e una significativa riduzione di crescita e produzione;
- temperatura massima letale: rappresenta la soglia oltre la quale la coltura non può sopravvivere e conduce inevitabilmente alla sua morte.

Di particolare interesse è lo zero di vegetazione (temperatura minima biologica), ovvero la temperatura alla quale la pianta riduce l'attività vegetativa e consuma la stessa quantità di materia organica che produce. Per la vite questo valore risulta essere di 10°C (Mullins et al., 1992). Con temperature inferiori o pari a 10°C, infatti, i tassi di fotosintesi risultano praticamente nulli. Tuttavia, si osservano picchi di produzione e di accumulo di carboidrati quando le temperature si collocano tra i 25 e i 35°C (Nunes et al., 2016). In particolare il picco della fotosintesi si verifica tra i 22°C e i 27°C (Zoecklein e Gump, 2022). Quando la temperatura supera i 40°C invece, si registra una significativa riduzione del tasso fotosintetico (Nunes et al., 2016).

La temperatura dell'aria è considerata il fattore atmosferico più influente sulla crescita e sullo sviluppo della vite, a condizione che le esigenze idriche, di irraggiamento e di nutrimento siano soddisfatte (Santos et al., 2020). *Vitis vinifera* è una specie esigente e richiede un clima adeguato per uno sviluppo ottimale (Santos et al., 2012). A livello climatico, le regioni viticole tradizionali in tutto il mondo sono confinate principalmente in un'area dove le temperature medie del periodo vegetativo (aprile-ottobre nell'emisfero nord, ottobre-aprile nell'emisfero sud) sono comprese tra 12-13°C e 22-24°C. Temperature inferiori a 12-13°C sono comuni in regioni con stagioni vegetative troppo brevi per il corretto sviluppo della vite, con bassi livelli di radiazione solare e accumulo termico insufficiente. Al

contrario, temperature superiori a 22-24°C possono causare uno stress termico eccessivo per le viti, spesso associato a uno stress idrico significativo in climi secchi, o ad una forte pressione di parassiti e malattie in climi umidi. In queste aree, può essere difficile soddisfare il fabbisogno in freddo per il periodo di dormienza, portando ad una rottura irregolare dei germogli (Santos et al., 2020). Ad oggi la produzione di vini di alta qualità è maggiormente realizzabile in zone con temperature medie del periodo vegetativo comprese tra i 13°C e i 21°C (Figura 12) (Jones e Alves, 2012).

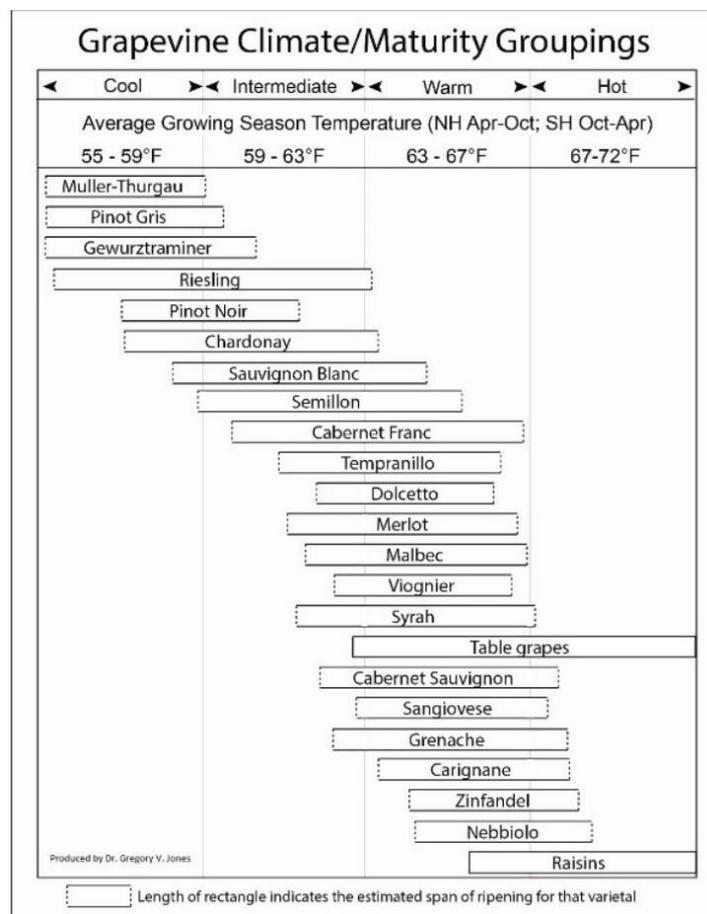


Figura 12: Suddivisione delle regioni viticole in diverse zone climatiche e livelli di maturazione, tenendo conto delle condizioni climatiche e del ciclo di crescita delle varietà di uve coltivate in regioni che vanno dalle più fresche alle più calde in tutto il mondo (Fonte: Jones e Alves, 2012).

La lunghezza della stagione di crescita è un fattore cruciale che influisce sulla qualità dell'uva e, di conseguenza, sulla qualità del vino. Questo perché la

temperatura dell'aria durante il periodo di maturazione ha un impatto significativo sulla composizione delle uve raccolte. Di conseguenza, il momento in cui avviene la maturazione, sia durante le calde giornate dell'estate che nei mesi più freschi dell'autunno, può determinare la potenziale qualità del vino per un'annata specifica (Hall e Jones, 2009).

Nelle regioni viticole tradizionali, il ciclo vegetativo della vite si estende per la durata di un anno, mentre il ciclo riproduttivo dura due anni. In generale, il ciclo della vite può essere diviso in due fasi principali: la fase di dormienza e il periodo vegetativo. Nello specifico, lo sviluppo fenologico della vite, che come detto è influenzato dal clima, è caratterizzato da diverse fenofasi, come mostrato in figura 13 (Santos et al., 2020).

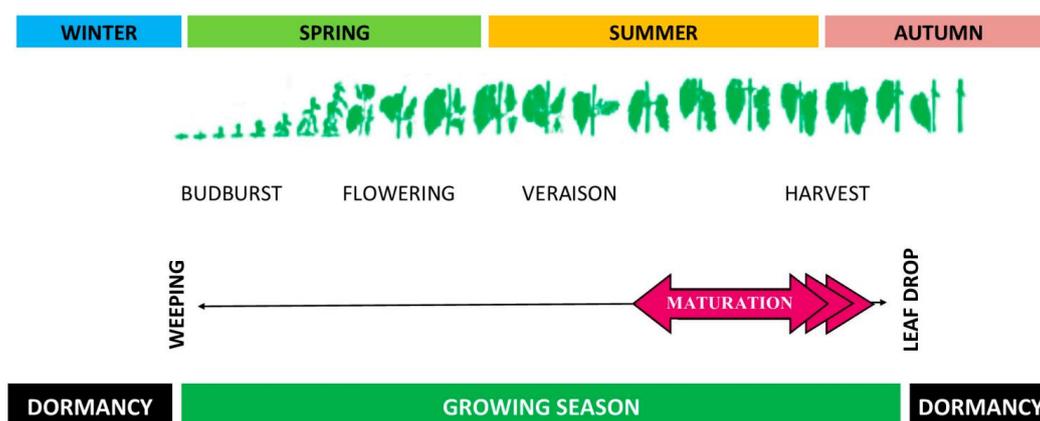


Figura 13: Ciclo vegetativo e principali fasi fenologiche della vite (Fonte: Santos et al., 2020).

Secondo Santos et al. (2020), la durata del periodo vegetativo per ogni varietà di vite è direttamente influenzata dalla temperatura media dell'aria durante tale periodo, ma un ruolo importante è anche ricoperto dall'umidità del suolo e dalle pratiche di gestione delle colture. La vite, come affermato da Bagagiolo et al. (2021), ha quattro stadi di sviluppo principali in cui è necessario che ci siano temperature medie adeguate come riportato da Vinoway (2008):

- germogliamento: rappresenta l'avvio della fase di crescita vegetativa (Duchêne et al., 2010). Si verifica quando le temperature oscillano tra i 6 e i 12°C (Vinoway, 2008) e quindi nell'ultima settimana di aprile (Ramos et al., 2018);

- fioritura: è il momento cruciale in cui avviene la fecondazione e si formano gli acini (Duchêne et al., 2010). Questo processo si verifica tipicamente quando le temperature si collocano tra i 17 e i 22°C (Vinoway, 2008) e quindi a metà giugno circa (Ramos et al., 2018);
- invaiatura: è l'inizio del processo di maturazione delle uve, che prosegue fino alla raccolta, quando il contenuto di zuccheri e l'acidità raggiungono i livelli richiesti per la produzione del vino (Duchêne et al., 2010). Questa fase si verifica generalmente quando le temperature si aggirano tra i 22 e i 25°C (Vinoway, 2008) e quindi nella seconda o terza settimana di agosto (Ramos et al., 2018);
- piena maturazione: la maturazione non rappresenta una fase fenologica ben definita a causa della diversità delle varietà di uva (Duchêne et al., 2010). Tuttavia, si può considerare che la piena maturazione si verifichi quando le temperature si aggirano tra i 18 e i 23°C (Vinoway, 2008). Questo momento cruciale di sviluppo delle uve solitamente avviene verso la fine di settembre o l'inizio di ottobre (Ramos et al., 2018).

La durata delle fasi fenologiche della vite varia notevolmente a seconda delle varietà di uva e viene principalmente influenzata dalle temperature dell'aria durante la stagione di crescita (Bagagiolo et al., 2021). Ciò significa che le fasi fenologiche possono differire significativamente sia tra diverse cultivar che tra diverse regioni e anni di coltivazione (Santos et al., 2020).

Le condizioni di temperatura e precipitazioni prima della fioritura risultano essere fondamentali per il processo (Templ et al., 2021). Ad esempio, alcune varietà di uva, come il Riesling e lo Shiraz, avviano il processo di fioritura con temperature intorno ai 20°C, mentre per il Moscato di Alessandria si richiedono temperature più elevate, intorno ai 25°C. Il Cabernet-Sauvignon, invece, ha bisogno di temperature più basse rispetto al Rkatsiteli per dare inizio alla fioritura. D'altra parte, le coltivazioni di uve americane, come il Delaware, mostrano infiorescenze che si sviluppano a temperature più basse (21-22°C) rispetto alle varietà tradizionali (27-28°C) (Srinivasan e Mullins, 1981).

La fioritura appare strettamente collegata ai livelli di temperatura massima registrati nel mese precedente, mentre per l'invasatura e la vendemmia diventano più rilevanti le temperature medie o gli indici di accumulo di calore (Tomasi et al., 2011). In particolare, le temperature accumulate dopo il 20 marzo svolgono un ruolo cruciale nell'avvio delle diverse fasi fenologiche e, conseguentemente, mostrano una forte correlazione con tutti gli eventi di crescita (Ramos et al., 2018). Inoltre, la temperatura registrata nel mese finale di maturazione è considerata un fattore particolarmente significativo nell'influenzare il vino prodotto (Hall e Jones, 2009).

I cambiamenti climatici e le variazioni nella maturazione hanno evidenziato e continueranno ad evidenziare impatti significativi sulla qualità del vino, come la rapida crescita delle piante e lo squilibrio dei profili di maturazione (Jones e Alves, 2012). Questi cambiamenti climatici influiranno sull'allegagione, sulla maturità, sull'uniformità del raccolto e sulla valutazione della maturità (Zoecklein e Gump, 2022), portando ad uno spostamento delle date dell'ultima gelata primaverile e del germogliamento a causa appunto dell'aumento delle temperature (Molitor et al., 2014), ma tutto questo verrà trattato più nel dettaglio nel terzo capitolo.

2.3 SOMMA TERMICA E INDICI BIOCLIMATICI

2.3.1 Growing Degree Days (GDD)

Il riscaldamento globale ha quindi un impatto significativo sulla vite, poiché questa ha specifiche esigenze termiche e la sua fenologia varia in base alla temperatura. Pertanto, diventa essenziale ottenere chiari riferimenti per poter comprendere come questa pianta si adatti e risponda a questo fenomeno di innalzamento delle temperature.

La scelta dei climi ideali per coltivare varietà di uva da vino è tradizionalmente basata su diversi parametri legati alla temperatura. La temperatura risulta essere il fattore più significativo per la crescita e la resa complessiva delle viti ma ciò non

significa che fattori come le precipitazioni o altri elementi meteorologici non siano rilevanti (Jones et al., 2012).

Il concetto di somma termica viene spesso utilizzato per descrivere l'influenza della temperatura sull'andamento dello sviluppo delle piante (Scarpate et al., 2012). I gradi giorno, noti come *Growing Degree Days* (GDD), sono ampiamente utilizzati come misura comune dell'accumulo di calore per valutare il tasso di crescita e lo sviluppo fenologico delle colture (Scarpate et al., 2012). I GDD rappresentano la somma termica delle differenze tra le temperature medie giornaliere e lo zero di vegetazione, considerando solo i giorni in cui tale valore viene superato, come rappresentato in figura 14. Questo calcolo può essere effettuato per l'intero ciclo colturale o per singole fasi fenologiche (Brichetto e Alemanno, 2022; Pastore et al., 2015).

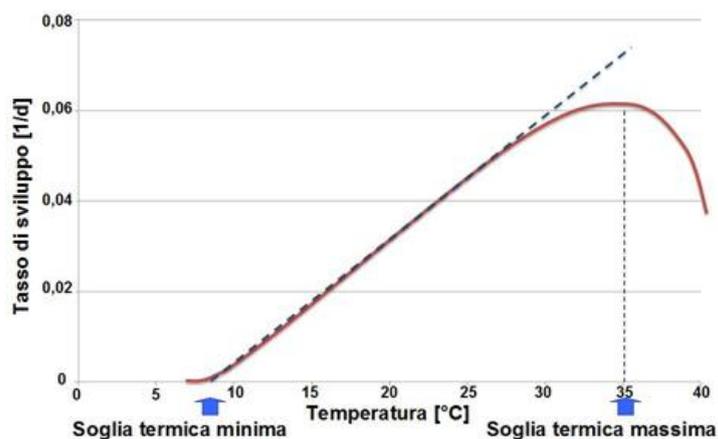


Figura 14: Grafico esemplificativo del calcolo dei gradi giorno.

<https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/61>

01

Per calcolare i gradi giorno di crescita per un singolo giorno (GDD_i), si utilizza la seguente formula:

$$GDD_i = (T_{max} + T_{min}) / 2 - b$$

dove:

- T_{max} è la temperatura massima registrata in una giornata (in °C);
- T_{min} è la temperatura minima registrata in una giornata (in °C);
- b è la temperatura di base, al di sotto della quale non ci sarà una crescita significativa, ovvero lo zero di vegetazione.

La determinazione dei GDD per un periodo di tempo viene ottenuta sommando i valori dei GDD giornalieri. Di conseguenza i GDD vengono utilizzati anche per definire i periodi di maturazione delle uve, in particolare per la determinazione di date di maturazione approssimative (Hall e Jones, 2009).

L'accumulo dei GDD viene considerato come un indicatore generale delle condizioni termiche in una specifica regione viticola. Pertanto, la quantificazione della somma termica necessaria per le diverse fasi del ciclo viticolo può fornire informazioni utili per stimare la durata del ciclo colturale e quindi le possibili date di vendemmia sulla base delle condizioni climatiche stagionali (Scarpate et al., 2012). Questo inoltre può fornire informazioni utili per la gestione delle attività colturali (potatura, concimazione, difesa fitosanitaria, ecc.), indicazioni sulle caratteristiche della stagione in corso, sugli effetti potenziali dei cambiamenti climatici sulla vite e sulla produzione di uva (Pastore et al., 2015).

È rilevante sottolineare che la vite non mostra crescita al di sotto di una temperatura pari ai 10°C, che come già anticipato rappresenta il suo zero di vegetazione, mentre oltre i 19°C la sua velocità di crescita si stabilizza senza ulteriori aumenti significativi. Di conseguenza, il calcolo dei GDD considera questi limiti termici. Nello specifico, viene impostato un massimo di 9°C al giorno per tener conto dell'assenza di crescita oltre una temperatura media di 19°C. Ciò implica che gli accumuli di calore calcolati con un massimo di 9°C al giorno, noti come gradi giorno biologicamente efficaci, risultino inferiori rispetto a un metodo senza limite superiore di GDD. I giorni biologicamente efficaci cumulativi (BEDD) rappresentano la somma dei GDDi per un certo numero di giorni in un periodo specifico, con un limite massimo di accumulo di 9°C in un singolo giorno (Hall e Jones, 2009).

