

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA VARIABILITÀ METEO-CLIMATICA SULLA QUALITÀ DEL BRUNELLO DI MONTALCINO

ANALYSIS OF METEO-CLIMATIC VARIABILITY EFFECTS ON QUALITY OF BRUNELLO DI MONTALCINO WINE

Simone Orlandini^{1*}, Daniele Grifoni², Marco Mancini¹, Giacomo Barcaioli², Alfonso Crisci²

¹: Dipartimento di Scienze Agronomiche e Gestione del Territorio Agroforestale - Università di Firenze. Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze. Italia.

²: Istituto di Biometeorologia – Consiglio Nazionale delle Ricerche. Via Caproni 8, 50145 Firenze. Italia.

* Corresponding author, Tel: +39 0553288257, Fax: +39 055332472, E-mail: simone.orlandini@unifi.it

Ricevuto 14 luglio 2004, accettato 14 marzo 2005

Riassunto

L'attività viticola è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche che agiscono sui comportamenti della coltura determinando, in ultima analisi, quantità e qualità della produzione. La possibilità di studiare questi aspetti sulla base della variabilità meteo-climatica che si è accentuata negli ultimi anni e nella prospettiva del cambiamento climatico previsto per i prossimi decenni ha quindi un'importanza rilevante per fornire agli operatori strumenti di analisi e previsione utili per la gestione e pianificazione della loro attività. A partire da queste considerazioni, la presente ricerca è stata condotta con lo scopo di investigare la relazione esistente fra le condizioni meteo-climatiche e le caratteristiche qualitative del vino Brunello di Montalcino (Siena). Per quanto riguarda la qualità della produzione è stato utilizzato un indicatore sintetico annuale basato sull'analisi sensoriale del vino. Le condizioni meteorologiche della stagione di crescita sono state invece analizzate utilizzando i dati di stazioni a terra, quelli provenienti dalle *Reanalysis* (NCEP/NCAR Reanalysis Project), i valori dell'Indice NAO (North Atlantic Oscillation) e alcuni scenari futuri relativi ai cambiamenti climatici. I risultati mostrano significative correlazioni fra qualità e regime termo-pluviometrico della zona di produzione del Brunello e possono rappresentare il presupposto per la creazione di un sistema di monitoraggio e previsione della produzione viticola di qualità. Relativamente al possibile impatto dei futuri cambiamenti climatici, i risultati evidenziano come eccessi termici potranno incidere sulla qualità della produzione enologica.

Parole chiave: *Vitis vinifera L.*, analisi sensoriale, agrometeorologia, cambiamenti climatici, indici bioclimatici, Indice NAO

Abstract

Viticulture is strongly related to meteorological conditions. They can modify grapevine (Vitis vinifera L.) responses determining the quality of production. The possibility of studying these aspects on the basis of meteo-climatic variability and change has a high relevance, also in order to provide the growers with operational and forecasting tools to improve the management and planning of viticultural activity. On the basis of these considerations the present research has been performed with the aim of analysing the relationship between meteo-climatic conditions and the quality of Brunello di Montalcino wine (Siena – central of Italy). To describe the quality of wine a yearly index based on sensorial analysis has been used. Weather conditions during growing season have been described utilising the data collected from ground agrometeorological stations, from the reanalysis (NCEP/NCAR Reanalysis Project), from the NAO Index (North Atlantic Oscillation) and from the future scenarios of climatic changes. The results have pointed out significant correlations between weather conditions and quality of wine and can represent the basis for the realisation of a monitoring and forecasting system for high quality viticulture. The analysis of the climatic change impact has pointed out that the excess of temperature can play a significant role in the future quality of Brunello di Montalcino wine.

