

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Sede amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente

**DOTTORATO DI RICERCA IN
Viticultura, Enologia e Marketing delle Imprese Vitivinicole
CICLO XXIV**

**Modelli matematici per l'analisi della variabilità
spazio-temporale della fenologia della vite**

Coordinatore : Prof. Viviana Corich

Supervisore : Prof. Andrea Pitacco

Dottorando : Gianni Fila

Data consegna tesi

31 gennaio 2012

Indice

Riassunto	1
Abstract	3
Capitolo 1 - Introduzione	5
1.1. Il sistema-vigneto	5
1.2. La viticoltura di fronte agli scenari di cambiamento	6
1.3 I modelli di simulazione nell'analisi dei sistemi	7
1.4. Obiettivi del lavoro	8
Capitolo 2 - Modellazione del germogliamento	9
2.1. Introduzione	9
2.2 Materiali e metodi	10
2.2.1 Prelievo e forzatura delle talee	10
2.2.2 Osservazioni fenologiche di pieno campo.....	11
2.2.3 Modelli utilizzati	12
2.2.4 Calibrazione	13
2.2.5 Validazione	13
2.2.6 Costruzione del "Fuzzy Indicator"	15
2.2.7 Impostazione dell'analisi.....	16
2.3 Risultati	16
2.3.1 Variabilità dei dataset.....	16
2.3.2 Calibrazione e validazione dei modelli	17
2.3.3 Fabbisogni in freddo e caldo	19
2.3.4 Temperature attive sul chilling.....	20
2.3.5 Temperature attive sul forcing	21
2.4. Discussione	23
2.4.1 Gli esperimenti di forzatura in camera di crescita possono sostituire le osservazioni di pieno campo per calibrare/validare i modelli di germogliamento?.....	23
2.4.2 I modelli calibrati su talee forzate presentano una parametrizzazione coerente con le conoscenze sperimentali disponibili?	23
2.5. Conclusioni	26
Capitolo 3 - Verso un modello generale di fenologia della vite	28
3.1. Introduzione	28

3.2 Materiali e metodi	31
3.2.1 Osservazioni fenologiche di pieno campo.....	31
3.2.2 Esperimenti di forzatura di talee	31
3.2.3 Modelli fenologici	31
3.2.4 Calibrazione e validazione dei modelli	33
3.2.5 Impostazione dell'analisi.....	33
3.3 Risultati	33
3.4 Discussione	42
3.5 Conclusioni.....	43
Capitolo 4 - Applicazione dei modelli di fenologia nello studio degli impatti dei cambiamenti climatici sulla viticoltura	45
4.1. Introduzione.....	45
4.2 Materiali e metodi	47
4.2.1 Generazione di dati climatici.....	47
4.2.2 Impostazione dell'analisi.....	49
4.3 Risultati	50
4.3.1 Risposta dei modelli di germogliamento	50
4.3.2 Risposta dei modelli generali di fenologia	53
4.4 Discussione	59
4.4.1 Risposta dei modelli di germogliamento	59
4.4.2 Risposta dei modelli generali di fenologia	60
4.5 Conclusioni.....	61
Capitolo 5 - Scenari di cambiamento del clima e impatti sulla fenologia della vite nel distretto del Prosecco	62
5.1. Introduzione.....	62
5.2 Materiali e metodi	63
5.2.1 Area di studio	63
5.2.3 Dati di copertura del suolo	65
5.2.4 Descrizione della procedura di downscaling	65
5.2.5 Interpolazione spaziale e ricostruzione dei dati meteorologici.....	68
5.2.6 Modellazione della fenologia	68
5.2.7 Schema dell'analisi e valutazione statistica	68
5.3 Risultati e discussione	69
5.3.1 Uscita dalla dormienza.....	70

5.3.2 Germogliamento.....	71
5.3.3 Fioritura.....	72
5.3.4 Invaiaatura.....	72
5.4 Conclusioni.....	73
Capitolo 6 - Modellazione della maturazione con input da telerilevamento	75
6.1 Introduzione.....	75
6.1.1 Modelli di maturazione	75
6.1.2 Gli indici di vegetazione	76
6.1.3 Le missioni MODIS	77
6.2 Materiali e metodi	78
6.2.1 Dati di maturazione	78
6.2.2 Dati meteorologici.....	79
6.2.3 Dati MODIS	80
6.2.4 Descrizione dei modelli.....	80
6.2.5 Valutazione statistica dei modelli.....	82
6.3 Risultati	82
6.3.1 Modello DOY.....	82
6.3.2 Modello GDD.....	83
6.3.3 Modello EVI.....	84
Appendice - Valutazione della performance di modelli biofisici attraverso un indicatore aggregato basato sulla <i>fuzzy logic</i>	88
A.1 La valutazione multimetrica dei modelli biofisici.....	88
A.2 Insiemi <i>fuzzy</i>.....	89
A.3 Regole <i>fuzzy</i>.....	89
A.4 Un modello <i>fuzzy</i> per la costruzione di un indicatore di <i>performance</i>	90
A.5 Esempio numerico	93
Bibliografia	94
Ringraziamenti	106

Riassunto

Gli scenari che la viticoltura dovrà affrontare nei prossimi anni saranno caratterizzati da una crescente complessità dal punto di vista tecnico e socio-economico. Già adesso gli operatori del settore devono rispettare numerosi vincoli, come costi di produzione, limiti alla produzione, normative ambientali, regolamenti comunitari, e soprattutto le richieste di un mercato esigente e mutevole. A questo già complesso quadro si aggiungono le prospettive rappresentate dai cambiamenti climatici. Dato il delicato equilibrio che la viticoltura mantiene con il clima del proprio territorio, spesso risultato di secoli di adattamento, anche piccoli mutamenti sono in grado di incidere sulla qualità del prodotto finale, il vino.

La necessità di sviluppare strategie di adattamento appare quindi una prospettiva inevitabile per la viticoltura, che dovrà puntare su un'oculata pianificazione del vigneto privilegiando l'approccio di "sistema", vale a dire considerando ad un tempo tutti i fattori coinvolti nel processo decisionale e l'insieme delle loro interrelazioni. È pertanto prevedibile un crescente interesse verso i modelli di simulazione, lo strumento fondamentale per l'analisi degli agroecosistemi e per lo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni gestionali.

L'obiettivo di questo lavoro è stato la messa a punto di modelli matematici della dinamica dello sviluppo della vite fino alla maturazione. L'ambito applicativo di riferimento è stato quello delle analisi territoriali e degli scenari di cambiamento climatico, diventate di grande attualità negli ultimi anni. In questo tipo di applicazioni i modelli sono utilizzati in una grande varietà di situazioni ambientali, anche molto diverse da quelle in cui sono stati sviluppati, rendendo così la robustezza la loro caratteristica più critica per l'affidabilità delle stime.

Dopo una sezione introduttiva (Capitolo 1), il lavoro ha affrontato la modellazione del germogliamento attraverso i modelli di *chilling* e *forcing*, che diversamente da quelli tradizionali basati solo sul tempo termico, includono la descrizione della dormienza invernale (Capitolo 2). Attraverso l'impiego di esperimenti in condizioni controllate, è stato evidenziato che la variabilità del dataset di calibrazione è un fattore chiave per una corretta parametrizzazione dei modelli, in vista di un loro utilizzo in applicazioni che richiedono alti gradi di estrapolazione. Il basso fabbisogno in freddo della vite infatti, rende la corretta determinazione della data di fine dormienza un elemento non critico se i modelli vengono calibrati e validati su dataset che comprendono unicamente inverni lunghi e freddi, come nella maggior parte delle condizioni di campo nelle regioni centro-settentrionali italiane. Essi tendono quindi ad assumere parametri inconsistenti dal punto di vista fisiologico, sebbene questo non ne pregiudichi l'accuratezza nelle condizioni climatiche attuali.

Lo stesso approccio è stato successivamente impiegato per lo sviluppo di un modello generale di fenologia, per stimare le date di germogliamento, fioritura e invaiatura. Anche qui è stata rilevata l'esistenza del rischio di artefatti dovuti a effetti di "deriva" della procedura di ottimizzazione se il dataset utilizzato presenta una scarsa variabilità (Capitolo 3).

Dopo la fase di messa a punto, modelli basati sia sull'approccio *chilling* e *forcing* che sul tempo termico, sono stati applicati all'analisi degli effetti dei cambiamenti climatici, con riferimento al distretto del Prosecco di Valdobbiadene-Conegliano DOCG. Non sono state evidenziate differenze di rilievo tra i vari tipi di modelli, eccetto che per la proiezione più lontana nel tempo, corrispondente al periodo 2080-2099 (Capitolo 4). Sempre per la stessa zona è stata poi condotta un'analisi delle variazioni indotte dai mutamenti climatici verificatisi negli ultimi 60 anni, su scala sia spaziale che temporale. Ne è emerso che l'aumento delle temperature, registrato soprattutto a partire dagli anni '80 del secolo scorso, ha influito in maniera spazialmente uniforme sulla fenologia media di quattro varietà di vite. Una certa eterogeneità su base spaziale delle variazioni è stata invece osservata sulla variabilità interannuale, che è risultata maggiore in alcune zone e non in altre (Capitolo 5).

Nel Capitolo 6 è stata infine affrontata la tematica della maturazione. Si tratta della parte del ciclo di sviluppo più difficile da modellizzare, a causa soprattutto della complessità del concetto di qualità, a cui quello di maturazione è strettamente legato. La qualità che l'uva deve presentare alla raccolta non è facile da definire, in quanto dipendente dal grado di conoscenza degli aspetti tecnici-enologici, tuttora in evoluzione.

Essendo più limitate le conoscenze della maturazione dal punto di vista modellistico, lo studio ha adottato un approccio più empirico rispetto a quanto fatto in precedenza, e ha esplorato la dipendenza dell'accumulo degli zuccheri negli acini dalle variazioni degli indici di vegetazione rilevati da satellite. Gli indici di vegetazione sono influenzati da un insieme di fattori che influiscono anche sul processo di maturazione, quali la densità di area fogliare, il contenuto in clorofilla, la capacità fotosintetica e lo stress idrico. E' stato quindi elaborato un semplice modello basato sulla correlazione tra l'indice di vegetazione EVI (*Enhanced Vegetation Index*) rilevato via satellite dal NASA-MODIS, e la variazione del contenuto in zuccheri, finalizzato a determinare il momento ottimale per la raccolta. Il modello, messo a confronto con altri due basati sul tempo cronologico e sul tempo termico, ha dato le stime migliori, con una percentuale di successi sopra l'80%.

Abstract

Present-day viticulture is facing difficulties of increasing complexity under both the technical and the socio-economic standpoint. Farmers are already required to comply with several restrictions such as production costs, upper limits to production, environmental regulations, EU directives, and to keep up with a demanding and rapidly evolving market. Climate change perspectives add further complexity to this scenario. Given the intimate relationships between viticulture and local climates, often established after centuries of trial and error cultivation experiences, even small changes can affect the quality of the final product, the wine, hence raising expectations of short-term impacts on viticulture.

The need of developing adaptation strategies appears to be an inevitable perspective for viticulture, which will have to base itself on appropriate vineyard design techniques according to system approaches, since these take into account simultaneously all the factors involved in the decision process and the set of their interrelations.

It is likely that this will increase the interest around simulation modelling, the fundamental tool for agro-ecosystems analysis and for developing management decision support systems.

The objective of this work was to set up mathematical models of grapevine annual development cycle, including berry ripening, with the main focus on applications dealing with territorial-level and climate change scenario analysis, topical research themes nowadays. These applications typically run across many environmental situations, eventually very different from those which models were calibrated upon, thus making their robustness a key feature for estimates reliability.

After a brief introductory section, (Chapter 1), the study undertook budburst modelling by means of the chilling and forcing approach, which, unlike the traditional one based on thermal time only, includes the description of winter dormancy (Chapter 2). Using growth-room experiments it was shown that the variability of the calibration dataset is fundamental for a consistent model parameterization, which is highly desirable for applications demanding high extrapolation degrees. Given the grapevine low chilling requirement, the exact assessment of dormancy break is not critical if models are optimized and validated against long and cold winters, like those found in Northern and Central Italy. In this case they tend to take inconsistent parameters with respect to current physiological knowledge, although this does not affect accuracy under present climatic conditions.

The same approach was adopted for developing a general phenology model, to estimate the timing of budburst, flowering and veraison. The study confirmed the existence of risks of calibration artefacts due to “drift effects”, if the dataset used has a low variability (Chapter 3).

After the set up phase, chilling/forcing and Thermal Time models were compared in the evaluation of climate change impacts at the Prosecco di Conegliano-Valdobbiadene DOCG wine district. No differences were found among the models, except for the last projected time period, 2080-2099 (Chapter 4). The same area was the object of a more detailed study, where the climate variability during the past 60 years was investigated also at the spatial scale. The main result was that the temperature rise, recorded mostly after the 80's of last century, affected the phenology of four grapevine cultivars uniformly across the area. On the contrary, the interannual variability showed unequal variations from site to site (Chapter 5).

The last part of the work was the modelling of berry ripening (Chapter 6). This is still considered a difficult task, mainly because of the complexity related to the concept of quality, which is strictly linked to ripening. The harvest target quality is not easy to define, since it depends on many technical-oenological aspects, still subjected to evolution.

Given the limited advancements on ripening modelling, the research evaluated the dependency of berries sugar content on the variations of remotely-sensed Vegetation Index by an empirical approach. Vegetation indices are affected by a number of factors, such as leaf area density, chlorophyll content, photosynthetic capacity and water stress, which happen to have an action also on the ripening process. It was therefore elaborated a simple model based on the correlation between the MODIS-EVI, the Enhanced Vegetation Index from the NASA-MODIS platform, and the variation of berry sugar content. The idea was to evaluate the approach operatively to individuate the harvest time. Compared to a couple of other models based on chronological and thermal time, the EVI-based model provided the most accurate estimates, with a more than 80% performance score on a good/bad evaluation scale.

Capitolo 1 - Introduzione

1.1. Il sistema-vigneto

La viticoltura è l'attività agricola più profondamente legata al territorio, poiché la qualità del prodotto finale, il vino, dipende strettamente sia dai fattori fisici che lo caratterizzano, come il suolo, il clima e la morfologia, che da tutte le tipicità che per opera dell'uomo vi si sono radicate, come le varietà coltivate e le tecniche colturali ed enologiche.

Data l'altissima varietà di combinazioni a cui tutti questi elementi possono dare vita, il rapporto della viticoltura con il proprio territorio assume spesso un carattere di unicità e irriproducibilità, su cui puntano le strategie commerciali per conferire una specifica identità al prodotto e renderlo così riconoscibile sul mercato.

L'insieme di tutti i fattori che definiscono la vocazionalità viticola di un territorio va comunemente sotto il nome di *terroir*, termine originatosi in Francia nel XVII secolo, e da allora sempre usato per caratterizzare i vini in base alla loro provenienza (Deloire et al. 2005). Nonostante la sua tradizione plurisecolare, solo negli ultimi decenni si è iniziato a studiare il *terroir* con metodi scientifici. Inizialmente veniva identificato con la posizione geografica, dove il fattore predominante era la geologia locale e il tipo di suolo. Verso la fine degli anni '90 del secolo scorso cominciarono a essere considerati indissolubili dal concetto di *terroir* anche la climatologia, le tecniche di allevamento e di conduzione del vigneto, nonché altri fattori legati alle attività dell'uomo (Carbonneau et al. 2010). Quest'ultime acquisizioni furono favorite anche dalla diffusione della viticoltura nelle Americhe, in Oceania e in SudAfrica, dove non potendo contare sulla lunga esperienza di coltivazione come in Europa, l'individuazione di zone adatte alla vite deve far ricorso a tutte le conoscenze tecniche e scientifiche disponibili sui fattori che influenzano la qualità del vino, che vanno ben oltre la geologia del territorio (Reynolds et al., 2007).

La complessità della tematica ha reso difficile per lungo tempo la formulazione di una definizione condivisa di *terroir*, alla quale si è pervenuti solo nel 2010, in occasione dell'ottava assemblea generale dell'OIV (*Organisation Internationale de la Vigne et du Vin*), riunita il 25 giugno a seguito del 33° Congresso Mondiale della Vigna e del Vino. Il testo della nuova definizione è il seguente:

“Il ‘terroir’ vitivinicolo è un concetto che si riferisce a uno spazio nel quale si sviluppa una cultura collettiva delle interazioni tra un ambiente fisico e biologico identificabile, e le pratiche vitivinicole che vi sono applicate, che conferiscono caratteristiche distintive ai prodotti originari di questo spazio.” Il “terroir” include caratteristiche specifiche del suolo, della topografia, del clima, del

paesaggio e della biodiversità. (Risoluzione Oiv/Viti 333/2010).

Il concetto di *terroir* potrebbe essere considerato a prima vista come una antica anticipazione del moderno “approccio di sistema”, entrato da pochi decenni nel lessico agronomico, per indicare lo studio di una determinata coltura in relazione a una pluralità di fattori che influiscono sul suo comportamento. I due concetti non sono comunque equivalenti: il *terroir* è usato per individuare un’entità unica e non riproducibile di fattori per connotare un vino e per collocarlo in una gerarchia qualitativa nel mercato. È di conseguenza un concetto “statico”, che conferisce un’individualità al prodotto, e che presuppone pertanto una relativa stabilità degli elementi che lo definiscono.

Il concetto di “sistema” è generalmente applicato per studiare le variazioni tra gli elementi che lo compongono e la meccanica delle loro interazioni. È di conseguenza un concetto “dinamico”, in quanto un sistema si può dire conosciuto quando sono note le leggi che ne determinano il modo con cui cambia nel tempo.

L’affermarsi dell’approccio di sistema nella ricerca in ambito agro-ambientale ha però probabilmente contribuito alla recente evoluzione del concetto di *terroir*, per cui si può parlare di un avvicinamento tra le due concezioni, che verosimilmente continueranno entrambe a essere usate in futuro.

1.2. La viticoltura di fronte agli scenari di cambiamento

Mentre il concetto di *terroir* trova un ambito applicativo privilegiato nella caratterizzazione qualitativa del vino, la nozione di “sistema” sta prendendo piede come base metodologica per l’elaborazione di strategie gestionali per affrontare decisioni che si presentano sempre più complesse rispetto al passato, data la necessità di rispettare un maggior numero di vincoli. Questi vanno dalla necessità di contenere i costi di produzione, di rispettare vincoli ambientali e le politiche agrarie comunitarie, e soprattutto di stare al passo con le esigenze di un mercato molto complesso per esigenze qualitative, e soggetto a rapida evoluzione dovuta alla globalizzazione e all’emergere di nuovi mercati.

A complicare ulteriormente le cose si aggiungono le prospettive dei cambiamenti climatici in atto. Nelle più importanti aree viticole mondiali, tra cui quella italiana, la viticoltura si è adattata perfettamente alle caratteristiche pedoclimatiche dell’ambiente, grazie a plurisecolari esperienze di coltivazione, che hanno ottimizzato il ciclo di sviluppo e maturazione in modo da sfruttare al massimo le disponibilità termiche locali, al punto che anche cambiamenti climatici minimi potranno provocare sensibili variazioni sulla qualità del vino.

Secondo alcuni studi gli effetti dei cambiamenti climatici sulla qualità del vino stanno già facendosi

sentire (Jones 2008), e stanno stimolando la ricerca di opportune strategie di adattamento. Queste possono consistere nello spostare gli impianti a quote più elevate, dove possibile, oppure nel modificare le tecniche di conduzione del vigneto, per esempio affinando le tecniche di dosaggio dell'irrigazione o adottando specifiche pratiche di potatura per condizionare la maturazione.

Appare comunque certo che tale ricerca dovrà prendere in considerazione tutte le conoscenze e le risorse tecniche disponibili, e difficilmente potrà basarsi solo sulla pratica sperimentale, perché non è possibile esplorare materialmente tutte le condizioni che si possono prefigurare per il futuro. E' pertanto prevedibile un ruolo sempre più importante dei modelli di simulazione che già oggi sono un fondamentale strumento di ricerca, ma che offrono anche molte opportunità dal lato applicativo.

1.3 I modelli di simulazione nell'analisi dei sistemi

Secondo una definizione di Banks e Carson (1984), un sistema è un gruppo di elementi che sono uniti insieme in una qualche interazione o interdipendenza finalizzata ad ottenere un determinato scopo. Leffelaar e Ferrari (1989) hanno invece definito un sistema come una parte di realtà che contiene elementi interrelati. Esempi di sistemi biologici vanno dagli organuli delle cellule di una pianta al sistema respiratorio di un animale. Su scala più ampia si definiscono gli "agroecosistemi" come unità di suolo usate per coltivazioni o pascoli/allevamenti, associate all'atmosfera e agli strati sottostanti di suolo, includendo i flussi di acque sotterranee.

L'analisi dei sistemi può consistere nello studio del loro stato ad un tempo determinato, oppure del loro comportamento nel tempo in risposta a perturbazioni che tendano ad alterarne lo stato di equilibrio cui tende. In generale, svolgere un'analisi sul sistema reale non è pratico né conveniente, soprattutto quando questo è molto complesso o molto esteso. E' quindi necessario svilupparne un modello che ne dia una rappresentazione semplificata, ma incorporandone i principali attributi considerati rilevanti ai fini dell'analisi.

Un modello matematico è un insieme di relazioni che tentano di descrivere con il linguaggio e gli strumenti della matematica il comportamento di un sistema. Il sistema fisico viene così rappresentato con lo scopo di permettere analisi e sintesi del sistema stesso, la cui accuratezza e validità dipenderanno della capacità del modello matematico di rappresentare correttamente le relazioni funzionali tra le differenti componenti del sistema reale (Donatelli, 1995).

Banks e Carson (1984) hanno definito la simulazione come l'imitazione di un processo o sistema reale nel tempo. Sia che la simulazione sia eseguita con calcoli a mano o utilizzando un computer, essa genera una "storia artificiale" del sistema, che può essere valutata per operare inferenze sulle caratteristiche del sistema reale. Secondo Spain (1982), la simulazione, nella sua forma più semplice, consiste nel codificare un modello matematico in un programma, da utilizzare in un

computer per produrre dati simulati. I dati prodotti dal modello matematico possono venire comparati con dati sperimentali rilevati nel sistema reale per verificare la bontà della previsione del modello. Effettuata questa verifica, il modello può essere utilizzato per l'analisi dei sistemi.

1.4. Obiettivi del lavoro

Il presente lavoro si propone di mettere a punto modelli matematici della fenologia della vite concentrando l'attenzione sulla loro applicabilità negli studi che ne analizzano la variabilità sulla scala spaziale o temporale, o su entrambe.

Sono infatti di crescente attualità, anche per la loro valenza sugli orientamenti politici di organismi nazionali e sovranazionali, gli studi sull'impatto che avranno i cambiamenti climatici sull'agricoltura, basati sull'impiego di modelli su serie climatiche generate in base a varie ipotesi di scenari futuri di emissione di carbonio nell'atmosfera.

Per la viticoltura rivestono inoltre grande interesse le analisi del comportamento fenologico su base territoriale, tipicamente di supporto alle attività di zonazione assistita da sistemi informativi geografici.

In entrambi gli ambiti di ricerca è richiesto ai modelli di fornire stime accurate in condizioni anche molto diverse da quelle in cui sono stati calibrati. La robustezza dei modelli, ossia la capacità di fornire buone stime anche quando sono impiegati in applicazioni ad alto grado di estrapolazione, è quindi un fattore critico per il loro successo e per l'attendibilità dei risultati.

Una parte importante delle attività è stata quindi dedicata all'ottimizzazione di alcuni modelli di fenologia, avendo cura di valutare gli aspetti che influenzano la consistenza dei parametri, e la capacità di riprodurre il più ampio intervallo di variazioni. Tale lavoro ha interessato innanzitutto il germogliamento, e poi è stato esteso alla descrizione generale della fenologia.

I modelli così approntati sono stati valutati in due analisi-tipo, riguardanti gli effetti dei cambiamenti climatici sia sulla scala temporale, che sulla scala spazio-climatica.

Per la maturazione, l'ultimo stadio del ciclo riproduttivo della vite, è stato proposto un approccio modellistico su basi più empiriche rispetto a quelli considerati per le precedenti fasi fenologiche, privilegiando l'aspetto applicativo di supporto alla determinazione del momento di raccolta in relazione alla specificità locale.

Capitolo 2 - Modellazione del germogliamento

2.1. Introduzione

I modelli della fenologia della vite stanno conoscendo un momento di popolarità nello studio degli effetti dei cambiamenti climatici sulla viticoltura (Webb et al. 2007; Kwon et al. 2008, Duchêne et al. 2010; Caffarra e Eccel 2011) e nelle applicazioni assistite da sistemi informativi geografici per gli studi di zonazione, dove vengono impiegati per identificare le aree più adatte a specifiche cultivar (Bois et al. 2008; Scaglione et al. 2008). Considerato il crescente interesse verso questo tipo di applicazioni, caratterizzate da un elevato grado di estrapolazione sia su scala temporale che su scala spaziale, la robustezza dei modelli impiegati rappresenta una caratteristica cruciale per il loro successo (Caffarra e Eccel 2010).

I modelli tradizionali di germogliamento sono basati sull'accumulo di "unità caldo" (*heat units* o *forcing units*) a partire da una data fissa, e sono generalmente conosciuti come "*Thermal time models*" (Cannel e Smith 1983; Linkosalo et al 2008) ovvero come "*Spring Warm models*" (Hunter e Lechowicz 1992; Parker et al. 2011). Le varie tipologie di questi modelli si differenziano per il modo con cui sono definite le *forcing units*: queste possono essere gradi-giorno (*Growing Degree Day-GDD* - Winkler 1974; Bonhomme 2000), o più complesse funzioni della temperatura giornaliera (Chuine et al. 1999; Parker et al 2011).

Rispetto a questi, i modelli di tipo *chilling* e *forcing*, sviluppati per le piante perenni, includono la descrizione della dormienza invernale (Richardson et al. 1974; Cannel e Smith 1983; Cesaraccio et al. 2004; Chuine 2000; De Cortázar-Atauri et al. 2009), e tengono pertanto conto degli effetti dell'andamento della stagione invernale. Per questo loro maggiore potere esplicativo si ritiene che possano meglio adattarsi alla variabilità ambientale e genotipica rispetto a quelli che considerano solo l'accumulo termico. A causa della loro più alta complessità richiedono però maggiori quantità di dati sperimentali per la calibrazione, per evitare problemi di overfitting.

Questo è per la verità uno dei principali limiti nella ricerca nel campo della fenologia. Dato che gli stadi di sviluppo possono essere osservati solo una volta all'anno, ci vogliono letteralmente decenni per mettere insieme dei dataset sufficientemente estesi. Ma anche quando questi sono disponibili, non è raro incorrere in serie limitazioni, come eterogeneità nel materiale vegetale, o nei criteri usati per identificare gli stadi fenologici, per non parlare di possibili lacune nei dati meteorologici.

Questi problemi hanno suggerito la possibilità di usare esperimenti in condizioni controllate su talee di vite prelevate in momenti diversi del riposo invernale, per costruire un dataset per la calibrazione e la validazione di modelli di germogliamento. Sono diversi i vantaggi che ci si aspetta di ottenere

da questo approccio. Innanzitutto, le talee richiedono poco spazio, e il germogliamento può essere indotto in poche settimane. In aggiunta, le date di germogliamento e le temperature possono essere registrate con alta omogeneità e accuratezza. In un breve periodo si dovrebbe quindi riuscire a concentrare molti cicli di forzatura, e assemblare un dataset fenologico sufficientemente ampio, idoneo a rimpiazzare la mancanza di dati di campo o ad integrarli se sono scarsi. Un altro vantaggio è dato dalla possibilità di variare a piacere le condizioni di crescita, permettendo di osservare il comportamento del materiale vegetale in un più ampio intervallo di condizioni. Questo consente di svincolarsi dalle specificità locali per raggiungere risultati più facilmente generalizzabili a vantaggio della robustezza dei modelli.

Molti studi in passato hanno fatto uso di esperimenti in condizioni controllate per indagare gli effetti della temperatura sul germogliamento della vite (Pouget 1967; Weaver et al. 1975; Calò et al. 1976; Dokoozlian 1999), ma l'informazione sperimentalmente acquisita non è mai stata incorporata in un modello matematico, che ne avrebbe facilitato la comprensione generale e lo sfruttamento per applicazioni pratiche.

In questa prima parte del lavoro si è valutato se osservazioni compiute su talee forzate possono rimpiazzare dataset poliennali basati su osservazioni in condizioni naturali per calibrare modelli matematici di germogliamento. L'idea presuppone che porzioni di pianta mantengano lo stesso comportamento fenologico della pianta intera, ipotesi non ancora supportata dalla letteratura a quanto risulta, e che quindi costituisce uno dei motivi di interesse della prova.

I principali interrogativi a cui si è cercato di dare una risposta possono essere riassunti nei seguenti due punti:

- 1) I modelli calibrati su talee forzate hanno la stessa accuratezza e robustezza di quelli calibrati su osservazioni in condizioni naturali?
- 2) I dati usati per la calibrazione hanno influenza sul contenuto informativo dei parametri ottenuti? In altre parole, i parametri sono coerenti con le conoscenze sperimentali disponibili?

2.2 Materiali e metodi

2.2.1 Prelievo e forzatura delle talee

Talee unigemme delle cultivar 'Montepulciano' e 'Sangiovese' sono state ripetutamente espianate da un vigneto situato nella località di Scerni, in Abruzzo (42.10N, 14.57E) tra il 2007 e il 2010 durante il riposo invernale. Le viti erano innestate su Kober 5BB e allevate a cordone permanente speronato, con 3×1.5 m di spaziatura tra le piante. Ogni anno i campionamenti sono iniziati dopo che per almeno sette giorni erano state registrate temperature medie giornaliere inferiori a 10° C.

Questa condizione si è verificata a metà ottobre nel 2007 e 2009, e alla fine di novembre nel 2008. Nelle prime due campagne di campionamento sono stati prelevati 10 e 9 campioni, fino al mese di marzo, mentre solo due campionamenti sono stati prelevati tra gennaio e febbraio nella terza campagna (Tabella 1). Ciascun campione (n = 90) è stato prelevato avendo cura di prelevare le gemme in modo uniforme lungo tutto il tralcio.

Dopo il prelievo i campioni sono stati messi in una camera di crescita in condizioni semi-controllate, dove la temperatura veniva mantenuta 8.0 ± 2.5 °C al di sopra di quella esterna. In tal modo le gemme rimanevano esposte a una naturale variazione giornaliera, che cambiava tra un ciclo di forzatura e l'altro. Nel corso della campagna sperimentale le temperature massime sono cresciute da 10 a 25 °C, mentre le minime sono cresciute da 6 a 18 °C. Per aumentare ulteriormente la variabilità di esposizione al freddo, in alcune date sono stati prelevati campioni aggiuntivi per esporli ad un pre-trattamento in camera fredda, a 2-3 °C, che poteva durare da 10 a 35 giorni, prima di sottoporli al regime di forzatura.

Il germogliamento è stato registrato quando il 50% delle gemme raggiungeva lo stadio 09 della scala BBCH (Lorenz et al. 1994).

Tabella 1 – Date dei prelievi di taleine effettuati nelle tre campagne sperimentali tra il 2007 e il 2010. I numeri tra parentesi accanto ad ogni data indicano la durata in giorni dei pre-trattamenti in camera fredda a 2-3 °C che precedevano la messa in forzatura in camera di crescita.

	2007/2008	2008/2009	2009/2010
1	22 novembre (0)	11 novembre (13)	5 gennaio (0)
2	3 dicembre (0)	22 dicembre (0)	5 gennaio (10)
3	18 dicembre (0)	2 febbraio (0)	2 febbraio (0)
4	3 gennaio (0)	2 febbraio (16)	
5	21 gennaio (0)	2 febbraio (31)	
6	5 febbraio (0)	24 febbraio (0)	
7	5 febbraio (14)	24 febbraio (35)	
8	5 febbraio (28)	5 marzo (0)	
9	19 febbraio (0)	5 marzo (26)	
10	4 marzo (0)		

2.2.2 Osservazioni fenologiche di pieno campo

Serie storiche di dati di germogliamento sono state messe a disposizione dalle collezioni ampelografiche del Centro per la Ricerca per la Viticoltura di Conegliano (CRA-CIN), situata a Susegana (TV, 45.85N, 12.26E) e dell'Unità di Ricerca per la Viticoltura di Arezzo (CRA-VIC), (43.29N, 11.90E), entrambe strutture del CRA-Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura. Le due collezioni hanno lo stesso schema di impianto, con viti innestate su SO4 e

allevate a Sylvoz con una spaziatura di 3 x1.5 m.

I dati di Susegana coprono il periodo 1985-2010, con due anni mancanti (2003 and 2007), mentre quelli di Arezzo sono disponibili senza interruzioni dal 1996 al 2010. In totale, 39 annualità sono state disponibili per ciascuna cultivar.

Entrambi i siti delle collezioni sono dotati di stazioni meteorologiche automatiche, per la registrazione di precipitazioni e delle temperature dell'aria.

2.2.3 Modelli utilizzati

Sono stati adottati i modelli 'Unified' e 'Unichill', sviluppati da Chuine (2000).

La scelta è stata motivata dal fatto che le funzioni di *chilling* e *forcing* proposte per questi modelli presentano, se opportunamente parametrizzate, la capacità di riprodurre tutte le funzioni analoghe che caratterizzano i modelli finora proposti in letteratura. Possono quindi essere considerati come una specie di "stato dell'arte" per questo tipo di modelli.

Tabella 2. Equazioni utilizzate nei modelli 'Unified' e 'UniChill' (T_m = temperatura media giornaliera)

<i>chilling unit</i> (c.u.) giornaliera	$C.U. = \frac{1}{1 + e^{a_c \cdot (T_m - c_c)^2 + b_c \cdot (T_m - c_c)}}$
<i>forcing unit</i> (f.u.) giornaliera	$f.u. = \frac{1}{1 + e^{b_f \cdot (T_m - c_f)}}$
sommatoria f.u critica (solo modello Unified)	$F_{crit} = W \cdot e^{(-k \cdot Sc)}$

Entrambi i modelli dividono il periodo di riposo invernale in due sottoperiodi. Nel primo, detto "dormienza", il germogliamento delle gemme è inibito da fattori endogeni; le gemme quindi non germogliano se sono poste in condizioni favorevoli di temperatura. Alla dormienza segue il sottoperiodo detto di "quiescenza", in cui le gemme sono fisiologicamente pronte a svilupparsi, ma perché avvenga il germogliamento devono essere esposte a condizioni idonee di temperatura.