La maturazione completa delle uve si verifica quando si raggiunge un determinato accumulo di GDD al di sopra della temperatura soglia. Tuttavia, è importante notare che queste soglie possono variare a seconda della varietà di vite e della regione di coltivazione. Un cambiamento climatico significativo e favorevole alla coltivazione della vite è stato osservato negli ultimi trent'anni, evidenziato dall'aumento della temperatura media dell'aria durante il periodo vegetativo, misurato come somma

delle temperature attive (SAT), la quale rappresenta la somma delle temperature medie giornaliere superiori a 10°C. Per dimostrare questo aumento della temperatura riportiamo l'esempio della città di Skierniewice (Polonia centrale), la quale nel periodo 1981-2000 riportava una SAT media pluriennale che si attestava poco al di sotto dei 2500°C e in particolare negli anni 1987-1989 era di 2480°C. Nel 2003, la SAT ha superato i 2700°C, nel 2005 ha raggiunto i 2550°C e nel 2006, considerato l'anno più caldo registrato, ha addirittura raggiunto i 2900°C (Lisek, 2008).

La maturazione dell'uva non dipende però solamente dai GDD accumulati, ma in minor parte anche da altri fattori come l'irraggiamento solare, l'umidità dell'aria, la disponibilità idrica del suolo, l'altitudine, la posizione geografica, la gestione del vigneto e la presenza di malattie o parassiti. Di conseguenza, queste soglie termiche e le temperature di maturazione possono variare significativamente da una zona di coltivazione all'altra.

Tuttavia, è importante considerare che il sistema dei GDD, ampiamente utilizzato nell'ambito agronomico per valutare l'impatto delle temperature sulle colture, presenta alcune limitazioni da tenere in considerazione. Queste limitazioni includono la mancanza di considerazione della risposta fotosintetica alle temperature elevate, che possono causare stress alle piante; trascura le fasi iniziali dello sviluppo delle colture, le quali dipendono maggiormente dalla temperatura del terreno anziché da quella dell'aria. Le escursioni termiche inoltre, che possono influenzare il processo di crescita delle piante, non vengono adeguatamente considerate ed infine, il sistema dei GDD non tiene conto di altri fattori importanti come la disponibilità di azoto e acqua, che possono influire sulla durata complessiva del ciclo delle colture (Maucieri, 2021b).

Nonostante queste limitazioni, è importante sottolineare che il sistema dei GDD rimane comunque un metodo affidabile per descrivere l'effetto delle temperature sulle colture (Pastore et al., 2015), ma per avere una valutazione completa e precisa della crescita delle piante risulta necessario considerare anche altri fattori e variabili citate in precedenza.

2.3.2 Indici bioclimatici

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi indici bioclimatici per valutare la vocazionalità climatica dei territori viticoli e monitorare i cambiamenti climatici nelle regioni vinicole (Sebastiani et al., 2005). Questi indici integrano le interazioni tra la pianta e l'atmosfera, tenendo conto dello sviluppo fisiologico delle piante e possono essere utilizzati per valutare l'idoneità di una regione o di un sito specifico per la viticoltura, così come per valutare le variazioni spaziali del potenziale varietale e delle condizioni climatiche durante il periodo vegetativo (Jones et al., 2005)

Gli indici bioclimatici, che spesso si basano sulla temperatura, come i GDD, forniscono una descrizione dell'idoneità di una determinata regione alla produzione di vino e sono ampiamente utilizzati per la zonazione viticola in Europa. Tra gli indici più comuni utilizzati in viticoltura ci sono quelli di Winkler e di Huglin (Santos et al., 2020).

L'obiettivo di questi indici bioclimatici risulta essere quello di valutare la predisposizione enologica dei territori e individuare le varietà di uva che meglio si adattano alle diverse condizioni climatiche. Sono strumenti essenziali per comprendere la relazione tra clima e pianta in viticoltura. Tipicamente si basano sulle temperature medie e massime giornaliere, consentendo di valutare l'idoneità di una specifica varietà di uva per crescere in base all'apporto termico e di analizzare il livello di maturazione delle uve durante l'annata in corso (Bricchetto e Alemanno, 2022). Di seguito gli indici e le grandezze derivate considerate.

2.3.2.1 Indice di Winkler

L'indice di Winkler (WI) è uno dei metodi più utilizzati per classificare le zone di produzione vinicola in base alle condizioni climatiche ed è stato sviluppato da Amerine e Winkler nel secolo scorso (Vercesi et al., 2003). Questo metodo si basa sulla somma dei GDD, che rappresentano il numero di gradi sopra i 50°F (10°C) di

temperatura media giornaliera, dal 1° aprile fino a maturazione e raccolta, che si suppone avvenga entro il 30 ottobre nell'emisfero Nord (Bricchetto e Alemanno, 2022). Nel calcolo dell'indice di Winkler, come possiamo vedere nella seguente formula, vengono considerate solo le temperature "attive" superiori allo zero di vegetazione di 10°C durante il periodo vegetativo delle viti (Teslic' et al., 2017; Vercesi et al., 2003):

$$WI = \sum_{i=1}^{1apr-31ott} (T_{med,i} - 10^{\circ}C) \quad se \ T_{med,i} > 10^{\circ}C$$

I GDD vengono quindi comunemente utilizzati per determinare le regioni climatiche adatte alla coltivazione della vite e con il lavoro di Winkler, inizialmente sviluppato per la California, è stato possibile classificare cinque regioni climatiche sulla base delle somme termiche stagionali (Hall e Jones, 2009). Questa classificazione permette di assegnare un certo range di somma termica alle regioni in modo da suddividere il territorio in zone a diversa vocazione vitivinicola (Amerine e Winkler, 1944). Sulla base della disponibilità termica in GDD calcolati con l'indice di Winkler, risulta quindi possibile classificare il territorio viticolo nelle seguenti categorie (Zorer et al., 2011):

- Troppo freddo: $IW < 850^{\circ}C$;
- Regione I: $851 - 1389^{\circ}C$;
- Regione II: $1390 - 1667^{\circ}C$;
- Regione III: $1668 - 1944^{\circ}C$;
- Regione IV: $1945 - 2222^{\circ}C$;
- Regione V: $2223 - 2700^{\circ}C$;
- Troppo caldo: $IW > 2701^{\circ}C$.

Si tratta di un metodo ampiamente utilizzato per quantificare il contributo termico che la vite ha a disposizione per l'attività metabolica e fisiologica (Bricchetto e Alemanno, 2022). Esso fornisce importanti informazioni sulle condizioni climatiche adatte per la coltivazione di diversi vitigni e contribuendo alla valutazione delle potenzialità viticole di una determinata area, come possiamo vedere in tabella 1.

Tabella 1: Alcuni vitigni consigliati in base ai valori di sommatoria termica di Winkler presenti negli intervalli termici specificati (Fonte: Vercesi et al., 2003; Wiforagri, 2020).

SOMMATORIE TERMICHE (WI)	VITIGNI NERI	VITIGNI BIANCHI
1200 - 1400	Gamay – Pinot Nero	Chardonnay – Riesling – Gewurztraminer
1400 – 1600	Cabernet Franc – Cabernet Sauvignon – Ciliegiole – Gamay – Grignolino – Malbec – Merlot – Pinot Nero	Albana – Chardonnay – Riesling – Pinot Bianco – Sauvignon – Trebbiano Toscano – Trebbiano Romagnolo
1600 - 1800	Cabernet Sauvignon – Carignan – Lambrusco – Grignolino – Malbec – Refosco – Ruby Cabernet - Sangiovese	Albana – Montuni – Pignoletto – Pinot Bianco – Riesling Italoico – Sauvignon – Semillon – Trebbiano Toscano – Trebbiano Romagnolo
1800 - 2000	Aleatico – Barbera – Nebbiolo – Lambrusco – Refosco – Ruby Cabernet - Sangiovese	Malvasia Bianca – Montuni – Moscato Bianco – Pignoletto – Trebbiano Romagnolo

2.3.2.2 *Indice di Huglin*

L'indice di Huglin (IH), chiamato anche indice eliotermico (Teslic' et al., 2017), è stato sviluppato da Pierre Huglin con l'obiettivo di migliorare la formulazione di Winkler (Wiforagri, 2020). Esso, a differenza dell'indice di Winkler, il quale ha il difetto di annullare il contributo delle giornate con temperatura media inferiore a 10°C (anche nel caso in cui la temperatura massima superasse questo valore), introduce anche la temperatura massima giornaliera (Tmax) nella sommatoria dei GDD (Brichetto e Alemanno, 2022) e inoltre rileva in modo migliore le condizioni favorevoli alla fotosintesi (poiché la sola temperatura media considerata nei casi precedenti è comprensiva anche delle temperature notturne, che risultano inefficaci per questo fenomeno) (Brichetto e Alemanno, 2022). L'indice di Huglin rappresenta una formulazione di GGD simile a quella di Winkler (Tomasi et al., 2011; Zoecklein e Gump, 2022), ma risulta di fondamentale importanza la variabile

aggiuntiva della latitudine inclusa per il suo impatto sulla durata del giorno (Zoecklein e Gump, 2022). Viene quindi introdotto un fattore di correzione e cioè un coefficiente di latitudine (K) che tiene conto del periodo medio di luce diurna (Tomasi et al., 2011) verso latitudini più elevate (Teslic' et al., 2017).

Questo indice è valutato da inizio aprile a fine settembre (Brichetto e Alemanno, 2022) ed è particolarmente indicato per le zone dove l'escursione termica è elevata e dove un utilizzo esclusivo delle temperature medie causerebbe una sottostima (o sovrastima) ancora più accentuata nell'accumulo di unità termica. Questo indice perciò risulta essere maggiormente indicato per le zone collinari (Wiforagri, 2020). Di seguito la formula, dove nel caso di valori negativi di " $T_{med,i} - 10^{\circ}C$ " vanno posti a zero (Brichetto e Alemanno, 2022):

$$IH = \sum_{i=1}^{1apr-30sett} \frac{(T_{med,i} - 10^{\circ}C) + (T_{max,i} - 10^{\circ}C)}{2} * K \quad se \ T_{max,i} > 10^{\circ}C$$

L'indice di Huglin viene impiegato per confrontare e classificare le principali regioni vinicole e per determinare la scelta delle varietà di uva da coltivare, in particolare viene ampiamente utilizzato in Francia come parametro elietermico in viticoltura (Laget et al., 2008). Questo indice infatti consente di suddividere il territorio viticolo in diverse categorie, che vediamo riportate qui di seguito, basate sulla disponibilità termica in GDD calcolati con l'indice di Huglin (Irimia et al., 2013):

- Molto freddo: ≤ 1500 , in cui solo le cultivar con maturazione precoce riescono a raggiungere la maturità;
- Freddo: $1500 < HI \leq 1800$;
- Temperato: $1800 < HI \leq 2100$;
- Temperato-caldo: $2100 < HI \leq 2400$;
- Caldo: $> 2400 \leq 3000$, ha un potenziale per riuscire a portare a maturazione una serie di varietà tardive (con rischi di stress associati);
- Molto caldo: $IH > 3000 \rightarrow$ non ci sono vincoli elietermici per l'area di uva da maturare.

Esiste una relazione diretta tra l'indice di Huglin e il livello di maturità delle uve. All'aumentare dell'indice di Huglin, si osserva un incremento del grado di maturazione delle uve (Bagagiolo et al., 2021). Nella seguente tabella possiamo vedere alcuni vitigni utilizzabili in relazione a questo indice.

Tabella 2: Indici di Huglin presunti per alcuni vitigni (Irimia et al., 2013; Laget et al., 2008; Wiforagri, 2020).

SOMMATORIE TERMICHE (HI)	VITIGNI NERI	VITIGNI BIANCHI
≤ 1500		Muller-Thurgau – Pinot Bianco – Gamay - Gewurztraminer
1500 - 1800	Cabernet Franc – Gamay – Pinot Nero – Ciliegiolo - Merlot	Chardonnay – Pinot Bianco – Pinot Grigio – Riesling – Sauvignon – Sylvaner
1800 – 2100	Cabernet Sauvignon – Lambrusco – Merlot – Sangiovese – Ciliegiolo - Syrah	Albana – Chenin Blanc – Pignoletto – Riesling – Semillon – Trebbiano Toscano – Ugni Blanc
2100 - 2400	Carignan – Lambrusco – Sangiovese – Grenache – Mourvèdre - Carignan	Montuni – Pignoletto – Trebbiano Romagnolo

Le temperature durante il periodo di crescita delle viti hanno quindi un ruolo cruciale nell'adattamento delle diverse varietà di uva a un particolare ambiente (Duchêne et al., 2010). Le diverse tipologie di uva vengono suddivise in base alla temperatura minima necessaria affinché l'uva possa maturare correttamente e in particolare, l'indice di Huglin, richiede generalmente una temperatura di almeno 1600°C per poter promuovere lo sviluppo ottimale della vite (Laget et al., 2008). Secondo l'indice Huglin, come evidenziato nella tabella 2, le regioni con vocazione vitivinicola solitamente rientrano in un intervallo di temperature compreso tra 1400°C e 2400°C. Tuttavia, studi più recenti hanno dimostrato che alcune varietà, come quelle coltivate a Jerez in Spagna, possono arrivare a raggiungere i 2700°C dell'indice Huglin (Wiforagri, 2020). La crescita delle uve da vino non è favorevole quando la temperatura di HI è inferiore a 900°C, mentre è piuttosto raro trovare valori superiori a 3000°C in Europa (Fraga et al., 2013).

Considerando l'aumento delle temperature come risultato del cambiamento climatico, potrebbe verificarsi una possibile modifica nella stagione vegetativa

delle viti. In futuro, potrebbe essere probabile che la stagione inizi prima del 1° aprile e si estenda oltre il 31 ottobre. Di conseguenza, i metodi di calcolo attualmente utilizzati, come l'indice GDD standard, l'indice di Winkler e l'indice di Huglin, potrebbero non essere più sufficienti o adatti per la valutazione delle condizioni climatiche. Sarà pertanto necessario apportare ulteriori adattamenti e aggiustamenti a questi metodi di calcolo per ottenere previsioni più accurate sull'accumulo termico stagionale nei prossimi decenni. Il cambiamento delle stagioni e delle temperature richiederà un continuo monitoraggio e una revisione delle metodologie utilizzate per valutare l'idoneità delle varietà di uva e per la classificazione delle regioni viticole. Solo attraverso questi sforzi sarà possibile garantire previsioni più precise e affidabili per l'industria vitivinicola in un futuro influenzato dal cambiamento climatico (Teslic' et al., 2017).

CAPITOLO TERZO

L'INFLUENZA DELLE TEMPERATURE SULLE FASCE CLIMATICHE COMPATIBILI CON LA VITICOLTURA: STRATEGIE DI ADATTAMENTO E MITIGAZIONE

È noto che i fattori meteorologici e climatici siano determinanti nello sviluppo e nella crescita della vite (Brichetto e Alemanno, 2022; Costa et al., 2019). La temperatura in particolare, mantenendo costanti gli altri elementi del terroir, gioca un ruolo fondamentale nel controllo dello sviluppo fenologico e della maturazione della vite, costituendo il fattore determinante nell'idoneità di una regione o di un sito per produrre uve di qualità (Brichetto e Alemanno, 2022; Costa et al., 2019; Meggio, 2022). Tuttavia, il cambiamento climatico sta influenzando sempre più profondamente la fenologia della vite, la maturazione, la composizione dell'uva, influenzando a sua volta aspetti chiave della vinificazione, della microbiologia e della chimica del vino, oltre che gli aspetti sensoriali (Brichetto e Alemanno, 2022; Mira de Orduña, 2010; Templ et al., 2021).

Il cambiamento climatico porterà quindi nuove sfide e modifiche significative nella crescita, sviluppo e resa della vite, influenzando lo stile e la tipicità del vino e la percezione del terroir in molte regioni viticole tradizionali (Santos et al., 2020). Il cambiamento delle aree di coltivazione della vite e delle sue fasi fenologiche risulta quindi inevitabile in futuro, ma delle previsioni precise risultano complicate a causa

della complessità dell'agroecosistema, che è un sistema aperto (Mattioli, 2022). L'adattamento sarà quindi essenziale per garantire una viticoltura sostenibile nel futuro (Santos et al., 2020).

3.1 L'INFLUENZA DEL RISCALDAMENTO GLOBALE SULLA COMPOSIZIONE DELL'UVA

L'aumento delle temperature può avere molteplici effetti sul vino, accelerando reazioni chimiche durante la produzione, l'invecchiamento, il trasporto e la conservazione (Mira de Orduña, 2010). La lunghezza della stagione di crescita e le temperature sono aspetti critici che influenzano la maturazione dell'uva e la qualità del vino (Jones et al., 2005).