Keywords: *Vitis vinifera L.*, sensorial analysis, agrometeorology, climate change, bioclimatological indices, NAO Index

Introduction

Le variabili meteorologiche hanno una notevole influenza sulle risposte vegeto-produttive della vite (*Vitis vinifera L.*) e sulla qualità del prodotto finale, sia in termini di uva che del risultato della sua trasformazione in vino. Da un anno all'altro l'efficacia delle concimazioni e delle

lavorazioni, le tecniche di potatura e difesa, ed in generale tutta la gestione del vigneto risultano fortemente condizionate dall'andamento meteorologico, determinando grandi variazioni quantitative e qualitative del prodotto (Manaresi, 1946; Costacurta e Roselli, 1980; Fregoni, 1998). È quindi estremamente importante individuare strumenti di semplice applicazione che esprimano le re-

lazioni fra condizioni meteorologiche e produzione enologica, in modo da fornire agli operatori indicazioni circa l'andamento della stagione produttiva e gli interventi tecnici da mettere in atto per massimizzare il risultato della coltivazione (Maracchi, 2003). Questo risulta estremamente importante soprattutto nel periodo attuale caratterizzato da una estrema variabilità climatica, che aumenta le difficoltà gestionali, rendendo ogni stagione diversa dall'altra e, in generale, le condizioni ambientali differenti da quelle tipiche degli ambienti produttivi che gli operatori erano abituati a gestire sulla base della propria esperienza e della conoscenza del luogo.

I cambiamenti climatici in atto hanno indubbiamente accentuato l'interesse verso questi studi. Le temperature hanno infatti mostrato un *trend* crescente che nell'ultimo secolo ha portato ad un incremento medio di 0.8 °C delle temperature superficiali (Beniston *et al.*, 1998) con l'ultima decade del secolo (1990-1999) che è risultata la più calda mai registrata. Per quanto riguarda le precipitazioni, non si hanno ancora segnali univoci, ma è stato osservato un leggero aumento della frequenza degli eventi estremi. La disponibilità di scenari climatici previ-

sti per i prossimi anni consente di analizzare i possibili impatti sulla viticoltura, individuando gli interventi di breve e lungo periodo necessari per mitigare le conseguenze negative e valorizzare quelle positive (Bindi *et al.*, 2002).

In questa prospettiva, l'impiego di indici in grado di descrivere sinteticamente alcune caratteristiche del clima dell'ambiente di coltivazione permette di fornire un utile strumento di conoscenza su cui basare molte scelte agronomiche e colturali (Azzi, 1933; Mancini, 1999). Tra i più importanti studi legati alla viticoltura, possiamo ricordare quelli di Amerine e Winkler che tra gli anni '40 e '50, mediante l'applicazione di un indice bioclimatico basato sulla temperatura, classificarono la California in cinque zone a diversa vocazione viticola (Winkler *et al.*, 1962). Nello stesso periodo Branas (1974), sempre con l'obiettivo di mettere in risalto le capacità produttive dei territori viticoli, propose un indice elioteramico che prende in considerazione le temperature medie efficaci e la durata quotidiana dell'irraggiamento nel periodo favorevole. Un metodo diverso per calcolare un indice elioteramico, ma sempre con l'obiettivo di rilevare le potenzialità vitivinicole dei territori, è stato proposto più recentemente da Huglin (1986). Negli ultimi anni, altri indici sono stati proposti sulla base di analoghe considerazioni, cercando di adattare le relazioni fra clima e viticoltura ai diversi ambienti di produzione (Fregoni *et al.*, 2002).

Molti di questi indici hanno trovato applicazione negli studi di zonazione viticola, ossia nelle indagini finalizzate allo studio del territorio per ripartirlo in zone omogenee, soprattutto relativamente alle interazioni tra ambiente e vitigni, al fine di far loro esprimere al meglio le potenzialità produttive (Intrieri *et al.*, 1993; Fregoni *et al.*, 1998).