La durata della dormienza viene stimata attraverso l'accumulo di unità-freddo (*chilling units*), calcolate mediante una funzione della temperatura media giornaliera, a partire dal 1 settembre fino al raggiungimento di una sommatoria critica (C_{crit}). Da questo momento inizia il calcolo dell'accumulo di *forcing units*, anche queste funzione della temperatura media giornaliera, fino a che viene raggiunta un'altra sommatoria critica (F_{crit}), in corrispondenza della quale si verifica il

germogliamento.

I due modelli si differenziano nel modo in cui viene determinato il fabbisogno in caldo espresso da F_{crit} . Nel modello Unified, F_{crit} è una variabile, che diminuisce con l'aumentare dell'esposizione al freddo durante un periodo di sensibilità (T_c) che può estendersi anche oltre l'uscita dalla dormienza. La diminuzione viene calcolata attraverso una funzione esponenziale del totale di *chilling units* accumulate. Nel modello UniChill, F_{crit} è un valore fisso, e costituisce quindi un parametro del modello.

In totale, i modelli Unified e Unichill hanno 9 e 7 parametri rispettivamente.

2.2.4 Calibrazione

I modelli sono stati ottimizzati con il metodo del *Simulated Annealing* (Kirkpatrick et al. 1983; Cerny 1985), che è già stato usato per calibrare modelli di fenologia (Chuine et al. 1998; Schaber e Badeck 2003). Tra le molte versioni esistenti di questo metodo, nel presente studio è stata usata quella proposta da Corana et al. (1987), descritta in uno pseudo-codice più moderno da Goffe et al. (1994).

L'algoritmo funziona in combinazione con un generatore di numeri pseudo-casuali. Qui sono stati usati alternativamente i generatori di Marsaglia et al. (1990), Knuth (1981) e il "Mersenne-Twister" sviluppato da Matsumoto e Nishimura (1998).

La procedura di ottimizzazione basata sull'algoritmo consiste nel minimizzare la radice quadrata dell'errore quadratico medio (RMSE - *Root Mean Squared Error*) tra date stimate e osservate:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}}$$

dove E_i = data di germogliamento stimata per l'i-esimo anno, M_i = data di germogliamento osservata l'i-esimo anno, n = numero di coppie stima/osservazione.

Per ciascuna ottimizzazione l'algoritmo è stato fatto girare ripetutamente, variando a ogni ciclo il set iniziale di parametri, finché un valore minimo stabile di RMSE veniva raggiunto.

2.2.5 Validazione

La validazione dei modelli, che richiede dati indipendenti da quelli su cui sono stati calibrati, viene comunemente eseguita calcolando alcuni indici statistici, di cui Martorana e Bellocchi (1999) hanno compilato un'ampia rassegna. Tra le statistiche più usate vanno certamente annoverate il

coefficiente di determinazione (R^2) e l'RMSE.

Come però evidenziato da Bellocchi et al. (2002), l'uso di una sola statistica o anche di un insieme di esse se vengono però analizzate separatamente e non in maniera sistematica, potrebbe rivelarsi inadeguato, dal momento che ciascuna valuta solo un particolare aspetto dell'aderenza del modello ai dati osservati. Così può succedere che un modello fornisca buone prestazioni rispetto ad un dato indice, ma nello stesso tempo risulti deficitario rispetto ad altri, altrettanto importanti per il ricercatore.

Il concetto è esemplificato dalla Figura 1. Data una serie di osservazioni di una variabile Y all'aumentare di una variabile X, il modello A è quello che riproduce meglio l'andamento del fenomeno. Questo modello presenta una buona correlazione tra le due variabili (R^2 elevato), ma ha un'accuratezza molto bassa, (RMSE elevato), in quanto è distante dalle misure. Il modello B ha invece una maggiore accuratezza (RMSE basso) essendo numericamente molto vicino ai punti rilevati, ma l'andamento del modello non riproduce quello presentato dalle osservazioni.

Appare del tutto evidente che il miglior modello è quello che incorpora sia le caratteristiche di accuratezza che di correlazione, e che almeno due indici sono necessari per descrivere quantitativamente la capacità di un modello di riprodurre il comportamento di un sistema.

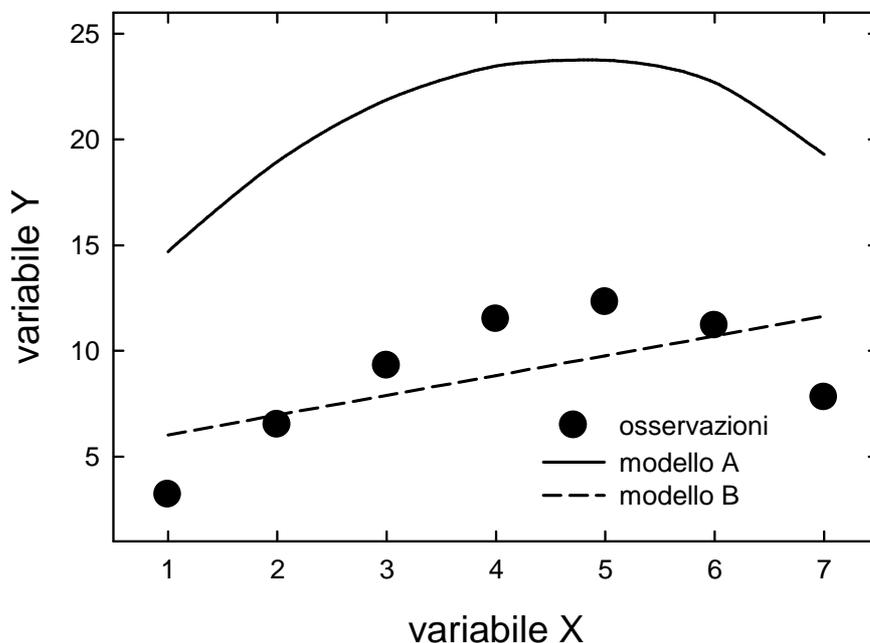


Figura 1. Rappresentazione grafica della indipendenza e complementarità dei concetti di “correlazione” e “accuratezza”. Il modello A ha buona correlazione ma scarsa accuratezza, mentre il modello B ha buona accuratezza ma scarsa correlazione. Il modello ideale è quello che combina entrambe le caratteristiche.

Per prevenire questo tipo di problemi, Bellocchi et al. (2002) hanno sviluppato un approccio basato

sulla logica *fuzzy*, per la valutazione simultanea dei modelli secondo più indici. Il metodo consiste nell'aggregazione di più statistiche in un solo indicatore, il cui valore dipende da quello assunto da ciascuna statistica componente secondo una gerarchia di pesi arbitrariamente assegnata, che riflette la conoscenza esperta del ricercatore.

Si presenta qui solo una descrizione sommaria e intuitiva del metodo, rimandando il lettore interessato alla più dettagliata descrizione riportata nell'Appendice. Oltre al lavoro citato, esempi applicativi del metodo sono riportati in Rivington et al. (2005), Donatelli et al. (2005), Diodato e Bellocchi (2007), Abraha e Savage (2008) e Confalonieri et al. (2010).

2.2.6 Costruzione del “Fuzzy Indicator”

E' stato definito un indicatore, denominato “FI” (= *Fuzzy Indicator*), il cui valore dipende da quelli simultaneamente assunti dai seguenti indici statistici: i) RMSE; ii) R^2 ; iii) la differenza assoluta tra 1 e la pendenza della retta di regressione stime vs. osservazioni (E vs M); iv) il valore assoluto dell'intercetta della retta di regressione E vs. M; v) e infine la “Modelling Efficiency” (EF) (Loague and Green 1991).

La scelta di queste statistiche definisce un criterio su una base esperta per classificare la performance dei modelli. L'idea di fondo è che un “buon” modello è quello che ha la minor differenza media tra stime e misure e dove la retta di regressione è la più vicina possibile alla retta bisettrice ($y = x$). L'indice EF aggiunge ulteriore rigore alla valutazione. Il suo intervallo di variazione è compreso tra $-\infty$ e $+1$, dove i valori negativi indicano che la media dei valori osservati è uno stimatore migliore del modello allo studio.

FI è un indice adimensionale che varia tra 0 (miglior risposta del modello) e 1 (peggiore risposta). La procedura di calcolo si basa sulla *multi-valued fuzzy set theory* introdotta da Zadeh (1965), e segue il cosiddetto Sugeno o Takagi–Sugeno–Kang metodo di inferenza fuzzy (Sugeno 1985).

L'intervallo di variazione di ciascuna statistica viene diviso in due *classi di membership* secondo una valutazione esperta: favorevole (F) e sfavorevole (U).

Per ciascuna statistica, F è l'intervallo del campo di variazione dove i valori assunti sono considerati ottimali, mentre se l'indice assume valori entro l'intervallo U, si considera fallita la stima. In questi due casi, il valore di *membership* è pari rispettivamente a 0 e a 1. Per assegnare i valori di *membership* intermedi, quando la statistica ricade all'interno delle soglie F e U, si applica un'interpolazione basata su una curva a “S” (Liao 2002).

Una volta che i valori di *membership* sono stati assegnati, FI viene calcolato. In estrema sintesi, il ragionamento è il seguente: se tutti gli indici ricadono nell'intervallo F, allora $FI = 0$. Se invece sono tutti nell'intervallo U, allora $FI = 1$. Per tutti gli altri casi, FI assume valori intermedi calcolati

in base a un insieme di regole decisionali derivate dai pesi relativi assegnati su base esperta a ciascuna combinazione di F/U. In questo lavoro è stata assegnata la stessa importanza a tutte le statistiche componenti l'indicatore FI. La Tabella 3 riporta i limiti assegnati a ciascun indice per individuare le classi F e U.

Tabella 3. Indici statistici usati per costruire l'indicatore fuzzy (FI), e definizione degli insiemi fuzzy. Per ciascun indice, F è l'insieme dei valori assunti dall'indice dove la risposta del modello è considerata ottimale, mentre U corrisponde all'intervallo di valori secondo i quali le stime devono considerarsi fallite.

indice	intervallo di variazione	valore ottimale	intervalli fuzzy
RMSE	[0; +∞]	0	F <1 ; U >10
R2	[0; 1]	1	F > 0.90; U <0.5
 1-m (*)	[0; +∞]	0	F<0.10; U>0.50
 q (**)	[0; +∞]	0	F<1; U>15
EF	[-∞; 1]	1	F>0.5; U<0

(*) $m =$ pendenza della regressione stime vs. osservazioni

(**) $q =$ intercetta della regressione stime vs. osservazioni

2.2.7 Impostazione dell'analisi

Come primo obiettivo ci si è proposti di valutare se l'uso di talee forzate per calibrare i modelli di germogliamento fosse efficace nel generare stime accurate. A tale scopo, i modelli così calibrati sono stati validati su osservazioni indipendenti compiute in pieno campo.

La calibrazione dei modelli è stata poi ripetuta usando come dataset di ottimizzazione le osservazioni di pieno campo, mentre la validazione è stata eseguita sulle talee forzate. In questo modo è stato determinato se i due dataset di calibrazione fossero equivalenti nel generare stime accurate su dati indipendenti, e quale fosse l'eventuale effetto sulla consistenza e sul valore informativo dei parametri ottenuti.

2.3 Risultati

2.3.1 Variabilità dei dataset

Il ciclo di esperimenti in camera di crescita è risultato efficace nella generazione di variabilità di esposizione alle temperature fredde. In Tabella 4 questa durata è stata espressa come il numero di giorni, compresi tra il 1 settembre e il germogliamento, che hanno avuto una temperatura media inferiore a 10° C. Questo valore è da tempo considerato la soglia al di sotto della quale le

temperature sono idonee a soddisfare il fabbisogno di freddo per superare lo stato di dormienza (Pouget 1972; Bernstein 1984). La variabilità dell'esposizione a queste temperature è variata tra 15 e 113 giorni nel dataset di talee forzate, e tra 92 e 154 giorni nei dati di campo. La maggiore variabilità nella durata di esposizione al freddo è risultata associata alla più alta variabilità nella data di germogliamento. L'intervallo tra il primo e ultimo germogliamento è stato di 117 giorni nelle talee forzate e 34 giorni nei dati di campo.

Tabella 4. Variabilità della data di germogliamento e della durata di esposizione al freddo nel dataset delle talee forzate e in quello raccolto in campo.

dataset	data di germogliamento (giorno dell'anno)		n. di giorni con T media < 10°C (dal 1 settembre al germogliamento)	
	intervallo di variazione	deviazione standard	intervallo di variazione	deviazione standard
talee forzate	[-11; 106]	29.9	[15; 113]	30.4
campo	[86; 120]	8.0	[92; 154]	14.2

2.3.2 Calibrazione e validazione dei modelli

Entrambi i modelli hanno mostrato buon grado di adattamento ai dati sperimentali per tutt'e due le cultivar, quando sono stati calibrati sulle talee forzate. I punteggi FI sono variati da 0.019 a 0.035. Alla validazione le stime migliori sono state osservate sull'Unichill per il Sangiovese (FI = 0.262) e la peggiore sullo stesso modello per il Montepulciano (FI = 0.411), mentre il modello Unified ha ottenuto punteggi comparabili, 0.348 e 0.304, per Montepulciano e Sangiovese (Tabella 5).

Tabella 5. Risultati della calibrazione su talee forzate dei modelli Unified e UniChill per le cultivar Montepulciano e Sangiovese. La validazione è stata eseguita su dati rilevati in pieno campo su due località per complessivi 39 anni (C = calibrazione; V = validazione).

indici	Unified				UniChill			
	Montepulciano		Sangiovese		Montepulciano		Sangiovese	
	C.	V	C	V	C	V	C	V
RMSE	2.866	5.697	2.725	5.935	3.375	5.582	2.803	4.656
R2	0.989	0.559	0.991	0.746	0.985	0.613	0.990	0.739
1-slope	0.014	0.052	0.012	0.041	0.014	0.114	0.035	0.052
intercept	1.153	6.247	0.870	8.152	0.912	11.294	1.827	6.479
EF	0.989	0.121	0.990	0.453	0.985	0.139	0.989	0.663
FI	0.0231	0.348	0.019	0.304	0.035	0.411	0.026	0.262

Buoni valori dell'indicatore FI sono stati ottenuti anche quando i modelli sono stati calibrati sui dati di campo. Il modello Unified ha ottenuto punteggi di 0.089 e 0.071 sul Montepulciano e Sangiovese, mentre i corrispondenti valori ottenuti con il modello Unichill sono stati 0.252 e 0.121 (Tabella 6).

Le statistiche di validazione in questo caso sono state calcolate considerando solo i germogliamenti osservati dopo la metà di febbraio. Prima di questa data, i modelli hanno completamente fallito le stime o le hanno pesantemente sovrastimate (Figura 2). I punteggi di FI così calcolati sono stati soddisfacenti, ma comunque un po' più alti di quelli ottenuti dai modelli calibrati sulle talee, e sono stati compresi tra 0.352 e 0.495.

Tabella 6. Risultati della calibrazione su osservazioni di pieno campo dei modelli Unified e UniChill per le cultivar Montepulciano e Sangiovese. La validazione è stata eseguita su dati rilevati in pieno campo su due località per complessivi 39 anni (C = calibrazione; V = validazione).

indici	Unified				UniChill			
	Montepulciano		Sangiovese		Montepulciano		Sangiovese	
	C.	V	C	V	C	V	C	V
RMSE	3.211	3.778	3.704	4.408	2.969	4.615	3.558	5.342
R2	0.775	0.976	0.825	0.963	0.777	0.981	0.822	0.982
1-slope	0.012	0.163	0.015	0.137	0.098	0.153	0.036	0.169
intercept	1.492	15.516	1.393	12.628	11.069	16.213	3.795	16.157
EF	0.715	0.937	0.781	0.918	0.756	0.913	0.798	0.901
FI	0.089	0.429	0.071	0.352	0.252	0.445	0.121	0.495

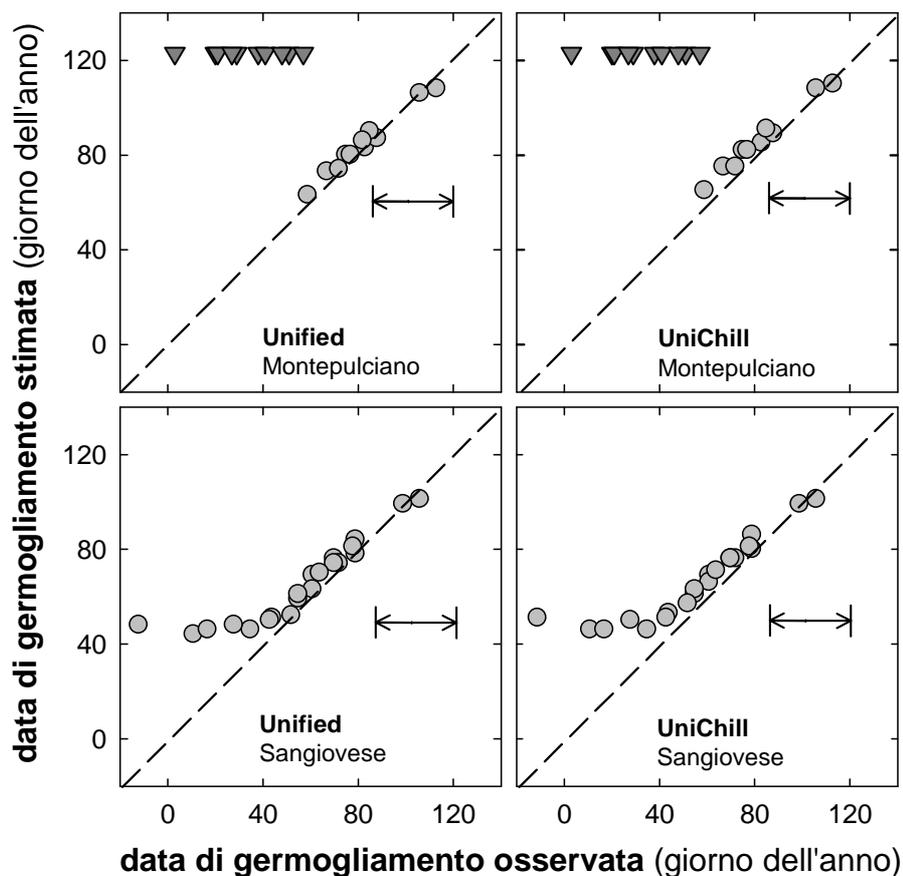


Figura 2. Validazione di modelli, calibrati con dati di campo, su dati ricavati da esperimenti in camera di crescita. I triangoli mostrano le stime fallite, alle quali è stato assegnato un valore arbitrario fuori scala. Le frecce a due punte indicano l'intervallo di variazione del dataset di calibrazione.

2.3.3 Fabbisogni in freddo e caldo

I fabbisogni in freddo e caldo delle cultivar in esame per superare le fasi di dormienza e quiescenza sono quantificati dai parametri C_{crit} e F_{crit} , che rappresentano il numero di giorni che la cultivar deve trascorrere alle temperature ottimali specifiche per le due fasi.

I valori di tutti i parametri restituiti dalle calibrazioni sono riportati nella Tabella 7, dove sono stati evidenziati quelli di C_{crit} e F_{crit} .

Tabella 7. Parametri dei modelli Unified e UniChill per le cultivar ‘Montepulciano’ (M) e ‘Sangiovese’ (S), ottenuti da ottimizzazione numerica su dati di germogliamento da esperimenti in camera di crescita o da osservazioni di campo. A scopo di confronto la tabella riporta i valori di F_{crit} (media \pm dev.st., calcolati sui dati di camera di crescita) anche per il modello Unified.

Mod./cv	a_c	b_c	c_c	b_f	c_f	C_{crit}	W	K	T_c	F_{crit}
<i>calibrazione su talee forzate</i>										
Unified/M	1.154	-10.964	0.537	-0.264	12.069	8.5	45.2	-0.0058	100	(37.9\pm1.44)
Unified/S	3.298	-23.197	0.886	-0.292	14.203	12.5	20.7	-0.0004	166	(20.1\pm0.08)
UniChill/M	2.560	23.668	9.838	-0.232	13.135	9.1				35.5
UniChill/S	3.441	23.839	8.182	-0.267	13.642	11.7				23.6
<i>calibrazione su dati di campo</i>										
Unified/M	1.180	-28.201	-8.832	-0.201	15.472	112.7	17.6	-9.3*10 ⁻⁵	193	(17.4\pm0.01)
Unified/S	0.282	-10.708	0.214	-0.217	13.187	132.5	24.5	-0.0004	167	(22.9\pm0.06)
UniChill/M	1.190	-20.322	-1.897	-0.194	15.041	114.9				19.0
UniChill/S	0.431	-17.597	-1.501	-0.165	15.145	127.4				22.3

Per esigenze di comparazione la tabella mostra i valori di F_{crit} anche per il modello Unified, dove in realtà non si tratta di un parametro, ma di una variabile che dipende dal *chilling* complessivamente ricevuto. I valori riportati sono stati calcolati sui dati di camera di crescita, e corrispondono alla media \pm la deviazione standard.

Per quanto concerne il fabbisogno in freddo, nei modelli calibrati su talee forzate l’ottimizzazione si è stabilizzata su bassi valori di C_{crit} , intorno ai 10 giorni, valori molto diversi da quelli ottenuti dalla calibrazione su dati di campo, che ha restituito valori di C_{crit} nettamente superiori, al di sopra di 110 giorni per tutte le cultivar e modelli.

I bassi fabbisogni in freddo sui modelli basati sulle prove in camera di crescita hanno permesso un’uscita precoce della fase di dormienza, che è stata stimata tra il 17 e 30 novembre, calcolata sul dataset di pieno campo. Ai fabbisogni ottenuti dopo calibrazione sui dati di campo, superiori di più di dieci volte a quelli ottenuti con l’altro dataset, sono invece corrisposte uscite dalla dormienza più tardive, tra l’8 gennaio e il 9 febbraio (Tabella 8).

Tabella 8. Medie delle date di uscita dalla dormienza stimate dai modelli Unified e Unichill, calibrati su talee forzate e su dati di campo.

modello	cultivar	calibrazione su talee forzate	calibrazione su dati di campo
Unified	Montepulciano	17 novembre	09 febbraio
	Sangiovese	30 novembre	15 gennaio
Unichill	Montepulciano	20 novembre	07 febbraio
	Sangiovese	29 novembre	08 gennaio

Per quanto invece riguarda in fabbisogni in caldo, la calibrazione dei modelli Unified e Unichill su talee forzate ha restituito valori di 37.9 e 35.5 giorni sul Montepulciano, e di 20.1 e 23.6 giorni sul Sangiovese. Esigenze in caldo minori come pure minori differenze tra le cultivar sono state ottenute dalla calibrazione su dati di campo, dove l' F_{crit} è risultato di 20 giorni in media (Tabella 7).

Era atteso che le esigenze di *forcing* fossero complementari a quelle di *chilling*: più lunga è la prima fase, più breve deve essere la seconda e viceversa. Questo è almeno quanto è stato effettivamente osservato sul Montepulciano, dove l' F_{crit} derivato dalla calibrazione su campo è stato circa la metà di quello ottenuto dalla calibrazione su talee. Diverso il comportamento riscontrato sul Sangiovese, dove l' F_{crit} è rimasto invariato con un valore medio di 22.2, nonostante un aumento di dieci volte di C_{crit} nel passare dalla calibrazione su camera di crescita a quella su campo.

Per interpretare questi comportamenti contrastanti sono stati presi in esame gli intervalli di temperature attive sul *chilling*, risultati molto differenti tra i due approcci di calibrazione. L'ampiezza dell'intervallo di temperature ottimali per il *chilling* è strettamente connesso con il fabbisogno in freddo, poiché il primo influisce sulla velocità con cui quest'ultimo viene soddisfatto.

2.3.4 Temperature attive sul *chilling*

Nei modelli calibrati su talee la funzione della temperatura che restituisce il valore di *chilling unit* ha assunto una forma rettangolare, dove l'intervallo ottimale di temperatura risulta facilmente individuabile, ed è pari a 0-10.5 °C in Montepulciano e 0.7-8.3 °C in Sangiovese, con pochissime differenze tra i modelli (Figura 3, grafici in alto). I modelli calibrati sui dati di campo mostrano funzioni con la stessa forma, ma con un più ampio intervallo di temperature ottimali, oltre a maggiori differenze tra le cultivar. Sul Montepulciano gli intervalli ottimali sono -9.1-15.3 °C (Unified) e -2.3-15.6 °C (Unichill), mentre per il Sangiovese sono -0.6-39.5°C (Unified) e -2.0-39.8°C(Unichill) (Figura 2, grafici in basso).

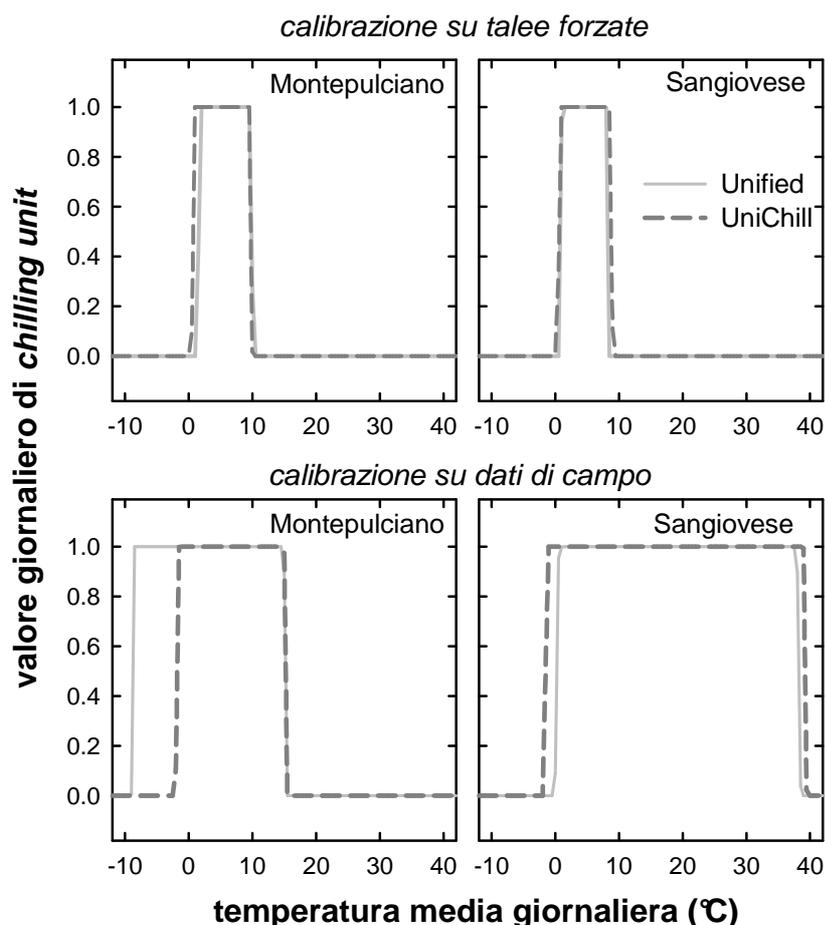


Figura 3. Funzioni di calcolo per le *chilling units* risultanti dalla calibrazione dei modelli Unified e UniChill su dati di camera di crescita e rilevati in campo.

2.3.5 Temperature attive sul forcing

Le funzioni ottimizzate per il calcolo delle *forcing units* sono riportate in Figura 4, dove compaiono anche alcuni dati tratti da Pouget (1967) e Moncur et al. (1989). Per quanto di nostra conoscenza, si tratta degli unici studi che finora sono stati dedicati a stabilire una relazione quantitativa tra la temperatura e la velocità di germogliamento per la vite. Nel lavoro di Pouget sono state considerate quattro cultivar, di cui nella figura compaiono solo quelle risultate come la più precoce (‘Perla di Csaba’) e la più tardiva (‘Ugni blanc’, corrispondente al ‘Trebiano’ in italiano). In entrambi i lavori i dati originali sono espressi in ‘velocità di germogliamento’ (avente dimensione: giorni^{-1}). Per renderli comparabili ai dati ottenuti in questo studio sono stati convertiti in unità corrispondenti al ‘tasso di germogliamento relativo giornaliero’, analogo alle *forcing unit*, normalizzando i singoli dati sulla temperature corrispondente alla massima velocità di germogliamento osservata, e cioè 25 °C in Pouget, e 20 °C in Moncur *et al.*

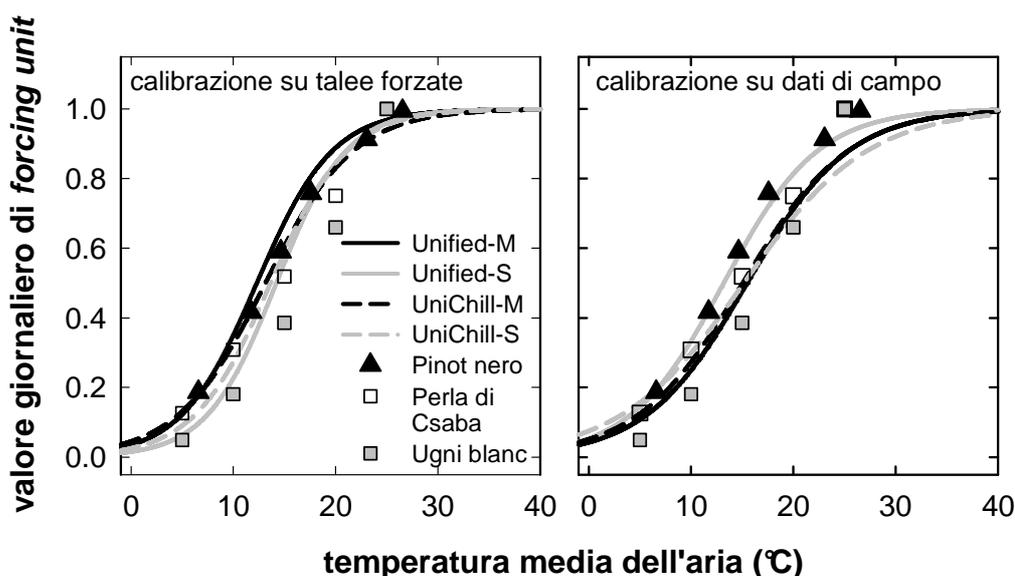


Figura 4. Funzioni per il calcolo delle *forcing units*, ottenute dopo calibrazione dei modelli Unified e UniChill su talee forzate e su dati di campo (M = Montepulciano, S = Sangiovese). I simboli puntiformi rappresentano dati di confronto tratti dalla letteratura.

A differenza delle curve precedenti, la natura asintotica delle curve non permette di distinguere valori critici che si prestano a essere presi come limiti di riferimento per l'intervallo di temperature attive sul *forcing*, e cioè una precisa soglia di temperatura minima, e un punto al di sopra del quale la curva assume valori ottimali. Per ovviare a tale problema sono state arbitrariamente definite la “minima temperatura attiva”, come la temperatura alla quale la *forcing unit* è pari a 0.05, e la “minima temperatura ottimale”, vale a dire la temperatura al di sopra della quale la *forcing unit* è maggiore o uguale a 0.95.

Usando questo criterio diventa più agevole confrontare le varie curve ottenute. Piccole differenze sono state riscontrate tra le curve ottenute con la calibrazione su talee forzate, dove la minima temperatura attiva è variata tra 0.5 e 4.2 °C, e la minima ottimale tra 23.3 e 25.9 °C.

Anche nei modelli basati sui dati di campo le funzioni di *forcing* non differiscono di molto tra i vari trattamenti, eccetto che per il modello Unified sul Sangiovese. In generale, rispetto alle curve derivate dalla calibrazione su talee, queste ultime risultano spostate verso le alte temperature di 1.2 °C in media, e presentano una minore pendenza. La minima temperatura attiva è variata tra -2.7 e 0.9 °C. La minima temperatura ottimale è invece compresa tra 26.8 e 33.0 °C.

Tutte le curve per entrambe le calibrazioni mostrano una buona aderenza ai punti ricavati dalla letteratura. Tuttavia le curve derivate dalle talee sono risultate più vicine ai dati di Moncur, sul lato sinistro del campo di variazione, mentre le altre risultano maggiormente aderenti ai dati di Pouget.

2.4. Discussione

2.4.1 *Gli esperimenti di forzatura in camera di crescita possono sostituire le osservazioni di pieno campo per calibrare/validare i modelli di germogliamento?*

In base ai risultati ottenuti, l'uso dei dati ricavati in camera di crescita per la calibrazione di due modelli di germogliamento ha consentito di ottenere stime di germogliamento con un buon grado di soddisfacimento dei criteri di valutazione adottati. Se usati per la validazione, hanno dimostrato una grande utilità nel fornire un ampio intervallo di condizioni su cui valutare i modelli, anche oltre l'intervallo di variazione considerato nella calibrazione, permettendo di quantificare i limiti per l'estrapolazione.

Assemblare dataset di germogliamento tramite la conduzione di esperimenti in camera di crescita con talee di vite è perciò un'alternativa percorribile per ovviare alla mancanza o scarsità di dati sperimentali di pieno campo.

2.4.2 *I modelli calibrati su talee forzate presentano una parametrizzazione coerente con le conoscenze sperimentali disponibili?*

Nonostante le grandi differenze nel tempo richiesto per completare le fasi di *chilling* e *forcing*, come pure nel modo in cui questi processi rispondono alla temperatura (Figure 2 e 3), i modelli calibrati sui due dataset in esame hanno mostrato accuratèzze comparabili in un ampio intervallo di esposizioni al freddo, purché al di sopra di un minimo critico (Figura 2). L'accuratèzza delle stime appare pertanto non condizionata dal modo con cui le dinamiche di *chilling* e *forcing* sono descritte, e viene pertanto da chiedersi se i parametri di questi modelli abbiano un reale significato fisiologico per la vite. È stato quindi effettuato un confronto dei nostri risultati con la letteratura disponibile sull'argomento per individuare quale delle due parametrizzazioni sia la più attendibile sotto questo profilo e per comprendere le cause delle discrepanze.

Parametri relativi al *chilling*

Gli esperimenti in camera di crescita hanno mostrato che le cultivar di vite allo studio hanno dei bassi fabbisogni in freddo, poiché il germogliamento si verifica già per i primi campionamenti prelevati in novembre.

Questi primi germogliamenti rappresentano un vincolo per il processo di ottimizzazione numerica, che tra le soluzioni iterativamente generate dall'algoritmo deve necessariamente selezionare quelle coerenti sia con i germogliamenti precoci che con quelli tardivi. Questo forza l'ottimizzazione a convergere verso bassi valori di C_{crit} , il cui effetto principale è di favorire un'uscita precoce dalla

dormienza. Un altro effetto della calibrazione su dataset con alta variabilità è quello di ottenere un intervallo stretto di temperature attive sul *chilling*, in questo caso comprese tra 0 e 10.5 °C. Questo rende i modelli più sensibili alla variabilità interannuale: il tempo necessario per accumulare il richiesto numero di *chilling units* si allunga negli autunni/inverni più miti, poiché una minor frazione di giorni risulteranno avere effetto sulla dormienza, e viceversa nelle annate più fredde. Questi risultati sono coerenti con precedenti ricerche, dove trattamenti di *chilling* di durata compresa tra 50 e 400 ore a temperature <7 °C sono stati sufficienti per indurre un normale germogliamento (Dokoozlian 1999; Botelho et al. 2007).