I cambiamenti climatici, in particolare l'innalzamento delle temperature e le variazioni delle precipitazioni, possono avere impatti significativi sulla crescita, la produttività e la qualità della vite (Ramos et al., 2018). La temperatura dell'aria risulta infatti essenziale per regolare la sintesi e decomposizione di ormoni e di composti chimici all'interno delle bacche durante la stagione di crescita (Scarpare et al., 2012).

Sebbene inizialmente le temperature elevate possono migliorare la maturazione e la qualità dei vini, un aumento continuo può portare a cambiamenti nel profilo aromatico a lungo termine (Duchêne e Schneider, 2005). Ogni cambiamento climatico, anche minimo, avrà quindi un impatto sulla chimica del vino (Mozell e Thach, 2014).

Non tutte le varietà di vite saranno altrettanto sensibili alle variazioni di temperatura (Duchêne e Schneider, 2005). È ampiamente dimostrato che l'aumento delle temperature può ridurre la qualità delle uve e dei vini (Duchêne et al., 2010). Entro la metà del secolo infatti, la tipicità dei vini potrebbe essere modificata a causa di diversi equilibri alcol/acidità e profili aromatici (Duchêne et al., 2010).

Il cambiamento climatico ha introdotto varie sfide enologiche legate alla composizione dell'uva (Mira de Orduña, 2010). L'aumento delle temperature influenzerà infatti molti processi biologici e fisiologici degli organismi viventi (Bécart et al., 2022) portando a delle conseguenze importanti per la viticoltura e quindi influenzando la composizione dell'uva (Jug e Rusjan, 2012; Mira de Orduña, 2010). Tra gli effetti più significativi dell'aumento delle temperature durante le stagioni di crescita sulla composizione dell'uva troviamo:

- Aumento dei tassi di fotosintesi e accumulo di carboidrati. Ciò è dovuto ad un'accelerazione del processo di maturazione (Martínez-Lüscher et al., 2016; Mira de Orduña, 2010). Questo aumento può portare a condizioni di sovraeccitazione del sistema fotosintetico, causando danni ai pigmenti assorbenti e ai centri di reazione (Jug e Rusjan, 2012).
- Cambiamenti morfogenetici (Jug e Rusjan, 2012). Temperature superiori ai 30°C possono provocare una riduzione delle dimensioni e del peso degli acini dell'uva (Hale e Buttrose, 1974), oltre che ad una diminuzione della larghezza delle foglie (Schultz, 2000).
- Danni alla buccia dell'uva. Temperature estremamente calde, superiori ai 35°C, possono causare scottature. Questo fenomeno può avere un impatto significativo sulla composizione chimica dell'uva, rendendo il frutto inadatto per la produzione di vino di qualità (Mattioli, 2022; Ramos et al., 2018).
- Maggior contenuto zuccherino (Bock et al., 2013; Mattioli, 2022; Zoecklein e Gump, 2022). Una maturazione accelerata delle uve provoca un innalzamento del contenuto di zuccheri. Questo, a sua volta, porterà a vini con un rapporto zucchero/acido modificato, a meno che non si corregga aggiungendo acido al mosto (Duchêne et al., 2010). Si è già osservato un aumento della concentrazione di zuccheri nell'uva negli ultimi decenni (Martínez-Lüscher et al., 2016) e questo trend è destinato ad aumentare ulteriormente con l'aumento delle temperature (Bock et al., 2013).
- Maggior contenuto alcolico (Martínez-Lüscher et al., 2015; Santos et al., 2020; Schultz, 2000). Questo effetto è una diretta conseguenza dell'aumento della concentrazione di zuccheri nell'uva (Mira de Orduña, 2010) e ciò comporta un'alterazione dei sapori e delle sensazioni in bocca (Mozell e Thach, 2014). In

molte regioni, sono stati riscontrati livelli di alcol più elevati dell'1-2% rispetto al passato (Bécart et al., 2022; Jones e Alves, 2012). Un incremento del 2% è stato osservato in tutte le cultivar di uva in Francia meridionale tra il 1980 e il 2001 (Mira de Orduña, 2010), con un impatto significativo sull'equilibrio del vino (Bécart et al., 2022). In Alsazia (Francia), i livelli alcolici potenziali del Riesling alla vendemmia sono aumentati del 2,5% negli ultimi 30 anni, correlati appunto a periodi di maturazione più caldi e precoci (Mira de Orduña, 2010). In Napa Valley (California), i livelli medi di alcol sono passati dal 12,5% al 14,8% tra il 1971 e il 2001. Sebbene alcuni possano considerare l'aumento dell'alcol positivo, esso rende il vino più "caldo" e meno adatto al cibo. Inoltre, i vini con livelli alcolici più elevati tendono a non invecchiare bene o a lungo (Jones e Alves, 2012).

- Diminuzione del contenuto di acidità totale dell'acino (Mattioli, 2022; Mira de Orduña, 2010; Santos et al., 2020) e quindi valori di pH più elevati (Mira de Orduña, 2010). L'aumento del pH è vantaggioso per la stabilità degli esteri di fermentazione e può influenzare il colore, il gusto e l'aroma del vino. Ad esempio, tra il 1980 e il 2001, in tutte le varietà di uva coltivate nella regione della Francia meridionale, si è osservata una variazione del pH da 3 a 3,3, mentre l'acidità totale è diminuita da 6 a 4 (Mira de Orduña, 2010).
- Riduzione dell'accumulo di metaboliti primari e secondari (Martínez-Lüscher et al., 2016). Tra essi di maggiore importanza sono i flavonoidi, gli amminoacidi e i carotenoidi (Schultz, 2000), il cui equilibrio è fondamentale per il potenziale enologico dell'uva, che può influire sull'aroma e sul colore del vino (Martínez-Lüscher et al., 2016; Mira de Orduña, 2010).
- Minore accumulo di antociani. Essi sono responsabili della colorazione delle bacche d'uva e possono causare una perdita di potenziale enologico (Duchêne et al., 2010; Martínez-Lüscher et al., 2016; Mattioli, 2022; Mira de Orduña, 2010).
- Modifica dei composti aromatici (Mira de Orduña, 2010). Diversi studi hanno indicato che, a livelli di zuccheri equivalenti, varietà di uve bianche e aromatiche mostrano livelli più bassi di intensità aromatica a causa delle alte temperature, riducendo così l'intensità aromatica (Mira de Orduña, 2010) e quindi lo sviluppo del sapore (Hall e Jones, 2009). A livello molecolare, le alte temperature possono

provocare la rottura dei peptidi e dei lipidi e possono anche degradare le auxine tramite la fotodegradazione. Questo processo può infatti avere un ruolo importante nella creazione di un aroma spento nei vini bianchi (Schultz, 2000).

- Minore accumulo di terpenoli. Si tratta di molecole responsabili degli aromi floreali (Duchêne e Schneider, 2005; Duchêne et al., 2010).
- Accelerazione della degradazione degli acidi organici (Duchêne et al., 2010; Santos et al., 2020). Mentre l'acido tartarico mostra una maggiore stabilità rispetto agli effetti termici, l'acido malico diminuisce a temperature più elevate (Mira de Orduña, 2010).
- Piccolo ma significativo aumento della concentrazione di linalolo (Duchêne et al., 2010).
- Maggiore formazione di coprodotti della fermentazione, come l'acido acetico (Mira de Orduña, 2010), l'acido ascorbico, il glutatione e i radicali (Schultz, 2000).
- Aumento dei livelli di potassio (Mira de Orduña, 2010).
- Concentrazioni più elevate di solidi sospesi (Mira de Orduña, 2010).
- Riduzione dell'attività della Rubisco (Jansen et al., 1998).
- Maggiore formazione di 1,1,6-trimetil-1,2-diidronaftalene (TND) e di altri norisoprenoidi C13. È stato osservato come essi possano conferire al Riesling note intense di cherosene (Mira de Orduña, 2010).
- Diminuzione delle pirazine nella composizione dell'uva (Mattioli, 2022; Mozell e Thach, 2014). Questo porta ad una riduzione dell'incidenza di vini con note vegetali ed erbacee (Mozell e Thach, 2014).
- Concentrazioni più elevate di alcuni fenoli specifici (Santos et al., 2020).
- Gusto più astringente del vino (Santos et al., 2020).

Nel contesto delle previsioni climatiche future, garantire un equilibrio tra l'accumulo di zuccheri e altri tratti qualitativi, come colore, sapore e aromi, rappresenta una sfida cruciale per il settore vitivinicolo nei prossimi decenni. La ricerca di soluzioni efficaci per gestire queste variabili sarà essenziale per garantire una viticoltura sostenibile e di alta qualità nel prossimo mezzo secolo (Martínez-Lüscher et al., 2016).

3.2 CAMBIAMENTI E ANTICIPI DELLE FASI FENOLOGICHE

Negli ultimi decenni, l'aumento delle temperature ha avuto un impatto rilevante sulla crescita e lo sviluppo della vite (Santos et al., 2020). Le temperature svolgono un ruolo essenziale nel regolare il ciclo di crescita e la fenologia della vite, influenzando anche il processo di evapotraspirazione. Se l'aumento della traspirazione è accompagnato da una sufficiente disponibilità di acqua, può accelerare la maturazione dell'uva. La durata della stagione vegetativa e le temperature medie sono determinanti per la maturazione e la qualità dell'uva, influenzando l'adattabilità delle varietà alle specifiche regioni viticole. Nei climi ideali, determinate varietà possono raggiungere la massima espressione di maturazione, ottimizzando lo stile del vino e la qualità dell'annata (Meggio, 2022).

Il clima gioca quindi un ruolo determinante nella produzione del vino, influenzando ogni fase, dalla scelta delle varietà d'uva alla qualità del vino risultante (Nemani et al., 2001). L'aumento delle temperature stagionali ha un impatto significativo sulla crescita della vite, portando a cambiamenti nel normale ciclo di sviluppo con un'anticipazione della fioritura, dell'invasatura e della piena maturità (Mozell e Thach, 2014). Questi cambiamenti climatici conducono a stagioni più calde, con intervalli più brevi tra le fasi fenologiche e di conseguenza una vendemmia anticipata (Bagagiolo et al., 2021; Duchêne et al., 2010). Attualmente infatti, c'è una netta evidenza che il germogliamento, la fioritura e l'invasatura si verifichino in anticipo rispetto al passato (Bock et al., 2013). Tra gli effetti positivi del cambiamento climatico però, vi è la riduzione dei danni causati dalle gelate invernali alle gemme e alle colture, poiché le temperature minime sono meno estreme (Hall e Jones, 2009). Di conseguenza, le varietà di uva attualmente coltivate in condizioni specifiche potrebbero non essere altrettanto adatte nello stesso ambiente modificato in futuro (Costa et al., 2019).

Il calendario fisiologico della vite in Europa è stato influenzato fortemente dal riscaldamento osservato (Tomasi et al., 2011). Studi hanno dimostrato che negli ultimi 50 anni, la vite ha risposto con cambiamenti fenologici, mostrando eventi più precoci e intervalli più brevi tra di essi, che variano dai 6 ai 25 giorni, a seconda

della varietà e della regione (Jones e Alves, 2012; Ramos et al., 2018). Questo si è tradotto in un'anticipazione delle date di vendemmia, soprattutto negli ultimi 20-40 anni (Mira de Orduña, 2010). Di seguito vengono riportati alcuni esempi dei principali cambiamenti di fenologia nella viticoltura mondiale.

In una prima visione generale, vediamo le proiezioni relative alla fenologia della vite esaminate in due diversi scenari di riscaldamento globale per il 2030, 2050 e 2070 (Ramos et al., 2018):

- Nel primo scenario, con un aumento medio della temperatura di circa 1,4°C, ci si aspetta che il germogliamento avvenga in anticipo di circa 2 giorni entro il 2030, 3 giorni entro il 2050 e 5 giorni entro il 2070. Inoltre, la fioritura è prevista con un anticipo da 3 a 8 giorni e l'invasatura da 6 a 19 giorni. Si stima che la piena maturazione possa avvenire fino a 23 giorni prima rispetto alle condizioni osservate (Ramos et al., 2018);
- Nel secondo scenario, con un aumento medio della temperatura di circa 3,7°C, il germogliamento è previsto in anticipo di circa 3 giorni entro il 2030, 5 giorni entro il 2050 e 9 giorni entro il 2070. La fioritura è stimata in anticipo di circa 5, 10 e 16 giorni rispettivamente per il 2030, 2050 e 2070, mentre l'invasatura potrebbe avvenire in anticipo di 10 giorni per il 2030, 19 giorni per il 2050 e 28 giorni per il 2070. La piena maturazione è proiettata in anticipo fino a 35 giorni (Ramos et al., 2018).

Tra il 1951 e il 1997, i cambiamenti climatici sulla costa della California hanno influenzato positivamente l'industria vinicola premium, fatto evidenziato da vini di qualità superiore e rese di uva maggiori. Sebbene l'aumento della temperatura media annua sia stato modesto (1,13°C), si è verificata una significativa riduzione delle giornate di gelate (meno 20 giorni) e un aumento della durata della stagione di crescita senza gelate (più 65 giorni). In particolare, nelle zone di Napa Valley e Sonoma Valley, le temperature più calde in inverno e primavera hanno determinato un avvio anticipato della stagione di crescita di circa 18-24 giorni (Nemani et al., 2001). Inoltre è stato visto che nel Nord America, tra il 1960 e il 2001, il momento della fioritura della vite è stato soggetto ad un'accelerazione di circa 0,15 giorni all'anno (Petrie e Sadras, 2008).

Tra il 1952 e il 1997, il clima più caldo a Bordeaux ha determinato un accorciamento delle fasi fenologiche e un potenziale aumento della qualità del vino (Hall e Jones, 2009). Studi condotti in Francia hanno evidenziato un significativo anticipo della stagione di raccolta nel periodo compreso tra il 1940 e il 2000, con un'anticipazione di circa 14-21 giorni tra il 1972 e il 2002 (Bagagiolo et al., 2021). In particolare, il Riesling coltivato in Alsazia (Francia orientale) ha mostrato un germogliamento e una fioritura anticipati di circa 15 giorni nel 2003 rispetto al 1965, seguiti da un'invasatura anticipata di circa 23 giorni nello stesso periodo (Duchêne e Schneider, 2005; Petrie e Sadras, 2008), con la raccolta anticipata di 2 settimane (Duchêne e Schneider, 2005). Inoltre, sempre in Alsazia, sia il Riesling che il Gewurztraminer hanno mostrato un anticipo di 23 giorni per l'invasatura rispetto al periodo 1976-2008 (Duchêne et al., 2010). Nel sud della Francia invece, si prevede un'anticipazione della maturazione dell'uva di 3-5 settimane in caso di un aumento delle temperature di crescita di 2-4°C rispetto alla media del periodo 1973-1992 (Mira de Orduña, 2010). Anche per Châteauneuf du Pape e Tavel, situate sempre in Francia Meridionale, sono state osservate date di raccolta anticipate di 18 e 21 giorni rispetto al periodo 1945-2000 (Mira de Orduña, 2010).

In Australia, tra il 1993 e il 2006, il tasso di variazione della data di maturazione delle varietà Cabernet Sauvignon, Chardonnay e Shiraz è stato costantemente negativo, con un anticipo medio di 0,5-3,1 giorni all'anno (Petrie e Sadras, 2008). Proiezioni future indicano che entro il 2050, il germogliamento potrebbe essere anticipato di 6-11 giorni, con le date di raccolta che si verificheranno fino a 45 giorni prima e la stagione di crescita che si comprimerà, portando alla maturazione in un periodo più caldo dell'anno (Tomasi et al., 2011). Per il Cabernet Sauvignon e lo Chardonnay, gli effetti dei cambiamenti climatici futuri indicano che, tranne che per la regione di Margaret River, il germogliamento potrebbe anticiparsi di 2-9 giorni entro il 2030 e 3-18 giorni entro il 2050 (Duchêne et al., 2010). Si prevedono anche significative anticipazioni delle date di raccolta entro il 2050, fino a 45 giorni prima rispetto al 1990 per la regione di Coonawarra (Mira de Orduña, 2010).