Recentemente, al fine di associare le condizioni generali di circolazione dell'atmosfera al ciclo della vite, svincolandosi dai dati puntuali rilevati dalle stazioni a terra, sono stati utilizzati alcuni indici climatici, quali il North Atlantic Oscillation Index (NAO), il Southern Oscillation Index (SOI), l'Arctic Oscillation Index (AO); inoltre sono stati impiegati dati osservati nell'atmosfera, ottenuti da modelli di reanalisi, quali l'altezza del geopotenziale, la distribuzione della pressione al livello del mare, la temperatura superficiale del mare (SST), etc. (Esteves e Manso Orgaz, 2001; Grifoni *et al.*, 2003).

Su queste basi la ricerca è stata condotta con l'obiettivo di analizzare mediante indici bioclimatici e climatici l'effetto della variabilità meteo-climatica osservata negli ultimi decenni sulla qualità del vino "Brunello di Montalcino". I risultati ottenuti sono quindi stati utilizzati per descrivere la possibile evoluzione della produzione enologica nei prossimi anni in seguito ai previsti cambiamenti climatici. Le relazioni ottenute potranno rappresentare la base per lo sviluppo di un sistema d'analisi e previsione della qualità a disposizione degli operatori del settore.

Tab. 1 - indice di valutazione qualitativa delle annate del vino Brunello di Montalcino.

Tab. 1 - *index of quality evaluation for Brunello di Montalcino wine.*

Qualità: stelletto	Qualità: giudizio
*	insufficiente
**	discreta
***	pregevole
****	ottima
*****	eccezionale

Tab. 2 - valutazione qualitativa delle annate del vino Brunello di Montalcino.

Tab. 2 - *quality evaluation of Brunello di Montalcino wine during the study period.*

anno	qualità	anno	qualità	anno	qualità
1945	*****	1964	*****	1983	*****
1946	****	1965	****	1984	*
1947	***	1966	****	1985	*****
1948	**	1967	****	1986	***
1949	***	1968	***	1987	***
1950	****	1969	**	1988	*****
1951	****	1970	*****	1989	**
1952	***	1971	***	1990	*****
1953	***	1972	*	1991	****
1954	**	1973	***	1992	**
1955	*****	1974	**	1993	****
1956	**	1975	*****	1994	****
1957	****	1976	*	1995	*****
1958	****	1977	****	1996	***
1959	***	1978	****	1997	*****
1960	***	1979	****	1998	****
1961	*****	1980	****	1999	****
1962	****	1981	***	2000	***
1963	***	1982	****		

Materiali e metodi

Valutazione qualitativa del vino

La qualità del vino è un elemento complesso dipendente da un gran numero di variabili come le caratteristiche chimiche dell'uva, il metodo di trasformazione adottato, etc. Può essere determinata mediante analisi chimiche sia sull'uva che sul vino stesso, utilizzando analisi strumentali (gas cromatografia in combinazione con sensori artificiali tipo l'olfattometro). Queste analisi forniscono una valutazione oggettiva in termini di quantità di componenti presenti correlabili con la qualità (Bertrand *et al.*, 2000; Bertuccioli, 2000).

In alternativa, l'altro sistema per la determinazione della qualità del vino è quello dell'analisi sensoriale che si basa sulla valutazione delle sue proprietà per mezzo di caratteristiche visive, olfattive e gustative. Questo tipo di analisi permette di verificare la capacità del vino di rispondere alle principali esigenze del mercato e quindi rappresenta una sintesi di tutti gli elementi che compongono il prodotto enologico. Inoltre, sono disponibili serie storiche di valutazioni sensoriali, la cui analisi consente una completa descrizione delle possibili modificazioni che si sono avute nel corso degli anni e delle eventuali correlazioni esistenti con le condizioni climatiche.

La qualità del Brunello di Montalcino (Siena) viene annualmente descritta dal Consorzio con un indice sintetico che si basa su analisi sensoriali ed è espresso in numero di stellette che variano da 1 a 5 (tab. 1). Questa valutazione, risultato di analisi comparate e standardizzate, per il periodo 1945-2000 è stata utilizzata nel presente studio come variabile dipendente per studiare le correlazioni con gli indici climatici e bioclimatici (tab. 2).