Per quanto invece riguarda i valori ottimali di temperatura per soddisfare il fabbisogno in freddo, quelli derivati dalla calibrazione su talee confermano quello che è già stato visto in precedenza. I limiti superiori sono stati molto vicini ai 10 °C, che è il valore da tempo accettato per la vite (Pouget 1972; Bernstein 1984) e per altre specie arboree (Perry 1971; Hänninen e Backman 1994; Sarvas 1974). Calò et al (1976) lavorando su 22 cultivar hanno osservato che un pre-trattamento freddo a 1 °C è più efficace di uno a -6° C per accelerare il germogliamento, coerentemente con i nostri risultati, in cui non viene soddisfatto il fabbisogno in freddo da temperature al di sotto di 0 °C. Dokoozlian (1999) non ha riscontrato differenze sul germogliamento variando le temperature di *chilling* tra 0 e 10°.

Il riscontro con i dati di letteratura ci autorizza a considerare i grandi fabbisogni in freddo ottenuti con la calibrazione sui dati di campo come irrealistici, e in tutta probabilità come artefatti generati dalla bassa variabilità del dataset di campo. Nelle regioni considerate infatti, la maggior parte della fase di *forcing* si svolge dopo i mesi di gennaio-febbraio, molto tempo dopo l'effettiva uscita dalla dormienza. In queste condizioni, l'esatta determinazione della data di uscita dalla dormienza non è critica, e la mancanza di vincoli fa sì che C_{crit} e la curva di risposta della *chilling unit* verso la temperatura assumano valori privi di senso.

Questo si applica specialmente ai parametri ottenuti per il Sangiovese. Nessun dato già pubblicato e neppure l'esperienza pratica comune sono in grado di confermare effetti sul *chilling* di temperature vicine ai 40°C (Figura 3). Con un intervallo ottimale di tale ampiezza, praticamente ogni giorno in autunno/inverno può soddisfare il fabbisogno in freddo e contribuire al superamento della dormienza. In altre parole, la variabilità invernale non è tenuta in considerazione da questa parametrizzazione, che pertanto può essere assimilata ad un modello di tipo *Thermal Time* che considera appunto solo la sommatoria di unità di caldo.

Sebbene il C_{crit} restituito dalla calibrazione di campo nel Sangiovese sia molto alto, l'ampio intervallo di temperature attive sul *chilling* consente di soddisfarlo pienamente verso l'inizio di gennaio, in un periodo dove normalmente l'accumulo di *forcing units* deve ancora iniziare. Perciò,

diversamente da quanto osservato sul Montepulciano, F_{crit} non è risultato diverso da quello restituito dalla calibrazione su talee, nonostante la grande differenza nel valore di C_{crit} (Tabella 7).

Questa interpretazione potrebbe essere applicata anche a risultati simili recentemente pubblicati da Caffarra e Eccel (2010), i quali hanno parametrizzato una versione modificata del modello Unified su dati di germogliamento della cultivar Chardonnay in un vigneto di Conegliano Veneto (TV), che dista solo 6 km da Susegana, da dove vengono parte dei nostri dati di campo. Anche questi autori hanno ottenuto un intervallo molto ampio di temperature di *chilling* ottimali, e un C_{crit} di 79 giorni, e hanno riconosciuto una connessione tra questi due risultati. Pur constatando però che questi risultati erano in contraddizione con precedenti studi, hanno comunque cercato di assegnare loro un senso fisiologico, ammettendo un effetto anche per temperature fino ai 20 °C, e un loro ruolo nel soddisfacimento del fabbisogno in freddo.

I nostri risultati, confermando da una parte la possibilità che la calibrazione basata sui dati di campo restituisca parametri in contrasto con l'evidenza sperimentale, dall'altra hanno dimostrato che questo non impedisce ai modelli di fornire stime accurate, almeno sotto le attuali condizioni climatiche.

Ulteriori evidenze sono state riportate da Parker et al (2011), che hanno mostrato che il modello Unichill e i modelli *Thermal time*, testati su un amplissimo dataset con molte località, hanno dato risultati comparabili.

Parametri relativi al *forcing*

Sia le curve ottenute dalla calibrazione su talee che quelle derivate dai dati di campo hanno corroborato i dati di letteratura riportati in Figura 4. Tuttavia, un confronto con questi dati richiede una certa cautela, in particolare quelli tratti dal lavoro di Pouget (1967), essendo stati ottenuti pre-trattando le talee con un bagno di acqua molto calda per interrompere artificialmente la dormienza. Questo trattamento è già stato riconosciuto avere un effetto di accelerazione del germogliamento (Orffer e Goussard 1980; Halaly et al. 2008) e non si può escludere che abbia alterato la relazione tra temperature e velocità della fase di *forcing*. Ciononostante gli autori citati hanno osservato che le minime temperature ottimali, nel senso da noi definito, sono tra i 20 e 25° C, similmente a quanto osservato per le curve derivate dalla calibrazione su talee, mentre quelle derivate dalla calibrazione su dati di campo (con l'eccezione del modello Unified sul Sangiovese) sono sopra i 30°C.

Un risultato collaterale degno di nota è la piccola deviazione standard calcolata per l' F_{crit} predetto dal modello Unified, poiché maggiori variazioni erano attese sulla scorta di precedenti esperienze riportate in letteratura, dove il tempo impiegato per arrivare al germogliamento appare notevolmente influenzato dal *chilling* complessivamente percepito (Dokoozlian 1999). In realtà, nei

nostri risultati l'ottimizzazione del modello Unified tende ad assumere valori fissi di F_{crit} , cancellando quindi la differenza principale che lo contraddistingue dal modello UniChill, che a questo punto diventa il modello preferibile, visto che fornisce le stesse prestazioni con una struttura più semplice. L'apparente contraddizione con i dati sperimentali può essere spiegata con l'impossibilità di separare l'effetto dell'accumulo precoce di *forcing units* da quello di un'eventuale riduzione di F_{crit} dovuta alla prolungata esposizione al *chilling*. È stato già appurato che l'accumulo di *forcing units* può avvenire anche a temperature $<10^{\circ}$ C, quindi nello stesso intervallo di temperature a cui avviene l'accumulo di *chilling units* (de Cortázar et al. 2009; Nendel 2010), e i nostri stessi dati lo confermano. Parte del soddisfacimento del fabbisogno in caldo può quindi avvenire dopo l'uscita dalla dormienza quando le temperature sono ancora basse. Il *forcing* accumulato durante questo periodo contribuisce ad accorciare il tempo di germogliamento, effetto che potrebbe essere confuso con una riduzione di F_{crit} . Una interpretazione simile è già stata proposta da Chuine e Cour (1999), che hanno di conseguenza messo in dubbio l'esistenza di una reattività di F_{crit} al *chilling*, e hanno piuttosto considerato la possibilità di un artefatto della modellazione.

I bassi valori di fabbisogno in freddo mostrati dai modelli calibrati su talee forzate sono complementari a più lunghi periodi di *forcing*, tra 20 e 40 giorni, che non risultano incompatibili con le conoscenze sperimentali disponibili. Calò et al. (1976) hanno osservato durate tra 13.5 a 35.5 giorni a 23° C su 22 cultivar. Hellman et al. (2006) hanno registrato durate di 28 giorni a 21° C per 'Sangiovese'. Dokoozlian (1999) riferisce che per la cultivar 'Perlette' a 22° C ci vogliono da circa 18 a più di 40 giorni, a seconda però dalla durata dei trattamenti di *chilling*. Weaver et al. (1975) hanno mostrato che talee di 'Carignane' prelevate da ottobre a febbraio germogliano da 20 a 40 giorni dopo l'espanto a 25° C.

2.5. Conclusioni

Una serie di esperimenti in condizioni semi-controllate è stata condotta per osservare il germogliamento in talee di vite esposte a diverse durate di esposizione al freddo. Le osservazioni sono state compilate in un dataset che è stato usato per calibrare e validare un paio di modelli di germogliamento. Dai risultati ottenuti sono state ricavate le seguenti conclusioni:

- Dataset costituiti da osservazioni effettuate in esperimenti in camera di crescita possono sostituire efficacemente osservazioni di campo multi-decadali per calibrare e/o validare modelli di germogliamento per la vite. Se usati per la calibrazione, consentono di ottenere parametrizzazioni più realistiche e informative.
- Sebbene le calibrazioni condotte su talee forzate e su osservazioni di campo forniscano

parametrizzazioni molto diverse e contrastanti, entrambe possono tuttavia fornire accurate stime, almeno nelle attuali condizioni climatiche.

- Usando i dati di campo per la calibrazione, la dimensione del dataset non è sufficiente a garantire una parametrizzazione consistente se la sua variabilità è scarsa. È quindi raccomandabile una certa cautela nell'usare queste calibrazioni in applicazioni che richiedano alti gradi di estrapolazione.

Capitolo 3 - Verso un modello generale di fenologia della vite

3.1. Introduzione

Nel precedente capitolo è stata analizzata la capacità di due modelli di *chilling/forcing* di stimare il germogliamento della vite, e sono stati evidenziati alcuni limiti delle procedure di ottimizzazione numerica, che possono originare parametrizzazioni prive di senso dal punto di vista fisiologico se non sono basate su dataset adeguati per estensione e variabilità.

In questa parte del lavoro è stata rivolta l'attenzione alle fasi successive del ciclo di sviluppo fino all'invasatura. La conoscenza quantitativa delle dinamiche di sviluppo vegetativo e riproduttivo in funzione delle variabili ambientali è un elemento cruciale per poter implementare applicazioni di monitoraggio e di supporto decisionale al management con l'ausilio dell'*information technology*, ed è particolarmente desiderabile nella vite. Se una cultivar con un dato comportamento fenologico è stata correttamente scelta in rapporto alle condizioni climatiche locali, la maturazione si collocherà verso la fine dell'estate-inizio autunno, quando più moderate sono le temperature diurne e maggiore è l'escursione termica giorno/notte. Sono queste le migliori condizioni per raggiungere la combinazione ottimale di zuccheri, acidi e delle componenti aromatiche e fenoliche (Jones e Davis 2000; Jones et al. 2005; Van Leeuwen et al. 2008). Al contrario se il ciclo si completa troppo precocemente rispetto all'andamento stagionale, a causa per esempio di una non corretta scelta della varietà in funzione dell'andamento climatico medio di un certo sito, le uve maturano in un periodo troppo caldo, a detrimento delle caratteristiche qualitative (Van Leeuwen e Seguin 2006).

Nelle zone dove una lunga esperienza di coltivazione ha consentito di individuare le varietà capaci di sfruttare al meglio la lunghezza della stagione utile, anche piccole variazioni possono alterare questo delicato equilibrio, con inevitabili conseguenze sulla qualità del vino. E' perciò pienamente giustificata la preoccupazione dei viticoltori nei confronti dei cambiamenti climatici in atto, i cui effetti sulle viticole locali potranno cominciare a farsi sentire anche a breve termine, se aumenterà la frequenza delle annate in cui la maturazione avviene al di fuori del periodo con le condizioni climatiche ideali.

Nonostante l'interesse dell'argomento e dei suoi risvolti pratici e scientifici, solo in tempi molto recenti sono stati compiuti i primi passi verso lo sviluppo di un modello generale della fenologia della vite.

Il primo tentativo di cui siamo a conoscenza è quello di Caffarra e Eccel (2010), che si sono basati sul modello 'UniChill' di Chuine (2010), per la stima delle date di germogliamento, fioritura e invasatura nella varietà Chardonnay. Il ciclo di sviluppo descritto dal modello inizia con la fase di

dormienza, che viene superata dopo che è stato accumulato un certo numero di *chilling units* calcolate con una versione semplificata della funzione proposta originalmente da Chuine, a cui segue una fase di accumulo di *forcing units*, anche queste basate sulla funzione analoga del lavoro citato, che termina con il germogliamento. Per la stima delle fasi successive di fioritura e invaiatura, il modello si basa ancora sull'accumulo di *forcing units* usando la stessa funzione di *forcing*, i cui parametri non sono stati stimati dagli autori, ma sono stati ricavati da risultati ottenuti da Pouget (1968) su Merlot.

Il modello, che è stato ottimizzato e validato su un ampio insieme di osservazioni fenologiche raccolte da varie località nell'Italia settentrionale, ha dimostrato una buona capacità di aderenza ai dati sperimentali in fase di calibrazione e una buona *performance* in quella di validazione.

Un altro recente studio dedicato alla messa a punto di un modello generale di fenologia della vite è quello presentato da Parker et al. (2011), che hanno messo a confronto il modello UniChill con i più convenzionali modelli di tipo *Thermal Time* (qui chiamati *Spring Warming models*) basati sull'accumulo di somme termiche per stimare le date di fioritura e invaiatura. Tutti i modelli in esame non si sono differenziati tra di loro, non avendo il modello UniChill mostrato un'accuratezza superiore nonostante il suo più alto livello meccanicistico. La conclusione di questi autori è che a parità di prestazione i modelli *Thermal Time* sono quindi preferibili per la loro minore complessità. Lo sviluppo di un modello generale di fenologia è stato l'obiettivo di questa parte di attività, che si è basata sui risultati ottenuti dalla modellazione del germogliamento presentata nel precedente capitolo, con particolare riferimento agli effetti che la struttura del dataset di calibrazione ha sulla parametrizzazione del modello, fino a condizionarne il senso fisiologico. Nel cercare di estendere la modellazione alle fasi di fioritura e invaiatura si è pertanto riservata una certa attenzione alla costituzione del dataset di calibrazione per valutarne gli effetti su una descrizione più generale dello sviluppo della vite.

Tra gli eventi fenologici considerati non è stata inclusa la maturazione, per la cui individuazione non si dispone ancora di criteri universalmente accettati e standardizzati. Il momento ottimale di maturazione dipende infatti da un gran numero di fattori legati alla qualità dell'uva, per esempio il grado zuccherino, l'acidità totale, il pH, la struttura della componente aromatica, la cui importanza relativa dipende anche dall'evoluzione delle conoscenze tecniche e dagli obiettivi enologici. A parte questo, anche sul piano puramente operativo il momento di raccolta, che in molti dataset coincide con la maturazione, è scelto in base a valutazioni eminentemente pratiche, come per esempio le condizioni climatiche (pioggia) prevedibili nella fase di raccolta.

L'obiettivo è stato perseguito attraverso il confronto di un modello di *chilling/forcing* con tradizionali modelli di tipo *Thermal Time*, tutti opportunamente modificati per includere più fasi

fenologiche.

3.2 Materiali e metodi

3.2.1 Osservazioni fenologiche di pieno campo

Lo studio ha riguardato le seguenti quattro cultivar: Chardonnay, Merlot, Glera, e Cabernet Sauvignon, per le quali sono stati acquisiti due ampi archivi di osservazioni fenologiche storiche, riguardanti le date di germogliamento, fioritura e invaiatura, provenienti da due località del Veneto, entrambe in provincia di Treviso:

1) Istrana (45.69N, 12.09E). I dati sono stati messi a disposizione dal CECAT - Centro per l'Educazione, la Cooperazione e l'Assistenza Tecnica, di Castelfranco Veneto. Coprono il periodo 1986-2010, eccetto che per la Glera, per la quale le osservazioni sono disponibili dal 1991.

2) Susegana (45.85N, 12.26E). Il dataset è stato rilevato sulla collezione ampelografica del Centro per la Ricerca per la Viticoltura (CRA-CIN), del Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura (CRA) di Conegliano (TV). Le osservazioni si estendono dal 1964 al 2010, salvo che per il Chardonnay, disponibile dal 1969.

Entrambi i vigneti dove sono state raccolte le osservazioni sono dotati di stazioni meteorologiche automatiche, per la registrazione delle precipitazioni e della temperatura dell'aria.

3.2.2 Esperimenti di forzatura di talee

Seguendo la metodologia già esposta nel precedente capitolo, sono state compiute nuove osservazioni di germogliamento su talee unigemme di ciascuna cultivar espuntate periodicamente dal vigneto durante l'autunno/inverno, in modo da avere campioni esposti al freddo per tempi diversi. Gli espunti di talee sono stati effettuati ad intervalli di 10-15 gg dalla collezioni ampelografica di Susegana, nel corso dell'autunno-inverno 2010-2011. Il primo prelievo è stato effettuato il 28 ottobre 2010, e l'ultimo il 12 aprile 2011, per un totale di 11 campioni (n = 30 gemme).

Dopo il prelievo in campo, le gemme sono state poste in cella climatica a 25 °C con fotoperiodo di 16 ore e un'intensità luminosa di 3000 lux. Il germogliamento è stato registrato quando il 50% delle gemme raggiungeva lo stadio 09 della scala BBCH (Lorenz et al. 1994).

3.2.3 Modelli fenologici

I modelli messi a confronto sono stati gli stessi testati da Parker et al. (2011).

UniChill – Modello di *chilling/forcing* sviluppato da Chuine (2000) per la stima della data di germogliamento, che qui viene esteso per calcolare anche le date di fioritura e invaiatura. Questi

due eventi aggiuntivi sono stimati accumulando *forcing units*, calcolate con la stessa funzione usata anche per la stima del germogliamento, fino al raggiungimento di sommatorie specifiche. Le sommatorie critiche di *forcing units* per il germogliamento, fioritura e invaiatura (F_g , F_f , F_i) sono tutte calcolate a partire dalla data stimata di fine dormienza.

UniForc – Si tratta di un altro modello proposto sempre da Chuine (2000), che stima il germogliamento solamente attraverso l'accumulo di *forcing units*, calcolate con l'omologa funzione del modello UniChill:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f.u._i = \frac{1}{1 + e^{b \cdot (Tm_i - c)}} & \text{se } Tm_i > 0 \\ f.u._i = 0 & \text{se } Tm_i \leq 0 \end{array} \right. \quad (Tm_i = \text{temperatura media giornaliera all'i-esimo giorno})$$

Anche questo modello è stato esteso per la stima di fioritura e invaiatura attraverso l'introduzione di due sommatorie specifiche di *forcing units*. Il modello è stato valutato in due versioni, che differiscono per la data da cui si inizia a calcolare l'accumulo di *forcing units* (T_0):

- 1) UniForc – Il T_0 corrisponde all'1 gennaio di ogni anno;
- 2) UniForc_calibrato - Il T_0 viene ottimizzato in fase di calibrazione del modello, considerandolo come un parametro aggiuntivo che può variare tra -60 (= 1 ottobre) e + 90 (30 aprile).

GDD (*Growing Degree Day*) – E' il più classico modello di tipo *Thermal Time*, basato sull'accumulo di gradi giorno, vale a dire la differenza tra la temperatura media giornaliera (Tm) e una temperatura base, al di sotto della quale lo sviluppo si arresta (Tb):

$$\left\{ \begin{array}{ll} GDD_i = (Tm_i - Tb) & \text{se } Tm_i > Tb \\ GDD_i = 0 & \text{se } Tm_i \leq Tb \end{array} \right.$$

dove: GDD_i = gradi giorno relativi al giorno i-esimo; Tm_i = temperatura media giornaliera del giorno i-esimo.

Anche il modello GDD è stato testato in due versioni diverse in maniera analoga al modello UniForc:

- 1) GDD – Il T_0 corrisponde all'1 gennaio di ogni anno;

2) GDD_calibrato - Il T_0 viene ottimizzato entro l'intervallo tra -60 e +90.

3.2.4 Calibrazione e validazione dei modelli

L'ottimizzazione dei modelli è stata effettuata attraverso una procedura di *Simulated Annealing*, già descritta nel Capitolo 2 (sezione 2.2.4).

3.2.5 Impostazione dell'analisi

I modelli allo studio sono stati calibrati sul dataset di Istrana e validati su quello di Susegana.

Per quanto riguarda il modello UniChill, in maniera simile alle esperienze descritte nel precedente capitolo, si è voluto verificare se l'impiego di un dataset caratterizzato da maggiore variabilità, almeno per la data di germogliamento, sia in grado di influire sulla parametrizzazione di un modello generale di fenologia, e sul significato fisiologico dei parametri. Il modello è stato quindi calibrato anche aggiungendo al dataset di Istrana le osservazioni di germogliamento compiute in camera di crescita. In tal modo, solo per il modello UniChill, sono state ottenute due serie di stime, che per comodità di esposizione verranno denominate:

calibrazione A = calibrazione sui dati di Istrana

calibrazione B = calibrazione sui dati di Istrana integrati dai dati di germogliamento ottenuti da talee sottoposte a forzatura in camera di crescita.

I modelli così calibrati sono stati validati sui dati di Susegana calcolando l'RMSE medio e quello relativo a ciascun evento fenologico.

3.3 Risultati

La Figura 5 riporta in forma di istogrammi le deviazioni delle date stimate di tutti gli eventi fenologici (germogliamento, fioritura e invaiatura) dai corrispondenti dati osservati in campo, ottenute dopo le procedure di calibrazione e validazione. Le deviazioni sono state espresse come RMSE per ciascuno dei modelli e cultivar allo studio. Per facilitare il confronto tra i modelli, sono state calcolate le medie tra le cultivar (Tabella 9).

L'ottimizzazione è stata soddisfacente per tutti i modelli, in quanto l'RMSE medio è stato compreso tra i 2.9 e i 3.9 giorni in media (Tabella 9). Il modello UniChill (calibrazione A) e UniForc calibrato, sono stati quelli che hanno mostrato la migliore capacità di adattamento ai dati sperimentali e la maggior accuratezza in validazione, con un RMSE medio di 5.2 e 5.1 giorni rispettivamente. L'aggiunta delle osservazioni compiute sulle talee forzate al dataset di calibrazione

ha alzato l'RMSE del modello UniChill, risposta attesa a causa dell'aumentato numero di vincoli per la procedura di ottimizzazione, ma ha anche peggiorato la risposta alla validazione, che è peggiorata di 0.8 giorni rispetto alla calibrazione A.

Il modello GDD è quello risultato più difficile da adattare ai dati disponibili, con un RMSE medio di 3.9 giorni, ed è pure quello che ha dimostrato la più bassa accuratezza in validazione. La versione con T_0 calibrato ha mostrato una risposta intermedia tra i due estremi.

Nel complesso, le differenze tra le cultivar hanno pesato più di quelle tra i modelli in validazione. Sul Chardonnay e sulla Glera sono state ottenute le stime migliori, al contrario del Merlot e soprattutto del Cabernet Sauvignon, che hanno fatto registrare alti valori di RMSE, di 1.5-2 giorni superiori rispetto alle altre cultivar.

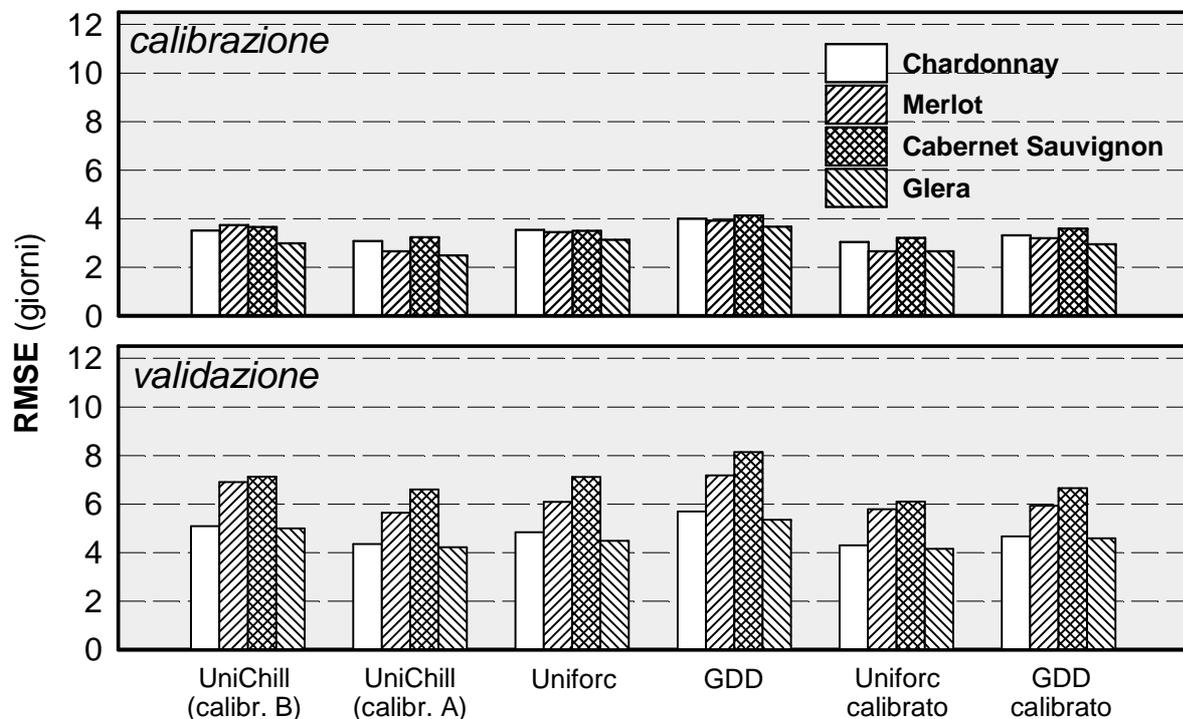


Figura 5. Deviazioni medie (espresse come RMSE - *Root Mean Square Error*) delle date stimate di tutti gli eventi fenologici in esame (germogliamento, fioritura e invaiatura) dalle rispettive misure per cinque modelli di fenologia della vite. La calibrazione è stata effettuata su un dataset rilevato a Istrana (calibrazione A). Per il modello Unichill è stata eseguita un'ulteriore calibrazione sullo stesso dataset integrato da osservazioni su talee in forzatura (calibrazione B). La validazione è stata eseguita su dati rilevati a Susegana.

Tabella 9. Dati della Figura 5 mediati tra le quattro cultivar.

	UniChill calibr. B	UniChill calibr. A	UniForc	GDD	UniForc calibrato	GDD calibrato
calibrazione	3.5	2.9	3.4	3.9	2.9	3.3
validazione	6.0	5.2	5.6	6.6	5.1	5.5

Le successive figure 6, 7 e 8 mostrano le deviazioni delle stime dalle osservazioni per i singoli eventi di germogliamento (Figura 6), fioritura (Figura 7) e invaiatura (Figura 8), mentre la Tabella 10 riporta gli stessi risultati mediati per cultivar.

La fioritura è l'evento fenologico più facile da adattare ai dati e di cui si ottengono le stime più accurate in validazione. In calibrazione l'RMSE (media delle cultivar) varia da 1.7 a 2.3 giorni, mentre in validazione si va dai 3.5 giorni del modello UniForc ai 4.8 del modello UniChill (calibrazione B.)

Le stime della data di germogliamento e invaiatura hanno mostrato deviazioni più elevate, che sono state però influenzate in larga parte dalla scadente risposta ottenuta sul Cabernet Sauvignon, dove lo scostamento minimo della data di germogliamento stimata da quella osservata è stato di 7.5 giorni (modello UniForc calibrato) arrivando a 11 giorni (modello GDD), e in minor misura sul Merlot. Anche sulle stime della data di invaiatura le deviazioni sono variate da 7.3 a 10 giorni.

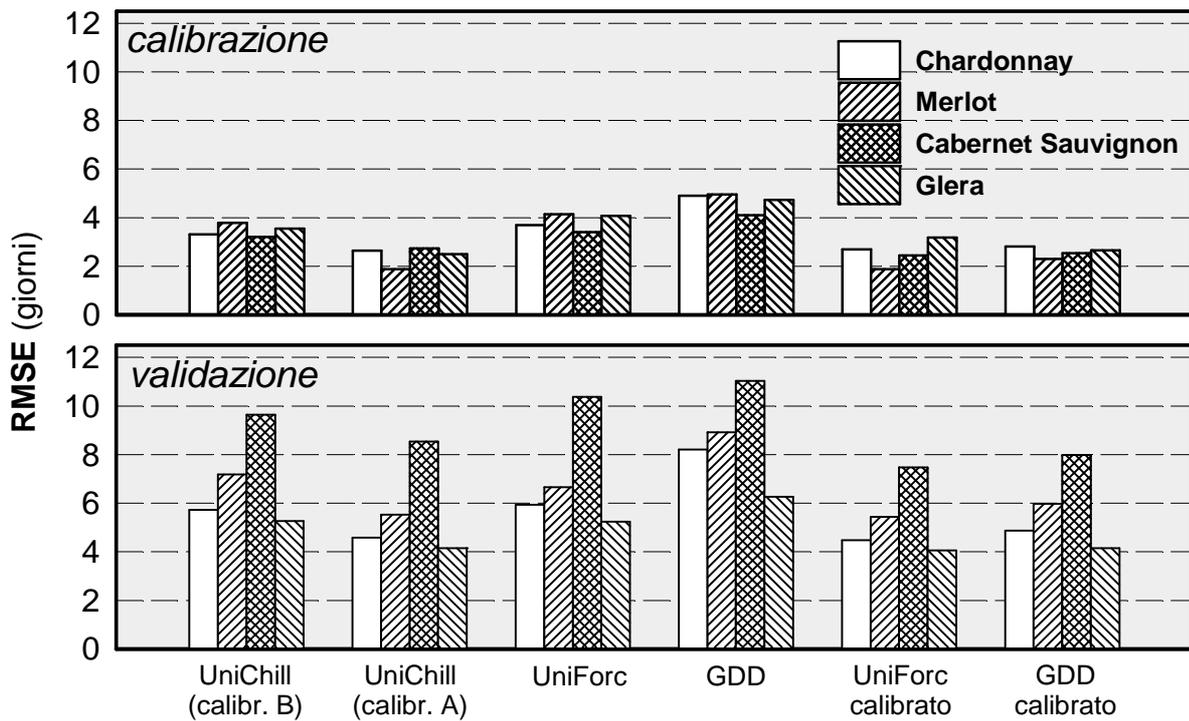


Figura 6. Deviazioni delle date di germogliamento stimate da quelle osservate in campo, dopo calibrazione e validazione di cinque modelli di fenologia della vite.

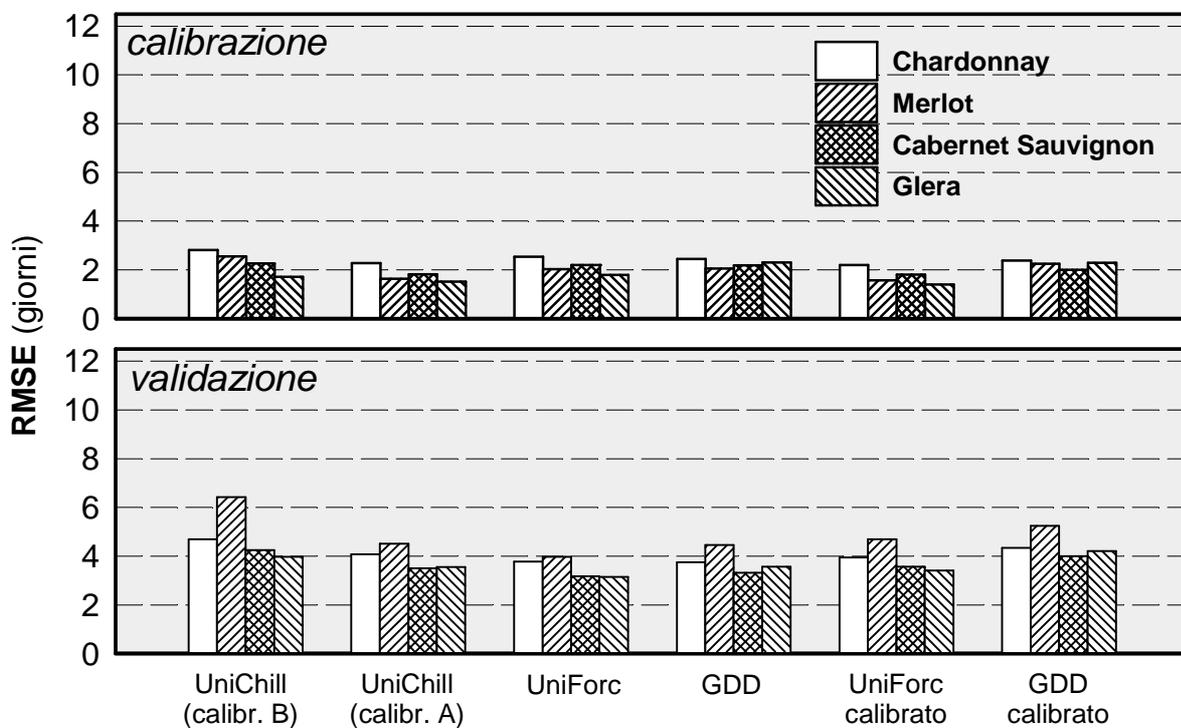


Figura 7. Deviazioni delle date di fioritura stimate da quelle osservate in campo dopo calibrazione e validazione di cinque modelli di fenologia della vite.

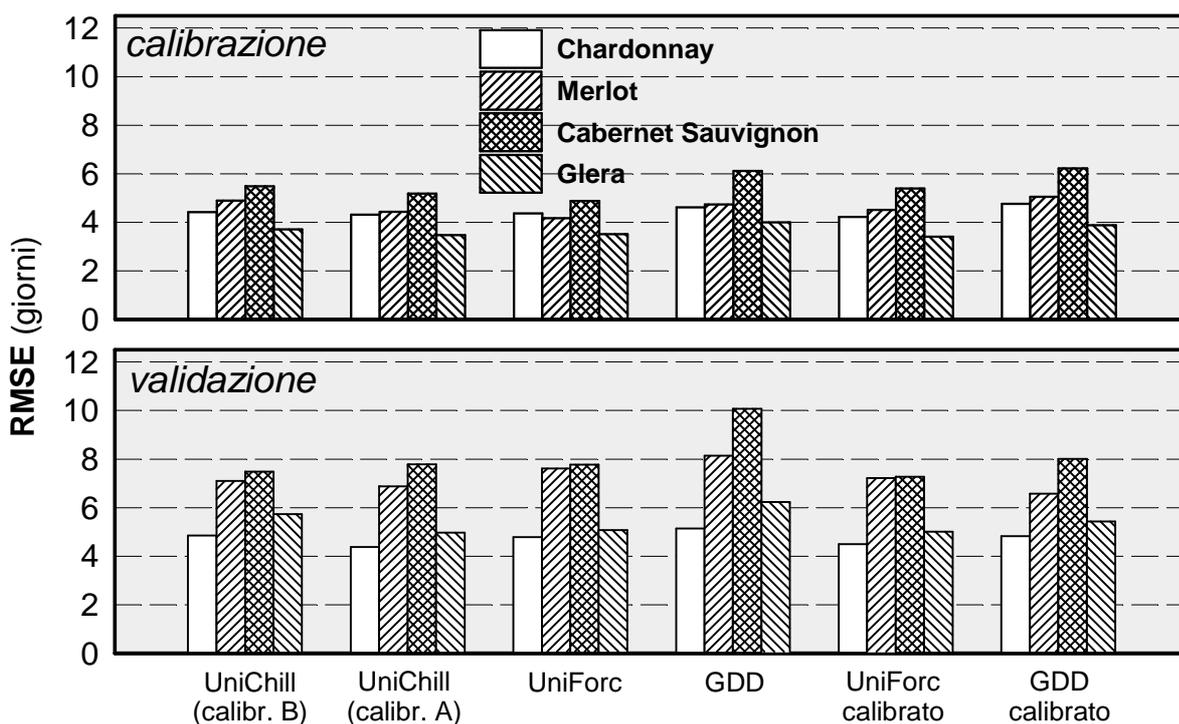


Figura 8. Deviazioni delle date di invaiatura stimate da quelle osservate in campo, dopo calibrazione e validazione di cinque modelli di fenologia della vite.