Le analisi provenienti da Rheingau, in Germania, dimostrano che il primo giorno di vendemmia avviene attualmente con un anticipo medio di 2-3 settimane rispetto

alla fine del 18° secolo. Nella regione del Baden invece, nel sud-ovest della Germania, le temperature medie annuali degli ultimi 10 anni sono state superiori di 1,2°C rispetto alla media del periodo 1961-1990, causando un'anticipazione di 3 settimane nella data media di inizio della maturazione del Pinot Nero dal 1976 al 2006. Anche nel Palatinato, sempre in Germania, le temperature medie annuali sono aumentate di 1,2°C tra il 1970 e il 2005, portando ad un'anticipazione di 2 settimane nella vendemmia (Mira de Orduña, 2010).

In Veneto, Italia, un ampio studio della durata di 46 anni condotto su 18 varietà di uve, ha rivelato che le date di maturazione per diverse cultivar sono state anticipate di 19 giorni dal 1964 al 2009 (Tomasi et al., 2011). In Spagna, nella regione del Penedès, è stata osservata un'anticipazione media di circa 12 giorni come data di inizio della vendemmia dal 1995 al 2009 (Bagagiolo et al., 2021). Anche in Austria orientale è stata registrata una tendenza all'anticipazione delle date di raccolta, con un anticipo di 5 giorni ogni 10 anni a Klosterneuburg e di circa 3 giorni ogni 10 anni a Vienna, nel periodo tra il 1970 e il 2007 (Bagagiolo et al., 2021). Nella regione vinicola del Douro, in Portogallo, si prevede un'anticipazione media delle fasi fenologiche di 6 giorni dal 2020 al 2100 (Costa et al., 2019).

In media, negli ultimi 30-50 anni, la fenologia della vite ha mostrato una risposta di 5-10 giorni per ogni aumento di 1°C di temperatura. Considerando che la temperatura media nel periodo vegetativo è aumentata di 1,3°C tra il 1950 e il 1999, con proiezioni di ulteriori 2°C entro il 2050, è probabile che si verifichino ulteriori cambiamenti nella fenologia della vite (Tomasi et al., 2011). Questi cambiamenti climatici potrebbero comportare la necessità di riconsiderare le varietà attualmente coltivate in determinate condizioni climatiche, poiché potrebbero non essere più adatte a raggiungere la maturazione nelle stesse condizioni in futuro (Parker et al., 2011). Questi sviluppi potrebbero avere importanti implicazioni per l'industria vinicola, richiedendo una gestione oculata delle varietà di uve coltivate per adattarsi alle nuove condizioni climatiche.

3.3 L'INFLUENZA DEL RISCALDAMENTO GLOBALE SULLE REGIONI

VITICOLE: MIGRAZIONI VITICOLE

Nonostante l'uva venga coltivata in molte regioni del mondo, la produzione di uva da vino di alta qualità risulta essere limitata a poche zone climaticamente favorevoli. Ogni varietà d'uva ha requisiti climatici molto specifici per raggiungere la massima qualità e rendimento, rendendo la coltivazione dell'uva da vino particolarmente vulnerabile sia alla variabilità climatica a breve termine che ai cambiamenti climatici a lungo termine (Mozell e Thach, 2014). La produzione di uva da vino di alta qualità risulta quindi strettamente legata alle regioni con un clima adatto, che consenta una composizione bilanciata e le caratteristiche varietali tipiche. Esistono infatti tre condizioni climatiche fondamentali per ottenere uve di qualità: un accumulo di calore sufficiente, un basso rischio di danni da gelo e l'assenza di caldo eccessivo. I vini di alta qualità richiedono un equilibrio tra queste tre condizioni (White et al., 2006).

Storicamente, la coltivazione della vite si è estesa in tutti i continenti, ad eccezione dell'Antartide (Santos et al., 2020) e ad oggi, la viticoltura si sviluppa principalmente nelle fasce geografiche comprese tra le latitudini 30° e 50° nell'emisfero settentrionale e tra le latitudini 30° e 40° nell'emisfero meridionale (Mattioli, 2022), come rappresentato in figura 15. Globalmente, la viticoltura si adatta ottimamente a condizioni climatiche con temperature medie comprese tra 12°C e 22°C durante la stagione di crescita, sia nell'emisfero boreale che in quello australe (Jones et al., 2012). Questi parametri climatici rappresentano le migliori condizioni per la produzione di uva da vino, prevalentemente nelle regioni delle medie latitudini. Tuttavia, sono numerose anche le aree subtropicali e tropicali ad altitudini più elevate che rientrano in queste fasce climatiche idonee alla coltivazione della vite (Jones et al., 2012).

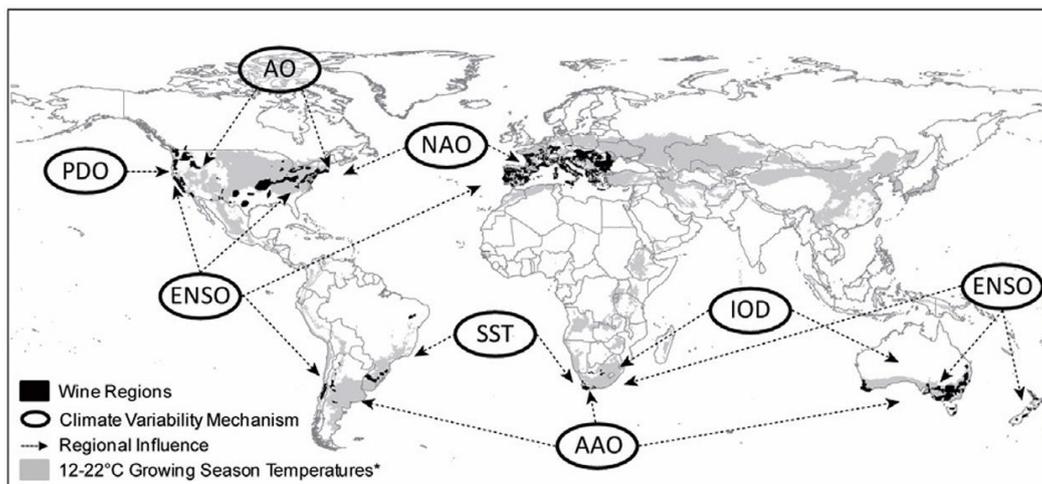


Figura 15: Distribuzione mondiale delle regioni viticole (Fonte: Jones et al., 2012).

In figura 15 si può osservare che “vaste aree in Europa orientale, Asia occidentale, Cina, Stati Uniti centro-occidentali e orientali, Argentina sud-orientale, Sudafrica sud-orientale e Australia meridionale” ricadono all’interno del range climatico ottimale per la viticoltura di 12-22°C. Tuttavia, è importante sottolineare che, nonostante queste regioni possano avere temperature adatte per la coltivazione della vite durante il periodo vegetativo, altre variabili possono limitare significativamente le possibilità di coltivazione (Jones et al., 2012). Mentre la maggior parte delle regioni vinicole mondiali rientra in queste zone climatiche ideali, ci sono alcune eccezioni in luoghi come Texas, Oklahoma e Mississippi negli Stati Uniti, São Francisco Valley in Brasile, Lower Orange River nel Capo Settentrionale in Sudafrica (Jones et al., 2012) e altre regioni come Perù, Thailandia, Cambogia, India e Venezuela (Mira de Orduña, 2010), dove le stagioni di crescita sono caratterizzate da un clima tropicale o meso-tropicale e di conseguenza le temperature superano i 22°C durante le rispettive stagioni di crescita (Jones et al., 2012; Mira de Orduña, 2010). La viticoltura sta quindi già affrontando notevoli sfide e cambiamenti, ma ciò che riserva il futuro rimane ancora poco noto (Mira de Orduña, 2010).

Nella storia della coltivazione della vite, le regioni vinicole si sono sviluppate in periodi climaticamente favorevoli e i progressivi cambiamenti climatici hanno portato a spostamenti di queste regioni nel corso dei secoli. Regrazioni storiche

delle date di vendemmia e delle rese in Europa mostrano periodi con temperature favorevoli, maggiore produttività e qualità in alcune regioni. Durante il "piccolo optimum" medievale (900-1300 d.C.), le temperature più calde hanno permesso la coltivazione dei vigneti anche in zone costiere del Mar Baltico e dell'Inghilterra meridionale. Tuttavia, il XIV secolo ha visto un drastico raffreddamento con la "Piccola Era Glaciale" che ha portato alla scomparsa della maggior parte dei vigneti del nord e a stagioni di crescita troppo brevi in gran parte dell'Europa (Jones e Alves, 2012). Questi cambiamenti climatici hanno così avuto un impatto significativo sulla geografia e sulla storia della viticoltura.

Come già previsto nel 1983, un cambiamento climatico prolungato e significativo, richiederebbe agli agricoltori di adeguare le loro pratiche agricole alle nuove condizioni di temperatura e precipitazioni (Lough et al., 1983), mettendo ulteriormente a dura prova le condizioni climatiche ottimali per la coltivazione della vite (Fraga et al., 2013). Questi cambiamenti climatici rappresentano una minaccia per l'industria vinicola globale (Bécart et al., 2022) e potrebbero spostare le zone con temperature ideali per la stagione di crescita verso le coste e le altitudini più elevate, trasformando aree vinicole non tradizionali in nuove regioni adatte alla coltivazione di uva da vino di qualità e togliendo la vocazionalità ad altre (Teslic' et al., 2017). Data l'importanza del settore vitivinicolo, risulta quindi di fondamentale importanza valutare gli scenari futuri per la viticoltura europea (Fraga et al., 2013).

Tra il 1950 e il 1999, molte rinomate regioni vinicole hanno sperimentato un aumento delle temperature durante il periodo di crescita delle viti, con un incremento medio di 1,26°C. Durante lo stesso periodo, le annate vinicole hanno mostrato una tendenza positiva verso una maggiore qualità e una minore variabilità tra gli anni. Questo miglioramento è stato attribuito sia all'avanzamento delle conoscenze enologiche che delle tecniche di coltivazione, ma è stato dimostrato che il clima gioca un ruolo significativo nella definizione delle caratteristiche qualitative dei vini e continuerà a farlo in futuro (Jones et al., 2005).

L'analisi presentata in figura 16 ci mostra un progressivo aumento delle temperature nei prossimi anni, ipotizzando che nel periodo 2041-2070 potrebbe favorire

un'estensione dell'idoneità climatica per la coltivazione della vite verso latitudini più settentrionali, fino al parallelo 55°N. Tale prospettiva creerebbe le condizioni necessarie per la formazione di nuove regioni vinicole (Fraga et al., 2013; Santos et al., 2020).

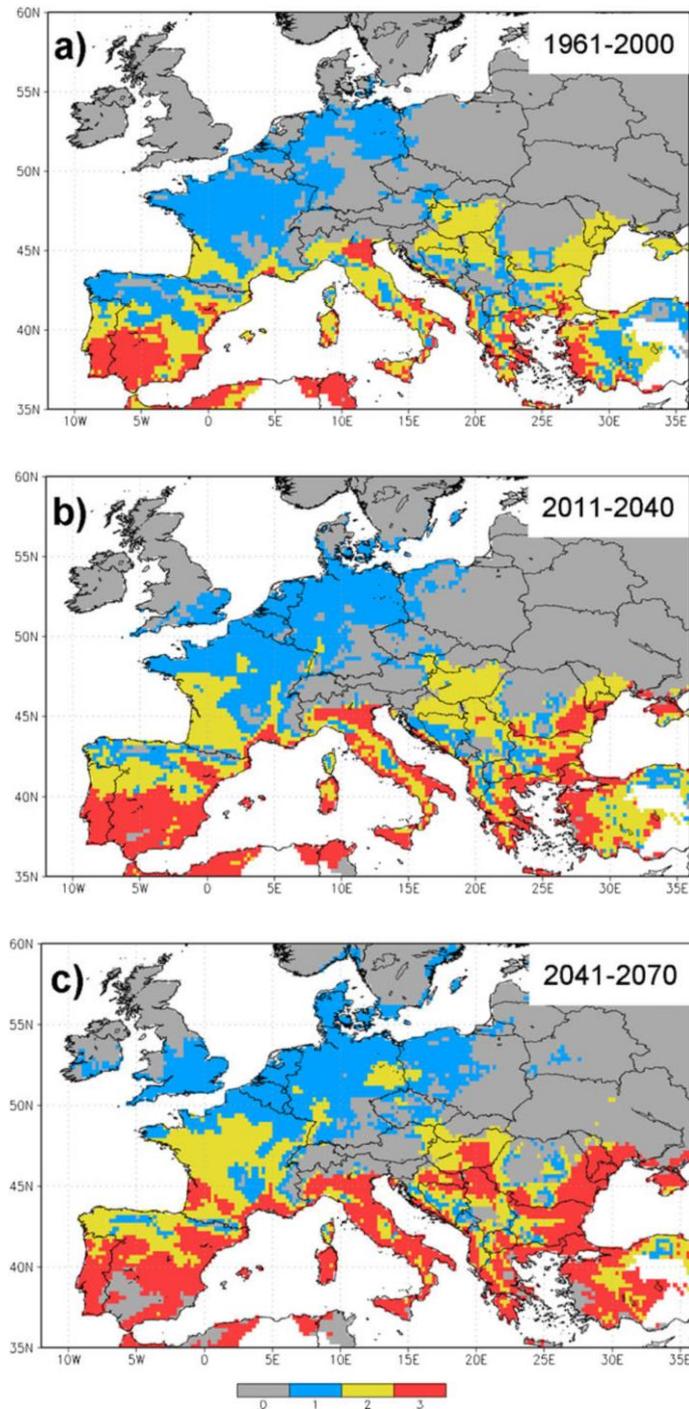


Figura 16: Cambiamenti futuri in Europa classificati con le tre classi dell'indice di Huglin per tre periodi di riferimento, di cui due futuri (Fonte: Fraga et al., 2013).

L'effetto dei cambiamenti climatici sulla viticoltura sarà diversificato sia in termini geografici che varietali (Lough et al., 1983). L'aumento continuo delle temperature potrebbe infatti consentire in futuro la coltivazione della vite anche in zone attualmente troppo fredde per tale scopo, mentre le regioni viticole attuali dovranno adattarsi a tali mutamenti (Duchêne et al., 2010; Jones e Alves, 2012). Ciò potrebbe rendere redditizia la produzione di vino in aree precedentemente non idonee o comunque marginali per la viticoltura (Bock et al., 2011).

Questa prospettiva di riscaldamento globale rivela un aumento dei margini di idoneità alla produzione di uva a nord e a est, modificando il quadro della distribuzione varietale. Tale tendenza offre interessanti opportunità per lo sviluppo della viticoltura in queste aree e suggerisce una possibile espansione delle zone viticole verso latitudini più settentrionali (Fraga et al., 2013; Schultz, 2000).

Secondo i modelli di circolazione globale, si prevede infatti un riscaldamento più rapido nell'emisfero settentrionale rispetto a quello meridionale (Schultz, 2000). Questa tendenza sta influenzando la viticoltura in Europa, spingendola sempre più verso nord a causa dei cambiamenti climatici in corso. In quest'ottica, alcune nazioni dell'Europa settentrionale potrebbero addirittura beneficiare di questa evoluzione, poiché diventerebbero nuove regioni viticole grazie alle condizioni climatiche precedentemente limitanti (Lough et al., 1983; Meggio, 2022). Inoltre, il previsto aumento delle temperature nell'Europa centrale e settentrionale comporterà un allungamento delle stagioni di crescita e periodi privi di gelate, riducendo così i danni causati dalle gelate autunnali e favorendo una maggiore qualità potenziale del vino (Santos et al., 2020). Questo determinerà un significativo spostamento dei confini idonei per la coltivazione della vite, con il limite settentrionale previsto per la viticoltura che si sposterà di circa 20-60 km per decennio tra il 2020 e il 2050 (Schultz, 2000).

Le regioni vinicole tradizionali come la Borgogna, la Champagne, l'Alsazia, la Valle della Loira (Francia), la Rheingau e la Mosella (Germania) potrebbero trarre vantaggio dai futuri climi più caldi, poiché diventeranno località più favorevoli alla coltivazione della vite (Santos et al., 2020) Inoltre ci si aspetta che emergano anche nuove aree adatte alla produzione di Champagne in Francia (Santos et al., 2020).

Allo stesso tempo, i cambiamenti climatici globali sposteranno la zona viticola verso nuove regioni, come Washington e l'Oregon negli Stati Uniti, la British Columbia e la Valle di Okanagan in Canada, oltre a Gran Bretagna, Paesi Bassi e Danimarca (Hall e Jones, 2009; Lisek, 2008).