Dati meteorologici

In mancanza di una serie storica completa per la stazione di Montalcino, sono stati utilizzati i dati di 6 stazioni collocate nei pressi dell'areale di produzione del Brunello, messe a disposizione dalla banca dati dell'Istituto di Biometeorologia del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Di queste, 4 sono distanti meno di 25 km e 2 rientrano in un raggio minore di 45 km dall'area di studio (fig. 1, tab. 3). La scelta delle stazioni è stata preliminarmente valutata sulla base dei valori medi, delle deviazioni standard e delle correlazioni fra le stazioni calcolate per ciascun anno e per le intere serie storiche. In particolare per le temperature il coefficiente di variabilità (deviazione standard/media) è risultato mediamente pari al 13% e le stazioni sono risultate fra loro significativamente correlate. Per quanto riguarda le precipitazioni è stato necessario escludere la stazione di Grosseto in quanto caratterizzata da regime pluviometrico non correlato con le altre stazioni presenti nell'area di studio. Il coefficiente di variabilità si è attestato intorno ad un valore medio del 15%.

Per queste 6 stazioni sono disponibili i dati termopluviometrici dal 1951 al 1997. Le serie storiche sono state completate per il periodo di studio utilizzando i dati delle *reanalysis* (punto Lat. 42° 30'; Lon. 10° 00' NCEP/NCAR) calibrate mediante approccio empirico descritto in dettaglio successivamente a proposito dei da-

Tab. 3 - coordinate geografiche e quota delle stazioni meteorologiche impiegate nello studio e di Montalcino.

Tab. 3 - geographical coordinates and elevation of meteorological stations used in this study and of Montalcino.

Stazione	Lat (°)	Long (°)	Quota (m s.l.m.)
Montalcino	43.05	11.48	564
Asciano (Monteoliveto)	43.18	11.52	401
Casteldelplano	42.90	11.53	639
Grosseto	42.75	11.12	8
Montepulciano	43.08	11.77	605
Pienza	43.08	11.68	499
Siena	43.32	11.31	348

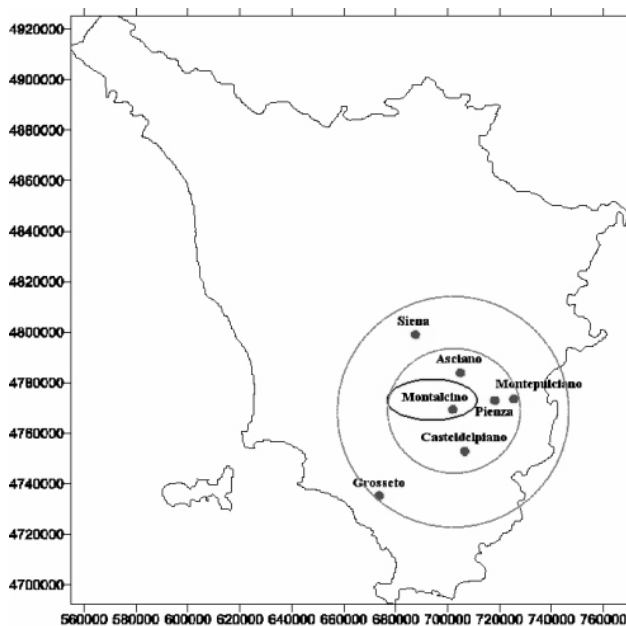


Fig. 1 - posizione delle stazioni meteorologiche impiegate rispetto a Montalcino. Le coordinate sono proiettate in UTM fuso 32 Nord, Datum ED 50.