Tabella 10. Dati delle Figure 6, 7 e 8, mediati tra le quattro cultivar.

	UniChill calibr. B	UniChill calibr. A	UniForc	GDD	UniForc calibrato	GDD calibrato
<i>calibrazione</i>						
germogliamento	3.5	2.4	3.8	4.7	2.5	2.5
fioritura	2.3	1.8	2.1	2.2	1.7	2.2
invaiatura	4.6	4.3	4.2	4.9	4.4	5.6
<i>validazione</i>						
germogliamento	7.0	5.7	7.1	8.6	5.4	5.9
fioritura	4.8	3.9	3.5	3.8	3.9	4.5
invaiatura	6.3	6.0	6.3	7.4	6.0	6.1

Nelle tabelle seguenti (Tabelle 11-13) sono riportati i parametri derivati dall'ottimizzazione numerica per tutti i modelli allo studio. La Tabella 11 presenta i parametri del modello UniChill, così come risultano dalle calibrazioni A e B. Viene messo in evidenza il valore del fabbisogno in freddo, rappresentato dal parametro C_{crit} , che quantifica il numero di giorni di esposizione alle temperature ottimali per il *chilling* di cui la cultivar ha bisogno per superare la fase di dormienza. Il risultato più saliente è che nella calibrazione A tale valore è molto alto, anche più di 10 volte come ordine di grandezza rispetto ai valori ottenuti con la calibrazione B, confermando quanto già

ottenuto con le prove sul Montepulciano e sul Sangiovese (Capitolo 2). Ad un maggior valore di C_{crit} corrisponde un minor valore medio del fabbisogno in caldo per il germogliamento, anche se la differenza tra le due calibrazioni è notevolmente minore, dell'ordine di 5-7 giorni. Minori differenze si riscontrano per il fabbisogno in caldo per la fioritura e invaiatura.

Tabella 11. Parametri del modello UniChill esteso dopo calibrazione sul dataset di Istrana (calibrazione A) e sullo stesso dataset integrato da osservazioni di germogliamento ottenute da talee in forzatura dopo periodi variabili di esposizione a temperature di chilling.

parametri	a_c	b_c	c_c	b_f	c_f	C_{crit}	F_g	F_f	F_i
calibrazione A									
Chardonnay	0.581	-25.036	-13.470	-0.221	16.846	164.348	9.121	30.192	78.489
Merlot	0.525	-23.564	-20.248	-0.212	19.226	163.599	7.199	24.795	69.707
Cabernet S.	0.189	-20.171	-19.576	-0.266	16.854	182.486	9.794	31.301	86.453
Glera	1.679	-26.794	-1.283	-0.279	15.420	122.898	7.917	36.162	94.339
calibrazione B									
Chardonnay	1.525	-5.317	3.531	-0.200	16.090	13.752	16.603	39.261	88.512
Merlot	0.927	7.400	7.464	-0.189	19.155	12.224	12.853	30.605	75.517
Cabernet S.	6.790	17.241	6.962	-0.194	17.187	6.853	19.734	40.341	89.928
Glera	1.441	-14.719	-2.369	-0.191	18.216	20.776	12.122	33.209	80.744

I parametri del modello UniForc, nella versione normale e con T_0 calibrato sono riportati nella successiva Tabella 12, mentre la Tabella 13 riporta i parametri del modello GDD, anche questi nelle due versioni.

In entrambi i modelli, la versione con T_0 calibrato ha migliorato leggermente le stime rispetto alla versione normale (Tabella 9). Stando al T_0 ottimizzato, il momento migliore per cominciare ad accumulare le *forcing units* si situa verso la fine dell'inverno, all'incirca tra la metà e la fine di febbraio. Rispetto alla versione con T_0 al primo gennaio, il diverso momento di inizio determina qualche differenza negli altri parametri dei modelli, in maniera più accentuata per il modello GDD. Per quest'ultimo, la versione con T_0 calibrata mostra anche temperature basali più basse rispetto all'altra versione.

Tabella 12. Parametri del modello UniForc e UniForc calibrato dopo calibrazione sul dataset di Istrana.

	b_f	c_f	F_g	F_f	F_i	T_o
UniForc						
Chardonnay	-0.209	18.520	9.613	27.153	70.416	
Merlot	-0.250	18.196	8.378	27.494	77.601	
Cabernet S.	-0.303	16.901	10.441	32.097	87.886	
Glera	-0.275	16.451	8.181	33.799	89.356	
UniForc calibrato						
Chardonnay	-0.208	18.278	7.773	26.057	69.820	40.0
Merlot	-0.212	18.604	7.706	26.628	74.111	46.1
Cabernet S.	-0.237	17.038	10.215	31.726	83.521	61.1
Glera	-0.240	16.288	8.315	33.891	88.134	45.9

Tabella 13. Parametri del modello GDD e GDD calibrato dopo calibrazione sul dataset di Istrana.

	T_b	GDD_g	GDD_f	GDD_i	T_o
GDD					
Chardonnay	7.6	122.4	498.5	1434.5	
Merlot	8.6	110.2	460.2	1430.1	
Cabernet S.	9.3	110.1	439.3	1360.8	
Glera	6.5	143.2	644.7	1762.1	
GDD calibrato					
Chardonnay	6.1	156.8	601.4	1653.2	56.1
Merlot	5.1	230.4	763.4	1969.1	53.7
Cabernet S.	6.0	245.3	703.7	1861.3	60.3
Glera	4.7	201.2	789.5	2029.3	49.3

Come già rilevato nelle prove con Montepulciano e Sangiovese, anche qui un elevato C_{crit} ha avuto l'effetto di posticipare notevolmente la stima della data di fine dormienza nel modello UniChill. E' interessante notare che questa data coincide quasi esattamente con il T_o ottimizzato ottenuto dai modelli GDD e UniForc calibrati (Tabella 12). In pratica, se ottimizzato su dataset che non contengono inverni brevi, il modello UniChill tende a coincidere con il modello UniForc con T_o ottimizzato.

Tabella 14. Confronto fra le date di fine dormienza stimate dal modello UniChill e la data ottimizzata di inizio della fase di *forcing* ottenute dai modelli GDD e UniForc.

	Chardonnay	Merlot	Cabernet S.	Glera
data di fine dormienza				
UniChill (cal B)	344.2	329.4	332.4	338.3
UniChill (cal A)	43.0	42.0	61.0	46.0
data di inizio accumulo forcing units				
GDD cal	56.1	53.7	60.3	56.5
UniForc cal	40	46.1	61.1	45.9

La ragione di questo comportamento diventa chiara analizzando in forma grafica come variano le *chilling units* giornaliere in funzione della temperatura. Le funzioni di *chilling* del modello UniChill derivate dalla calibrazione A si differenziano notevolmente tra le cultivar in esame (Figura 9A). Il Glera, il Merlot e il Chardonnay mostrano intervalli di ampiezza crescente per le temperature ottimali; si va da [-1; +14.5°C] per la Glera fino a [-13; +29.5°C] per lo Chardonnay. Il Cabernet non mostra limiti all'interno dell'intervallo esplorato [-20; +40 °C]. Per questa cultivar quindi qualsiasi temperatura contribuisce a soddisfare il *chilling*, il che equivale a dire che la data di fine dormienza è un numero fisso, indipendentemente dall'andamento delle temperature invernali, che dipende solo dal valore di C_{crit} . A parte questo caso estremo, anche per le altre cultivar l'elevata ampiezza dell'intervallo ottimale è la condizione necessaria per soddisfare gli elevati C_{crit} derivanti da questa calibrazione.

Nella calibrazione B, l'intervallo di variazione è decisamente più ristretto per tutte le cultivar. E' compreso tra -4 e 8°C per il Glera e Merlot, e ancora più ristretto per Chardonnay e Cabernet Sauvignon, tra 3 e 7 °C.

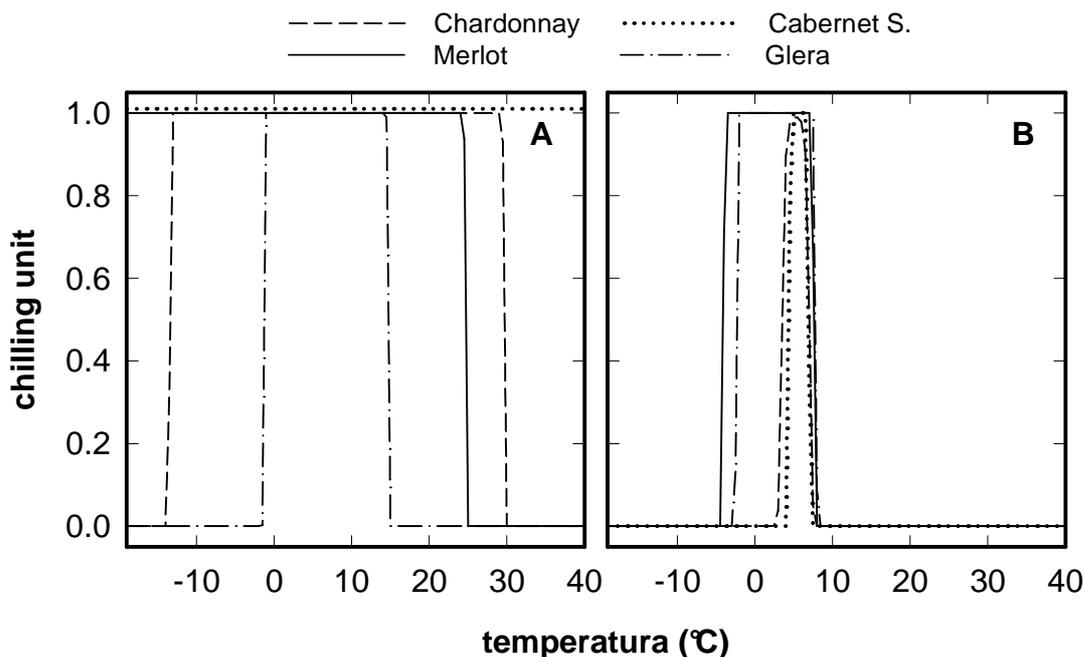


Figura 9. Funzioni di chilling ottenute per quattro cultivar di vite calibrando il modello UniChill sul dataset di Istrana (A) e sullo stesso dataset integrato da osservazioni di germogliamento su talee in forzatura (B).

Le funzioni di *forcing* del modello UniChill riflettono l'eterogeneità delle corrispondenti funzioni di *chilling* nella calibrazione A (Figura 10A), mentre più omogenee appaiono quelle derivate dalla calibrazione B (Figura 10B). In media, le curve delle due calibrazioni hanno la stessa collocazione rispetto all'asse delle temperature: il parametro c_f , che individua la temperatura alla quale la *forcing*

unit giornaliera vale 0.5 è 17.1 °C nella calibrazione A e di 17.7 °C nella calibrazione B. Mediamente quindi le due calibrazioni rispondono allo stesso modo alla temperatura. Maggiore è invece la differenza nel parametro b_f , che influenza la pendenza della parte lineare della curva: i valori medi sono -0.24 e -0.19 rispettivamente per la calibrazione A e B. Una minor pendenza della curva, come quella ottenuta dalla calibrazione B, rende il modello meno sensibile alle temperature alle estremità dell'intervallo di variazione.

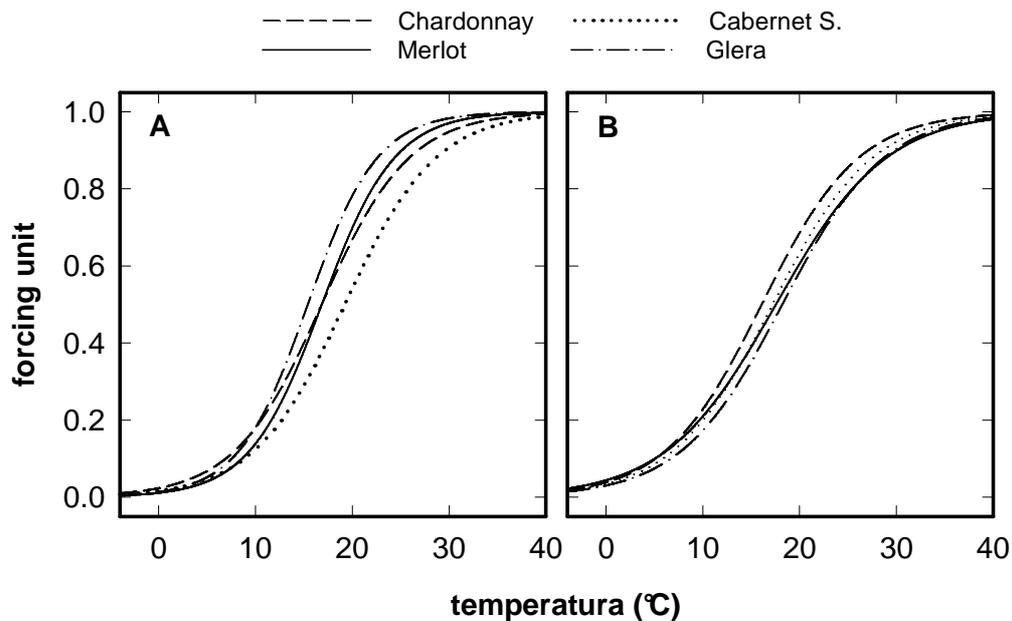


Figura 10. Funzioni di forcing ottenute per quattro cultivar di vite calibrando il modello UniChill sul dataset di Istrana (A) e sullo stesso dataset integrato da osservazioni di germogliamento su talee in forzatura (B).

Per

confronto si riportano in Figura 11 le curve di *forcing* derivate dall'ottimizzazione del modello UniForc, che hanno la stessa forma matematica delle omologhe funzioni del modello UniChill. Rispetto a questo, le curve appaiono più simili a quelle derivate dalla calibrazione A: il parametro c_f è (media tra le cultivar) di 17.5 °C per entrambe le versioni del modello, mentre il parametro b_f è -0.24 e -0.22.

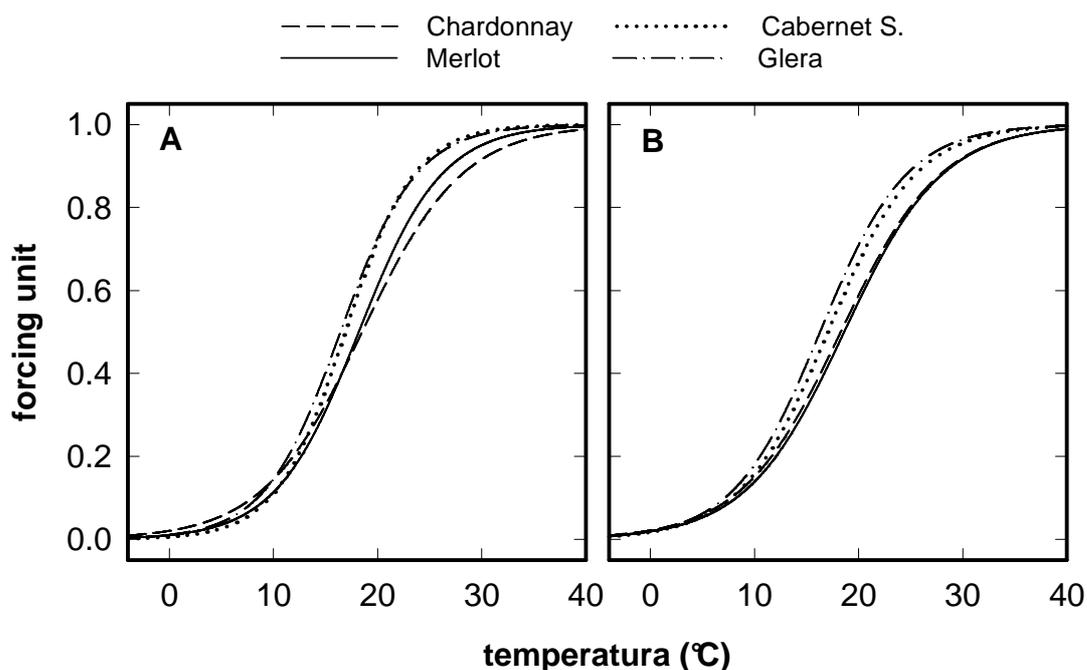


Figura 11. Funzioni di *forcing* ottenute per quattro cultivar di vite per i modelli UniForc (A) e UniForc calibrato (B).

3.4 Discussione

Come già evidenziato a proposito della modellazione del germogliamento nelle cultivar Montepulciano e Sangiovese (Capitolo 2), anche i nuovi risultati confermano che l'aggiunta al dataset di calibrazione di osservazioni compiute dopo brevi periodi di esposizione al freddo è in grado di modificare notevolmente la parametrizzazione dei modelli di *chilling* e *forcing*.

Le differenze più evidenti hanno riguardato il fabbisogno in freddo e l'intervallo di temperature attive sul suo soddisfacimento. Sotto questo punto di vista, la calibrazione del modello UniChill su un dataset più variabile ha consentito di ottenere parametrizzazioni più coerenti con le conoscenze fisiologiche disponibili. In tutte le cultivar le temperature che sono risultate attive ai fini del soddisfacimento del fabbisogno in freddo sono contenute tra i -4 e gli 8 °C, valori piuttosto vicini a quelli ottenuti dalle prove sperimentali riportate in letteratura (cfr. Capitolo 2).

L'ottimizzazione del modello UniChill sul dataset di campo, caratterizzato unicamente da inverni lunghi e freddi, ha invece prodotto parametri assolutamente privi di senso dal punto di vista fisiologico. Come già rilevato nel precedente capitolo, non è pensabile che il superamento della dormienza possa avvenire anche grazie all'esposizione a temperature intorno ai 40 °C, come risulterebbe dalle funzioni di calcolo delle *chilling units* (Figura 9A), e neppure che possa impiegare un tempo pari a più di quattro mesi, come risulta dai valori di C_{crit} ottenuti con la calibrazione A.

In realtà queste soluzioni generate dal processo di ottimizzazione hanno di fatto trasformato il

modello di *chilling/forcing* in un modello di tipo *Thermal Time*, equivalente al modello UniForc. La comparazione con il modello UniForc, che è in pratica il modello UniChill senza la parte di *chilling*, rende questo del tutto evidente. La data di fine dormienza stimata dal modello UniChill con la calibrazione A è coincidente con il T_0 ottimizzato del modello UniForc calibrato.

La tendenza dei modelli a convergere verso un unico tipo di modello spiega quindi perché tutti forniscono prestazioni praticamente equivalenti.

Rimane da spiegare perché il modello UniChill non sia in grado di fornire stime più accurate quando viene dotato di una parametrizzazione in linea teorica più robusta, in quando ottenuta su un dataset più vario.

Va rilevato che questa incapacità è stata valutata solo in condizioni di inverno lungo e freddo, non avendo altri dati indipendenti con inverni brevi su cui eseguire la validazione. Le condizioni esaminate costituiscono per la calibrazione B solo un sottoinsieme di quelle che dovrebbe essere in grado di analizzare. Un confronto più appropriato andrebbe pertanto svolto su un più ampio intervallo di condizioni. La spiegazione più probabile è comunque data dal fatto che poiché nel modello UniChill-calibrazione B l'uscita dalla dormienza avviene nei mesi di novembre e dicembre, la fase di accumulo di *forcing units* si estende per un periodo molto lungo, per 4-5 mesi circa. Benché in linea teorica il modello dovrebbe essere in grado di tener conto delle variazioni interannuali, è anche vero che in un periodo così lungo è più facile accumulare errori, dovuti per esempio a imprecisioni nei dati climatici. La curva di *forcing* in effetti, dato il suo andamento asintotico agli estremi dell'intervallo di variazione è sensibile a temperature molto basse, e quindi è quindi in condizione di accumulare errori anche minimi. Per questa ragione l'ottimizzazione in assenza di costrizioni tende a confinare la fase di *forcing* al periodo primaverile, annullando l'effetto del calcolo della fine dormienza, che di fatto coincide con il calcolo di un T_0 equivalente a quello del modello UniForc.

3.5 Conclusioni

Lo sviluppo di un modello generale di fenologia della vite è stato reso possibile dalla disponibilità di un adeguato dataset di osservazioni fenologiche per quattro importanti cultivar della viticoltura veneta. Per rendere più robusta la parametrizzazione ci si è avvalsi di dati di germogliamento artificialmente ottenuti in camera di crescita per estendere la capacità di stima degli eventi fenologici in un ampio intervallo di condizioni. Sono stati quindi testati diversi modelli, comprendenti un modello di *chilling/forcing* e alcuni modelli *Thermal Time*.

Benché il modello Unichill calibrato anche sui dati di camera di crescita abbia dimostrato il più alto contenuto informativo e la più alta coerenza con i dati disponibili, le sue prestazioni non sono state

superiori a quelle degli altri modelli.

Se le risposte nelle condizioni climatiche non si differenziano, è però possibile che lo siano in condizioni climatiche diverse, per esempio negli scenari di cambiamento climatico.

Capitolo 4 - Applicazione dei modelli di fenologia nello studio degli impatti dei cambiamenti climatici sulla viticoltura

4.1. Introduzione

La convinzione che cambiamenti climatici su scala globale siano in atto si sta consolidando nella comunità scientifica internazionale, che di conseguenza considera inevitabili profondi mutamenti sugli ecosistemi naturali e sulle attività umane, in particolare sull'agricoltura (IPCC 2007).

Dato il delicato equilibrio che mantiene con le condizioni climatiche locali, è probabile che la viticoltura risentirà degli effetti dei cambiamenti a più breve termine rispetto ad altre colture, specialmente nelle zone di più antica tradizione viticola. Per questo motivo la vite è stata una delle colture più studiate sotto questo profilo (Jones and Davis 2000; Duchêne e Schneider 2005; Petrie e Sadras 2008; Meier et al. 2007; Ramos et al. 2008; Malheiro et al. 2010; Caffarra e Eccel, 2011; Urhausen et al. 2011) grazie anche alla disponibilità di antiche registrazioni delle date di vendemmia, che hanno permesso di ricostruire gli effetti dei cambiamenti in epoche storiche (Chuine et al. 2004; Schleip et al. 2008; Mariani et al. 2009).

Poiché tutti gli scenari descritti per i prossimi decenni sono concordi nel prevedere un continuo aumento della temperatura, sia pure con un certo margine di incertezza, si possono ipotizzare per la viticoltura almeno due situazioni-tipo: da un lato la possibilità di introdurre la coltivazione della vite e la produzione di vino in aree dove finora questo era stato impedito dalle temperature troppo fredde e dalla brevità della stagione vegetativa, dall'altro la necessità per le attuali aree viticole di far fronte ai cambiamenti elaborando strategie di adattamento (White et al. 2006; Hall e Jones 2009).

La conseguenza più facilmente prevedibile dell'aumento delle temperature sarà un anticipo delle fasi fenologiche. Gli impatti più rilevanti si avranno verosimilmente sulla maturazione delle bacche, che tenderà sempre più ad allontanarsi dalle favorevoli condizioni autunnali verso il più caldo periodo estivo, con un peggioramento della qualità delle bacche e del vino (Jackson e Lombard 1993; Jones et al. 2005; Mori et al. 2007).

I modelli che descrivono quantitativamente lo sviluppo della vite in rapporto alle variabili climatiche sono l'unico strumento a disposizione dei ricercatori per indagare l'effetto dei cambiamenti climatici in quanto permettono di realizzare proiezioni future del comportamento della pianta in risposta a determinati scenari. I risultati delle analisi di scenario condotte in tal modo possono supportare l'elaborazione di opportune strategie di adattamento della viticoltura (Duchene e Schneider 2005; Wolfe et al. 2005; Moriondo e Bindi 2007).

Nelle prove di cui si è riferito nei precedenti due capitoli è stata rilevata l'esistenza di effetti di

deriva stocastica durante l'ottimizzazione numerica dei modelli, che incidono sulla consistenza della parametrizzazione risultante. È stato però pure riscontrato che nelle condizioni climatiche attuali questo non ha influito in maniera apprezzabile sulla qualità delle stime dei modelli. Rimane da accertare se in condizioni ambientali diverse da quelle di calibrazione, tali effetti possano generare risposte diverse.

Considerato il grande interesse nei confronti degli studi sugli impatti dei cambiamenti climatici, e dell'uso intensivo di modelli di fenologia che spesso li caratterizza, è apparso utile verificare la "tenuta" della calibrazione dei modelli, rilevando la presenza di eventuali discrepanze e la loro entità.

4.2 Materiali e metodi

4.2.1 Generazione di dati climatici

Serie sintetiche di dati di temperatura minima e massima giornaliera sono state generate sulla base delle previsioni del modello di circolazione generale (GCM) HadCM3 dell'Hadley Centre (Pope et al. 2007) che rappresenta uno degli istituti di ricerca climatologica del Servizio Meteorologico inglese, meglio conosciuto come *Met Office* (www.met-office.gov.uk). Il modello considera diverse ipotesi per le future emissioni di anidride carbonica in atmosfera, assunta come la principale variabile trainante i cambiamenti climatici. Tali ipotesi sono codificate con delle sigle (A1, A2, B1, B2 etc.) proposte in un documento denominato “SRES – Special Report Emission Scenario”, dell'*International Panel of Climate Change* (IPCC), l'organismo ufficiale delle Nazioni Unite che coordina le indagini sui cambiamenti climatici e che suggerisce le indicazioni da adottare per la mitigazione degli impatti derivati da questi.

Le stime del GCM sono generate con una bassissima risoluzione spaziale, su una griglia globale di 96 x 73 celle con 2.5° di latitudine e 3.75° di longitudine. Per poter utilizzare l'informazione degli scenari alla scala locale è necessario effettuare un'operazione di *downscaling*, consistente in un'interpolazione spaziale dei nodi originali per ottenere una griglia a maggiore livello di dettaglio geografico. In questo studio si è adottata una procedura di *downscaling statistico* (Murphy 2000), calibrata sulle proprietà di serie storiche reali riferite alla località in esame, implementata nel software LARS-WF5 (Rackso *et al.* 1991; Semenov e Brooks 1999; Semenov e Stratonovitch 2010). Si tratta di un generatore stocastico di dati climatici che nella sua ultima versione incorpora le previsioni di 15 modelli climatici usati nel quarto *Assessment Report* dell'IPCC (IPCC, 2007). Usando dati meteorologici locali relativi al periodo 1960-2010 per calibrare il sistema, è stato effettuato un *downscaling* delle previsioni del modello HadCM3 per la località Susegana (TV). Sono state così generate serie climatiche per i seguenti tre scenari di emissione definiti dall'IPCC: 'A1B', 'A2' and 'B1' (IPCC 2007; Wikipedia 2011).

Scenario A1B. Prevede un aumento della temperatura media globale di 2.8°C, con un intervallo di incertezza da 1.7 a 4.4°C. Descrive una rapida crescita economica e della popolazione fino al 2050 circa, e una loro graduale diminuzione nel periodo successivo. Le differenze di reddito fra paesi poveri e paesi ricchi diminuiscono. Le varie fonti di energia sono equilibrate e vengono sviluppate più efficienti tecnologie.

Scenario A2. Prevede un aumento di temperatura media globale di 3.4 °C in un intervallo di

probabilità compreso tra 2.0 e 5.4 °C. Lo scenario ipotizza una crescita continua della popolazione, con lenti e frammentari sviluppi della tecnologia e del reddito procapite. Le tensioni internazionali si acuiscono facendo scendere il livello di cooperazione, ed aumentano le disparità internazionali di produttività e di reddito pro capite.

Scenario B1. L'aumento di temperatura stimato è di 1.8 °C in un intervallo di probabilità da 1.1 a 2.9 °C, che consegue alle più basse emissioni ipotizzate. Si tratta quindi dello scenario auspicabile, i cui punti fondamentali sono l'alto livello di coscienza sociale ed ambientale, unito ad un approccio coerente con lo sviluppo sostenibile. È caratterizzato da un alto livello di attività economica, basato sull'uso di tecnologie a basso impatto ambientale e più efficienti in termini di sfruttamento delle risorse naturali, nonché da una distribuzione più equa delle risorse a livello internazionale.

Per ciascuno di questi scenari sono state generate tre serie climatiche corrispondenti ai seguenti periodi futuri: 2011-2033, 2046-2065 e 2080-2099. Come periodo attuale di riferimento si è usato lo stesso adottato dall'IPCC, e cioè quello tra gli anni 1980 e 1999. Per semplicità di esposizione nel prosieguo della trattazione ci si riferirà a questi periodi attraverso i loro anni intermedi, e cioè il 1990 per il periodo attuale, e gli anni 2020, 2055 e 2090 per le proiezioni future.

Le previsioni di aumento della temperatura dell'HadCM3 interpolate per Susegana sono riportate in forma di medie stagionali nella Tabella 14, da cui è possibile evincere che lo scenario A2 è quello più pessimistico, in quanto mostra i più alti incrementi rispetto al presente, che tuttavia non si discostano di molto dall'A1B. L'incremento di temperatura più alto è di +6.2 °C previsto per l'anno 2090 per la temperatura media estiva. Lo scenario B1 è invece quello più ottimistico, con un incremento massimo di 4.0 °C per l'estate del 2090.

Tabella 15. Variazioni delle temperature medie stagionali per tre scenari di emissione e tre proiezioni temporali previste dal modello HadCM3 interpolato per il sito di Susegana. I valori tra parentesi rappresentano i valori medi nel periodo di riferimento 1980-1999.

scenario	proiezione	Autunno (10.7 °C)	Inverno (5.2 °C)	Primavera (16.0 °C)	Estate (22.5 °C)
A1B	2020	+0.2	+0.8	+0.9	+1.2
	2055	+1.9	+2.1	+2.4	+3.8
	2090	+3.2	+3.7	+4.2	+6.0
A2	2020	0.0	+0.8	+0.9	+1.0
	2055	+1.5	+1.7	+2.2	+3.1
	2090	+3.2	+3.7	+4.4	+6.2
B1	2020	-0.2	+0.8	+1.0	+0.8
	2055	+1.0	+1.6	+2.0	+2.8
	2090	+2.4	+2.7	+2.8	+4.0

4.2.2 Impostazione dell'analisi

I modelli di germogliamento e quelli generali fin qui ottenuti (cfr capitoli 2 e 3) sono stati valutati sui dati climatici generati. L'analisi del comportamento dei modelli nelle stime di lungo periodo si articolerà in due parti:

- 1) comportamento dei modelli di germogliamento, con riferimento alle cultivar Montepulciano e Sangiovese;
- 2) comportamento dei modelli generali di fenologia, con riferimento alle cultivar Chardonnay, Merlot, Cabernet Sauvignon e Glera.

4.3 Risultati

4.3.1 Risposta dei modelli di germogliamento

I modelli Unified e Unichill (Capitolo 2) sono stati fatti girare su tutte le proiezioni climatiche, ottenendo le date di germogliamento e di uscita dalla dormienza per il Montepulciano e il Sangiovese. Come atteso, rispetto al periodo di riferimento l'applicazione agli scenari futuri di emissione ha previsto anticipi dell'epoca di germogliamento, che diventano sempre più importanti man mano che le proiezioni avanzano nel futuro. In generale, lo scenario A2 è stato quello con le massime variazioni, sebbene non molto diverse da quelle previste per lo scenario A1B, da cui si differenziano al massimo di 1.8 giorni. Lo scenario che invece mostra i minori cambiamenti è il B1 (Figura 12).

Nel Montepulciano le stime derivate dai due tipi di calibrazione sono state pressoché coincidenti, con una differenza massima di 2.7 giorni fino al 2020, che successivamente comincia a crescere arrivando a valori compresi tra 5 (Unified su B1) e 12 giorni (Unichill su A1B) nel 2090. In questa cultivar, i modelli calibrati su talee forzate prevedono maggiori anticipi della data di germogliamento, con un massimo di 16.5 giorni (Unified su A2) contro i corrispondenti 12.3 previsti dalla calibrazione alternativa.

Nel Sangiovese le due calibrazioni mostrano un andamento parallelo al variare delle proiezioni, dove la massima differenza tra loro è di tre giorni nel modello Unified, mentre nello Unichill sono praticamente coincidenti (Figura 12). Negli scenari A2 e A1B il cambiamento previsto della data di germogliamento è stato di 21.5 giorni, mediando tra modelli e cultivar, mentre nello scenario B1 è stato di 13 giorni.

La differenza di risposta tra le cultivar diventa ancora più evidente esaminando le date stimate di uscita dalla dormienza (Figura 13). Mentre l'aumento delle temperature è responsabile dell'accelerazione della fase di *forcing*, sensibile al caldo, contribuendo in tal modo ad anticipare il germogliamento, ci si aspetta l'effetto opposto sul superamento della dormienza, poiché se in inverno le temperature si alzano ci vuole più tempo per accumulare le *chilling units*.

Questo tipo di risposta è quella effettivamente osservata su tutt'e due le cultivar in entrambi i modelli quando questi sono calibrati sulle talee forzate. Il più grande cambiamento del momento di fine dormienza, 19.7 giorni in media, è stato stimato sullo scenario A1B, mentre il minore (14.6 giorni in media) è stato ancora osservato sullo scenario B1 (Figura 13).

I modelli calibrati sui dati di campo prevedono invece risposte completamente differenti tra le cultivar. Nel Montepulciano l'evento è ritardato come per la calibrazione su talee, ma la variazione

si svolge interamente circa 80 giorni più tardi, tra la prima e la terza settimana di febbraio. Nel Sangiovese non c'è praticamente variazione, e la data di uscita si mantiene stabilmente nella seconda settimana di gennaio, in maniera del tutto indifferente al modello e alla proiezione temporale.