Nei Paesi dell'Europa meridionale invece, i produttori vitivinicoli stanno affrontando notevoli difficoltà nel gestire al meglio le stagioni al fine di mantenere gli standard qualitativi elevati e allo stesso tempo esprimere appieno le caratteristiche del terroir (Meggio, 2022). Questa situazione risulta particolarmente critica in quanto l'acqua è una risorsa scarsa in queste regioni e l'irrigazione spesso non è una soluzione possibile (Schultz, 2000). Con il previsto aumento delle temperature e la presenza di forti periodi di siccità durante la stagione di crescita, l'Europa meridionale è infatti destinata a subire impatti negativi sullo sviluppo della vite e sulla qualità del vino, rendendo necessarie misure per affrontare il sempre più frequente stress termico e idrico (Fraga et al., 2013; Santos et al., 2020).

Le regioni lungo la costa mediterranea, come Grecia, Italia, Francia e Spagna, sono particolarmente vulnerabili ai cambiamenti climatici, con previste maggiori aridità e deficit idrici. Questi paesi potrebbero infatti diventare completamente inospitali per la produzione di vino entro il 2050 a causa delle sfavorevoli condizioni climatiche (Mattioli, 2022; Mozell e Thach, 2014; Santos et al., 2020). In particolare, entro il 2050, regioni viticole come Bordeaux (Francia) e Toscana (Italia) potrebbero subire una significativa riduzione del 85% nella produzione, insieme a California (-70%), Sud Africa (-55%) e Cile (-40%) (Hannah et al., 2013). Allo stesso modo, regioni come Andalusia, La Mancha (Spagna), Alentejo (Portogallo), Sicilia, Puglia e Campania (Italia) probabilmente soffriranno gravi deficit idrici (Santos et al., 2020).

Il cambiamento climatico avrà quindi un impatto globale sulla viticoltura, ma ogni regione avrà una combinazione unica di fattori rilevanti per l'adattabilità delle coltivazioni (Teslic' et al., 2017). Di conseguenza, il cambiamento climatico influenzerà la produzione di vino in modo diverso in ogni regione, soprattutto per quanto riguarda la selezione delle varietà di uve adatte alle nuove condizioni climatiche (Mozell e Thach, 2014).

Sono previsti importanti spostamenti geografici delle regioni viticole globali tra il 1961-2000 e il 2041-2060. Le attuali regioni vinicole manterranno l'idoneità alle coltivazioni, ma in aree più piccole, principalmente ad alte quote e nelle aree costiere (Hannah et al., 2013). In figura 17 possiamo infatti vedere la previsione di variazione globale della vocazionalità viticola in base al peggior scenario climatico possibile (RCP 8.5), ovvero senza l'attuazione di interventi per combattere il riscaldamento globale. “Le regioni viticole attuali che perderanno gran parte della loro vocazionalità viticola, se non tutta, entro la metà del secolo sono rappresentate in rosso, mentre quelle che manterranno l'idoneità sono indicate in verde chiaro (50% di probabilità) e verde scuro (90% di probabilità). Le aree che attualmente non sono idonee, ma che in futuro diventeranno idonee, sono indicate in azzurro (50% di probabilità) e blu (90% di probabilità). Nella figura, sono forniti anche maggiori dettagli per le regioni di California/Nord America occidentale (A), Cile (B), Sudafrica (C), Nuova Zelanda (D) e Australia (E)” (Hannah et al., 2013).

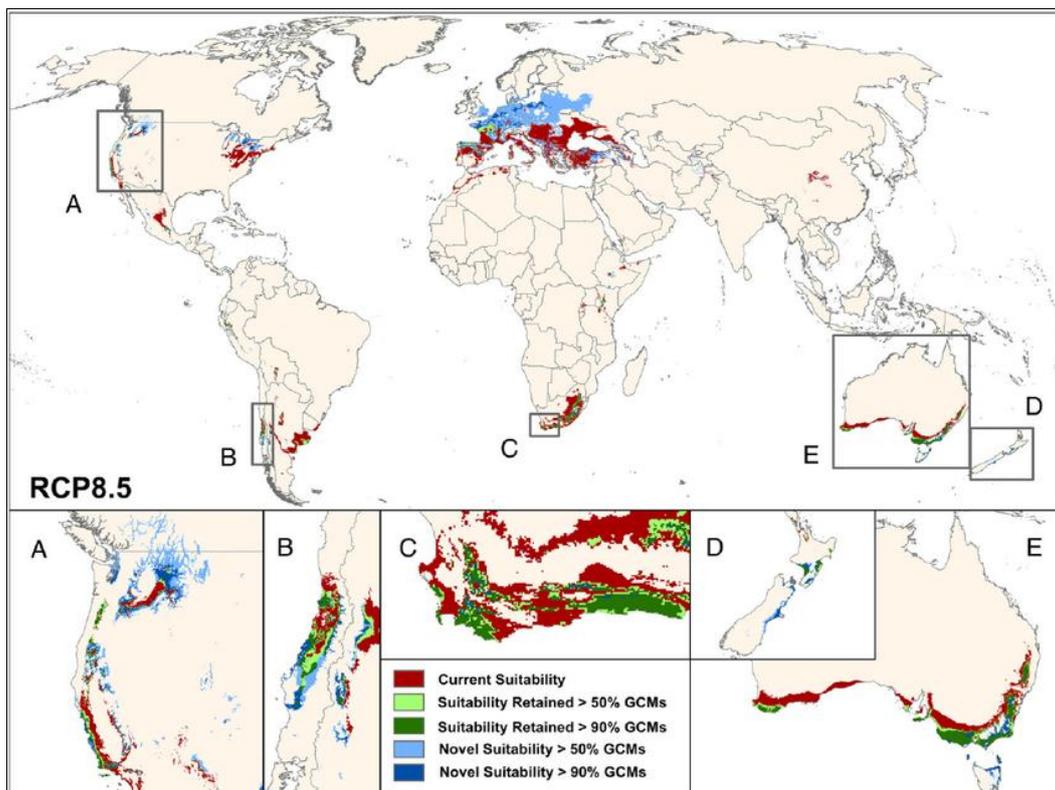


Figura 17: Proiezioni della distribuzione geografica delle regioni viticole per il periodo 2041-2060 secondo lo scenario RCP 8.5 (Fonte: Hannah et al., 2013).

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di paesi fondamentali per la viticoltura mondiale che hanno subito e/o che subiranno delle modifiche nelle classificazioni delle zone viticole, a causa del riscaldamento globale, aprendo nuove opportunità in altre aree.

Studi recenti hanno evidenziato che, in assenza di adeguate misure di adattamento, diverse regioni viticole australiane potrebbero diventare inadatte per la produzione di vino di qualità nel corso di questo secolo (Hall e Jones, 2009). In particolare, con una previsione di aumento delle temperature di 2°C entro il 2060 nell'Australia meridionale (Mozell e Thach, 2014), ben 21 delle attuali 61 regioni vinicole del paese potrebbero raggiungere temperature nel periodo vegetativo che comprometterebbero la produzione di vino di qualità entro il 2070 (Hall e Jones, 2009). In particolare, la regione delle Perth Hills, nell'Australia occidentale, è stata vista essere quella che subirà la maggiore variazione al di sopra della media del periodo 1971-2000, con previsioni di aumento di 1°C entro il 2030, 1,9°C entro il 2050 e 2,7°C entro il 2070. Invece, la regione di Kangaroo Island sarebbe quella che sperimenterebbe una variazione minore, con previsioni di aumento di 0,5°C entro il 2030, 0,9°C entro il 2050 e 1,3°C entro il 2070 (Hall e Jones, 2009). Di conseguenza, ci si aspetta che nei futuri climi, la produzione vinicola australiana si sposterà verso le aree meridionali e costiere (White et al., 2006), come illustrato nella figura 18. Tali cambiamenti avranno impatti significativi sul settore vinicolo del paese, rendendo essenziale l'adozione di strategie di adattamento per garantire la sostenibilità della produzione e la preservazione della qualità del vino (Hall e Jones, 2009; Mozell e Thach, 2014; Zoecklein e Gump, 2022).

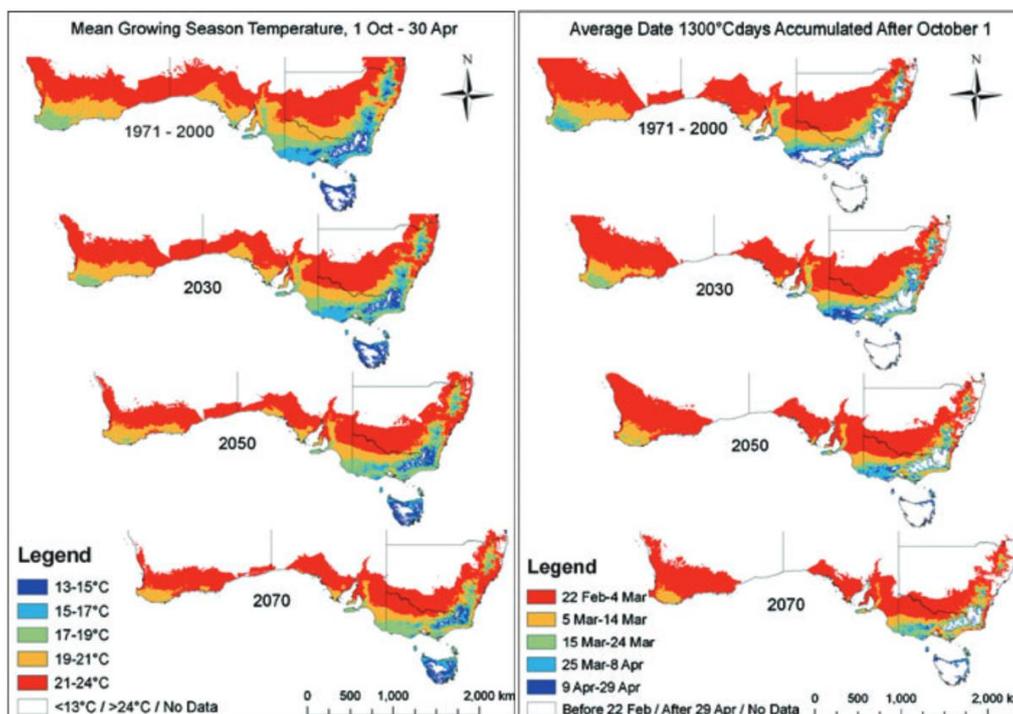


Figura 18: Condizioni di coltivazione della vite in Australia durante il periodo 1971-2000, insieme alle proiezioni per il 2030, 2050 e 2070. I dati riguardano la temperatura media per il periodo dal 1° ottobre al 30 aprile (sinistra) e le date stimate di fine stagione, basate su una data di inizio del 1° ottobre e un accumulo termico di 1300 giorni biologicamente efficaci (destra) (Fonte: Hall e Jones, 2009).

In Italia, attualmente la coltivazione della vite si estende su gran parte della penisola, con una distribuzione che va dai 35° ai 47° di latitudine nord e fino ad un'altitudine di 1200 metri sul livello del mare (Brichetto e Alemanno, 2022). Nella regione dell'Emilia-Romagna in particolare, l'innalzamento delle temperature già osservato ha comportato un cambiamento nella classificazione delle aree viticole, con la maggior parte di esse passate da 'temperate-calde' a 'calde' secondo l'indice di Huglin. Questa variazione ha spinto i viticoltori verso altitudini più elevate, con un aumento dell'altezza media da 67 metri durante il periodo 1961-1990 a 335 metri nel periodo 1986-2015. Tale tendenza è destinata a continuare in futuro, con l'intera Italia settentrionale proiettata verso una classificazione 'calda' secondo l'indice di Huglin nel periodo 2041-2070 (Teslic' et al., 2017). Anche in Piemonte, sono stati registrati incrementi significativi negli indici di Winkler e di Huglin, evidenziando

un aumento delle temperature. Ad esempio, a La Morra, l'indice di Huglin è aumentato del 27% (+460°C) rispetto alla media storica nel 2022 (Bricchetto e Alemanno, 2022). A Moncalieri, l'indice di Huglin è aumentato da 1917 a 2590 GDD all'anno e a Cuneo, sono state riscontrate differenze di 400°C in più rispetto alle medie storiche (Bagagiolo et al., 2021). In Toscana inoltre, sono stati osservati cambiamenti significativi nel periodo di maturazione dell'uva, con il Chianti che si sta confrontando con continue variazioni delle condizioni idonee alla sua coltivazione (Mozell e Thach, 2014).

Anche in Spagna, nella regione di Castilla e León, negli ultimi decenni si sono osservati significativi aumenti delle temperature e si prevede che tali trend continueranno in futuro. Attualmente classificata come 'regione I' secondo l'indice di Winkler e da 'temperata' a 'temperata-calda' secondo l'indice di Huglin, è quindi possibile che possa transitare verso la regione II o III di WI o verso la categoria 'calda' di HI, il che implicherebbe la necessità di modifiche nelle varietà coltivate e nelle pratiche agricole per adattarsi alle nuove condizioni (Ramos et al., 2018). Allo stesso tempo, lo studio di Mozell e Thach (2014) suggerisce che la Spagna potrebbe subire tali cambiamenti critici nelle temperature e nella disponibilità d'acqua, da porre a rischio la sopravvivenza della coltivazione della vite.

La stessa situazione è stata osservata ad Hérault, in Francia, dove alcune zone viticole precedentemente classificate come 'calde-temperate' tra il 1975 e il 1996 sono state riclassificate come 'calde' tra il 1997 e il 2005, a causa dell'aumento delle temperature (Laget et al., 2008). In Alsazia invece, l'aumento delle temperature ha già consentito la coltivazione del Cabernet Franc (1800 GDD) in questi anni e si prevede la possibilità di coltivare Grenache e Syrah (2100 GDD) entro il 2025 (Duchéne e Schneider, 2005). Contrariamente, nell'Inghilterra meridionale, il clima sta assumendo caratteristiche simili a quelle dello Champagne e ha già registrato diverse annate rilevanti (Mozell e Thach, 2014), difatti si è riscontrato interesse da parte dei proprietari di cantine dello Champagne ad acquistare terreni in regioni più settentrionali, in particolare in Inghilterra (Mira de Orduña, 2010).

In passato, diverse regioni degli Stati Uniti hanno goduto di condizioni favorevoli per la produzione di uva da vino di alta qualità, in particolare nella costa occidentale, nel versante occidentale delle montagne della Sierra Nevada, in varie regioni del sud-ovest e nella costa marittima orientale, con alcune zone degli Stati Uniti centrali che erano marginalmente idonee. Tuttavia, le proiezioni future indicano un cambiamento significativo, come mostrato in figura 19. A causa dell'aumento della frequenza di giorni estremamente caldi durante la stagione di crescita (con temperature superiori ai 35°C), molte di queste regioni potrebbero perdere la loro capacità viticola. Infatti, nel sud-ovest e negli Stati Uniti centrali, il potenziale produttivo scomparirà quasi completamente, con solo alcune zone dell'ovest intermontano che mostrano un margine di idoneità (White et al., 2006). In particolare, in California, i cambiamenti climatici potrebbero causare una considerevole perdita di terreni adatti alla coltivazione di uva, soprattutto nelle contee di Napa e Santa Barbara, dove le superfici agricole potrebbero ridursi del 50%. Alcuni studi suggeriscono persino che ci sia la possibilità che queste regioni possano scomparire del tutto, lasciando idonee solo le fasce costiere, le montagne della Sierra Nevada, Yellowstone, ed eventualmente, lo Yukon (Mozell e Thach, 2014). È invece previsto l'emergere di nuove aree di potenziale eccellenza lungo la costa dell'Oregon e di Washington. Nonostante ciò, entro la fine del 21° secolo, si stima che la produzione di uva da vino potrebbe ridursi fino all'81% (White et al., 2006). Di conseguenza, i cambiamenti climatici potrebbero spingere l'insediamento dei vigneti verso quote più elevate, come nel Nord America occidentale (Hannah et al., 2013) e in Canada (Lough et al., 1983).