Fig. 1 - position of used weather stations and Montalcino area. Coordinates are projected in fuso 32 North UTM, Datum ED 50.

ti degli scenari futuri. Le relazioni con la qualità sono state analizzate considerando il valore medio delle stazioni selezionate, al fine di ottenere una descrizione rappresentativa della variabilità interannuale del clima dell'area di produzione del Brunello di Montalcino.

Indici bioclimatici

I dati meteorologici sono stati utilizzati per calcolare indici bioclimatici in grado di definire la vocazionalità potenziale dei territori viticoli. Per questo studio sono stati impiegati indici termici e pluviometrici di carattere generale, quali la somma delle temperature attive (STA), che per il periodo aprile-ottobre prende il nome di Indice di Winkler (WI), l'Indice di Huglin (HI), la somma delle

Tab. 4 - indici bioclimatici impiegati.**Tab. 4** - *applied bioclimatic indices.*

Indici pluviometrici	<ul style="list-style-type: none"> • precipitazioni mensili • somma delle precipitazioni annuali • somma delle precipitazioni periodo aprile-settembre • somma delle precipitazioni periodo luglio-settembre • somma delle precipitazioni periodo aprile-ottobre • numero giorni di pioggia periodo aprile-settembre
Indici termici	<ul style="list-style-type: none"> • somma delle temperature attive per i mesi aprile - ottobre • somma delle temperature attive periodo aprile-ottobre • indice di Huglin per i mesi da aprile a settembre • indice di Huglin

precipitazioni nel periodo vegetativo aprile-settembre ($P_{apr-set}$). Per un'analisi più dettagliata, tali indici sono stati calcolati anche per i singoli mesi e per i periodi nei quali la qualità finale risulta maggiormente legata alle condizioni atmosferiche (tab. 4).

$$WI = \sum_{apr}^{ott} (T_{media-gg} - 10^{\circ}C)$$

$$HI = \sum_{apr}^{set} \frac{(T_{media-gg} - 10^{\circ}C) + (T_{massima-gg} - 10^{\circ}C)}{2} \times K$$

$$P_{apr-set} = \sum_{apr}^{set} P_{gg}$$

Dove:

WI = indice di Winkler (gradi giorno),

$T_{media-gg}$ = temperatura media giornaliera dell'aria ($^{\circ}C$),

$T_{massima-gg}$ = temperatura massima giornaliera dell'aria ($^{\circ}C$),

HI = indice di Huglin,

$P_{apr-set}$ = precipitazioni cumulate nel periodo aprile settembre (mm),

P_{gg} = precipitazione giornaliera (mm),

K = coefficiente di latitudine.

L'indice di Winkler (Winkler *et al.*, 1962) e l'indice di Huglin (Huglin, 1986) sono impiegati in viticoltura per descrivere le disponibilità termiche dei territori. Elevati valori di tali indici sono indicati per vitigni a maturazione tardiva, viceversa basse disponibilità termiche si adattano bene vitigni a maturazione precoce. Di conseguenza la variazione inter-annuale delle disponibilità termiche è strettamente legata alla qualità del vino prodotto da un determinato vitigno.

Le piogge cumulate sono state calcolate sommando la pioggia nei vari periodi considerati. Anche in questo caso i risultati produttivi variano annualmente in relazione al regime pluviometrico che può quindi modificare la qualità finale (Fregoni, 1998).

Gli indici bioclimatici e qualitativi sono stati analizzati per mezzo di correlazioni lineari singole e multiple, im-

piegando i primi come variabile indipendente e la valutazione qualitativa come variabile dipendente. La valutazione della correlazione è stata fatta attraverso il coefficiente di determinazione e il livello di significatività.