È noto che ritardi nell'uscita della dormienza controbilanciano la tendenza anticipatrice della fenologia primaverile (Yu et al. 2010). Nei nostri risultati tuttavia questo effetto è apprezzabile solo nelle stime basate sulla calibrazione sui dati di campo nel Montepulciano. Nelle stime basate su talee forzate il ritardo della fine dormienza resta confinato entro l'autunno, anche nella proiezione più tardiva. Per questa ragione la fine dormienza si verifica sempre prima che inizi la fase di accumulo delle *forcing units*, su cui ha quindi un effetto molto trascurabile.

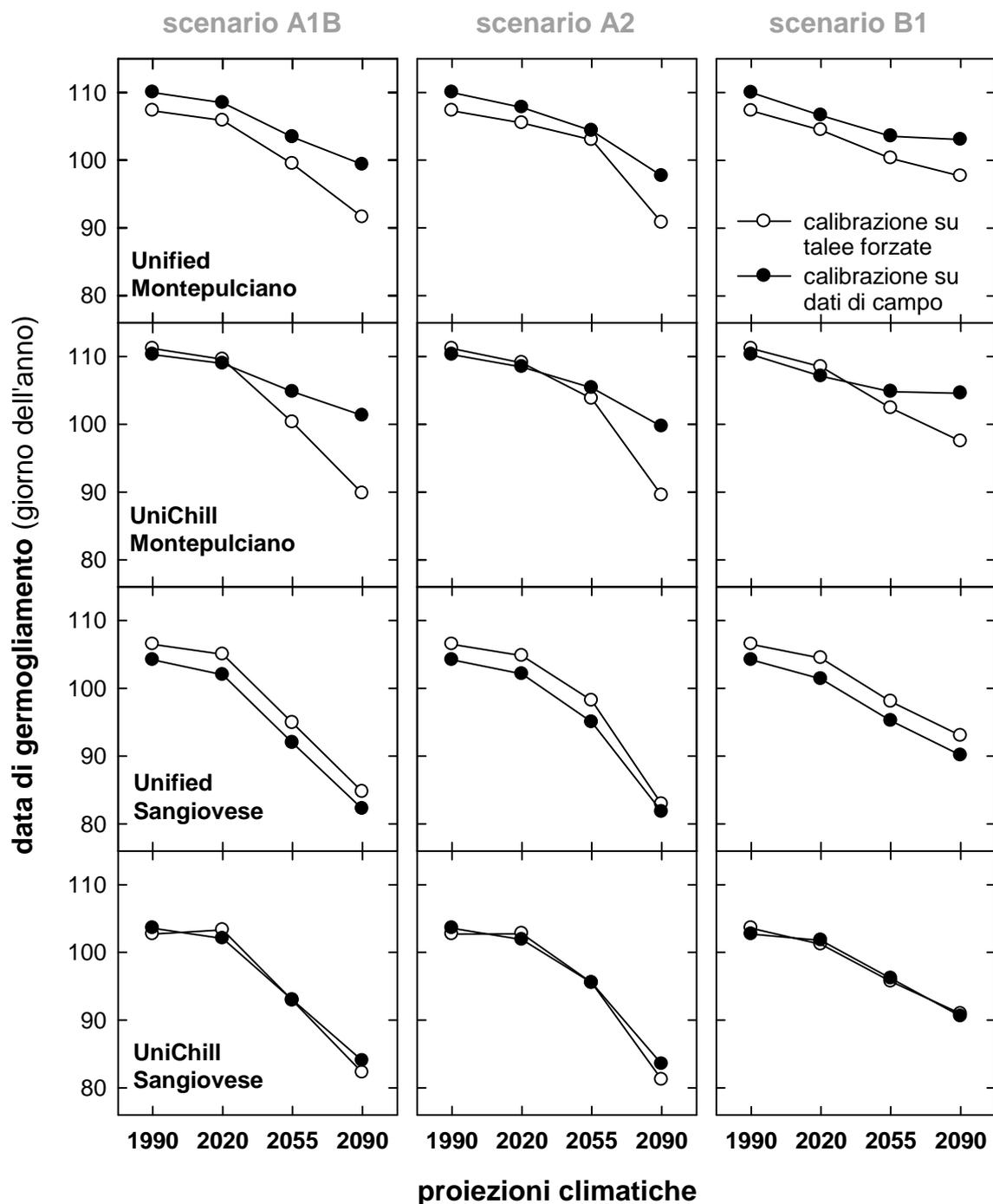


Figura 12. Date di germogliamento stimate dai modelli Unified e UniChill calibrati su talee forzate e su dati di campo. Le stime si riferiscono al tempo presente e a tre proiezioni temporali future per tre differenti scenari di emissione di CO₂.

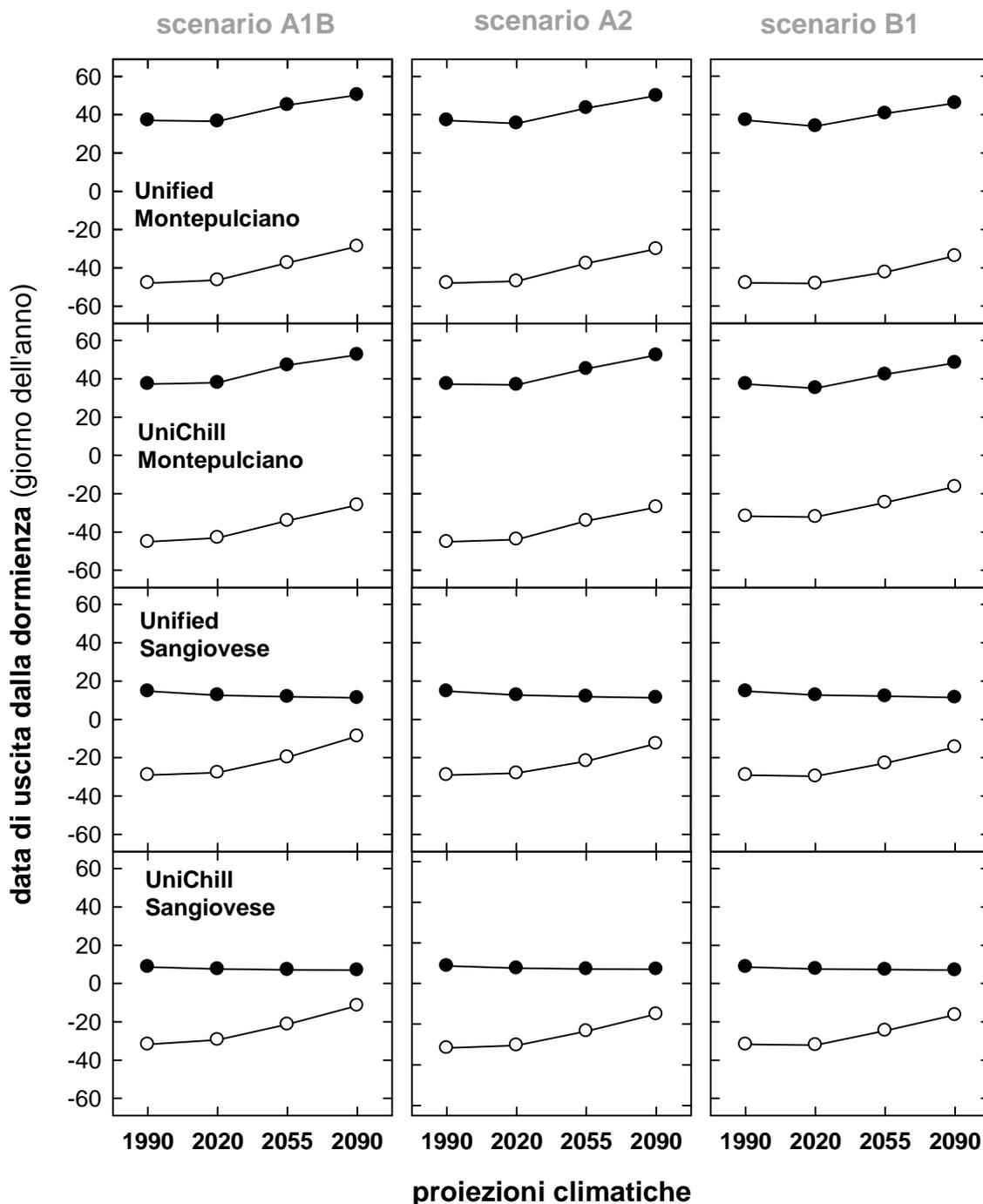


Figura 13. Date di uscita dalla dormienza stimate dai modelli Unified e UniChill calibrati su talee forzate e su dati di campo. Le stime si riferiscono al tempo presente e a tre proiezioni temporali future per tre scenari di emissione di CO₂.

4.3.2 Risposta dei modelli generali di fenologia

Le stime ottenute dai modelli generali di fenologia (Capitolo 3) sono riportate nelle successive figure dalla 14 alla 16, e in forma riassuntiva, con le medie delle quattro cultivar, dalla Tabella 15. Sulla scorta delle risposte ottenute dal precedente ciclo di simulazioni, questa parte dell'analisi si è concentrata sui seguenti due aspetti:

- L'introduzione della dormienza nel modello UniChill ha influito sulle previsioni delle date delle fasi successive al germogliamento, fioritura e invaiatura?
- Se esiste una differenza tra i modelli, come cambia con il variare delle proiezioni temporali considerate?

La Figura 14 riporta la variazione delle date di germogliamento ottenute per tutte le combinazioni cultivar/scenario. L'andamento della risposta dei modelli allo spostamento nel futuro delle proiezioni climatiche conferma la tendenza all'anticipo dell'evento fenologico già vista con il Montepulciano e Sangiovese. Anche le differenze tra gli scenari esplorati sono coerenti con i primi risultati, con i maggiori cambiamenti rilevati sull'A1B e l'A2, tra loro non molto diversi, e quelli minori sul B1.

I modelli mostrano stime molto simili fino alla proiezione temporale intermedia, il 2055, dopo di che cominciano a divergere sensibilmente. I modelli GDD e UniForc non calibrati sono quelli che si scostano maggiormente dagli altri, prevedendo i maggiori spostamenti della data di germogliamento, per tutti gli scenari e le cultivar.

Il modello UniChill, nelle due calibrazioni ha mostrato in media piccole differenze, non superiori a 2-3 giorni dai modelli GDD e UniForc calibrati (Tabella 15). Va comunque notato che i comportamenti delle due calibrazioni non sono stati equivalenti, con l'UniChill-calibrazione A che ha stimato i minori anticipi di data, da 7.6 giorni (B1) a 16.4 (A1B), mentre l'UniChill-calibrazione B è stato praticamente coincidente con i modelli Thermal Time. Le differenze tra le due calibrazioni sono riscontrabili per lo più nelle cultivar Merlot e Glera, mentre non sono apprezzabili nelle altre due.

Le differenze tra modelli risultano più attenuate nelle stime della data di fioritura (Figura 15) e ancora di più in quelle della data di invaiatura (Figura 16).

In termini generali, l'anticipo della fenologia tra il 1990 e il 2090 è simile (sui 20 giorni in media) per il germogliamento e la fioritura, e molto più elevato per l'invaiatura, conseguenza del fatto che per l'estate il modello GCM prevede i maggiori aumenti di temperatura.

Uno sguardo alle date stimate di fine dormienza (Figura 17) completa il quadro interpretativo. Il modello UniChill-calibrazione A mostra una stessa data per questo evento, ed è quindi insensibile agli scenari e alle proiezioni per le cultivar Chardonnay, Merlot e Cabernet Sauvignon. Solo la Glera mostra una variazione, che mostra quindi un effetto di bilanciamento dell'anticipo, che si può notare fino all'invaiatura.

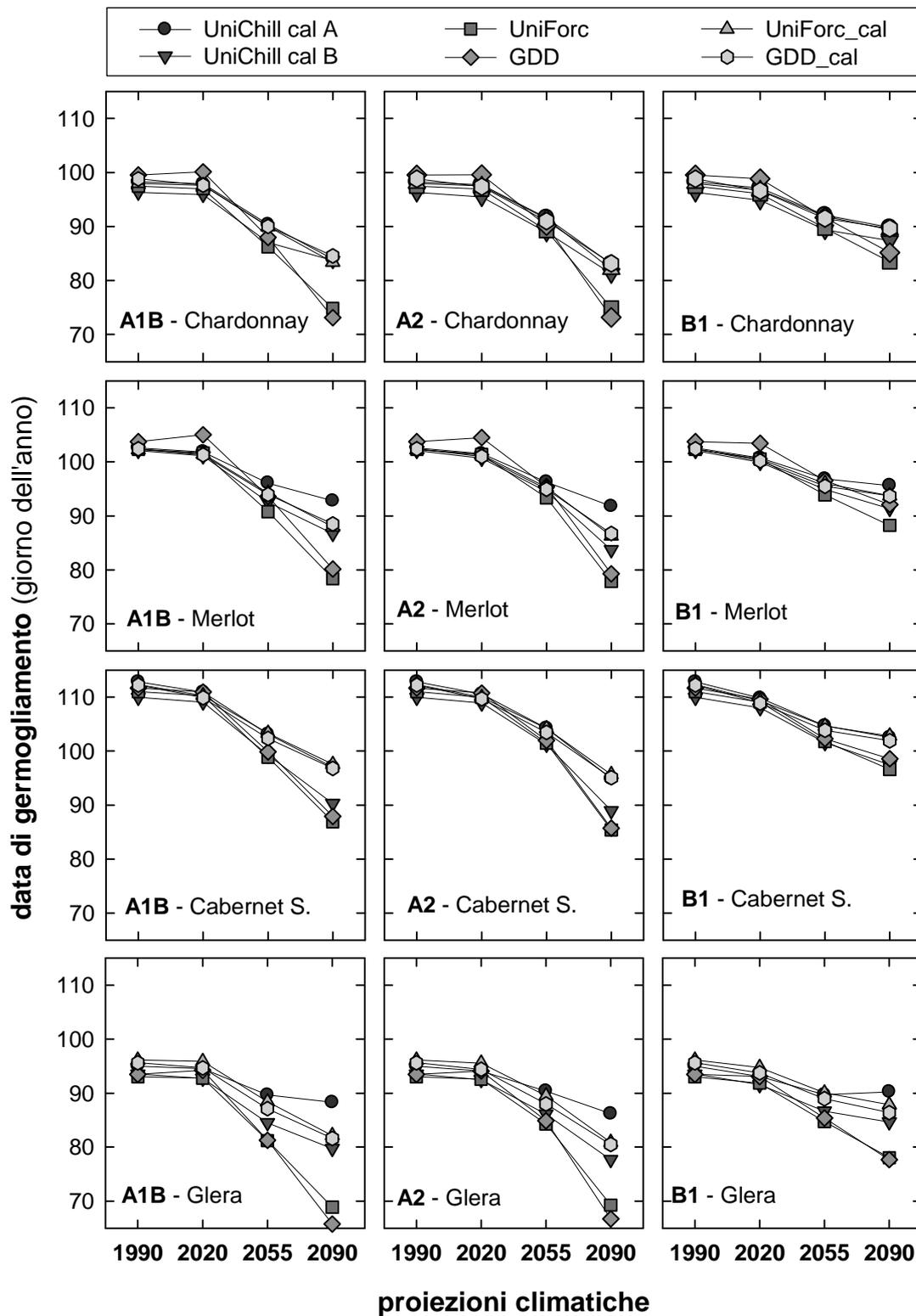


Figura 14. Date di germogliamento stimate da modelli di fenologia della vite per il presente e per tre periodi futuri sotto tre diversi scenari di emissione di CO₂.

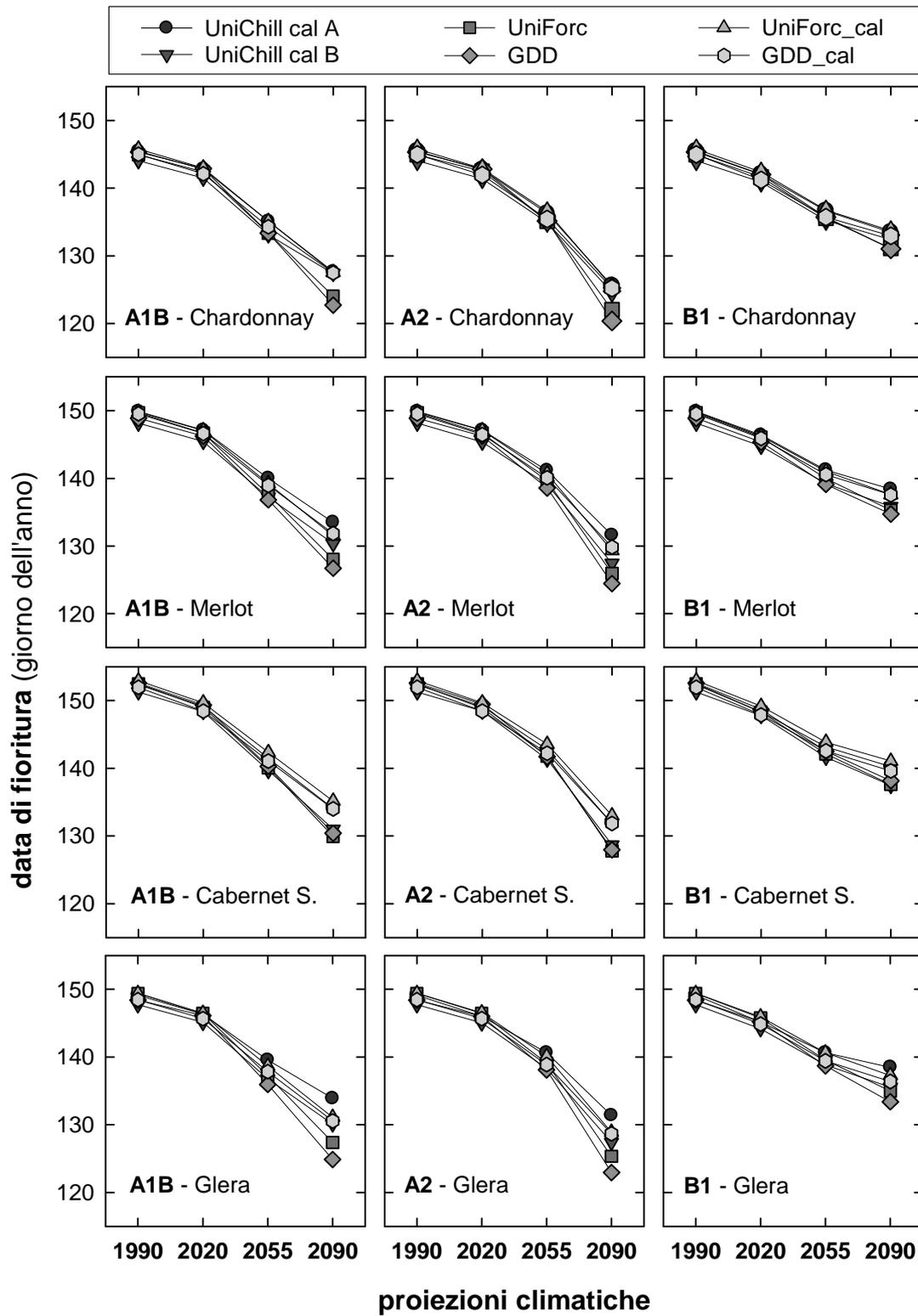


Figura 15. Date di fioritura stimate da modelli di fenologia della vite per il presente e per tre periodi futuri sotto tre diversi scenari di emissione di CO₂.

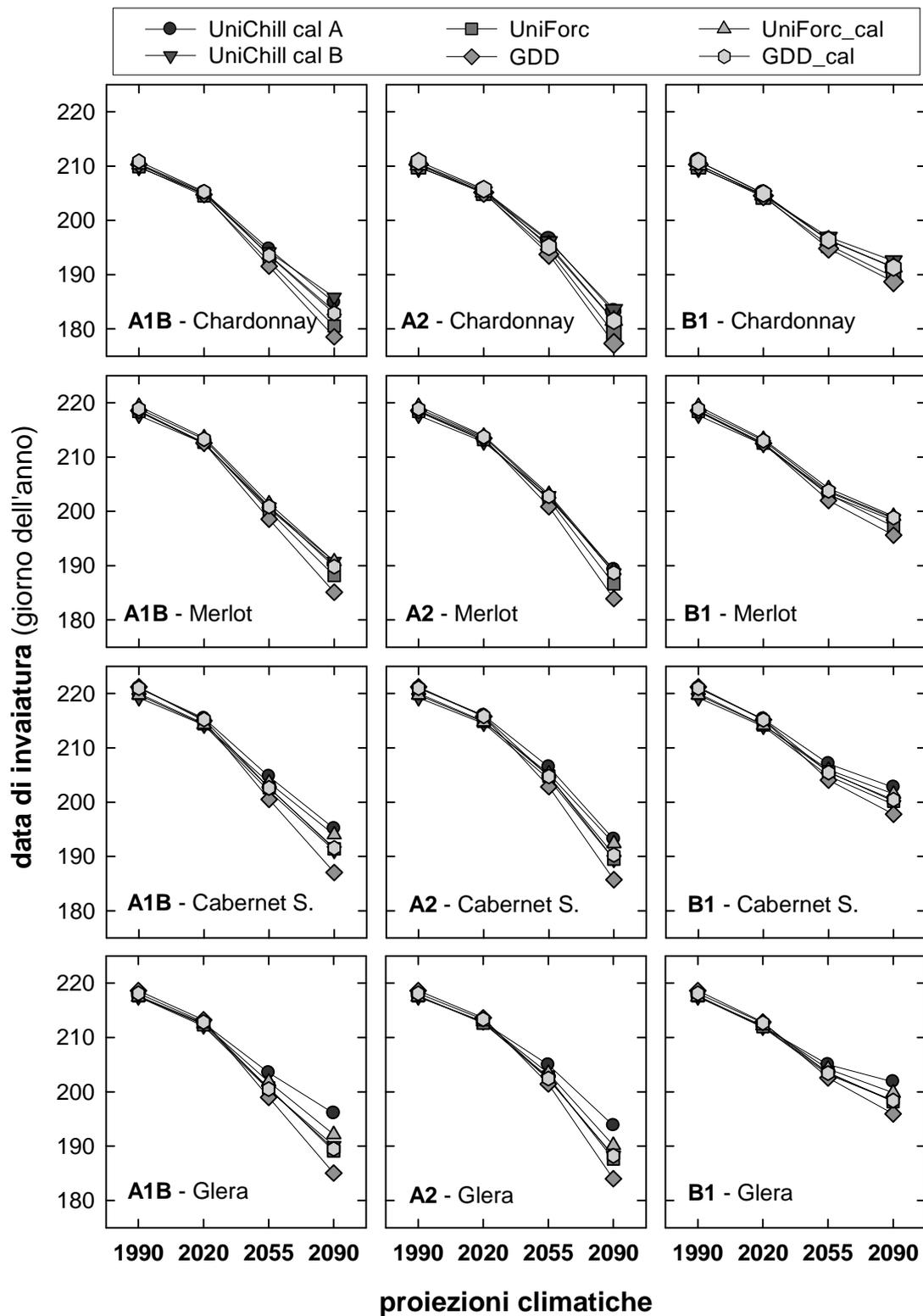


Figura 16. Date di invaiatura stimate da modelli di fenologia della vite per il presente e per tre periodi futuri sotto tre diversi scenari di emissione di CO₂.

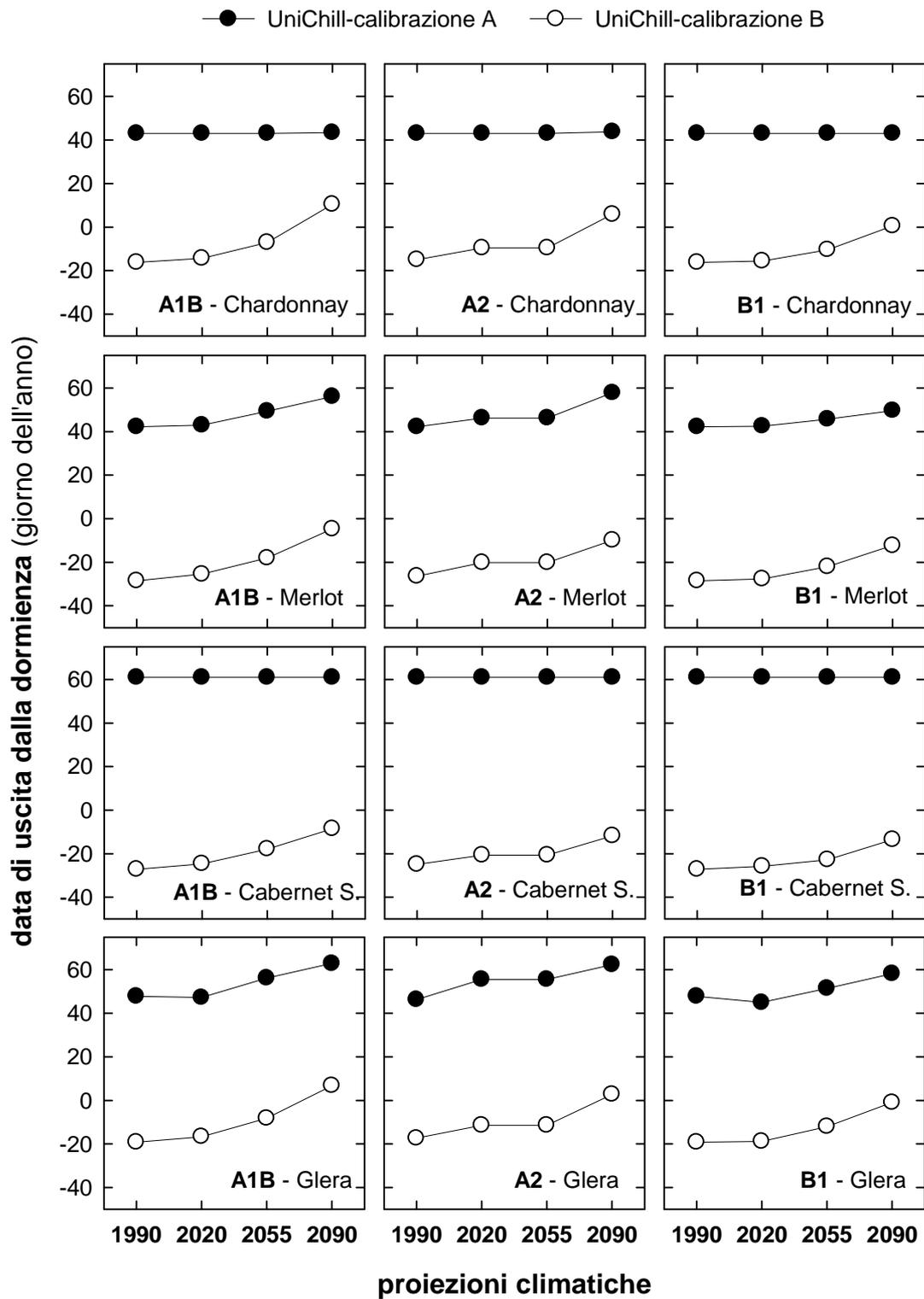


Figura 17. Date di fine dormienza stimate dal modello UniChill, calibrato su dati di campo (calibrazione A) e su dati di campo + dati di camera di crescita (calibrazione B), per il presente e tre periodi futuri sotto tre scenari di emissione di CO₂.

Tabella 16. Variazione (in giorni) delle date dei principali eventi fenologici 1990-2090, calcolate dai vari modelli fenologici per tre scenari di emissione di CO₂. Media di quattro cultivar.

scenario	Unichill (cal A)	UniChill (cal B)	UniForc	GDD	UniForc calibrato	GDD calibrato
<i>germogliamento</i>						
A1B	16.4	18.9	24.8	27.0	17.4	18.3
A2	16.1	20.0	25.4	27.8	18.2	18.9
B1	7.6	10.3	14.4	13.7	8.8	9.3
<i>fioritura</i>						
A1B	16.9	18.1	21.8	22.6	18.1	17.8
A2	19.1	20.8	23.8	24.9	20.3	19.8
B1	11.5	12.5	14.4	14.5	12.1	12.1
<i>invaiaatura</i>						
A1B	25.3	26.6	29.2	33.2	26.6	28.8
A2	27.0	28.5	30.7	34.4	28.4	30.1
B1	18.4	18.7	20.2	22.6	18.7	20.0

4.4 Discussione

4.4.1 Risposta dei modelli di germogliamento

Nelle attuali condizioni climatiche i due tipi di calibrazione usati per i modelli Unified e UniChill, hanno dimostrato una simile capacità di stima del germogliamento. Nelle proiezioni future il comportamento è diverso tra le cultivar, ma più che per intrinseche proprietà biologiche, questo è dipeso in tutta probabilità da effetti di deriva stocastica durante il processo di ottimizzazione numerica.

Sulla calibrazione con talee forzate, il comportamento è simile tra le cultivar, per le quali risultano ampi spostamenti in avanti della data di germogliamento.

Se invece la calibrazione è avvenuta sui dati di campo, allora il comportamento cambia. Poiché per il Montepulciano la parametrizzazione ha restituito parametri meno aberranti che nel Sangiovese, viene conservata una certa capacità di risposta del modello agli aumenti di temperatura, in particolare quelli invernali, con conseguente effetto di ritardo sulla fine della dormienza e di controbilanciamento della tendenza anticipatrice della fenologia.

Non ci sono motivi particolari per spiegare perché questo sia avvenuto in Montepulciano e non su Sangiovese, se non effetti di overfitting che per la loro natura stocastica sono difficilmente prevedibili. Fermando forzatamente l'algoritmo a soluzioni intermedie, anche molto vicine a quella finale, sono stati effettivamente notati comportamenti in linea con quelli del Montepulciano (dati non mostrati).

Del resto, la riprova di questa interpretazione è costituita dal fatto che con dati aggiuntivi di talee forzate, il comportamento delle due cultivar si riallinea.

I risultati comunque mostrano piuttosto chiaramente i rischi sottesi all'uso di una calibrazione non consistente quando i modelli sono usati in condizioni altamente estrapolative. Anche se le capacità dei modelli differentemente parametrizzati appaiono equivalenti in condizioni non critiche, vale a dire simili a quelle sulle quali sono stati calibrati, lo stesso può non valere in condizioni diverse.

4.4.2 Risposta dei modelli generali di fenologia

Per i modelli generali la risposta è stata comparabile a quella riscontrata su quelli di germogliamento, con poche differenze tra i modelli a confronto.

Il principale obiettivo era di verificare se l'inclusione della descrizione della dormienza avesse avuto qualche effetto sulle stime, rispetto ai semplici modelli basati solo sul tempo termico. Dal punto di vista pratico, non ci sono state grandi differenze, eccetto che per i modelli GDD e UniForc non calibrati. I grandi anticipi rilevati da questi ultimi sono dovuti essenzialmente al fatto che considerano l'accumulo di *forcing units* a partire dal 1 gennaio. Poiché le proiezioni climatiche prevedono il maggior innalzamento delle temperature in primavera ed estate, causando quindi un anticipo del momento di inizio dell'accumulo delle *forcing units*, l'arco di tempo considerato da questi modelli copre l'intero intervallo interessato dalla variazione climatica primaverile-estiva, e ne massimizza gli effetti. Le versioni con T_0 calibrato, che iniziano l'accumulo solo dopo il giorno 50-60, non risentono degli aumenti di temperatura prima di tale data, per cui l'effetto di anticipo viene sottostimato rispetto alle versioni normali.

Il modello UniChill-calibrazione A, essendo come si è visto praticamente coincidente con il modello UniForc calibrato, dovrebbe aver dato stime coincidenti. Questo avviene in realtà solo per il Chardonnay e il Cabernet Sauvignon, ma non per la Glera e il Merlot, dove il modello si differenzia sensibilmente soprattutto nella proiezione del 2090. La differenza è dovuta al posticipo dell'uscita della dormienza che si osserva per queste due cultivar (Figura 17) che ha ritardato l'inizio della fase di accumulo delle *forcing units*.

Questo effetto si nota in misura molto più ridotta per il modello UniChill-calibrazione B, dato che il posticipo di dormienza, che ha interessato tutte le cultivar, si svolge tra i primi di dicembre e i primi giorni di gennaio, vale a dire prima della fase di intenso accumulo di *forcing units*, ma sufficiente a differenziare la risposta da quella della calibrazione A, e dal modello UniForc con T_0 calibrato.

Le differenze tra le due calibrazioni nel 2090 per quanto riguarda il germogliamento sono dell'ordine di 3-4 giorni, comparabili quindi con quelle riscontrate usando i modelli di solo germogliamento.

Le differenze tra i modelli si attenuano nelle successive fasi di sviluppo. Questo è particolarmente interessante vista l'importanza per la vite del momento in cui si verifica la maturazione. Se in media

la differenza tra il massimo e minimo anticipo è di 10 giorni per il germogliamento, negli scenari A1B e A2, e di 6 giorni per il B1, all'invasatura la differenza scende ad un massimo di 7 giorni per l'A1B e l'A2 e di 4 giorni per il B1 (Tabella 15). Se si considerano però i dati delle singole cultivar, le differenze sono in alcuni casi più rilevanti che in altre, come per esempio nella Glera, dove la differenza tra le date di invasatura arriva a 11 giorni tra il modello UniChill calibrato A e lo GDD.

4.5 Conclusioni

Tre modelli generali di fenologia della vite, comprendenti un modello di *chilling/forcing* e due di tipo *Thermal Time*, sono stati messi a confronto in un'analisi di lungo periodo relativa agli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo di sviluppo vegetativo e riproduttivo della vite.

I modelli hanno stimato le date dei principali eventi fenologici di germogliamento, fioritura e invasatura in maniera sostanzialmente equivalente, anche se sono comunque riconoscibili i pattern di comportamento prevedibili in base alla struttura dei modelli. Differenze di un certo rilievo sul piano pratico sono state ottenute solo in corrispondenza della proiezione climatica più lontana nel tempo, relativa al periodo 2080-2099.

La principale implicazione di questo risultato è che le previsioni fin qui apparse in letteratura sugli impatti dei cambiamenti climatici in viticoltura, sono da ritenersi attendibili in linea generale, anche se basate su modelli semplici, almeno in un orizzonte di breve-medio termine. Vista però la tendenza a divergere, le differenze saranno comunque più importanti se si considerano periodi ancora più in là nel tempo, ma che comunque sono lontane dagli interessi attuali degli operatori.