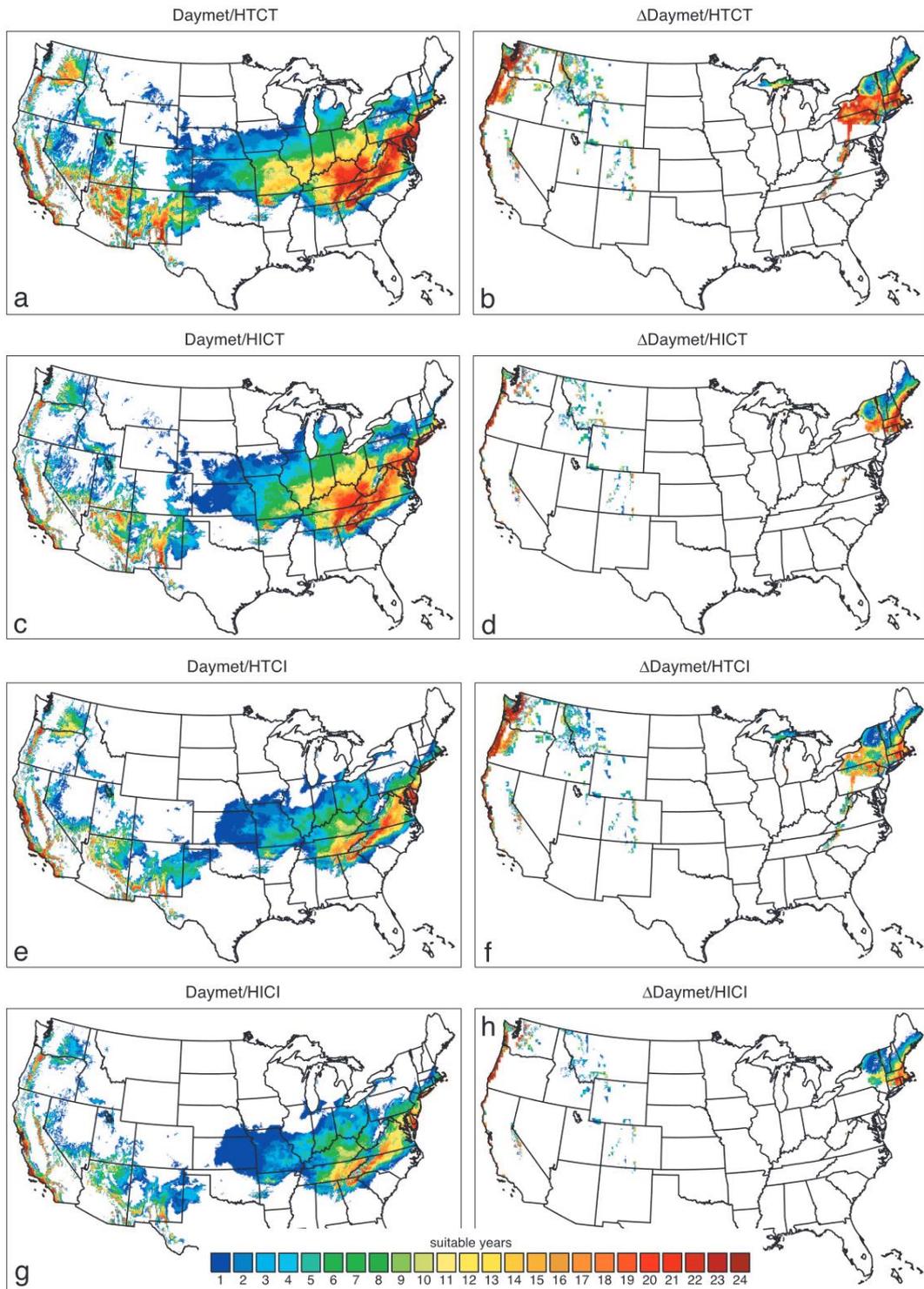


Figura 19: Aree idonee negli Stati Uniti per la produzione di uve da vino di qualità in climi attuali e futuri, suddivise in quattro categorie di tolleranza della vite alle temperature estreme: a) e b) Viti resistenti al caldo e al freddo (HTCT); c) e d) Viti sensibili al caldo e resistenti al freddo (HICT); e) e f) Viti resistenti al

caldo e sensibili al freddo (HTCI); g) e h) Viti sensibili al caldo e al freddo (HICI)
(Fonte: White et al., 2006).

Negli ultimi vent'anni, la coltivazione dell'uva nella Polonia centrale ha conosciuto un aumento di successo, attribuibile in gran parte alle fluttuazioni climatiche, in particolare all'aumento della temperatura media dell'aria da maggio a settembre. Questo aumento di interesse verso la viticoltura polacca è stato favorito anche da progressi biologici nella selezione di nuove varietà di uve, oltre a cambiamenti socio-economici e culturali, nonché a modifiche nelle normative riguardanti la produzione di vino. L'evoluzione relativamente rapida delle condizioni ha significativamente influenzato il settore vitivinicolo in Polonia, aumentandone così le possibilità di successo. Tuttavia, va notato che sebbene i cambiamenti climatici siano stati un fattore importante, non possono essere considerati l'unica ragione dell'aumento dell'area vitata nel paese (Lisek, 2008).

Altri studi hanno evidenziato importanti cambiamenti climatici in ulteriori regioni vinicole del mondo. Ad esempio, sia il Sudafrica che la Nuova Zelanda stanno affrontando aumenti delle temperature e potrebbero in futuro dover piantare nuove varietà di vite adatte a climi più caldi (Mozell e Thach, 2014). In Serbia, le previsioni indicano che le temperature si alzeranno e molte zone viticole perderanno la loro vocazione a causa dell'aridità del terroir (Merloni, 2017). In Svizzera inoltre, gli eventi di calore estremo dovrebbero diventare una minaccia crescente per i vigneti nei prossimi decenni (Templ et al., 2021). Al contrario, in Austria e nelle regioni meridionali dell'Ungheria, si prevede un raddoppio delle aree adatte alla viticoltura entro il 2050 grazie all'evoluzione delle temperature (Santos et al., 2020). Anche Cina e India infine potrebbero registrare una notevole espansione dei vigneti nazionali e l'apertura di nuove regioni alla coltivazione della vite (Santos et al., 2020).

Tutti questi cambiamenti futuri pongono quindi nuove sfide significative per l'industria vitivinicola sia in Europa che a livello globale. Risulta essenziale adattarsi ai cambiamenti climatici in corso e trovare soluzioni innovative per garantire la sostenibilità e la prosperità dell'industria vinicola nel futuro (Fraga et al., 2013).

3.4 SOLUZIONI PER FRONTEGGIARE UN AUMENTO ECCESIVO DELLE TEMPERATURE IN VIGNETO E IN CANTINA

Per la prima volta in oltre mille anni, il clima futuro sarà notevolmente diverso da quello attuale, con l'unica certezza che le temperature continueranno a salire. È addirittura dai tempi della crisi della fillossera che l'industria vitivinicola non deve affrontare una riconsiderazione così profonda delle sue strategie e tecniche future (Duchéne e Schneider, 2005). Il riscaldamento globale sta difatti provocando gravi problemi alle tradizionali regioni vinicole, rendendo necessaria una revisione della selezione delle varietà di uva e delle pratiche agrotecniche ed enologiche, alcune delle quali hanno richiesto secoli per svilupparsi (Lisek, 2008). Il clima terrestre sta cambiando ad un ritmo che risulta essere molto più veloce di quanto l'industria vitivinicola e altre aziende si stiano adeguando. Nonostante l'incertezza riguardante l'esatto tasso e l'entità dei cambiamenti futuri, sarebbe vantaggioso che il settore vitivinicolo adottasse un approccio proattivo, valutando gli impatti, investendo nella ricerca genetica e nella selezione di nuovi genotipi, adottando adeguate strategie di adattamento, modificando le varietà e le pratiche di gestione, o addirittura mitigando le differenze di qualità del vino attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie (Jones e Alves, 2012).

Questi probabili cambiamenti ambientali richiederanno adeguamenti per preservare le caratteristiche dei vini di alta qualità (Duchéne e Schneider, 2005), di conseguenza risulta necessario ed essenziale attuare delle strategie di adattamento, senza le quali si avrebbero delle conseguenze estremamente dannose sulla resa e sulla fisiologia delle viti (Mira de Orduña, 2010; Templ et al., 2021). Anche nei climi più freschi, che finora hanno tratto vantaggio dai cambiamenti climatici, potrebbe essere necessario adottare uno stile di vinificazione più interventista, con aggiunte di acqua, regolazioni di acidità e riduzione dell'alcol. Le soluzioni specifiche dipenderanno dallo stile di vino desiderato, dalle normative locali e dalla diversa tolleranza alle temperature estreme delle diverse varietà d'uva (Mira de Orduña, 2010).

Di seguito sono presentate alcune soluzioni pratiche al previsto riscaldamento futuro sia per i vigneti esistenti che per quelli di nuovo impianto.

Il cambiamento climatico richiede importanti adattamenti nella viticoltura, come la creazione di nuovi genotipi a maturazione tardiva o capaci di produrre vini di alta qualità a temperature elevate (Duchêne et al., 2010; Parker et al., 2011). Ciò comporta la necessità di adattare nuove varietà di viti alle future condizioni ambientali (Duchêne e Schneider, 2005), accettando cambiamenti nella tipologia dei vini e modificando di conseguenza la produzione (Parker et al., 2011). Potrebbe essere opportuno passare a varietà che maturino più tardi (Parker et al., 2011) o prima del picco delle temperature estive (Mattioli, 2022), arrivando a produrre vini rossi o da dessert dove ora si producono vini bianchi (Duchêne et al., 2010; Mattioli, 2022). Altre alternative includono l'approfondimento della variabilità genetica esistente o "la selezione di varietà da incroci con tipi genetici a maturazione tardiva, come il Riesling e il Moscato d'Alessandria" (Duchêne et al., 2010). Inoltre, strategie come aumentare il carico di uva per vite o utilizzare con moderazione i nutrienti azotati nel vigneto possono influenzare la maturazione delle uve, ritardandola (Keller, 2010). La scelta adeguata del portainnesto considerando le nuove condizioni climatiche diventa quindi cruciale in caso di nuovo impianto (Mozell e Thach, 2014). La corretta selezione delle cultivar avrà quindi un ruolo importante nella manutenzione dei vigneti futuri (Lisek, 2008).

Un'alternativa per ritardare la maturazione delle varietà attuali è quella di posticipare la rottura delle gemme tramite una potatura invernale tardiva (Duchêne et al., 2010; Friend e Trought, 2007), potendo di conseguenza ritardare anche altre fasi dello sviluppo della vite (Friend e Trought, 2007). Tuttavia, questa strategia non è facilmente attuabile su scala regionale, poiché sarebbe logisticamente complesso applicare una potatura tardiva a tutti gli appezzamenti di vigneto e, anche se lo si facesse, l'effetto sarebbe limitato a pochi giorni, mentre sarebbero necessarie settimane di ritardo (Duchêne et al., 2010).

Le fluttuazioni annuali nella qualità dei vini potrebbero spingere verso una nuova strategia: spostare la coltivazione della vite in zone attualmente più fresche, magari a quote o latitudini più elevate, al fine di evitare condizioni di maturazione troppo

calde (Duchêne et al., 2010; Mozell e Thach, 2014), richiedendo così di esplorare nuove aree che potrebbero offrire condizioni favorevoli per la produzione di vini di alta qualità (Duchêne e Schneider, 2005). Generalmente, si considera che con l'aumento dell'altitudine, la temperatura diminuisca di circa 1°C ogni 100 metri (Zoecklein e Gump, 2022). L'opzione di spostare la coltivazione delle viti in zone più fresche rappresenterebbe quindi una soluzione potenzialmente valida per far fronte al cambiamento climatico e garantire la costante produzione di vini di buona qualità. Tuttavia, questa strategia implica l'identificazione e la valutazione attenta di nuove aree e richiederebbe un adeguato adattamento delle pratiche agronomiche alle condizioni locali.

Con l'aumento delle temperature, si prevede un incremento dei tassi di evapotraspirazione, causando con maggiore frequenza eventi di stress idrico. Di conseguenza, sarà indispensabile adeguare i sistemi di gestione del suolo e le scelte dei portainnesti per far fronte a queste sfide. In Europa, l'irrigazione potrebbe quindi diventare una pratica sempre più diffusa, ma la disponibilità di acqua rappresenterà il fattore limitante in molte aree (Schultz, 2000). Per fronteggiare le condizioni ambientali legate al cambiamento climatico, sono state proposte nuove tecniche di gestione del vigneto, come l'induzione di un deficit idrico poco prima dell'invasatura, che può contribuire a ripristinare i rapporti di antociani alterati dall'aumento della temperatura (Martínez-Lüscher et al., 2016). L'uso efficace dell'irrigazione a goccia, insieme a strategie di *deficit irrigation*, diventerà sempre più importante per garantire rese costanti e vini di qualità costante (Lereboullet et al., 2013). Tuttavia, i tentativi di mantenere una certa produttività e qualità dell'uva di fronte al riscaldamento globale potrebbero comportare un maggiore utilizzo di acqua per l'irrigazione e il raffreddamento dell'uva tramite nebulizzazione o aspersione, con potenziali impatti quantitativi sui corpi idrici (Hannah et al., 2013), per cui, per ridurre gli sprechi e contrastare il riscaldamento globale, diventa essenziale considerare il riutilizzo, il trattamento e il riciclo dell'acqua (Mozell e Thach, 2014).

Con l'avvento di estati più secche e calde, anche i sistemi di formazione dei vigneti, “dalla gestione del suolo all’architettura delle chiome”, dovranno necessariamente

subire delle modifiche (Duchéne e Schneider, 2005) e per compensare l'aumento delle temperature in vigneto, sarà opportuno considerare un miglioramento delle tecniche di raffreddamento, mediante l'orientamento strategico delle viti (Hannah et al., 2013), adottando tecniche di allevamento diverse, in modo da fornire una maggiore ombreggiatura alle uve e ridurre gli zuccheri, aumentando la parte acida (Keller, 2010). Il tutto può quindi essere ottenuto regolando il rapporto tra foglie e peso del grappolo, modificando la distanza tra le viti e regolando l'altezza delle piante nel vigneto per ridurre l'esposizione ai raggi UV nell'area fertile (Merloni, 2017; Santos et al., 2020). Diversi studi hanno però messo in evidenza come le tradizionali tecniche di gestione del vigneto nell'ultimo decennio, compresa la gestione delle chiome, la potatura e il diserbo, non sono state sufficienti per affrontare le sfide imposte dalle temperature più elevate e dalla siccità (Lereboullet et al., 2013).

Un'ulteriore soluzione per affrontare le temperature elevate in vigneto consiste nell'adottare la raccolta notturna e la consegna rapida dell'uva in cantina. Questa pratica permette di raccogliere le uve durante le ore più fresche, evitando così un abbassamento della qualità dovuto alle temperature elevate (Mozell e Thach, 2014). Per proteggere i frutti e le foglie della vite dai danni causati dai raggi UV e dal calore eccessivo, si possono invece utilizzare prodotti che creano uno strato sottile di particelle inerti e riflettenti (un'alternativa è l'utilizzo di reti ombreggianti). Le sostanze chimiche comunemente utilizzate per questo scopo includono il carbonato di calcio (CaCO_3), il potassio silicato (K_2SiO_3) e il caolino ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). L'impiego del caolino, che risulta essere il più comune in viticoltura, può migliorare le attività fotosintetiche e la gestione dell'acqua, contribuendo ad aumentare la capacità antiossidante nelle bacche e la presenza di metaboliti secondari, fattori che influenzano positivamente la qualità delle uve (Santos et al., 2020).

Diverse caratteristiche del futuro viticolo risultano ad oggi già visibili grazie alla cosiddetta viticoltura di precisione, la quale è basata sull'utilizzo di moderne tecnologie come i satelliti di posizionamento globale (GPS) e che grazie alla tecnologia visiva computerizzata dei trattori, permette di individuare e gestire in modo mirato le specifiche esigenze delle viti e dei vigneti in generale. Grazie a

queste tecniche avanzate, risulta quindi possibile mappare il sito del vigneto per individuare le aree problematiche, monitorare la resa delle viti e identificare le zone a bassa produzione. Inoltre, si possono stimare le dimensioni delle viti e della chioma durante l'invaiaatura, valutare il carico colturale e apportare aggiustamenti meccanici per bilanciare il carico d'uva di ogni vite. Questo approccio permette di ottimizzare la produzione e la qualità delle uve, garantendo un'attenzione personalizzata per ciascuna pianta e migliorando di conseguenza la gestione complessiva del vigneto (Howell, 2001). “Le tecnologie, tra cui il telerilevamento, possono fornire misure obiettive e non distruttive della composizione delle uve, del grado di maturazione e/o dell'uniformità della maturazione” (Zoecklein e Gump, 2022).

Le prove suggeriscono che il cambiamento climatico sta influenzando significativamente la produzione di vino, coinvolgendo sia la fisiologia e la biochimica delle viti, che i metodi di produzione del vino. Di conseguenza, i viticoltori e i produttori devono affrontare una serie di sfide e adottare diverse strategie per mantenere la qualità, l'identità e la redditività dei loro vini (Mozell e Thach, 2014). Di seguito sono presentate alcune soluzioni pratiche riguardanti la produzione vinicola in cantina per adattarsi al previsto riscaldamento futuro.