Va comunque tenuto presente che l'esperienza è stata condotta considerando una sola campagna annuale di forzatura. Per una valutazione più sicura saranno necessari altri cicli sperimentali, e non esclusivamente riservati al germogliamento. Anche per le fasi successive, sebbene questo comporti apparati sperimentali più dispendiosi, è pensabile il ricorso a condizioni controllate o semi controllate per variare artificialmente le condizioni a livello della chioma. Questo potrebbe avvenire usando piante in vaso, più facili da maneggiare e spostare in ambienti protetti, o tramite il ricorso di apprestamenti protettivi direttamente in campo

Capitolo 5 - Scenari di cambiamento del clima e impatti sulla fenologia della vite nel distretto del Prosecco

5.1. Introduzione

La caratterizzazione climatologica delle zone viticole è uno degli elementi fondamentali per la definizione dei *terroir*, in quanto specifica se una data zona è idonea per portare a termine la maturazione dei grappoli in maniera adeguata agli obiettivi enologici (Jones, 2004). Per lungo tempo essa è stata basata sul presupposto implicito che le fluttuazioni climatiche annuali di una regione, che determinano l'effetto "vintage", avvengano attorno ad una media che rimane stabile nel lungo periodo. I risultati delle ricerche sui cambiamenti climatici in atto mettono tuttavia in discussione questa assunzione, e stimolano la ricerca di nuovi criteri per descrivere la climatologia in un contesto di cambiamento.

Si tratta di una tematica di grande attualità per il settore viticolo, soprattutto nelle aree dove il perseguimento della qualità e della tipicità dei vini sono stati obiettivi prioritari, e che nel corso degli anni ha generato dei sistemi colturali in cui il ciclo vegeto-riproduttivo della vite è stato adattato al clima locale per sfruttare in maniera ottimale le risorse ambientali. Questo processo, che in alcune zone è durato per secoli, ha reso i sistemi viticoli strettamente legati alle peculiarità dei climi locali e per questo intrinsecamente molto sensibili alle loro variazioni, al punto che anche cambiamenti di limitata portata possono risolversi in rilevanti variazioni della tipologia della produzione, se non addirittura nella compromissione della vocazione viticola.

L'obiettivo di questa parte di attività è stata quella di esplorare approcci metodologici per lo studio della variabilità spazio-temporale del clima di un territorio, che consentano cioè di tracciare l'entità e la distribuzione spaziale delle variazioni climatiche che avvengono in un certo periodo. Per poter essere di utilità pratica, l'analisi deve poter essere condotta ad un elevato grado di dettaglio spaziale, in grado cioè di cogliere variazioni differenziali all'interno di un'area viticola, e le loro relazioni con la morfologia e le caratteristiche del territorio.

Una delle tipiche applicazioni di dati climatici spazialmente espliciti è il loro impiego con modelli di fenologia per studiare gli effetti dei cambiamenti climatici sui rapporti vitigno-ambiente. Questi modelli consentono infatti di stimare il comportamento della vite anche in periodi per i quali non si dispone di osservazioni fenologiche storiche, o dove queste hanno una limitata estensione temporale.

Il primo dei problemi che si incontrano accingendosi ad una analisi spaziale con scala di dettaglio fine è costituito dal fatto che le aree viticole sono tipicamente di limitata estensione ed è pertanto

difficile reperire dati climatici con sufficiente densità spaziale ed estensione temporale per caratterizzazioni spazio-temporali pluridecennali. L'uso di database climatici continentali o globali di pubblico dominio potrebbe sopperire alla carenza di serie storiche locali: essi hanno infatti una buona estensione temporale e sono disponibili anche a passo giornaliero o sub-giornaliero. Il loro limite principale è dato dalla bassa risoluzione spaziale. Essendo il risultato di interpolazioni di larga scala sono anche caratterizzati da un certo grado di errore, i cui effetti sono tanto più sensibili quanto più piccola e morfologicamente varia è l'area su cui sono utilizzati.

La parte principale di questa ricerca è stata quindi la messa a punto di una procedura di *downscaling* di un dataset europeo, per aumentarne la risoluzione spaziale ad un livello sufficiente a rilevare la variabilità interna nella zona allo studio. Il dataset così rielaborato è stato usato per studiare gli effetti del cambiamento climatico sulla fenologia della vite in una tra le più tipiche zone viticole del Veneto.

5.2 Materiali e metodi

5.2.1 Area di studio

Come caso-studio è stato scelto il distretto del “Conegliano-Valdobbiadene Prosecco Superiore DOCG”, in provincia di Treviso (Figura 18). Si tratta di una zona prevalentemente collinare, che si estende approssimativamente per 35 km in direzione est-ovest, e per 25 km in direzione nord-sud, il cui punto centrale ha coordinate 45.95N e 12.17E. L'altitudine varia tra i 30 e 460 m s.l.m, e il 72.7% della superficie coperta da vigneti varia tra 100 e 300 m. L'area coltivata a vite si estende su 8017 ettari e la produzione principale è il Prosecco di Conegliano-Valdobbiadene, ottenuto principalmente dalla varietà locale ‘Glera’.



Figura 18. Localizzazione del distretto “Conegliano-Valdobbiadene Prosecco superiore DOCG” all’interno della regione Veneto.

5.2.2 Dati meteorologici

Serie storiche di temperatura giornaliera minima e massima, per 20 siti all’interno della zona di studio sono state reperite presso l’ARPAV (Agenzia Regionale Prevenzione Ambientale del Veneto) e il CODITV (Consorzio Difesa Colture, provincia di Treviso), per gli anni dal 1989 al 2008. A parte la limitata estensione temporale, queste serie sono caratterizzate da ampie lacune, che interessano circa il 25% di tutto il periodo.

La distribuzione delle stazioni nell’area allo studio è illustrata dalla Figura 19.

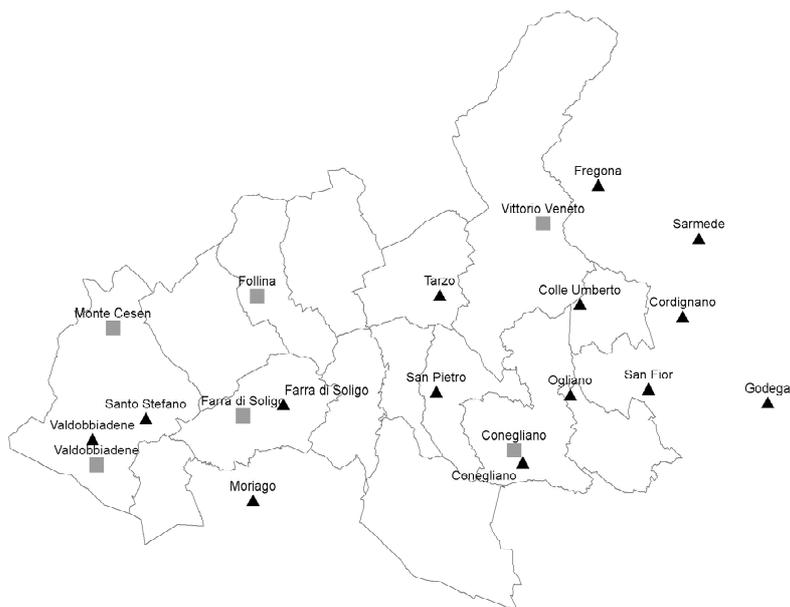


Figura 19- Localizzazione delle stazioni meteo ARPAV (quadrati) e CODITV (triangoli) nel territorio del distretto “Conegliano-Valdobbiadene Prosecco superiore DOCG”.

Si è valutato quindi l’impiego di un dataset Europeo di pubblico dominio, lo *European Climate Assessment* (ECA) dataset, sviluppato come parte dell’*European Union Framework 6 ENSEMBLES project*, (Haylock et al. 2008; Klok e Klein Tank 2009). Di questo esiste una versione in *grid*, l’E-OBS dataset, alla risoluzione spaziale di 0.25° , per i dati giornalieri di temperatura minima, massima, media e di precipitazioni. L’intero dataset (versione 3.0) è stato scaricato dal sito <http://eca.knmi.nl>. L’E-OBS data è stato usato per ricostruire le serie climatiche locali attraverso una procedura di *downscaling*, mentre i dati storici locali sono stati usati per calibrare e validare la procedura.

5.2.3 Dati di copertura del suolo

Le informazioni sulla copertura del suolo sono state usate per concentrare l’attenzione solo sulla superficie effettivamente interessata dalla coltura della vite, per restringere il carico computazionale dell’analisi. Le delimitazioni delle aree vitate in formato *shapefile* sono state estratte dalla versione digitale della mappa della copertura del suolo 2007 in scala 1:10000 (Regione Veneto 2009).

5.2.4 Descrizione della procedura di *downscaling*

La distribuzione spaziale della temperatura dell’aria in un dato momento è determinata dalle

interazioni tra lo stato dell'atmosfera e le caratteristiche della superficie (per esempio l'altitudine, pendenza, presenza di corpi d'acqua), i cui effetti dipendono dalle concomitanti condizioni meteorologiche. È stato per esempio già evidenziato come il gradiente di temperatura indotto dall'altitudine sia variabile di giorno in giorno e come le variazioni seguano gli andamenti climatici stagionali. È quindi ragionevole pensare che condizioni meteorologiche simili generino simili interazioni atmosfera-superficie e in ultima analisi simili distribuzioni spaziali di temperatura. Su questo assunto è stata costruita l'ipotesi che se un numero finito di "pattern meteorologici" potesse essere definito in base a qualche criterio di classificazione, allora a ciascuno di loro ne potrebbe corrispondere uno specifico di distribuzione spaziale di temperatura. Inoltre, se ciascun pattern meteorologico per un certo sito potesse essere caratterizzato da una relazione quantitativa tra la sua temperatura e la temperatura media della zona, si avrebbe allora un comodo metodo per ricostruire la serie storica della temperatura locale partendo dalla sequenza dei pattern e dalla serie delle temperature medie della zona.

Sulla base di queste premesse è stato sviluppato un metodo che si serve del grid E-OBS per individuare gruppi di giorni con simile meteorologia. Come criterio di classificazione è stata adottata la distribuzione dei residui delle temperature giornaliere in un'area pari a 25 nodi del grid, corrispondente ad un rettangolo di 140 x 115 km (NS-EO) centrato sulla zona allo studio (Figura 20).

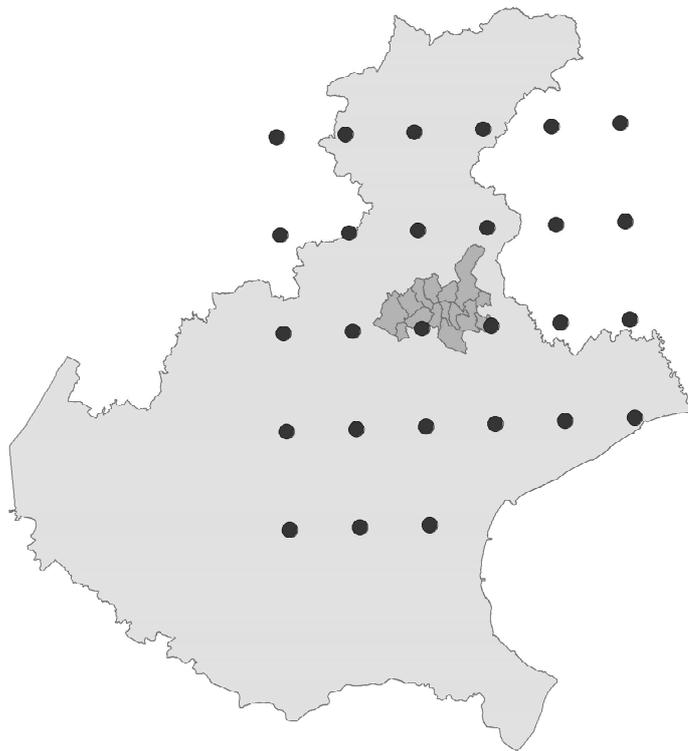


Figura 20. I nodi del grid del dataset E-OBS usati nella ricerca di pattern climatici

L'ipotesi è che ad una data distribuzione di temperature a questa scala sub-regionale corrisponda una specifica distribuzione nell'area allo studio. L'analisi è stata condotta sui residui per eliminare gli effetti della stagionalità. Queste serie giornaliere di residui sono stati sottoposte a *k-means cluster analysis*, per mezzo della procedura "clara" (Kaufman e Rousseeuw 1990) implementata nel *package* "cluster" v. 1.12.0 del linguaggio R, versione 2.9.1 (www.r-project.org). La procedura è stata eseguita con un numero ottimale di gruppi pari a 45, che è stato il risultato migliore in prove preliminari in un intervallo tra 5 e 60. Per ciascun gruppo è stata calcolata la differenza media tra i valori storici e i valori E-OBS per ognuna delle 20 stazioni di misura disponibili. Queste differenze sono state poi usate come fattori di correzione per stimare la temperatura di ciascuna stazione dai dati E-OBS. Il calcolo dei fattori di correzione è stato eseguito su metà del dataset ARPAV-CODITV (giorni dispari), mentre la loro validazione è avvenuta sulla restante metà (giorni pari). L'accuratezza delle stime è stata determinata attraverso l'RMSE. Alla fine si è proceduto alla ricostruzione della serie storica per la temperatura media giornaliera per il periodo 1950-2008 per ognuno dei 20 siti meteo disponibili.

5.2.5 Interpolazione spaziale e ricostruzione dei dati meteorologici

Una volta ricostruita la serie climatica per il periodo 1950-2008 per ciascuna stazione, la temperatura media giornaliera è stata estrapolata su tutta l'area vitata per ottenere mappe giornaliere di temperatura ad una risoluzione spaziale di 500m. L'interpolazione è stata eseguita tramite regressione lineare multipla, usando come variabili predittive l'altitudine e le coordinate cartografiche X e Y, nel sistema Gauss-Boaga (fuso ovest), i cui valori sono stati derivati da un modello digitale del terreno 25m con ordinarie procedure GIS. I residui tra stime e dati ricostruiti, che rappresentano la parte di variabilità non spiegata dalle variabili predittive, sono stati poi interpolati con *Inverse Distance Weighting* (Shepard 1968).

5.2.6 Modellazione della fenologia

Le mappe giornaliere di temperatura sono state usate come input di un modello di fenologia per stimare la data di inizio delle fasi fenologiche di fine dormienza, germogliamento, fioritura e invaiatura nelle cultivar Chardonnay, Cabernet Sauvignon, Merlot e Glera. Il modello adottato è lo UniChill (Chuine, 2000), ottimizzato su dati di campo integrati da osservazioni su talee forzate in condizioni controllate (Capitolo 3, Tabella 11-calibrazione B).

5.2.7 Schema dell'analisi e valutazione statistica

L'intervallo dal 1950 al 2008 è stato diviso in due periodi: dal 1950 al 1979 (periodo 1), e dal 1980 al 2008 (periodo 2). Per ciascuno di questi periodi è stato calcolato l'indice di Winkler (WI) medio, ossia la somma delle temperature attive usando il valore di 10°C come temperatura base (= Temperatura media giornaliera - 10°), dal 1 aprile al 31 ottobre (Winkler et al. 1974), e la variabilità interannuale espressa come Coefficiente di Variazione (CV), vale a dire il rapporto tra la deviazione standard e la media trentennale. Lo stesso schema di valutazione è stato applicato alle date stimate per i principali eventi fenologici.

Le medie trentennali e i relativi CV sono stati calcolati per complessivi 309 punti della zona, vale a dire quelli risultanti dalla sovrapposizione di un grid di 500 m all'area interessata dalla coltivazione della vite. I dati ottenuti sono stati utilizzati per studiare la variabilità spaziale di medie e CV e delle loro variazioni, descrivendole graficamente tramite box-plots. In questo tipo di diagramma le aree rettangolari rappresentano l'intervallo di variazione compreso tra il 25° e il 75° percentile, con una linea intermedia che rappresenta la mediana. Le barre di errore delimitano invece il 10° e 90° percentile.

La significatività statistica delle differenze tra le media di tutte le medie trentennali dei 309 punti, per i due periodi, è stata determinata con un *paired t-test*. Lo stesso test è stato eseguito sulle

medie dei rispettivi CV. Il t-test tuttavia non rileva differenze nella forma della distribuzione delle medie trentennali tra i 309 punti, che era invece oggetto del nostro studio. A questo scopo è stato pertanto eseguito anche il test di Kolmogorov-Smirnov (KS-test).

5.3 Risultati e discussione

I dati E-OBS di temperatura media giornaliera sono stati preliminarmente sottoposti ad una analisi esplorativa, per individuare trend di variazione poliennali (Figura 21). Ne è emerso un evidente trend di crescita, soprattutto a partire dagli anni '80, dove è apprezzabile una discontinuità che coincide con la suddivisione nei due periodi trentennali. La media dell'indice di Winkler è stata di 1485°C per il periodo 1 e di 1699°C per il periodo 2.

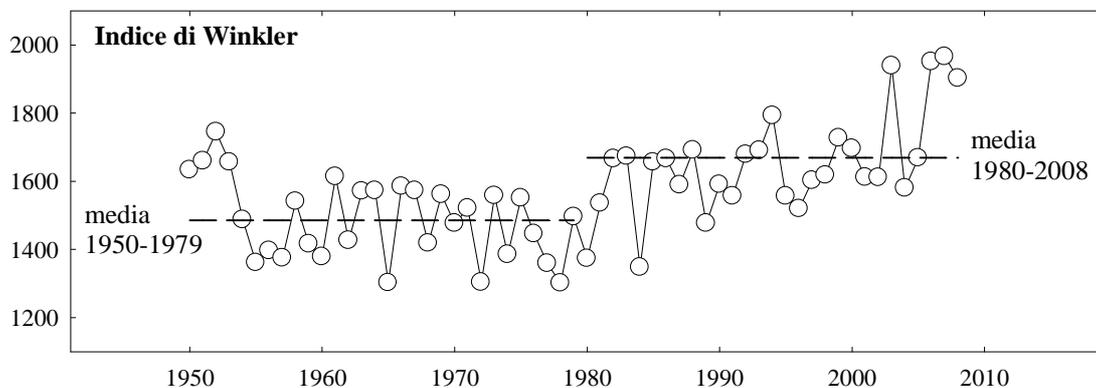


Figura 21. Medie annuali dell'indice di Winkler calcolato sui dati del dataset E-OBS. Le linee tratteggiate individuano la media trentennale per i periodi 1950-1979 e 1980-2008.

La procedura di *downscaling* ha permesso di stimare la temperatura media giornaliera dei siti delle stazioni di misura con uno RMSE di 0.96 °C calcolato sul subset di validazione. L'81.2% dei residui è risultato compreso tra $\pm 1^\circ\text{C}$ e il 92.5% tra $\pm 1.5^\circ\text{C}$. Questo livello di accuratezza è stato considerato sufficiente per ricostruire le serie storiche 1950-2008 per tutte le stazioni di misura, dalle quali sono state poi derivate per interpolazione spaziale le mappe giornaliere di temperatura alla risoluzione di 500 m.

L'intervallo di variazione dell'indice di Winkler nell'area vitata è riportato in Figura 22 in forma di box-plot. Se si considera l'intervallo tra il 10° e 90° percentile, l'indice è variato tra 1267 e 1745 °C durante il periodo 1, e da 1445 ai 1922 °C nel periodo 2, con una differenza tra le medie risultata altamente significativa al t-test ($p < 0.001$). L'indice è cresciuto omogeneamente all'interno dell'area coltivata a vite, senza cambiamenti rilevanti nella forma della distribuzione, come

confermato dal test KS ($p > 0.99$). Il coefficiente di variabilità, che esprime la variabilità interannuale è aumentato in media da 7.5% a 8.9%, ($p < 0.001$, t-test), anche in questo caso senza differenze significative nella forma della distribuzione.

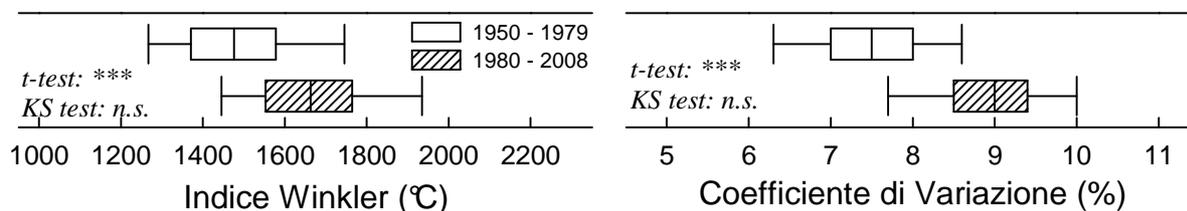


Figura 22. Variabilità dell'Indice di Winkler e del suo Coefficiente di Variazione (medie trentennali) all'interno della zona allo studio nei periodi 1950-1979 e 1980-2008.

L'aumento generalizzato della temperature ha avuto un effetto sulla fenologia di tutte le varietà allo studio. Anche per gli eventi fenologici la variabilità spaziale delle medie trentennali e dei CV è illustrata in forma di box-plot nelle figure 23-26, che riportano anche i risultati dei test t e KS.

Le date stimate per i principali eventi fenologici mostrano un sensibile anticipo nel secondo periodo rispetto al precedente, e in alcuni casi si riscontra anche una variazione della forma della distribuzione. Complessivamente è stata riscontrata una differenziazione nelle medie zonali e nella loro variabilità interannuale per tutte le cultivar, con poche eccezioni. Il test KS ha rilevato differenze significative nella forma della distribuzione solo per il CV relativamente alla fase di fioritura (tutte le cultivar) e invaiatura (Glera e Chardonnay).

Si riportano di seguito le osservazioni in dettaglio per ciascuna fase.

5.3.1 Uscita dalla dormienza

La media trentennale è variata significativamente per tutte le cultivar, e così pure il coefficiente di variazione, mentre il test KS non ha rilevato differenze nella forma della distribuzione (Figura 23).

La data stimata per questo evento ha registrato anticipi di 4-6 giorni, tranne che per il Merlot, dove in controtendenza è risultata posticipata di 1.2 giorni. L'aumento del CV è stato dell'ordine dell'1%.

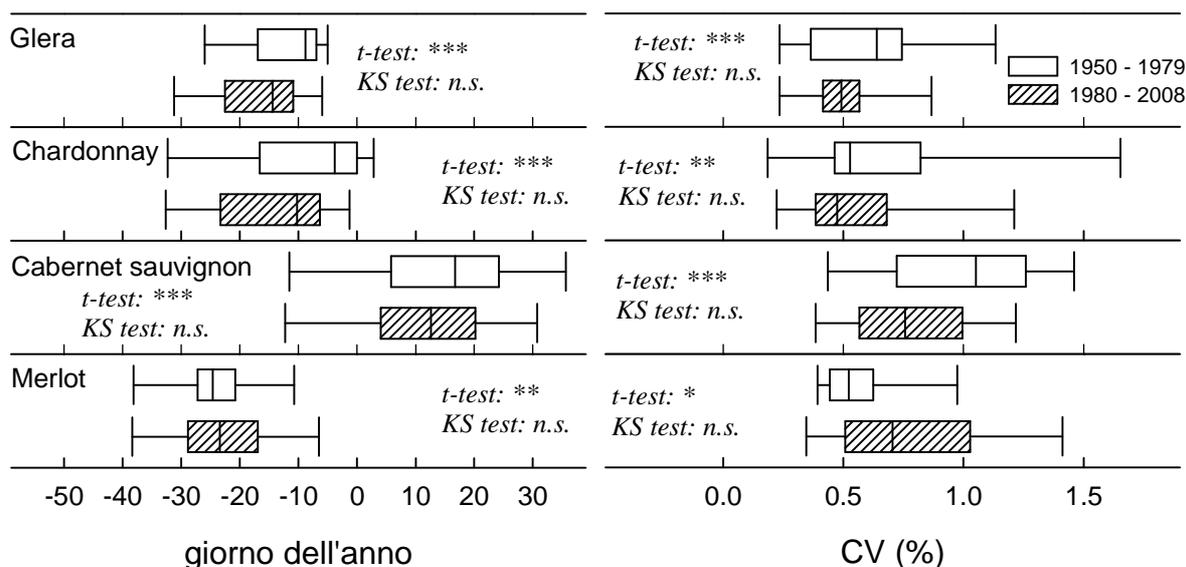


Figura 23. Variabilità spaziale delle medie trentennali delle date di uscita dalla dormienza (grafici di sinistra) e dei coefficienti di variazione (grafici di destra).

5.3.2 Germogliamento

Nel secondo periodo il germogliamento è risultato anticipato di 2-5 giorni, mentre il CV è aumentato di 0.15-1.5%. Il t-test ha rilevato differenze altamente significative ($p < 0.001$) sia per le medie che per il CV, mentre il test KS non ha rilevato differenze per i due indici (Figura 24).

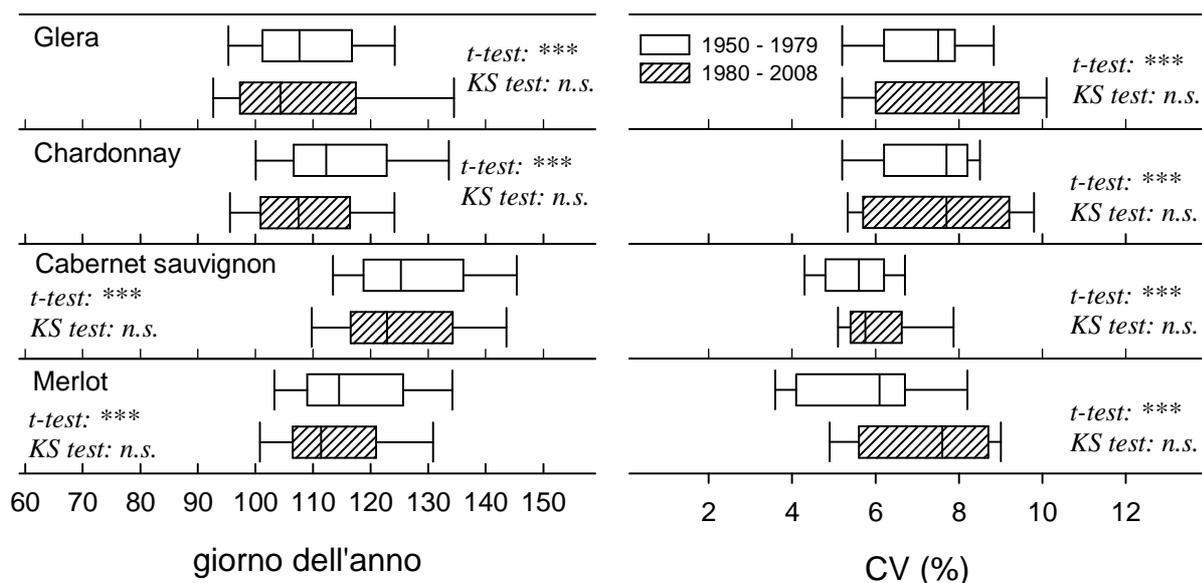


Figura 24. Variabilità delle medie trentennali delle date di germogliamento e dei relativi Coefficienti di Variazione all'interno dell'area allo studio per i periodi 1950-1979 e 1980-2008.

5.3.3 Fioritura

La fioritura ha mostrato lo stesso comportamento delle fasi precedenti, tranne che per il Cabernet Sauvignon., la cui variabilità interannuale non è variata significativamente, anche se per poco ($p = 0.074$), e per lo Chardonnay, che mostra una differenza significativa nella forma della distribuzione del CV (Figura 25). La data di inizio fioritura nel secondo periodo è risultata anticipata di 4-5 giorni, mentre il CV è aumentato di 1.7-1.2%.

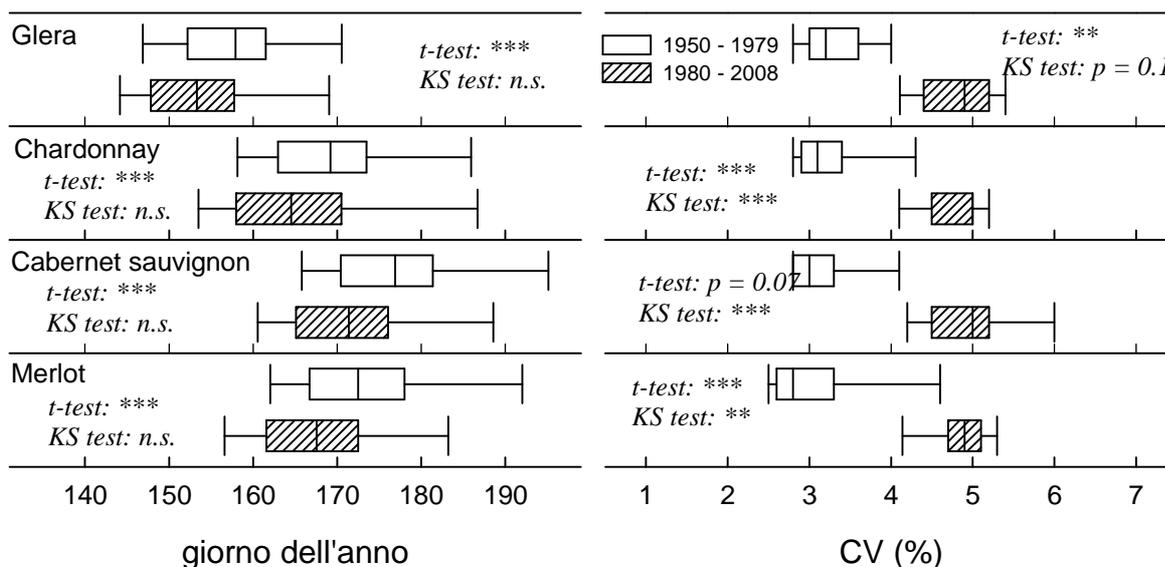


Figura 25. Variabilità delle medie trentennali delle date di fioritura e dei relativi Coefficienti di Variazione all'interno dell'area allo studio per i periodi 1950-1979 e 1980-2008.

5.3.4 Invaiaitura

E' la fase che ha fatto registrare le più ampie variazioni, con un anticipo che è variato da 6 a 10 giorni. Il CV, che è variato da 1 a 1.3, solo su Glera non ha mostrato significatività statistica al t-test, ($p=0.1$). Per quanto invece riguarda la differenza nella distribuzione spaziale, solo Glera a Chardonnay hanno mostrato differenze significative (Figura 26).

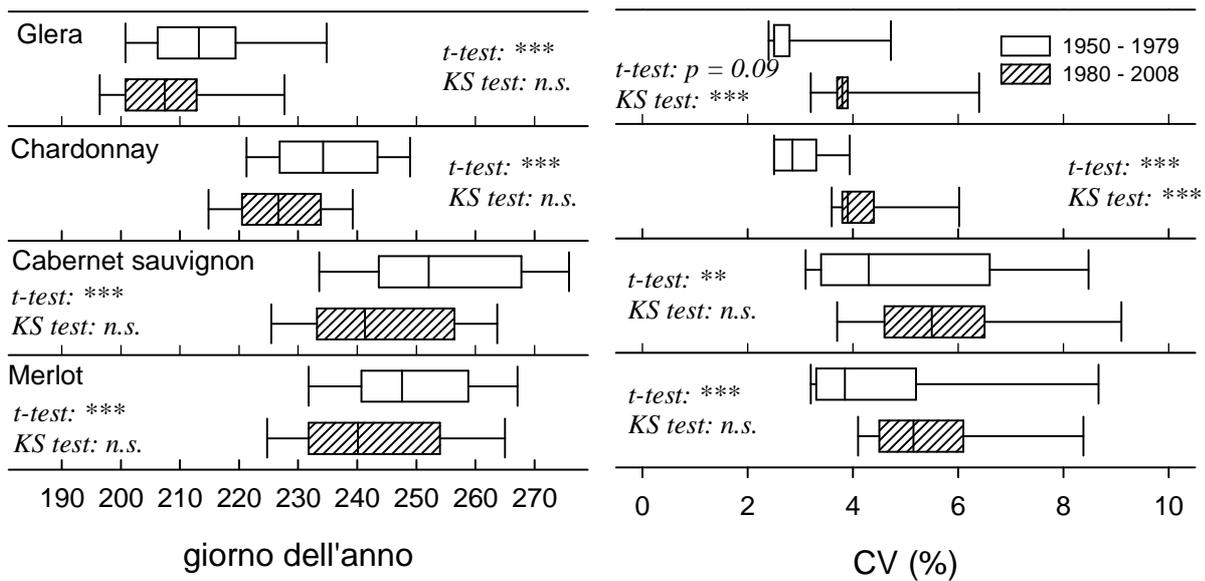


Figura 26. Variabilità delle medie trentennali delle date di invaiatura e dei relativi Coefficienti di Variazione all'interno dell'area allo studio per i periodi 1950-1979 e 1980-2008.

5.4 Conclusioni

La variabilità spazio-temporale della temperatura media giornaliera di una tipica zona viticola del Veneto è stata analizzata combinando una procedura di *downscaling* di un dataset Europeo con tecniche di interpolazione spaziale. Le risultanti mappe giornaliere di temperatura hanno reso possibile un'analisi dei cambiamenti della temperatura media giornaliera intervenuti nel periodo 1950-2008, e dei loro effetti sulla fenologia della vite.

Nel periodo considerato si è avuto un incremento delle temperature cumulate, che ha provocato l'anticipo delle fasi fenologiche. Si è inoltre avuto un aumento della variabilità interannuale sia della temperatura che della fenologia.

Per quanto riguarda le medie trentennali dell'indice di Winkler e delle date stimate per l'inizio delle fasi fenologiche, il grado di accuratezza raggiunto dal metodo di *downscaling* non ha permesso di evidenziare variazioni nella loro distribuzione spaziale, che sono pertanto risultate aumentate in maniera omogenea nel territorio. Sono state invece rilevate disomogeneità nella variazione del CV, e limitatamente alle fasi di fioritura e invaiatura.

Si ritiene in conclusione, che almeno sotto l'aspetto della temperatura, l'aumento registrato nel corso degli ultimi 60 anni non abbia sostanzialmente mutato la caratterizzazione viticola del territorio, mentre il netto aumento della variabilità interannuale potrebbe avere avuto un maggiore

impatto sulla organizzazione aziendale, rendendo più complicata la programmazione delle operazioni colturali.

Capitolo 6 - Modellazione della maturazione con input da telerilevamento

6.1 Introduzione

6.1.1 Modelli di maturazione

La determinazione del momento della vendemmia è una delle operazioni cruciali per il successo del ciclo produttivo annuale. Da essa dipende la corretta organizzazione di tutte le risorse coinvolte nella catena di operazioni che costituisce il processo di trasformazione dell'uva in vino: manodopera, macchinari, trasporto, servizi analitici, stoccaggio, coordinamento con il lavoro della cantina.

Nella maggior parte dei casi, l'individuazione della data di raccolta si basa sul monitoraggio diretto dei parametri qualitativi degli acini, principalmente il contenuto in zuccheri, tramite campionamenti periodici e analisi rifrattometriche. Si tratta certamente di un metodo sicuro, ma anche dispendioso, poiché per essere efficace deve essere praticato con una sufficiente frequenza e in più punti del vigneto, per gestirne la variabilità spaziale.

In alternativa, il monitoraggio della maturazione potrebbe essere svolto attraverso dei modelli matematici, che consentirebbero di ovviare agli onerosi campionamenti in campo, e di praticarlo su maggiori estensioni territoriali.

I più semplici tentativi di modellazione statistica, basati sulla semplice correlazione lineare con le principali variabili climatiche, risalgono a poco più di 30 anni fa (Chudyk et al., 1979). Sono stati successivamente proposti approcci più elaborati, basati su relazioni allometriche (Sadras e McCarthy 2007; Sadras et al. 2008), funzioni del tempo cronologico o termico (Dupin, 2010; Sadras e Petrie, 2011a,b) o su più sofisticati modelli meccanicistici dell'accumulo di zuccheri nella bacca (Dreier et al, 2000; Dai et al 2009; Dai et al. 2010).

Dal punto di vista pratico, il modello ideale dovrebbe avere bisogno di pochi dati di input, o comunque facilmente accessibili e a costo contenuto, dovrebbe fornire risposte in tempo reale e con un ragionevole grado di accuratezza, compatibile con le tolleranze tecniche del processo di vinificazione.

In questa ultima parte del lavoro sono stati messi a confronto tre semplici modelli, basati ciascuno su una sola variabile guida facilmente rilevabile, per determinare il momento di raccolta con buona approssimazione. I primi due si basano sul tempo cronologico sul tempo termico mentre il terzo usa gli indici di vegetazione rilevati via satellite. A differenza delle altre variabili, gli indici di

vegetazione sono influenzati contemporaneamente da più fattori, come il contenuto idrico del suolo, la temperatura, condizioni di stress della pianta, livello nutrizionale, e quindi hanno un contenuto informativo più alto.

La maggiore accessibilità odierna di servizi di telerilevamento, sia di parte pubblica che privata, rende realistica la messa a punto di metodi di monitoraggio basati su questo tipo di dati.

6.1.2 Gli indici di vegetazione

Un **indice di vegetazione** è un'equazione matematica in grado di esprimere delle relazioni quantitative tra i dati telerilevati e i parametri della vegetazione. Il prodotto di questa equazione viene anch'esso definito indice di vegetazione.

L'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) è il primo ed il più comune indice di vegetazione ad essere stato proposto (Kriegler et al. 1969; Rouse et al. 1973; Tucker 1979). È un indicatore basato sulla riflettanza del rosso visibile e del vicino infrarosso. La banda del rosso coincide con la zona di massimo assorbimento della clorofilla, mentre quella dell'infrarosso si trova nel plateau di alta riflettanza, dovuto alle componenti della parete cellulare.

L'NDVI viene calcolato mediante la seguente espressione:

$$NDVI = \frac{(NIR - red)}{(NIR + red)}$$

dove *NIR* rappresenta il vicino infrarosso (*Near InfraRed*), mentre *red* rappresenta la banda del rosso visibile. Al numeratore e denominatore compaiono rispettivamente le quote di radiazione riflessa e incidente.

L'NDVI è risultato ben correlato con lo “stato di salute” della vegetazione, inteso fondamentalmente come biomassa, densità di area fogliare e processo fotosintetico (Gamon et al. 1995), in quanto una vegetazione sana e vigorosa assorbe una quota maggiore di luce visibile mentre riflette maggiormente nel vicino infrarosso, alzando così il valore di NDVI. Viceversa, una vegetazione sparsa, degradata o poco funzionante, riflette la luce visibile più del vicino infrarosso, generando quindi bassi valori di NDVI.

Nel presente studio sono state utilizzate misure da satellite, le quali risentono di alcune limitazioni, dovute a influenze delle condizioni atmosferiche (Holben, 1986), a saturazione del segnale oltre certi valori-soglia (Lillesaeter, 1982) e all'effetto *background* (effetto sfondo) del suolo (Huete, 1987).

Per ovviare a questi problemi è stato elaborato un altro indice di vegetazione, l'EVI (*Enhanced*

Vegetation Index), che viene calcolato in modo simile all'NDVI, ma introducendo le informazioni della banda del blu per correggere le distorsioni causate dalle particelle presenti nell'aria e dalla copertura del suolo al di sotto della vegetazione.

L'equazione per il calcolo dell'EVI è la seguente:

$$EVI = \frac{G \cdot (NIR - red)}{NIR + C1 \cdot red - C2 \cdot blue + L}$$

dove: *NIR*, *red* e *blue* sono le bande spettrali dell'infrarosso, del rosso e del blu; *C1* e *C2* sono coefficienti utilizzati per la correzione degli aerosol in funzione della riflettanza nel blu; *L* è un coefficiente per la correzione del suolo; *G* è il "gain factor".

I coefficienti utilizzati nell'algoritmo sono: *L*=1, *C1*=6, *C2*=7.5, *G*=2.5.

6.1.3 Le missioni MODIS

Verso la fine degli anni '90 la NASA avviò un programma per l'osservazione della Terra dallo spazio chiamato EOS (*Earth Observing System*) con l'obiettivo di monitorare le terre emerse, la superficie del suolo, la biosfera, l'atmosfera e gli oceani. In due satelliti lanciati in orbita rispettivamente nel 1999 (*EOS Terra*) e nel 2002 (*EOS Aqua*), tra i vari strumenti di bordo è stato inserito anche il MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Si tratta di uno spettrometro attivo su 36 bande spettrali con risoluzioni spaziali di 250, 500 e 1000 m a seconda della banda, e dove la risoluzione maggiore è riservata alle bande usate per il calcolo degli indici di vegetazione. I due satelliti effettuano due passaggi giornalieri in prossimità di una stessa zona. Il satellite *Terra* passa sull'Italia intorno alle ore 10:30 del mattino e della sera (ora italiana), mentre *Aqua*, passa verso le 01:30 del mattino e del pomeriggio. Per ogni punto della superficie terrestre le due missioni forniscono complessivamente quattro immagini, due diurne e due notturne, fornendo importanti informazioni per lo studio dell'atmosfera, degli oceani, della superficie terrestre e del bilancio dell'energia radiante del pianeta. L'obiettivo del MODIS è quello di studiare la Terra come un unico sistema, con particolare attenzione alle interazioni tra l'atmosfera, la terra e gli oceani (Barnes et al. 1998).

I dati grezzi misurati dal MODIS sono resi disponibili giornalmente, ma sono pure rilasciati alcuni prodotti già elaborati, come gli indici di vegetazione che in seguito verranno descritti, con una risoluzione temporale di 8 o 16 giorni a seconda della risoluzione spaziale del dato.

6.2 Materiali e metodi

6.2.1 Dati di maturazione

I dati utilizzati in questo studio sono stati raccolti dal Centro per l'Educazione, la Cooperazione e l'Assistenza Tecnica (C.E.C.A.T.) di Castelfranco Veneto. Il C.E.C.A.T. è un organismo accreditato dalla Regione Veneto per l'erogazione di servizi di formazione continua nel settore agricolo ed agroindustriale veneto, che svolge anche attività di assistenza tecnica e di sperimentazione.

Le osservazioni si estendono per un ventennio, dal 1992 al 2010, e riguardano le varietà Chardonnay, Merlot, Cabernet Sauvignon e Glera.

Per quanto riguarda l'analisi del tenore zuccherino, i campionamenti sono stati fatti a cadenza settimanale fino alla data della vendemmia, per un totale di 8-10 campioni per varietà e per anno. I campionamenti iniziavano sempre 10-12 giorni prima dell'invasatura, quando il grado zuccherino era inferiore a 5° Bx, in modo da rilevare anche la parte iniziale della curva di maturazione. Infatti, all'inizio dell'invasatura il contenuto degli zuccheri è già mediamente sui 6-8 °Bx. Per la misurazione del grado zuccherino è stato utilizzato un rifrattometro ottico portatile comunemente utilizzato in viticoltura.

I campioni consistevano di 30-60 porzioni di grappoli per appezzamento, prelevati uniformemente da tutte le parti del grappolo, da più punti del vigneto scelti casualmente. Gli acini appena raccolti sono poi stati messi in sacchetti di plastica, quindi etichettati e conservati in una borsa frigo fino all'arrivo in laboratorio.

I campionamenti hanno riguardato 52 aziende distribuite nella provincia di Treviso, e in poche località della provincia di Padova, nei dintorni di Campodarsego. La maggior concentrazione dei campionamenti si trova comunque nella zona di Valdobbiadene, dove è prevalente la coltivazione del vitigno "Glera" e "Glera lungo", per la produzione del vino Prosecco DOC e DOCG.

I "trattamenti", ossia le minime unità sperimentali considerate, consistevano nelle combinazioni di cultivar/sito, in tutto 86. Il numero delle combinazioni è più numeroso del numero di aziende per il fatto che in alcune di queste sono state campionate più cultivar.

Per due aziende in provincia di Treviso (a Pezzan d'Istrana, con dati disponibili dal 1986 ad oggi, e a Venegazzù, con dati sono disponibili a partire dal 1992) sono state effettuate anche osservazioni fenologiche (classificate secondo Baggiolini, 1952).

6.2.2 Dati meteorologici

Le serie storiche di temperatura giornaliera minima e massima sono state acquisite presso 18 stazioni dell'ARPAV (Agenzia Regionale Prevenzione Ambientale del Veneto) e da una stazione del CECAT localizzata nel sito di Pezzan d'Istrana.

La distribuzione sul territorio dei siti di rilevamento dei dati di maturazione e delle stazioni meteorologiche è illustrata nella Figura 27.

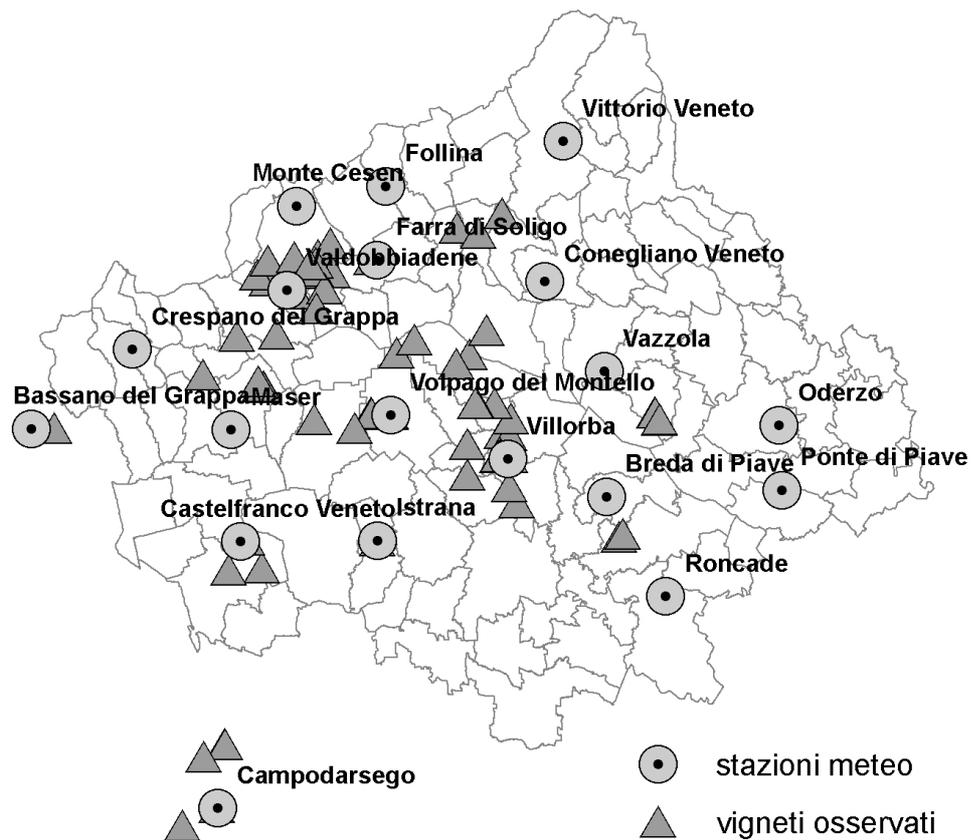


Figura 27. Mappa della provincia di Treviso con i siti di rilevamento dei dati di maturazione e delle stazioni meteorologiche utilizzate.

I dati di temperatura sono stati interpolati per ciascun sito di osservazione attraverso la procedura *Inverse Distance Weighting* secondo il metodo di Shepard (Shepard, 1968)

$$u(x) = \frac{\sum_{i=0}^N w_i(x) u_i}{\sum_{j=0}^N w_j(x)}$$

dove:

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p}$$

e dove x indica la posizione per la quale si vuole interpolare la grandezza in esame, x_i è un punto noto, d è la distanza del punto da interpolare x dal punto noto x_i , N è il numero totale dei punti noti usati nell'interpolazione, p è un numero reale positivo. Nella procedura adottata si è posto $p = 2$.

6.2.3 Dati MODIS

Nelle elaborazioni che sono state fatte è stato utilizzato esclusivamente l'indice di vegetazione EVI, perché in prove preliminari aveva fornito risultati migliori. I dati MODIS disponibili sono stati ottenuti per ciascun sito dal portale http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl (agosto 2011). Per ogni singolo vigneto è stato acquisito l'indice di vegetazione per una griglia quadrata dal lato di 1 km per un totale di 81 pixel di 250x250 m. Il pixel centrale corrisponde alle coordinate geografiche del vigneto e per le elaborazioni dell'indice di vegetazione è stato utilizzato il valore EVI medio dell'area di 1 km² intorno al punto.

6.2.4 Descrizione dei modelli

Sono stati definiti tre modelli di previsione degli zuccheri, basati su tre variabili guida: Modello DOY; Modello GDD e Modello EVI.

Modello DOY - Il modello usa come variabile guida le date dei singoli campionamenti, espresse come giorno dell'anno (DOY = *day of the year*). Per valutare la capacità del modello di stimare il grado zuccherino nel corso dell'accumulo, sono stati scelti delle concentrazioni di riferimento, riconducibili ai livelli di maturazione iniziale, intermedio e ottimale. Per le cultivar bianche, i gradi Brix corrispondenti a questi tre livelli sono stati 10°, 15° e 18° Bx, mentre per le cultivar rosse sono

stati 10°, 15° e 20° Bx . Per ciascuno di questi livelli di maturazione e per ogni sito è stata calcolata la data media. L'insieme di tutte le date medie costituisce il “modello” di stima, calibrato singolarmente su ogni sito, che in pratica assegna a dei giorni fissi il raggiungimento di ciascun livello di maturazione.

Modello GDD – In questo modello la maturazione dipende dalla temperatura dell'aria e dai suoi effetti cumulativi secondo l'approccio GDD (*Growing Degrees Days* – gradi giorno). Per il calcolo dei GDD cumulati è stata utilizzata la forma classica del modello mediante la seguente equazione:

$$GDD = \sum_i^n \left(\frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} - T_b \right)$$

dove T_{\min} e T_{\max} rappresentano rispettivamente le temperature minima e massima giornaliera, mentre T_b rappresenta la temperatura base, ovvero la soglia termica al di sotto della quale non si verifica la crescita. La temperatura base è stata assunta pari a 10°C, secondo l'approccio classico di Winkler et al. (1974). La sommatoria dei gradi giorno è iniziata a partire dal primo giorno dell'anno.

Ciò premesso, in modo analogo al modello DOY, sono state calcolate le medie interannuali, per ogni sito e per ogni livello di maturazione, dei GDD in corrispondenza del raggiungimento delle concentrazioni di zuccheri prefissate.

L'applicazione del modello a dati meteo indipendenti consiste semplicemente nel computo dei GDD e nell'assegnazione dei livelli di maturazione quando i GDD superano le soglie specifiche.

Modello EVI - Gli indici di vegetazione dipendono da molte variabili, tra cui la densità di area fogliare e il bilancio idrico del sistema colturale. In pratica, forniscono un valore integrato dello stato di “benessere” della coltura, perciò rispetto al modello GDD ci si aspetta una maggiore capacità di tener conto della complessità e specificità pedoclimatica del sito. Analogamente ai modelli precedenti, per ogni combinazione sito/varietà e per ogni livello di maturazione di riferimento, sono stati calcolati i valori medi interannuali di EVI corrispondenti. Dal momento che l'incremento degli zuccheri nei frutti è il risultato di molteplici fattori ambientali e biologici che agiscono in maniera cumulativa, si è assunto che gli effetti quantificati in maniera integrata dall'EVI agiscano in modo simile, e cioè sul dato cumulato del valore giornaliero dell'indice.

A questo proposito si pone il problema di quando cominciare a calcolare la sommatoria, il che equivale a chiedersi da quando le grandezze a cui l'EVI è sensibile influenzano la maturazione.

Inizialmente l'EVI è stato cumulato a partire dalla data di inizio invaiatura, determinata attraverso il modello GDD precedentemente calibrato (cfr. Capitolo 3). Questo perché altri lavori (Coombe 1992; Keller e Hrazdina 1998; Chervin et al. 2004), ma anche la stessa consuetudine di campo, indicano nell'invaiatura il momento di inizio della maturazione. Dall'analisi delle curve generate si è notato che questo mostrava risultati incoraggianti, ma allo stesso tempo anche dei margini di miglioramento. Come è già stato accennato all'invaiatura l'accumulo di zuccheri si presenta già avviato, e quindi non può essere accettato come momento di inizio dell'accumulo di EVI. Si è pertanto pensato di individuarlo reiterando l'analisi del su una serie di punti di inizio predeterminati, individuati tramite compito dei GDD e intervallati da step di 100 in una prima fase, raffinando la ricerca restringendo l'intervallo a 50 e poi a 10 GDD, fino a trovare il momento di inizio ottimale per ciascuna varietà. I risultati riportati più avanti riguarderanno quelli ottenuti alla fine di questa procedura.

6.2.5 Valutazione statistica dei modelli

I modelli sono stati valutati sotto un profilo applicativo, simulando una procedura di monitoraggio dell'andamento dell'accumulo di zuccheri in tempo reale, per orientare la scelta del momento di vendemmia.

L'accuratezza delle stime è stata valutata attraverso una procedura di *cross validation*. Questo metodo consiste nel suddividere il dataset in due sottoinsiemi complementari, detti *training set* e *testing set*. Sul training set viene calibrato il modello, le cui previsioni vengono testate sull'insieme complementare.

Nel caso in esame, per ogni cultivar dagli n anni di dati disponibili sono stati estratti dei *training set* di $n-1$ dati escludendo a turno ciascuna annata, che è stata usata come *testing set*. Si è quindi ottenuta una distribuzione di scarti, cioè delle differenze tra stime e misure, per ogni combinazione cultivar/sito. Per il confronto tra i modelli si è quindi assunto che un modello è tanto più accurato quanto più ristretta è la distribuzione degli scarti intorno allo 0. In un'ottica di applicazione pratica del metodo è stata quindi proposta come indice di accuratezza la percentuale di scarti compresa nell'intervallo di ± 1 grado Bx, considerata come tolleranza accettabile con gli obiettivi tecnici della vinificazione.

6.3 Risultati

6.3.1 Modello DOY

La Figura 28 riporta i risultati delle elaborazioni per tenori di zuccheri corrispondenti a tre livelli di

maturazione: precoce (10° Bx), intermedio (15° Bx) e tardivo (18° Bx per uve a bacca bianca, 20° Bx per uve a bacca rossa).

In linea generale gli scarti tendono a distribuirsi uniformemente nell'intervallo di variazione considerato. Solo per le uve a bacca rossa è riconoscibile una maggiore concentrazione di scarti inferiori a 1° Bx in valore assoluto, e solo per i tenori di zucchero più elevati elevati (20° Bx), mentre per gli altri livelli zuccherini la risposta del modello si dimostrano scadente. I risultati peggiori sono stati ottenuti per lo Chardonnay dove è a malapena riconoscibile un picco di frequenza in prossimità della classe centrale. Per la Glera la miglior curva è quella fornita della stima per il grado intermedio (15° Bx) anche se presenta una base larga ed un picco centrale contenuto, indice di una maggiore dispersione dei dati.

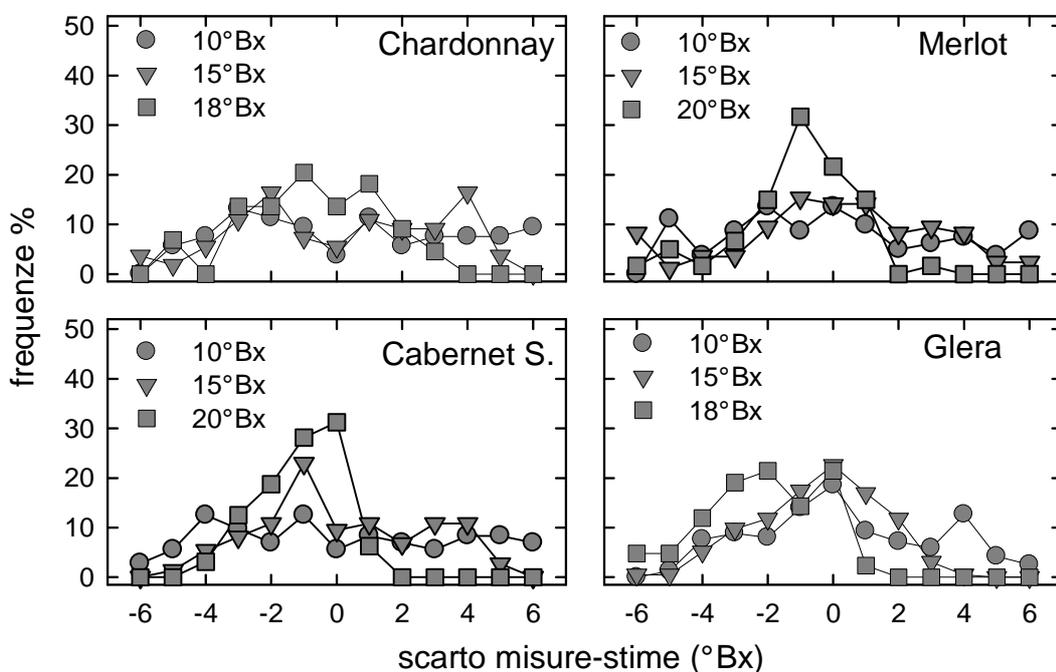


Figura 28. Distribuzione di frequenza relativa, in classi di ampiezza pari a 1° Bx, degli scarti tra misure e stime del contenuto in zuccheri delle bacche determinati attraverso il modello DOY.

6.3.2 Modello GDD

Rispetto al precedente il modello GDD mostra incrementi di accuratezza per alcune cultivar. Nei grafici della Figura 29 è possibile distinguere dei pattern di distribuzione di frequenza degli scarti vicini a quelli attesi, ossia con una maggiore concentrazione attorno al valore 0, dove cioè le stime si avvicinano di più ai valori misurati. Analogamente al modello precedente, questo vale soprattutto per il livello finale di maturazione, su tutte le cultivar. Sul Merlot e sul Glera questa tendenza è riconoscibile anche per i valori iniziali di maturazione, anche se il picco non coincide esattamente col valore centrale.

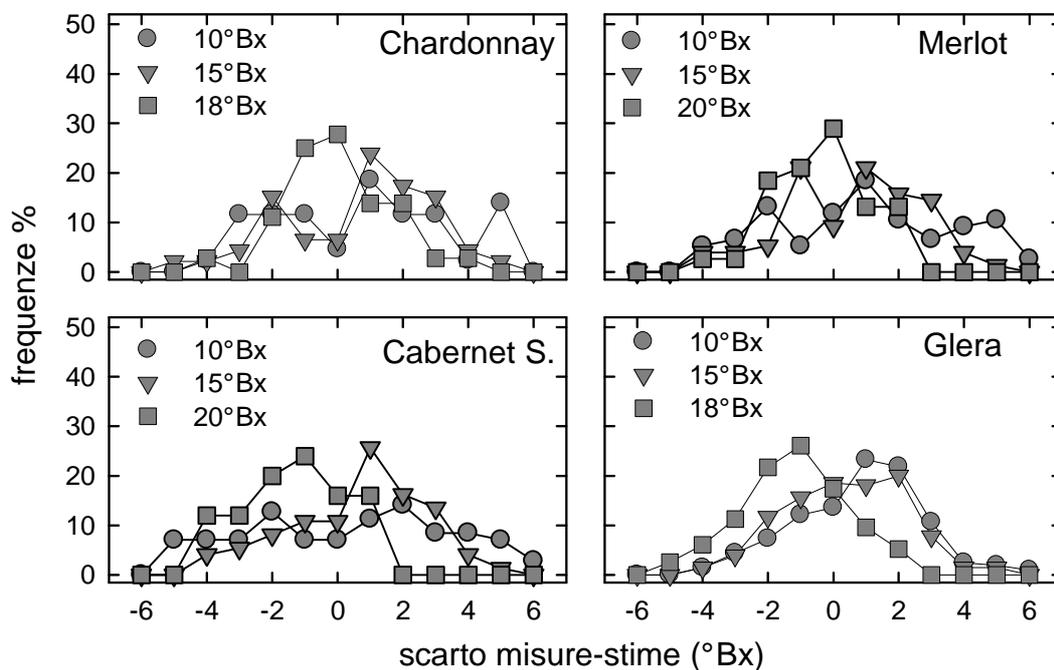


Figura 29. Distribuzione di frequenza relativa, in classi di ampiezza pari a 1° Bx, degli scarti tra misure e stime del contenuto in zuccheri delle bacche determinati attraverso il modello GDD.

6.3.3 Modello EVI

Per tutte le cultivar e per tutti i tenori di zucchero di riferimento è stata eseguita una procedura di ottimizzazione del momento iniziale di accumulo per i valori di EVI, espresso in termini di GDD.

Il punto di inizio accumulo ottimale, espresso in gradi-giorno (°C/giorno) è risultato di 700 per lo Chardonnay, di 1000 per il Merlot, di 1150 per il Cabernet Sauvignon e di 850 per il Glera.

In linea generale le distribuzioni di frequenza ottenute si avvicinano maggiormente all'andamento atteso rispetto ai due modelli precedenti. Le migliori stime si ottengono sempre per i più elevati livelli di zucchero, ma si nota un miglioramento dell'accuratezza anche per gli stadi precoci di maturazione.

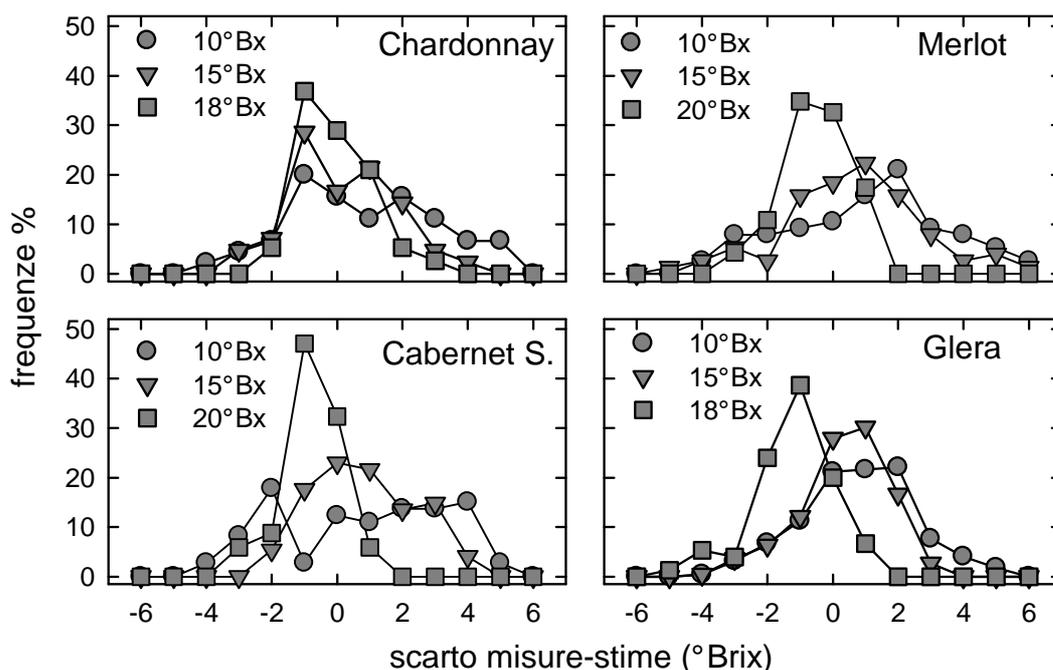


Figura 30. Distribuzione di frequenza relativa, in classi di ampiezza pari a 1° Bx, degli scarti tra misure e stime del contenuto in zuccheri delle bacche determinati attraverso il modello EVI.

La Tabella 30 illustra questi risultati in forma riassuntiva, riportando le percentuali delle stime la cui differenza dai dati osservati risulta minore di 1° Bx in valore assoluto. Appare piuttosto chiara la migliore capacità predittiva dell'approccio basato sui dati EVI. Con la sola eccezione della Glera, il valore ottimale di raccolta è stimato con buona approssimazione per più dell'84% dei casi. Anche ai valori intermedi il modello EVI si dimostra superiore, con l'eccezione del Merlot e per lo stadio iniziale per quanto riguarda il Cabernet Sauvignon.

Tabella 17. Percentuali di osservazioni la cui differenza dai dati osservati è < 1° Bx in valore assoluto.

CULTIVAR	Chardonnay			Merlot			Cabernet S.			Glera		
	10	15	18	10	15	20	10	15	20	10	15	18
DOY	24.5	23.6	52.3	32.1	43.5	68.3	26.4	43.2	65.6	41.8	56.9	38.1
GDD	34.9	37.0	64.3	35.5	51.3	63.2	25.4	47.3	56.0	49.0	52.2	53.0
EVI	46.7	67.2	86.8	35.5	56.6	84.8	26.0	62.2	85.3	54.1	70.3	65.3

6.4 Discussione

Dai risultati ottenuti è possibile affermare che, salvo poche eccezioni, l'accuratezza dei modelli GDD ed EVI è superiore a quella offerta dal modello DOY. Il modello EVI è risultato poi superiore al modello GDD, grazie al maggior contenuto informativo dell'indice di vegetazione, i cui valori

dipendono infatti da fattori strettamente legati alla capacità produttiva, come la capacità fotosintetica delle piante, la densità di area fogliare, la disponibilità idrica e la evapotraspirazione (es. Nagler et al. 2005).

Le migliori stime sono state ottenute, in linea generale, per i più alti tenori zuccherini. Questo si spiega facilmente con il fatto che le curve di accumulo degli zuccheri raggiungono un plateau alle più elevate concentrazioni zuccherine (dell'ordine di 18-20° per le uve a bacca bianca e di 21-23° per quelle a bacca rossa), dove si attenua l'effetto della variabile guida fino a cessare del tutto, e diminuendo la variabilità interannuale. In ogni caso, il modello EVI mantiene sempre una maggiore accuratezza.

Dai risultati ottenuti si è però osservato che la capacità predittiva del modello dipende dalla scelta del momento di inizio per calcolare l'accumulo dell'EVI. Le migliori performance si ottengono a partire da uno momento abbastanza avanzato del ciclo stagionale, prossimo o oltre le 800 GDD, ma sempre antecedente l'invasatura, che a seconda delle cultivar si registra al raggiungimento di 1000-1200 GDD. Questo fatto mette in risalto almeno due importanti aspetti. Il primo dimostra che il momento dell'invasatura non è il punto di partenza migliore per l'accumulo dell'EVI, sebbene sia universalmente riconosciuto come il momento di inizio della maturazione. Questi risultati trovano riscontro in studi recenti che dimostrano che le dinamiche tipiche della maturazione (sintesi e accumulo degli zuccheri, dei polifenoli ecc.) iniziano circa una decina di giorni prima dell'invasatura (Thomas et al., 2008; Mattheews et al., 2009).

Il secondo aspetto mette in evidenza che tutto ciò che accade prima di questo momento sembra essere ininfluenza, o comunque poco rilevante, sulla fisiologia di maturazione delle bacche in termini di accumulo degli zuccheri. Questo potrebbe far pensare che la maturazione dei frutti goda, in qualche modo, di una certa indipendenza dalla fase di accrescimento e di sviluppo della pianta (fino alla fase riproduttiva). Numerosi studi hanno valutato l'importanza degli effetti di una corretta disponibilità idrica nonché le conseguenze dello stress idrico sull'accrescimento delle bacche (Hardie e Considine 1976; Kliewer et al., 1983), l'importanza di una adeguata condizione nutrizionale delle piante (Keller et al., 1998a,b), e gli effetti delle temperature e dell'esposizione luminosa sulla crescita e lo sviluppo dei grappoli (Dokoozlian and Kliewer, 1996). L'approccio modellistico non ha smentito certamente le acquisizioni fisiologiche ma si è solo concentrato sulle dinamiche di accumulazione degli zuccheri utilizzando pochi elementi che rappresentano una serie molto numerosa di variabili genetiche ed ambientali.

L'utilizzo dell'EVI medio del kilometro quadrato attorno al punto, ha dato risposte migliori rispetto al dato EVI puntuale, perché probabilmente ampliando la zona di interesse si riescono a cogliere in modo più preciso le influenze delle variazioni del bilancio idrico che la misurazione di un singolo

pixel non riesce a interpretare così bene in un tempo limitato.

In conclusione, l'approccio per monitorare mediante stima il grado Brix in tempo reale applicato a questo dataset, ha dimostrato che il remote sensing ha un maggiore contenuto informativo e quindi ha consentito di avere delle stime con buone accuratezze. Però, nel modo in cui è stato impostato, l'approccio richiede comunque dati campionari di maturazione per calibrare il modello per ogni singolo sito, perciò il modello stesso calibrato su un sito, non è applicabile in altre situazioni.

I prossimi sviluppi dovranno cercare il modo di estendere la capacità predittiva del modello in maniera più generale per raggiungere l'obiettivo di avere un solo modello che funzioni per un'ampia scala territoriale senza la necessità di ricorrere a campionamenti in situ.

Appendice - Valutazione della performance di modelli biofisici attraverso un indicatore aggregato basato sulla *fuzzy logic*

A.1 La valutazione multimetrica dei modelli biofisici

Il crescente interesse che l'uso dei modelli di simulazione dei processi biofisici sta incontrando nel campo della ricerca agro-ambientale, rende cruciale la definizione di adeguate tecniche di valutazione della loro *performance*, cioè della loro capacità di riprodurre il comportamento dei sistemi studiati in maniera adeguata secondo i criteri di valutazione adeguati agli scopi della ricerca. Tra i vari contributi pubblicati sull'argomento sono da segnalare quelli di Rykiel (1996) e di Bellocchi et al. (2010).

Data la grandissima varietà di applicazioni che si avvalgono di modelli matematici, l'approccio che sta raccogliendo i maggiori consensi è quello di usare procedure di valutazione messe a punto per ogni specifico caso (Bellocchi et al. 2002; Confalonieri et al. 2009), piuttosto che stabilire un'unica metodologia standardizzata, valida per ogni tipo di problema.