Le temperature più elevate, che come conseguenza portano anche ad una raccolta anticipata, possono avere un impatto significativo sui composti aromatici, causando reazioni ossidative durante le fasi pre-fermentative, pertanto, “è consigliato aumentare la capacità di raffreddamento della cantina” (Mira de Orduña, 2010), valutare le pratiche igieniche della cantina e considerare l'utilizzo di antimicrobici e antiossidanti per preservare la qualità del vino (Mozell e Thach, 2014).

Per compensare l'aumento dei livelli di zucchero nel mosto, è possibile adottare tecniche di riduzione dello zucchero, come l'ultrafiltrazione e l'osmosi inversa (Mozell e Thach, 2014). Infatti, come precedentemente analizzato, mosti con elevate concentrazioni di zuccheri possono causare stress nei lieviti, portando ad una maggiore produzione di prodotti di fermentazione, come l'acido acetico (Mira de Orduña, 2010). Inoltre, per bilanciare gli effetti di livelli più elevati di alcol,

dovuti alla maggior presenza di zuccheri, una soluzione può essere il considerare l'utilizzo di ceppi di lievito più tolleranti all'alcol (Mozell e Thach, 2014).

Per contrastare invece la riduzione dell'acidità, che risulta importante per la stabilità microbica e per prevenire eventuali blocchi di fermentazione, si può considerare di eseguire l'acidificazione (Mira de Orduña, 2010). In particolare, per vini bianchi con livelli più bassi di acidità a causa di vendemmie anticipate, si può prolungare il contatto del vino con le bucce per preservare i composti aromatici, proteggerli dall'ossidazione e aumentare la quantità di mannoproteine (Mozell e Thach, 2014). Allo stesso tempo, per affrontare la variabilità delle annate, soprattutto per quanto riguarda la complessità e lo stile del vino, è essenziale considerare con attenzione nuove tecniche di assemblaggio, come l'assemblaggio di vini provenienti da terroir e regioni diverse, dove il protocollo enologico lo consente (Mozell e Thach, 2014).

Infine, per adattarsi alla maturazione anticipata dell'uva, risulta cruciale pianificare in anticipo le operazioni di raccolta e implementare un sistema di adattamenti pianificati per affrontare gli impatti futuri causati dal cambiamento climatico. Questo approccio proattivo è essenziale per ridurre la vulnerabilità del settore e garantire la sostenibilità e la competitività. Evitando di sovraccaricare la manodopera e le attrezzature in periodi brevi, si assicura una gestione operativa efficiente e sostenibile (Mozell e Thach, 2014).

Nonostante i progressi scientifici sull'impatto del riscaldamento globale in viticoltura, sono necessarie ulteriori ricerche poiché le diverse regioni vinicole del mondo affrontano sfide climatiche diverse. Ciò richiede un'analisi approfondita delle condizioni specifiche di ciascuna località e l'identificazione di soluzioni pratiche vantaggiose per il sito e il prodotto. Le certificazioni per pratiche sostenibili e rispettose dell'ambiente sono sempre più adottate da produttori progressisti in tutto il mondo e questi passi in avanti dimostrano l'impegno dell'industria verso la sostenibilità (Mozell e Thach, 2014).

Il futuro del vino è strettamente legato al pianeta e alla sua popolazione. Viticoltori e produttori di vino devono comprendere il ruolo significativo della loro industria nel contesto globale e adottare un approccio responsabile nell'affrontare il

cambiamento climatico. La realtà è che il clima del pianeta sta cambiando, e l'industria vitivinicola deve essere pronta ad adattarsi e mitigare gli impatti (Mozell e Thach, 2014).

CONSIDERAZIONI FINALI

Il presente elaborato si è proposto di osservare come i cambiamenti climatici e, in particolare, le tendenze all'aumento delle temperature, stiano influenzando e potranno influenzare la fenologia e la vocazionalità vitivinicola globale. A tal fine sono stati presi in considerazione due degli indici bioclimatici maggiormente utilizzati in viticoltura, in particolare gli indici di Winkler e di Huglin, al fine di valutare le migliori zone viticole per le diverse varietà d'uva. Infine è stato adottato uno sguardo microbiologico e chimico osservando come l'innalzamento della temperatura vada a modificare la composizione dell'acino e ad anticipare ogni fase fenologica della vite. A fronte delle possibili migrazioni viticole trattate sono state poste delle possibili soluzioni attuabili sia in vigneto che in cantina.

Nel corso degli ultimi decenni, la vite ha già risposto ai cambiamenti climatici con cambiamenti fenologici anticipati, causando un anticipo della data di vendemmia. Tuttavia, proiezioni di ulteriori aumenti di temperatura suggeriscono che tali cambiamenti potrebbero rendere necessaria la revisione delle varietà coltivate in diverse condizioni climatiche, poiché potrebbero non essere più adatte a raggiungere la maturazione nelle stesse condizioni in futuro.

Questi cambiamenti climatici rappresentano una minaccia per l'industria vinicola globale e potrebbero spostare le zone con temperature ideali per la stagione di crescita verso le coste e le altitudini più elevate, consentendo in futuro la coltivazione della vite anche in zone attualmente troppo fredde per tale scopo, lasciando le regioni viticole attuali ad affrontare nuove sfide. Questa prospettiva di riscaldamento globale rivela un aumento dei margini di idoneità alla produzione di uva, suggerendo una possibile espansione delle zone viticole verso latitudini più

settentrionali. Il cambiamento climatico avrà quindi un impatto globale sulla viticoltura, ma ogni regione avrà una combinazione unica di fattori rilevanti per l'adattabilità delle coltivazioni.

Questo studio ha chiaramente evidenziato come l'ascesa delle temperature globali stia già avendo un impatto dominante sull'intero settore vitivinicolo mondiale, presentando prospettive future catastrofiche. Tuttavia, accanto a questa constatazione, sono state individuate soluzioni e restrizioni cruciali volte ad affrontare questa problematica. È stato ampiamente dimostrato che il cambiamento climatico sia principalmente il frutto delle azioni umane, il che sottolinea la nostra responsabilità fondamentale nell'affrontare questa sfida. I destini futuri sono chiaramente nelle nostre mani, nei nostri atteggiamenti prossimi e nell'incoraggiare una riduzione delle emissioni inquinanti. Risulta quindi importante ribadire che, nonostante le difficoltà attuali, c'è ancora una luce di speranza nella lotta contro il riscaldamento globale e le sue implicazioni per la viticoltura. La prospettiva di spostare le coltivazioni viticole verso aree più adatte dal punto di vista climatico emerge come un'alternativa fattibile, ma un nostro corretto comportamento e l'introduzione di nuove tecniche e tecnologie viticole potrebbe non solo preservare le tradizioni legate alla viticoltura, ma allo stesso tempo migliorare le pratiche globali di coltivazione. Si possono quindi fare ulteriori passi in avanti, portando così ad un miglioramento del settore vitivinicolo stesso.

La natura ipotetica di quanto finora sostenuto rende necessario sottolineare la multifattorialità alla base delle previsioni future. Il tutto, infatti, dipenderà dall'evolversi dello stesso riscaldamento globale, il quale è direttamente influenzato dai cambiamenti socio-psico-antropologici mondiali. Risultano chiaramente necessarie ulteriori ricerche empiriche per costruire una solida base di conoscenza riguardante l'evoluzione di questo fenomeno, ma la mole di studi in costante aumento sembra testimoniare un crescente interesse per quest'ambito sia da parte del senso scientifico che del senso comune.

BIBLIOGRAFIA

- Amerine, M., & Winkler, A. (1944). Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia*, 15(6), 493-675.
- Aydinalp, C., & Cresser, M. S. (2008). The effects of global climate change on agriculture. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 3(5), 672-676.
- Bagagiolo, G., Rabino, D., Biddoccu, M., Nigrelli, G., Berro, D. C., Mercalli, L., Spanna, F., Capello, G., & Cavallo, E. (2021). Effects of inter-annual climate variability on grape harvest timing in rainfed hilly vineyards of Piedmont (NW Italy). *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, 37–49. <https://doi.org/10.36253/ijam-1083>
- Baul, T. K., & McDonald, M. (2015). Integration of Indigenous knowledge in addressing climate change. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 14(1), 20–27.
<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/32021/1/IJTK%201%281%29%2020-27.pdf>
- Bécart, V., Lacroix, R., Puech, C., & García De Cortázar-Atauri, I. (2022). Assessment of changes in Grenache grapevine maturity in a Mediterranean context over the last half-century. *OENO One*, 56(1), 53–72. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.1.4727>
- Bedin, B. (2020). Beni culturali e catastrofi naturali. Facoltà di Economia e gestione delle arti e delle attività culturali, Università Ca' Foscari Venezia.

- Bock, A., Sparks, T. H., Estrella, N., & Menzel, A. (2013). Climate-Induced Changes in Grapevine Yield and Must Sugar Content in Franconia (Germany) between 1805 and 2010. *PLoS ONE*, 8(7), e69015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069015>
- Bock, A., Sparks, T., Estrella, N., & Menzel, A. (2011). Changes in the phenology and composition of wine from Franconia, Germany. *Climate Research*, 50(1), 69–81. <https://doi.org/10.3354/cr01048>
- Brichetto, I., & Alemanno, L. (2022). Vendemmia 2022: l'anno delle anomalie record.
- Cole, C. V., Duxbury, J., Freney, J., Heinemeyer, O., Minami, K., Mosier, A., & Zhao, Q. (1997). Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 49, 221-228.
- Cordini, G., & Stroppa, C. (2006). Il bene acqua: realtà e prospettive sociali (1. ed). Presented at the Convegno “Il bene acqua. Realtà e prospettive sociali,” Roma: Aracne.
- Costa, R., Fraga, H., Fonseca, A., García de Cortázar-Atauri, I., Val, M. C., Carlos, C., & Santos, J. A. (2019). Grapevine Phenology of cv. Touriga Franca and Touriga Nacional in the Douro Wine Region: Modelling and Climate Change Projections. *Agronomy*, 9(4), 210. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040210>
- Cristofalo, S. D. (2016). Progetto CNR Energy+: metodo di calcolo semplificato per la scomposizione della radiazione solare globale e la stima della produzione da fotovoltaico. *Istituto per l'Ambiente Marino Costiero. Consiglio nazionale delle ricerche*.
- Crovetto, G. M. (2020). Le emissioni di metano nei bovini da latte. *Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali. Università degli Studi di Milano*.
- Daly, H. (2022). Clima ed effetto serra. Ozono. Desertificazione. Patologia Ambientale. Capitolo 04
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*, 41(3), 193–204. <https://doi.org/10.3354/cr00850>

- Duchéne, E., & Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(1), 93–99. <https://doi.org/10.1051/agro:2004057>
- Duxbury, J. M. (1994). The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fertilizer Research*, 38(2), 151–163. <https://doi.org/10.1007/BF00748775>
- Edenhofer ORP-M, Sokona Y, Kadner S, Minx JC, Brunner S, Agrawala S, Baiocchi G, Bashmakov IA, Blanco G, Broome J, Bruckner T, Bustamante M, Clarke L, Conte Grand M, Creutzig F, Cruz-Núñez X, Dhakal S, Dubash NK, Eickemeier P, Farahani E, Fischedick M, Fleurbaey M, Gerlagh R, GómezEcheverri L, Gupta S, Harnisch J, Jiang K, Jotzo F, Kartha S, Klasen S, Kolstad C, Krey V, Kunreuther H, Lucon O, Masera O, Mulugetta Y, Norgaard RB, Patt A, Ravindranath NH, Riahi K, Roy J, Sagar A, Schaefer R, Schlömer S, Seto KC, Seyboth K, Sims R, Smith P, Somanathan E, Stavins R, von Stechow C, Sterner T, Sugiyama T, Suh S, Ürge-Vorsatz D, Urama K, Venables A, Victor DG, Weber E, Zhou D, Zou J, & Zwickel T (2014). Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_technical-summary.pdf
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Jones, G. V., Alves, F., Pinto, J. G., & Santos, J. A. (2014). Very high resolution bioclimatic zoning of Portuguese wine regions: present and future scenarios. *Regional Environmental Change*, 14(1), 295–306. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0490-y>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2013). Future scenarios for viticultural zoning in Europe: ensemble projections and uncertainties.

International Journal of Biometeorology, 57(6), 909–925.
<https://doi.org/10.1007/s00484-012-0617-8>

Fraga, H., Santos, J. A., Malheiro, A. C., & Moutinho-Pereira, J. (2012). Climate change projections for the portuguese viticulture using a multi-model ensemble. *Ciencia E Tecnica Vitivinicola*, 27(1), 39–48. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5126.6647>

Friend, A. P., & Trought, M. C. T. (2007). Delayed winter spur-pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13(3), 157–164. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2007.tb00246.x>

Hale, C. R., & Buttrose, M. S. (1974). Effect of Temperature on Ontogeny of Berries of *Vitis Vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 99(5), 390–394. <https://doi.org/10.21273/JASHS.99.5.390>

Hall, A. J., & Jones, G. T. (2009). Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15(2), 97–119. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2008.00035.x>

Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., & Hijmans, R. J. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), 6907–6912. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>

Hayman, P., Longbottom, M., McCarthy, M., & Thomas, D. (2012). Managing grapevines during heatwaves. *Grape and wine research and development corporation*.

Hendrickson, L., Ball, M. C., Wood, J. T., Chow, W. S., & Furbank, R. T. (2004). Low temperature effects on photosynthesis and growth of grapevine. *Plant, Cell and Environment*, 27(7), 795–809. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01184.x>

Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>

- Howell, G. S. (2001). Sustainable Grape Productivity and the Growth-Yield Relationship: A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52(3), 165–174. <https://doi.org/10.5344/ajev.2001.52.3.165>
- Huang, S. K., Kuo, L., & Chou, K.-L. (2016). The applicability of marginal abatement cost approach: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.013>
- Huang, S., Ghazali, S., Azadi, H., Movahhed Moghaddam, S., Viira, A.-H., Janečková, K., & Kurban, A. (2023). Contribution of agricultural land conversion to global GHG emissions: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 876, 162269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162269>
- Hunter, J., Volschenk, C., & Zorer, R. (2016). Vineyard row orientation of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz/101-14 Mgt: Climatic profiles and vine physiological status. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229, 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.06.013>
- Iliceto, V. (2009). Riscaldamento globale: solo CO₂? *Atti del workshop in geofisica*.
- Iltis, C., Martel, G., Thiéry, D., Moreau, J., & Louâpre, P. (2018). When warmer means weaker: high temperatures reduce behavioural and immune defences of the larvae of a major grapevine pest. *Journal of Pest Science*, 91(4), 1315–1326. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0992-y>
- IPCC. (2018). Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva, Switzerland, 2018.
- Irimia, L., Patriche, C. V., & Quénot, H. (2013). Viticultural Zoning: A Comparative Study Regarding the Accuracy of Different Approaches in Vineyards Climate Suitability Assessment. *Cercetari Agronomice in Moldova*, 46(3), 95–106. <https://doi.org/10.2478/v10298-012-0097-3>

- Jansen, M. A. K., Gaba, V., & Greenberg, B. M. (1998). Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. *Trends in Plant Science*, 3(4), 131–135. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01215-1](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01215-1)
- Jones, G. V., & Alves, F. (2012). Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal. *International Journal of Global Warming*, 4(3/4), 383. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2012.049448>
- Jones, G. V., Reid, R., & Vilks, A. (2012). Climate, Grapes, and Wine: Structure and Suitability in a Variable and Changing Climate. In P. H. Dougherty (Ed.), *The Geography of Wine* (pp. 109–133). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0464-0_7
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3), 319–343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Jug, T., & Rusjan, D. (2012). Advantages and disadvantages of UV-B radiations on Grapevine (*Vitis* sp.). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 24(6). <https://doi.org/10.9755/ejfa.v24i6.14676>
- Kakani, V. G., Reddy, K. R., Zhao, D., & Sailaja, K. (2003). Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 120(1–4), 191–218. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.015>
- Keller, M. (2010). Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16, 56–69. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00077.x>
- Laget, F., Tondut, J.-L., Deloire, A., & Kelly, M. T. (2008). Climate trends in a specific Mediterranean viticultural area between 1950 and 2006. *OENO One*, 42(3), 113. <https://doi.org/10.20870/oenone.2008.42.3.817>
- Lenzi, A. (2005). L'effetto serra. *Atti del Museo di Storia Naturale di Rosignano Solvay*.

- Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., & Bardsley, D. K. (2013). Socio-ecological adaptation to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *164*, 273–285. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.008>
- Li Vigni, L., Ygor, O., Giorgio, C., Fausto, G., & Liuzzo, M. (2015). Determinazione in continuo di CO₂, CH₄ e H₂O_v in ambiente atmosferico attraverso tecnica ad assorbimento laser (UGGA). *Rapporti tecnici INGV*, *310*.
- Li, Y., Ye, W., Wang, M., & Yan, X. (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *Climate Research*, *39*, 31–46. <https://doi.org/10.3354/cr00797>
- Lionello, P. (2023). AR6: cosa sappiamo di impatti, adattamento e vulnerabilità.
- Lisek, J. (2008). Climatic factors affecting development and yielding of grapevine in central Poland. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, *16*(1), 285-293.
- Lough, J. M., Wigley, T. M. L., & Palutikof, J. P. (1983). Climate and climate impact scenarios for Europe in a warmer world. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *22*(10), 1673-1684.
- Madronich, S., McKenzie, R. L., Björn, L. O., & Caldwell, M. M. (1998). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *46*(1-3), 5-19.
- Mahato, A. (2014). Climate change and its impact on agriculture. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *4*(4), 1-6.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021a). Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, *13*(3), 1318. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Malhi, G. S., Kaur, M., Kaushik, P., Alyemeni, M. N., Alsahli, A. A., & Ahmad, P. (2021b). Arbuscular mycorrhiza in combating abiotic stresses in vegetables: An eco-friendly approach. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(2), 1465–1476. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.001>

- Marrocchi, G., & Silvestroni, O. (2022). Innovations in the management of verdicchio vineyards in the castelli di Jesi area.
- Martínez-Lüscher, J., Morales, F., Delrot, S., Sánchez-Díaz, M., Gomés, E., Aguirreolea, & J., Pascual, I. (2013). Short- and long-term physiological responses of grapevine leaves to UV-B radiation. *Plant Science*, *213*, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.08.010>
- Martínez-Lüscher, J., Morales, F., Sánchez-Díaz, M., Delrot, S., Aguirreolea, J., Gomès, E., & Pascual, I. (2015). Climate change conditions (elevated CO₂ and temperature) and UV-B radiation affect grapevine (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) leaf carbon assimilation, altering fruit ripening rates. *Plant Science*, *236*, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.04.001>
- Martínez-Lüscher, J., Sánchez-Díaz, M., Delrot, S., Aguirreolea, J., Pascual, I., & Gomès, E. (2016). Ultraviolet-B alleviates the uncoupling effect of elevated CO₂ and increased temperature on grape berry (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) anthocyanin and sugar accumulation. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, *22*(1), 87–95. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12213>
- Martínez-Lüscher, J., Torres, N., Hilbert, G., Richard, T., Sánchez-Díaz, M., Delrot, S., & Gomès, E. (2014). Ultraviolet-B radiation modifies the quantitative and qualitative profile of flavonoids and amino acids in grape berries. *Phytochemistry*, *102*, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.03.014>
- Mattioli, E. (2022). Cambiamento climatico: un resoconto sugli effetti e strategie di adattamento in viticoltura. Dipartimento Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Facoltà di Scienze e Tecnologie Viticole ed Enologiche, Università degli studi di Padova.
- Meggio, F. (2022). The interplay between grape ripening and weather anomalies in Northern Italy – A modelling exercise: This article is published in cooperation with Terclim 2022 (XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium), 3-8 July 2022, Bordeaux, France. *OENO One*, *56*(2), 353–373. <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.2.5438>

- Mendelsohn, R. (2009). The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1), 5–19. <https://doi.org/10.1080/19390450802495882>
- Merloni, E. (2017). Capacità di adattamento delle imprese vitivinicole ai cambiamenti climatici: il caso del Sangiovese in Emilia-Romagna. Dipartimento Economia agraria ed estimo, Facoltà di scienze e tecnologie agrarie ambientali e alimentari. Università di Bologna.
- Meyer, L., Brinkman, S., van Kesteren, L., Leprince-Ringuet, N., & Van Boxmeer, F. (2015). Technical Support Unit for the Synthesis Report. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland*.
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897–2913. [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
- Mira de Orduña, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844–1855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
- Molitor, D., Caffarra, A., Sinigoj, P., Pertot, I., Hoffmann, L., & Junk, J. (2014). Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: a case study for the Luxembourgish winegrowing region: Late frost damage risk. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(1), 160–168. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12059>
- Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., & Butler, J. H. (2011). Non-CO2 greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476(7358), 43–50. <https://doi.org/10.1038/nature10322>
- Mozell, M. R., & Thach, L. (2014). The impact of climate change on the global wine industry: Challenges & solutions. *Wine Economics and Policy*, 3(2), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2014.08.001>
- Mullins, M. G., Bouquet, A., & Williams, L. E. (1992). Biology of the grapevine. *Cambridge, UK. Cambridge University Press*.

- Nemani, R., White, M., Cayan, D., Jones, G., Running, S., Coughlan, J., & Peterson, D. (2001). Asymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry. *Climate Research*, 19, 25–34. <https://doi.org/10.3354/cr019025>
- Nunes, N. A. S., Leite, A. V., & Castro, C. C. (2016). Phenology, reproductive biology and growing degree days of the grapevine ‘Isabel’ (*Vitis labrusca*, Vitaceae) cultivated in northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 76(4), 975–982. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.05315>
- Pais, I. P., Reboredo, F. H., Ramalho, J. C., Pessoa, M. F., Lidon, F. C., & Silva, M. M. (2020). Potential impacts of climate change on agriculture - A review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 397. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i6.2111>
- Parker, A. K., De Cortázar-Atauri, I. G., Van Leeuwen, C., & Chuine, I. (2011). General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L.: Grapevine flowering and veraison model. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 206–216. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>
- Parry, M. L., Porter, J. H., & Carter, T. R. (1990). Agriculture: climatic change and its implications. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(9), 318-322. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90090-z](https://doi.org/10.1016/0169-5347(90)90090-z)
- Pastore, V., Arous, A., Palese, A., Persiani, A., & Celano, E. G. (2015). Carta di attitudine alla produzione viticola dell’area cilento, alburni, vallo di diano. Dipartimento delle culture europee mediterranee. Università della Basilicata.
- Perugini, L. (2023). AR6: gravità, urgenza e speranza.
- Petrie, P. R., & Sadras, V. O. (2008). Advancement of grapevine maturity in Australia between 1993 and 2006: putative causes, magnitude of trends and viticultural consequences. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 14(1), 33–45. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2008.00005.x>
- Pirani, A. (2023). AR6: la fisica del clima e le sfide future.

- Pitari, G., Curci, G., & Sabatino, A. D. (2016). Evidenze del cambiamento climatico: dalla scala globale a quella locale. *Ila Giornata Scienza e Ambiente*.
- Proverbio, D., & Gerbi, V. (2016). Sull'impatto del cambiamento climatico sulla produzione vitivinicola. *Produzione del cibo e coltura nel XXI secolo*. Università degli studi di Torino.
- Ramos, M. C., Jones, G. V., & Yuste, J. (2018). Phenology of Tempranillo and Cabernet-Sauvignon varieties cultivated in the Ribera del Duero DO: observed variability and predictions under climate change scenarios. *OENO One*, 52(1). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.1.2119>
- Reddy, P. P. (2013). Impact of climate change on insect pests, pathogens and nematodes. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 19(2), 225–233. <http://aapmhe.in/index.php/pmhe/article/viewFile/205/194>
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., & Schultz, H. R. (2020). A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), 3092. <https://doi.org/10.3390/app10093092>
- Santos, J., Malheiro, A., Pinto, J., & Jones, G. (2012). Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research*, 51(1), 89–103. <https://doi.org/10.3354/cr01056>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Economic, social and governance adaptation readiness for mitigation of climate change vulnerability: Evidence from 192 countries. *Science of The Total Environment*, 656, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.349>
- Scarpore, F. V., Scarpore Filho, J. A., Rodrigues, A., Reichardt, K., & Angelocci, L. R. (2012). Growing degree-days for the 'Niagara Rosada' grapevine pruned in different seasons. *International Journal of Biometeorology*, 56(5), 823–830. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0484-8>

- Scherer, L., Gürdal, İ., & Van Bodegom, P. M. (2022). Characterization factors for ocean acidification impacts on marine biodiversity. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 2069–2079. <https://doi.org/10.1111/jiec.13274>
- Schiavon, S., & Zecchin, R. (2007). *Climate Change 2007: Causes, impacts, mitigation*. University of California.
- Schultz, H. (2000). Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(1), 2–12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>
- Sebastiani, L., Marchi, S., Guidotti, D., Ricciolini, M., Niccolai, M., & Storchi, P. (2005). Sviluppo e applicazione di un Sistema Informativo on-line per il monitoraggio della maturazione dell'uva: l'esperienza della Toscana sul Sangiovese. *Rivista italiana di agrometeorologia*, 43-45.
- Solomon, S. L. (2007). *Climate change 2007: the physical science basis : contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In *Cambridge University Press eBooks*. <https://boris.unibe.ch/71452/>
- Sperandio, M. (2013). *Analisi delle tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili e non*. Dipartimento di Ingegneria Industriale, Facoltà di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, Università degli studi di Padova.
- Srinivasan, C., & Mullins, M. G. (1981). Physiology of Flowering in the Grapevine — a Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 32(1), 47–63. <https://doi.org/10.5344/ajev.1981.32.1.47>
- Templ, B., Templ, M., Barbieri, R., Meier, M., & Zufferey, V. (2021). Coincidence of temperature extremes and phenological events of grapevines. *OENO One*, 55(1), 367–383. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.1.3187>
- Teslic, N., Vujadinovic, M., Ruml, M., Antolini, G., Vukovic, A., Parpinello, G. P., Ricci, A., & Versari, A. (2017). Climatic shifts in high quality wine production areas, Emilia Romagna, Italy, 1961-2015. *Climate Research*, 73(3), 195–206. <https://doi.org/10.3354/cr01468>

- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313–3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>
- Tol, R. S. J. (2013). The economic impact of climate change in the 20th and 21st centuries. *Climatic Change*, 117(4), 795–808. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0613-3>
- 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(3), 329–339. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108>
- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2009). Global warming due to increasing absorbed solar radiation: Global warming by solar radiation. *Geophysical Research Letters*, 36(7), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009GL037527>
- Venkataramanan, M. (2011). Causes and effects of global warming. *Indian Journal of Science and Technology*, 4(3), 226–229. <https://doi.org/10.17485/ijst/2011/v4i3.17>
- Vercesi, A., Castagnoli, A., & Dosso, P. (2003). Metodologia di caratterizzazione agrometeorologica dei territori. *Informatore Agrario*, 14, 13-16.
- Verdolini, E. (2023). AR6: le sfide della transizione climatica.
- Wang, X., Hu, H.-B., Zheng, X., Deng, W.-B., Chen, J.-Y., Zhang, S., & Cheng, C. (2022). Will climate warming of terrestrial ecosystem contribute to increase soil greenhouse gas fluxes in plot experiment? A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 827, 154114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154114>
- Watson, R. T., Filho, L. G. M., Sanhueza, E., & Janetos, A. (1992). Greenhouse Gases: Sources and Sinks.
- Wei, T., Yang, S., Moore, J. C., Shi, P., Cui, X., Duan, Q., & Dong, W. (2012). Developed and developing world responsibilities for historical climate change and CO₂ mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12911–12915. <https://doi.org/10.1073/pnas.1203282109>

- White, M. A., Diffenbaugh, N. S., Jones, G. V., Pal, J. S., & Giorgi, F. (2006). Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(30), 11217–11222. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603230103>
- Yue X-L, & Gao Q-X (2018) Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Adv Clim Change Res* 9:243–252. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>
- Zoecklein, B. W., & Gump, B. H. (2022). Practical methods of evaluating grape quality and quality potential. In *Managing Wine Quality* (pp. 135–185). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00003-8>
- Zorer R., Rocchini D., Delucchi L., & Neteler M., (2011). Derivazione dell'indice bioclimatico di Winkler a partire da mappe telerilevate modislst. In *XII meeting degli utenti GRASS e GFOSS, Trento, 9-11 febbraio 2011* (pp. 1-29).
- Zucaro, R., & Pontrandolfi, A. (2007). Agricoltura Irrigua e Scenari di Cambiamento Climatico. *Stagione irrigua 2006 nel Centro Nord. Istituto Nazionale di Economia Agraria*.

SITOGRAFIA

<https://www.silviazamboni.it/2019-anno-record-per-laumento-della-temperatura-media-in-italia-e-non-solo/> (figura 1)

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Italian.pdf (figura 2)

<https://ilbolive.unipd.it/it/news/25-mega-citta-producono-52-emissioni-gas-serra> (figura 4)

<https://ilbolive.unipd.it/it/news/25-mega-citta-producono-52-emissioni-gas-serra> (figura 5)

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/> (figura 6)

https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (figura 7)

https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_n2o/ (figura 8)

https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_sf6/ (figura 9)

<https://medicinaonline.co/2017/03/09/differenza-tra-raggi-infrarossi-ultravioletti-e-visibili/> (figura 11)

<https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/6101> (figura 14)

Maucieri (2021a). I fattori climatici e le piante.
https://samv.elearning.unipd.it/pluginfile.php/307082/mod_resource/content/1/4%20-%20I%20fattori%20climatici%20e%20le%20piant.pdf (ultima consultazione 21/07/2023)

Maucieri (2021b). Fenologia e applicazioni.
https://samv.elearning.unipd.it/pluginfile.php/307239/mod_resource/content/1/5%20-%20fenologia%20e%20applicazioni.pdf (ultima consultazione 14/07/2023)

Vinoway (2008). Il clima e la vite
<https://www.vinoway.com/pedia/pediaviticoltura/nozioni-general-ecologia-viticola/il-clima-e-la-vite/> (ultima consultazione 21/07/2023)

Wiforagri (2020). Viticoltura intelligente: gli indici bioclimatici per il monitoraggio varietale
<https://www.wiforagri.com/2020/09/17/gli-indici-bioclimatici-in-viticoltura/> (ultima consultazione 13/07/2023)

RINGRAZIAMENTI

Come conclusione dell'elaborato che sancirà la fine del mio percorso universitario, vorrei spendere alcune brevi parole per coloro che più di tutti mi sono stati vicini nel corso dell'intero percorso accademico.

Ringrazio la mia famiglia, per essermi stata sempre vicino, per avermi fatto ragionare su ogni scelta riguardante il mio futuro, restandomi vicino passo dopo passo, dandomi consigli costruttivi e credendo ogni giorno in me e nel mio processo di crescita personale e professionale. Ringrazio in particolare i miei genitori, che seppure abbiano avuto il piacere di dovermi sopportare, sono stati i miei due pilastri, su cui sono riuscito a basare la serenità di questi anni.

Ringrazio Edo, in tutto questo percorso sei stato il mio punto di riferimento e non avrei potuto chiedere di meglio. Ci sei sempre stato, dall'inizio alla fine, risultando fondamentale per la mia crescita. Sei riuscito a farmi tirare fuori il meglio di me, a farmi credere nelle mie capacità e a darmi la consapevolezza di quanto bisogna credere nei propri sogni.

Ringrazio Anna, il mio faro nella notte, nulla può esprimere meglio il tutto, il tuo esserci sempre è stato di primaria importanza. Sei arrivata nella mia vita nel momento giusto, che coincideva però anche con quello più difficile, dovendo così affrontare il tutto insieme a me. Ti sei dimostrata determinata e forte, sostenendomi in questo percorso finale. Il tuo continuo ripetermi di credere di più in me stesso e la tua positività sono state proprio ciò di cui avevo bisogno, te ne sarò per sempre grato. Grazie per aver posto così tanta fiducia in me e per essermi stata accanto quando pensavo che non ce l'avrei più potuta fare. Questo primo grande passo verso il mio futuro porta anche la tua firma. Sei unica.

Ringrazio Sophie,

in questi ultimi due anni sei riuscita a farmi aprire in un modo incredibile, subendoti di conseguenza tutte le mie lamentele, ma dandomi allo stesso tempo i consigli e le forze necessarie per affrontare al meglio il tutto. È anche grazie a te se non ho mollato nei momenti più duri, riuscendo così a portare a termine questo percorso.

Ringrazio i miei amici tutti e in particolare i ragazzi della biblioteca,

avete reso questi anni e in particolare quest'ultimo fatto di ansie e paure, molto più leggero e vivibile, siete stati fantastici.