Se lo scopo della ricerca, per fare un esempio, è quello di ottenere modelli statistici semplici e robusti, per applicazioni pratiche calibrate su situazioni molto specifiche, come una curva di regressione del tipo: resa della coltura vs. dose di fertilizzante, avrà più importanza l'accuratezza media delle stime nel caso concreto allo studio, piuttosto che la validità generale del modello. Al contrario in uno studio finalizzato a comprendere le basi meccanicistiche di un processo, avrà importanza agli occhi del ricercatore anche la capacità del modello di rispondere nello stesso modo alla varietà di situazioni possibili nel sistema in esame, coerentemente con le assunzioni e le basi teoriche del modello stesso.

Soprattutto in quest'ultimo caso è tipico valutare la risposta del modello basandosi su più indici statistici, ognuno in grado di valutare un particolare aspetto delle prestazioni del modello secondo gli specifici obiettivi della ricerca.

Bellocchi et al. (2002) hanno proposto un metodo basato sulla logica sfumata (*fuzzy logic*), per considerare simultaneamente una varietà di indici statistici utili a valutare la *performance* di un modello. Il metodo consente di aggregare indici diversi per natura, gamma di variazione e unità di misura, in un solo indicatore adimensionale su una scala di valori definita, in grado di tener conto della diversa importanza attribuita a ciascuno di loro in base alla conoscenza esperta del ricercatore. In questa sezione verranno esposti solo per sommi capi i fondamenti teorici e pratici della logica *fuzzy*. Per una trattazione più completa ed esaustiva si rimanda ai lavori seminali e a monografie specifiche (per esempio Klir e Yuan, 1995).

A.2 Insiemi *fuzzy*

Zadeh (1965) sviluppò la teoria degli insiemi *fuzzy* per estendere la capacità dei modelli matematici di rappresentare concetti e grandezze qualitative, per esempio “caldo” o “alto”. Questo avveniva negli anni in cui si gettavano le basi per i primi sistemi esperti e per sviluppare complessi processi di automazione, che dovevano implementare capacità di controllo in funzione di diverse variabili guida.

L'insieme *fuzzy* è un'estensione del tradizionale concetto di insieme. Quest'ultimo (di seguito chiamato insieme *crisp*), usa funzioni di appartenenza (*membership*) che restituiscono solo i valori booleani di “vero” o “falso”. In altri termini, per un dato ente si può solo stabilire se appartiene o no ad un dato insieme.

Nella logica *fuzzy*, un dato ente può appartenere contemporaneamente a diversi insiemi, con diversi gradi di appartenenza. Per esempio una persona di 50 anni di età, può appartenere all'insieme dei “giovani”, con un basso grado di appartenenza (es. 5%) e all'insieme degli “anziani” con un più alto grado di appartenenza (es. 60%).

Una volta stabilito il concetto di insieme, la teoria *fuzzy* estende le regole logiche per effettuare operazioni sugli insiemi, costituendo così le cosiddette regole *fuzzy*.

A.3 Regole *fuzzy*

Le regole *fuzzy* rappresentano l'estensione delle regole della logica classica applicate agli insiemi *fuzzy*, e ridefiniscono gli operatori logici negazione (NOT), disgiunzione (OR) e congiunzione (AND), più tutti gli altri elementi della logica, es. quantificatori, modificatori e meccanismi inferenziali (Klir e Yuan, 1995).

Più precisamente, le regole *fuzzy* possono essere definite come rappresentazioni di inferenze logiche fatte su combinazioni di “proposizioni *fuzzy*”, che assumono la forma “ $x_i \in A_j$ ”, dove x_i è la variabile allo studio, e A_j è l'insieme *fuzzy* di appartenenza. Sono costituite da un antecedente, da cui viene ricavato per inferenza *fuzzy* il valore di un conseguente.

L'antecedente risulta dalla combinazione di diverse proposizioni *fuzzy*, che può basarsi su diversi operatori booleani, ma in questo lavoro verranno considerate solo quelle unite dall'operatore di congiunzione AND.

La forma più tipica assunta dalle regole utilizzate sarà quindi la seguente:

$$\overbrace{\text{se } (x_1 \text{ è } A_1) \text{ AND } (x_2 \text{ è } A_2)}^{\text{antecedente}} \text{ allora } \overbrace{(y \text{ è } B)}^{\text{conseguente}}$$

Un “modello *fuzzy*” consiste in un insieme di regole che mettono in relazione una serie di variabili di *input* con una serie di variabili di *output*. Nel nostro specifico caso le variabili di *input* sono i singoli indici statistici che quantificano vari aspetti della risposta di un modello biofisico, mentre l’*output* sarà il singolo indicatore finale.

A.4 Un modello *fuzzy* per la costruzione di un indicatore di *performance*

Il metodo di aggregazione descritto qui di seguito si basa sul metodo di inferenza di Sugeno (Sugeno 1985), e si prefigge di ottenere un indicatore che quantifichi la “bontà” del modello in una scala di “qualità”, definita da criteri di valutazioni specifici al problema.

Allo scopo si definiscono due insiemi (o classi) *fuzzy*: F (=Favourable) e U (=Unfavourable), a cui associare rispettivamente le nozioni su base esperta di “prestazione del modello buona” e “prestazione del modello non buona”. La risposta del modello, secondo ciascuna statistica usata, potrà essere assegnata a entrambi gli insiemi secondo scale di giudizio predefinite e basate su una conoscenza esperta, che portano a definire delle funzioni di membership. Il grado di *membership* viene individuato su una scala che va da 0 (= non appartenenza all’insieme) a 1 (= totale appartenenza all’insieme).

Per ogni statistica si possono definire delle soglie arbitrarie, fondate sull’esperienza, oltre la quale la risposta del modello può essere classificata “buona” (F) oppure “non buona” (U). Per esempio, per i modelli di fenologia studiati nel Capitolo 2, un valore di RMSE sopra i 10 giorni è stato considerato come indice di insuccesso del modello (= totale appartenenza all’insieme U e nessuna appartenenza all’insieme F), mentre un valore inferiore a 1 è stato assunto come pieno successo della stima (= totale appartenenza all’insieme F e nessuna appartenenza all’insieme U). Per i valori che ricadono tra le due soglie, il grado di *membership* per ciascuna della due classi assume valori intermedi calcolati con delle funzioni di transizione. Nel caso più semplice queste potranno essere lineari, ma è possibile adottare funzioni di altro tipo. In questo lavoro sono state usate curve a “S”, in modo da assicurare una transizione graduale dell’indice tra i valori soglia (Liao, 2002). Se α e γ sono i valori-soglia per un dato indice statistico, le funzioni di *membership* sono così definite:

$$S(x; \alpha; \lambda) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha \\ 2 \times \left(\frac{x - \alpha}{\gamma - \alpha} \right)^2 & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 - 2 \times \left(\frac{x - \alpha}{\gamma - \alpha} \right)^2 & \beta \leq x \leq \lambda \\ 1 & x \geq \lambda \end{cases}$$

dove $\beta = (\alpha + \gamma) / 2$

Due termini *fuzzy* adiacenti con funzioni S di *membership* si sovrappongono nel punto intermedio tra i due estremi. La funzione S sopra riportata rappresenta solamente la transizione in un senso tra i due estremi. La transizione in senso opposto è data dal complemento a 1 (Figura A.1).

funzioni di membership

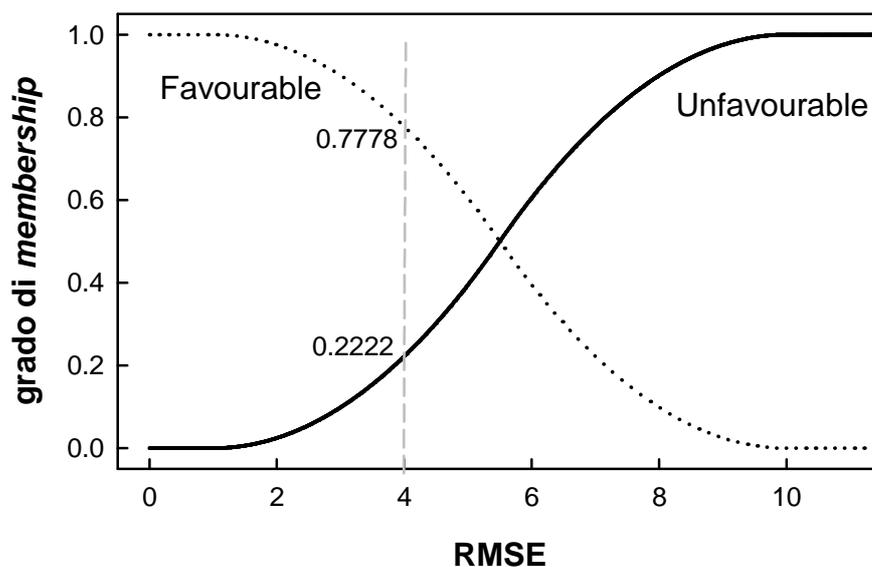


Figura A.1. Funzioni di appartenenza (*membership*) per gli insiemi fuzzy “Favourable” e “Unfavourable”. Per un RMSE = 4 corrisponde un grado di *membership* all’insieme Favourable di 0.2222, e di 0.7778 all’insieme Unfavourable.

Una volta definiti gli insiemi *fuzzy* e le funzioni di *membership*, il processo di aggregazione procede attraverso i seguenti passaggi.

- 1) “fuzzificazione”

I valori reali calcolati da ciascuna statistica vengono interpretati in termini di *fuzzy set*, calcolando per entrambi gli insiemi F e U il valore di *membership*.

2) combinazione dei valori nell'antecedente

Viene calcolato un “valore di verità” complessivo per l'antecedente, per ciascuna regola che compone il modello, dove le diverse clausole (es. “se RMSE è F”) sono collegate dall'operatore AND. Per un indicatore (FI = *fuzzy index*) basato su due indici (es. RMSE e R^2), è necessario definire quattro regole:

se (RMSE è F) AND (R^2 è F) allora (y è B_1) [regola 1]

se (RMSE è F) AND (R^2 è U) allora (y è B_2) [regola 2]

se (RMSE è U) AND (R^2 è F) allora (y è B_3) [regola 3]

se (RMSE è U) AND (R^2 è U) allora (y è B_4) [regola 4]

B è un numero che quantifica il peso relativo assegnato alla regola.

Secondo il metodo di inferenza di Sugeno, il valore vero di una regola di decisione è definito come il più piccolo dei veri valori dell'antecedente. Pertanto, un subset *fuzzy* è assegnato a ciascuna variabile di *output* per ciascuna regola usando l'aggregatore “min”, dove min significa “il valore minimo di”. Si possono definire con w_i ($i = 1, \dots, 4$) i valori veri delle regole come segue:

$w_1 = \min(F(\text{'RMSE}), F(\text{'R}^2))$ [valore vero della regola 1]

$w_2 = \min(F(\text{'RMSE}), U(\text{'R}^2))$ [valore vero della regola 2]

$w_3 = \min(U(\text{'RMSE}), F(\text{'R}^2))$ [valore vero della regola 3]

$w_4 = \min(U(\text{'RMSE}), U(\text{'R}^2))$ [valore vero della regola 4]

dove:

$F(\text{'RMSE}); U(\text{'RMSE})$ – grado di *membership* per gli insiemi F e U per un dato valore di RMSE;

$F(\text{'R}^2); U(\text{'R}^2)$ – grado di *membership* per gli insiemi F e U per un dato valore di R^2 .

Una volta ottenuto il valore dell'antecedente, occorre tradurlo in un valore per il conseguente, moltiplicando il valore vero della regola per il corrispondente fattore di ponderazione esperto.

3) combinazione dei valori dei conseguenti

Il valore finale ($FI =$ fuzzy indicator) è dato dalla somma di tutti i conseguenti, pesato sulla somma dei valori di verità:

$$FI = \frac{w_1 \times B_1 + w_2 \times B_2 + w_3 \times B_3 + w_4 \times B_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}$$

A.5 Esempio numerico

Il seguente esempio è tratto da Bellocchi et al. (2002). PI_{doy} e PI_{Tmin} sono due indici statistici (“Pattern Index” relativo alla data e alla temperatura minima) che si vogliono aggregare in un unico indicatore.

PI_{doy}		PI_{Tmin}		peso esperto (B_i)	valore vero (w_i)	$w_i \times B_i$
classe fuzzy	grado di membership	classe fuzzy	grado di membership			
F	0.2222	F	0.5644	0.00	0.2222	0.0000
F	0.2222	U	0.4356	0.50	0.2222	0.1111
U	0.7778	F	0.5644	0.50	0.5644	0.2822
U	0.7778	U	0.4356	1.00	0.4356	0.4356
					$\sum w_i =$	$\sum w_i \times B_i =$
					0.8289	1.4444

Output finale (FI) $(0.8289/1.4444) = \mathbf{0.5739}$

Figura A.2. Esempio numerico di calcolo di un indicatore aggregato basato su due indici (PI_{doy} e PI_{Tmin})

Bibliografia

- Abraha M.G., Savage M.J. 2008. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology* 148:401–416.
- Baggiolini M. 1952. Stades repères de la vigne. *Revue Romande d'Agriculture, de Viticulture et d'Arboriculture* 8(1):4-6
- Banks J., Carson J.S. 1984. Discrete-event system simulation. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 514 p.
- Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V. 1998. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4):1088– 1100
- Bellocchi G., Acutis M., Fila G., Donatelli M. 2002. An Indicator of Solar Radiation Model Performance based on a Fuzzy Expert System. *Agronomy Journal* 94:1222–1233.
- Bellocchi G., Rivington M., Donatelli M., Matthews K. 2010. Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30:109–130
- Bernstein Z. 1984. L'amélioration de la régulation de débourrement dans les régions à hiver doux. *Bulletin de l'OIV* 57:478–488.
- Bois B., Van Leeuwen C., Pieri C., Gaudillere J.P., Saur E., Joly D., Wald L., Grimal D. 2008. Viticultural agroclimatic cartography and zoning at mesoscale level using terrain information, remotely sensed data and weather station measurements. Case study of Bordeaux winegrowing area. *Proceedings of the VIIth International Terroir Congress*, Nyon, Switzerland, 19-23 May 2008.
- Bonhomme R. 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy* 13, 1-10.
- Botelho R.V., Pavanello A.P., Pires E.J.P., Terra M.M., Muller M.M.L. 2007. Effects of chilling and garlic extract on bud dormancy release in Cabernet Sauvignon cuttings. *American Journal of Enology and Viticulture* 58:402–404.
- Caffarra A., Eccel E. 2010. Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv. Chardonnay. *International Journal of Biometeorology*. 54:255-267.
- Caffarra A., Eccel E. 2011. Projecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine

in a mountain area. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 17:52-61.

Calò A., Costacurta A., Nicolin G. 1976. Indagini sul ruolo della temperatura e sul comportamento di alcune varietà di vite (*V. vinifera* L.) in relazione al momento del germogliamento. *Rivista di Viticoltura ed Enologia* 4:135-147.

Cannell M.G.R., Smith R.I. 1983. Thermal Time, Chill Days and Prediction of Budburst in *Picea sitchensis*. *Journal of Applied Ecology* 20:951-963.

Carbonneau A., Cargnello G., Ojeda H., Tonietto J., Schultz H. .2010. Synthesis of the contribution of the GiESCO (Group of international Experts of vitivincultural Systems for CoOperation). *Proceedings of the VIII International Terroir Congress*, June 14th-18th, Soave (VR) Italy, vol 1, pp16-21

Cerny V. 1985. A thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45:41-51.

Cesaraccio C., Spano D., Snyder R.L., Duce P. 2004. Chilling and forcing model to predict budburst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology* 126:1-13.

Chervin C., El-Kereamy A., Roustan J.P., Latché A., Lamon J., Bouzayen M. 2004. Ethylene seems required for the berry development and ripening in grape, a non-climateric fruit. *Plant Science* 167: 1301–1305

Chudyk R.V., Crowther R.F., Bradt O.A. 1979. Use of Meteorological Data to Estimate Field Sugar Levels in Concord Grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 30(3):253-255.

Chuine I. 2000. A Unified Model for Budburst of Trees. *Journal of Theoretical Biology* 207:337-347.

Chuine I., Cour P., Rousseau D.D. 1998. Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing. *Plant Cell Environment* 21:455-466.

Chuine I., Cour P. 1999. Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone-tree species. *New Phytologist* 143:339-349.

Chuine I. Cour P., Rousseau D.D. 1999b. Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modelling. *Plant Cell Environment* 22:1-13

Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Ladurie E.L. 2004. Historical phenology: grape ripening as a past climate indicator. *Nature* 432:289–290

Confalonieri R., Acutis M., Bellocchi G., Donatelli M. 2009. Multi-metric evaluation of the models

- WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological Modelling* 220:1395–1410
- Confalonieri R., Bregaglio S., Bocchi S., Acutis M. 2010. An integrated procedure to evaluate hydrological models. *Hydrological Processes* 24:2762-2770.
- Coombe B.G. 1992. Research on development and ripening of the grapeberry. *American Journal of Enology and Viticulture* 43:101–10
- Corana A., Marchesi M., Martini C., Ridella S. 1987. Minimizing Multimodal Functions of Continuous Variables with the ‘Simulated Annealing’ Algorithm. *ACM Transactions on Mathematical Software* 13:262-280.
- De Cortázar-Atauri I.G., Brisson N., Gaudillere J.P. 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology* 53:317-326.
- Dai Z.W., Vivin P., Robert T., Milin S., Li S.H., Génard M. 2009. Model-based analysis of sugar accumulation in response to source–sink ratio and water supply in grape (*Vitis vinifera*) berries. *Functional Plant Biology* 36:527–540.
- Dai Z.W., Vivin P., Barrieu F., Ollat N., Delrot S. 2010. Physiological and modelling approaches to understand water and carbon fluxes during grape berry growth and quality development: a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16:70–85.
- Deloire A., Vaudour E, Carey V, Bonnardot V, Van Leeuwen C 2005. Grapevine responses to terroir: a global approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 39(4):149-162.
- Diodato N., Bellocchi G. 2007. Modelling solar radiation over complex terrains using monthly climatological data. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:111–126.
- Dokoozlian N.K. 1999. Chilling Temperature and Duration Interact on the Budbreak of ‘Perlette’ Grapevine Cuttings. *HortScience* 34:1-3.
- Dokoozlian N.K., Kliewer W.M. 1996. Influence of light on grape berry growth and composition varies during fruit development. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 121(5):869–874.
- Donatelli M 1995. Sistemi nella gestione integrata delle colture – appunti delle lezioni. Pubblicazione speciale dell’Istituto Sperimentale Agronomico, ISA-Sezione di Modena, Modena, 133 pag. Progetto finalizzato PANDA, Serie Generale, Pubblicazione n. 3.
- Donatelli M., Wösten J.H.M., Bellocchi G. 2005. Evaluation of pedotransfer functions. In:

- Pachepsky, Y.A., Rawls, W. (Eds.), Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Developments in Soil Science, vol. 30. Elsevier, Amsterdam, pp 357–363.
- Dreier L.P., Stoll G.S., Ruffner H.P. 2000. Berry Ripening and Evapotranspiration in *Vitis vinifera* L. *American Journal of Enology and Viticulture* 51(4):340-346.
- Duchêne E., Schneider C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development* 25:93-99.
- Duchêne E., Huard F., Dumas V., Schneider C., Merdinoglu D. 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research* 41:193-204.
- Dupin S., Tisseyre B., Roger J.M., Gobrecht A. 2010. Utilisation de données historiques pour caractériser le Millésime en cours. *In: Proceedings of the VIII International Terroir Congress*, 2:124-128, June 14th-18th, Soave, Italy.
- Fila G., Bellocchi G., Donatelli M., Acutis M. 2003. IRENE_DLL: a class library for evaluating numerical estimates. *Agronomy Journal* 95:1330–1333
- Fila G., Belvini P., Meggio F., Pitacco A. 2010. Validation of phenological models for grapevine in the Veneto region. *In: Proceedings of the VIII International Terroir Congress*, 2:124-128, June 14th-18th, Soave, Italy.
- Fox D.G. 1981. Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion models performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 62:599–609.
- Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L., Griffin K.L., Hartley A.E., Joel G., Peñuelas J., Valentini R. 1995.. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications* 5:28–41.
- Goffe W.L., Ferrier G.D., Rogers J. 1994. Global optimization of statistical functions with simulated annealing. *Journal of Econometrics* 60:65-99.
- Halaly T., Pang X., Batikoff T., Crane O., Keren A., Venkateswari J., Ogradovitch A., Sadka A., Lavee S., Or E. 2008. Similar mechanisms might be triggered by alternative external stimuli that induce dormancy release in grape buds. *Planta* 228:79–88.
- Hall A., Jones G.V. 2009. Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15:97–119
- Hänninen H., Backman R. 1994. Rest break in Norway spruce seedlings: test of a dynamic

- temperature response hypothesis. *Canadian Journal of Forest Research* 24:558-563.
- Hardie W.J., Considine J.A. 1976. Response of grapes to water stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture* 27(2):55-61
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M. 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201
- Hellman E., Shelby S., Lowery C. 2006. Exogenously applied Abscisic Acid did not consistently delay budburst of deacclimating grapevines. *Journal of the American Pomological Society* 60:178-186.
- Holben B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7:1383-1622
- Huete A.R. 1987. Soil influence in remote sensed vegetation-canopy spectra. In: Elachi C. (Ed.) - Introduction to the physics and techniques of remote sensing, Wiley-Interscience 1987, New York, pp. 107-141
- Hunter A.F., Lechowicz M.J. 1992. Predicting the Timing of Budburst in Temperate Trees. *Journal of Applied Ecology* 29:597-604.
- IPCC (2007) Climate change 2007: synthesis report. In: Pachauri RK, Reisinger A (eds) Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team. WMO-UNEP, Geneva. Reperibile sul web alla data di stesura del presente lavoro (dicembre 2011) all'URL: www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- Jackson D.I., Lombard P.B. 1993. Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality—a review. *American Journal of Enology and Viticulture* 44:409–430
- Jones G.V. 2004 Making wine in a changing climate. *Geotimes* 49:24-28
- Jones G.V., Davis R.E. 2000. Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture* 51:249-261
- Jones G.V., Snead N., Nelson P. 2004. Geology and wine 8. Modeling viticultural landscapes: a GIS analysis of the terroir potential in the Umpqua Valley of Oregon. *Geoscience Canada*, 31(4):167-178

- Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K. 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic Change* 73:319-343
- Jones G.V., Duff A.A., Myers J.W. 2006. Modeling Viticultural Landscapes: A GIS Analysis of the Viticultural Potential in the Rogue Valley of Oregon. *In: Proceedings of the VI International Terroir Congress*, 2:124-128, July 3rd-5th, Bordeaux, France
- Jones G.V. 2008. Il cambiamento climatico: osservazioni, proiezioni e conseguenze sulla viti-vinicoltura. *Italus Hortus* 15(1): 3-14
- Kaufman L, Rousseeuw P.J. 1990. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. Wiley, New York
- Keller M., Arnink K.L., Hrazdina G. 1998a. Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison. I. Effect on grapevine growth, fruit development and ripening. *American Journal of Enology and Viticulture* 49(3):333-340.
- Keller M., Hrazdina G. 1998b. Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison. II. Effect on anthocyanin and phenolic development during grape ripening. *American Journal of Enology and Viticulture* 49:341–349.
- Kirkpatrick S., Gelatt C.D. Jr., Vecchi M.P. 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220(4598):671-680.
- Kliewer W.M., Freeman B.M., Hossom C. 1983. Effect of irrigation, crop level and potassium fertilization on Carignane vines. I. Degree of water stress and effect on growth and yield. *American Journal of Plant Physiology* 34:186-196
- Klir G.J., Yuan B. 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and applications. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ
- Klok E.J., Klein Tank A.M.G. 2009. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology*, 29:1182–1191.
- Knuth D.E. 1981. The Art of Computer Programming, volume 2: Seminumerical Algorithms. 2nd edition Addison-Wesley, Reading, MA.
- Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka, R.F., Richardson W. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Sixth International Symposium on Remotes Sensing of Environment, Ann Arbor, MI (pp. 97–131).
- Kwon E.-Y., Jung J.-E., Chung U., Yun J.I. 2008. Using Thermal Time to Simulate Dormancy

- Depth and Bud-Burst of Vineyards in Korea for the Twentieth Century. *Journal of Applied Meteorology* 47:1792-1801.
- Leffelaar P.A., Ferrari T.J. 1989. Some elements of dynamic simulation. In: Simulation and system management in crop protection. In: R. Rabbinge, SA Ward, HH van Laar (eds.). Simulation Monograph 32, Pudoc, Wageningen, The Netherlands
- Liao T.W. 2002. A fuzzy C-medians variant for the generation of fuzzy term sets. *International Journal of Intelligent Systems* 17:21–43.
- Lillesaeter O. 1982. Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. *Remote Sensing of Environment*. 12:247-254.
- Linkosalo T., Lappalainen H.K., Pertti H. 2008. A comparison of phenological models of leaf bud burst and flowering of boreal trees using independent observations. *Tree Physiology* 28:1873-1882
- Loague K., Green R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models. Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* 7:51–73.
- Lorenz D.H., Eichhorn K.W., Bleiholder H., Klose R., Meier U., Weber E. 1994. Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). *Viticulture and Enology Science* 49:66–70.
- Malheiro A.C., Santos J.A., Fraga H., Pinto J.G. 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research* 43:163-177
- Mariani L., Parisi S., Failla O., Cola G., Zoia G., Bonardi L. 2009. Tirano (1624–1930): a long time series of harvest dates for grapevine. *Italian Journal of Agrometeorology* 14, 7–16.
- Marsaglia, G., Zaman, A., Tsang, W.W. 1990. Toward a universal random number generator. *Statistics & Probability Letters* 8:35-39.
- Martorana F., Bellocchi G. 1999. A review of methodologies to evaluate agroecosystem simulation models. *Italian Journal of Agronomy* 3:19-39.
- Matsumoto M., Nishimura T. 1998. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer simulation* 8:3-30.
- Matthews M.A., Thomas T.R., Shackel K.A. 2009. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: possible relation of veraison to turgor and berry softening. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15, 278–283
- Meier N., Rutishauser T., Pfister C., Wanner H., Luterbacher J. 2007. Grape harvest dates as a

- proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. *Geophysical Research Letters* 34, L20705
- Moncur M.W., Rattigan K., MacKenzie D.H., McIntyre G.N. 1989. Base Temperatures for Budbreak and Leaf Appearance of Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 40:21-26.
- Mori K., Goto-Yamamoto N., Kitayama M., Hashizume K. 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of Experimental Botany* 58:1935–1945
- Moriondo M., Bindi M. 2007. Impact of climate change of typical Mediterranean crops. *Italian Journal of Agrometeorology* 12:5–12.
- Murphy J. 2000. Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. *International Journal of Climatology* Vol. 20 (5), pp. 489-501.
- Nagler P.L., Scott R.L., Westenburg C., Cleverly J.R., Glenn E.P., Huete A.R. 2005 Evapotranspiration on western US rivers estimated using the enhanced vegetation indices from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sensing of Environment* 97(3):337–351.
- Nendel C. 2010. Grapevine bud break prediction for cool winter climates. *International Journal of Biometeorology* 54, 231-241.
- Orffer C.J., Goussard P.G. 1980. Effect of hot-water treatments on budburst and rooting of grapevine cuttings. *Vitis* 19:1-3.
- 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._ *Australian Journal of Grape and Wine Research* 17: 206-216
- Perry T.O. 1971. Dormancy of trees in winter. *Science* 171, 29-36.
- 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* 14:33–45
- Pope V., Brown S., Clark, R., Collins M., Collins W., Dearden, C. Gunson J., Harris G., Jones C., Keen A., Lowe J., Ringer M., Senior C., Sitch S., Webb M., Woodward S. 2007. The Met Office Hadley Centre climate modelling capability: the competing requirements for improved resolution, complexity and dealing with uncertainty. *Philosophical Transactions of the Royal Society A:*

Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365(1860): 2635-2657.

Pouget R. 1967. Méthode d'appréciation de l'évolution physiologique des bourgeons pendant la phase de pré-débourrement: application à l'étude comparée du débourrement de la Vigne. *Vitis* 6:294-302.

Pouget R. 1968. Nouvelle conception du seuil de croissance chez la vigne. *Vitis* 7:201–205

Pouget R. 1972. Considérations générales sur le rythme végétatif et la dormance des bourgeons de la vigne. *Vitis* 11:198–217.

Racsko P., Szeidl L., Semenov M.A. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57:27-41.

Ramos M.C., Jones G.V., Martinez-Casasnovas J.A. 2008. Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. *Climate Research* 38:1–15

Regione Veneto. 2009. Carta della copertura del suolo 2007. Alla data di stesura della tesi reperibile all'U.R.L.: www.cartacoperturasuolo.it.

Reynolds A.G., Senchuk I.V., van der Reest C., de Savigny C. 2007. Use of GPS and GIS for elucidation of the basis for terroir: spatial variation in an Ontario Riesling vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture* 58:145-162

Richardson E.A., Seeley S.D., Walker D.R. 1974. A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. *HortScience* 82, 302-306.

Rivington M., Bellocchi G., Matthews K.B., Buchan K., 2005. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and Forest Meteorology* 135: 228–243.

Rouse J.W. Jr., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.. 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393)

Rykiel E.J. Jr. 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90:229–244

Sadras V., McCarthy M.G. 2007. Quantifying the dynamics of sugar concentration in berries of *Vitis vinifera* cv. Shiraz: a novel approach based on allometric analysis. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13:66-71

Sadras V.O., Collins M., Soar C.J. 2008. Modelling variety dependent dynamics of soluble solids

- and water in berries of *Vitis vinifera*. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 14:250–259.
- Sadras V.O., Petrie P.R. 2011a. Quantifying the onset, rate and duration of sugar accumulation in berries from commercial vineyards in contrasting climates of Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 17:190–198
- Sadras V.O., Petrie P.R. 2011b. Predicting the time course of grape ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. (disponibile in solo *online early view* alla data di stesura della tesi: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-0238.2011.00169.x/abstract>)
- Sarvas R. 1974. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Autumn dormancy and winter dormancy. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 84:1-101.
- Scaglione G., Pasquarella C., Federico R., Bonfante A., Terribile F. 2008. A multidisciplinary approach to grapevine zoning using GIS technology: An example of thermal data elaboration. *Vitis* 47:131–132.
- Schaber J., Badeck F.W. 2003. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *International Journal of Biometeorology* 47:193–201.
- Schleip C., Rutishauser T., Luterbacher J., Menzel A. 2008. Time series modelling and central European temperature impact assessment of phenological records over the last 250 years. *Journal of Geophysical Research* 113, G04026
- Shepard D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*. pp. 517–524.
- Spain J.D. 1982. *BASIC microcomputer models in biology*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts. 354pp.
- Semenov M.A., Brooks R.J. 1999. Spatial interpolation of the LARS – WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research* 11:137-148
- Semenov M.A., Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research* 41:1-14.
- Sugeno M. 1985. An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences* (NY) 36:59–83.
- Thomas T.R., Shackel K.A., Matthews M.A. 2008. Mesocarp cell turgor in *Vitis vinifera* L. berries throughout development and its relation to firmness, growth, and the onset of ripening. *Planta* 228:1067-1076
- Tucker C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.

Remote Sensing of Environment 8:127– 150

Urhausen S., Brienens S., Kapala A., Simmer C. 2011. Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Moselle region. *Climatic Change* 109:349–373

Van Leeuwen C., Seguin G. 2006. The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research* 17:1-10.

Van Leeuwen C., Garnier C., Agut C., Baculat B., Barbeau G., Besnard E., Bois B., Boursiquot J.M., Chuine I., Dessup T., Dufourcq T., Garcia-Cortazar I., Marguerit E., Monamy C., Koundouras S., Payan J.C., Parker A., Renouf V., Rodriguez-Lovelle B., Roby J.P., Tonietto J., Trambouze W. (2008) Heat requirements for grapevine varieties are essential information to adapt plant material in a changing climate. *Proceedings of the 7th International Terroir Congress, Changins, Switzerland (Agroscope Changins-Wädenswil: Switzerland)* pp. 222–227.

Weaver R.J., Lavee S., Johnson J. 1975. Rooting and end of rest in 'Carignane' cuttings as affected by collection time and cane segment used. *American Journal of Enology and Viticulture* 26:164-167.

Webb L.B., Whetton P.H., Barlow E.W.R. 2007. Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13:165–175.

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 USA* 103:11217–11222

Wikipedia (2011) <http://en.wikipedia.org/wiki/Special_Report_on_Emissions_Scenarios>, Agosto 2011.

Winkler A., Cook J.A., Kliewer W.M., Lider L.A. 1974. General Viticulture. 2nd revised edition. Berkeley and Los Angeles, California. University of California Press.

Wolfe D.W., Schwartz M.D., Lakso A.N., Otsuki Y., Pool R.M., Shaulis, N.J. 2005. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *International Journal of Biometeorology* 49:303–309.

Yu H., Luedeling E., Xu Janchu. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(51): 22151-22156.

Zadeh L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8:338–353.

Ringraziamenti

La maggior parte di questo lavoro non sarebbe stata possibile senza il prezioso apporto del Centro per l'Educazione, la Cooperazione e l'Assistenza Tecnica, di Castelfranco Veneto (CECAT), e in particolar modo al Dr. Paolo Belvini, che ha reso disponibili dati fenologici e di maturazione, frutto di più vent'anni di lavoro nell'ambito dell'assistenza tecnica e della sperimentazione di campo.

Un altro sentito ringraziamento va al Dr. Bruno di Lena, dell'Agenzia Regionale per i Servizi di Sviluppo Agricolo della Regione Abruzzo, e alla Prof.ssa Oriana Silvestroni, dell'Università Politecnica delle Marche, per aver condiviso i dati sperimentali relativi alle prove di germogliamento in camera di crescita di Montepulciano e Sangiovese.

Ai colleghi del CRA-Centro di Ricerca per la Viticoltura di Conegliano, Massimo Gardiman e Diego Tomasi, nonché a Paolo Storchi, del CRA-Unità di Ricerca per la Viticoltura di Arezzo, sono riconoscente per avermi fornito i dati fenologici rilevati sulle collezioni ampelografiche dei loro istituti. Ringrazio in particolare Massimo Gardiman per la fondamentale collaborazione nella realizzazione delle prove di germogliamento in camera climatica.

Ringrazio infine il Consorzio Difesa Colture della provincia di Treviso (CODITV) e l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV), per la fornitura dei dati meteorologici impiegati nelle analisi sul territorio del Prosecco di Conegliano-Valdobbiadene DOCG.