Indice NAO

L'Indice NAO è stato ottenuto dal NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (<http://www.cdc.noaa.gov>). Questo viene definito come la differenza normalizzata delle anomalie di pressione atmosferica fra le Azzorre e l'Islanda. Nell'emisfero nord il NAO dei mesi invernali mostra una significativa correlazione con le temperature e le precipitazioni (Hurrell e Van Loon, 1997; Osborn *et al.*, 1999). Anche in questo caso l'analisi della regressione è stata utilizzata per determinare la relazione fra qualità e condizioni meteorologiche dei singoli mesi. Per il periodo nel quale è stata evidenziata la correlazione più alta è stata inoltre realizzata la mappa di correlazione sull'area Europa/Nord Africa fra la qualità e la pressione al livello del mare. Tale mappa è stata elaborata con la procedura proposta dal Climate Diagnostic Center (CDC) al sito <http://www.cdc.noaa.gov/>.

Scenari futuri

Il modello globale di circolazione (GCM) utilizzato per la generazione degli scenari è l'HadCM3 sviluppato dall'Hadley Center (UK). Tale modello può essere considerato lo stato dell'arte dei modelli climatici in quanto presenta l'accoppiamento atmosfera-oceano. All'interno dell'HadCM3 l'atmosfera è schematizzata attraverso 19 livelli con risoluzione orizzontale di 2.5° in latitudine e 3.75° in longitudine dando origine ad una griglia globale costituita da 96×73 celle.

Gli scenari hanno origine da ipotesi di evoluzione della concentrazione dei gas-serra in atmosfera a sua volta determinate a partire da quattro grandi ipotesi legate a variabili sociopolitiche. I due profili utilizzati in questo lavoro sono quelli moderati, cioè l'A2-Global Sustainability (Conservazionista-globalizzato) e il B2-Local Stewardship (Conservazionista-localista).

I dati di scenario a scala globale sono poi stati calibrati sulla particolare situazione locale per mezzo di operazioni di *downscaling* di tipo empirico, applicate anche per i dati delle *reanalysis*. Il primo passo è consistito nella generazione di una serie di scenari locali a partire dai dati del GCM. Nel nostro caso è stata utilizzata la tecnica della Triangulated Irregular Network (TIN), ottenendo in uscita una serie sintetica per ciascuna stazione di interesse. Successivamente si è proceduto alla calibrazione di tale serie a partire dal valore medio delle stazioni meteorologiche utilizzate, considerato rappresentativo del territorio di produzione del Brunello. Dopo aver ordinato per rango le serie di scenario ed osservate per ciascun mese, si è dunque proceduto alla stima del modello lineare che garantisce il miglior accordo tra i dati di scenario e i dati osservati. Infine, è stato applicato il modello ai dati di scenario giornaliero ottenendo così la serie di scenario calibrata. In questa fase sono stati usati degli specifici filtri a garanzia del fatto che il prodotto finale rispondesse il più possibile alla realtà meteo-climatica locale. Per le temperature sono stati perciò moderati i valori estremi

forniti dallo scenario, mentre per le precipitazioni, poiché gli scenari sovrastimano i giorni piovosi, è stato introdotto un processo markoviano per eliminare, secondo un peso probabilistico e in modo assolutamente casuale, un certo numero di giorni di pioggia.

Risultati e discussione

Correlazione tra qualità e indici bioclimatici

Per quanto riguarda gli aspetti termici, l'analisi della correlazione è stata effettuata, per le singole stazioni, con le sommatorie delle temperature attive e l'indice di Huglin, calcolati sia sull'intera stagione che su sottoperiodi. I valori più elevati del coefficiente di determinazione sono stati ottenuti per la sommatoria delle temperature attive classica, corrispondente all'indice di Winkler (periodo aprile-ottobre) (tab. 5).

La stessa analisi è stata svolta impiegando le precipitazioni cumulate. Le migliori correlazioni sono state ottenute, anche in questo caso, per il periodo che copre l'intera stagione vegetativa, ossia aprile - settembre, seguito per importanza dal sottoperiodo che comprende le fasi di invaiatura e maturazione dell'uva, ossia i mesi di luglio - settembre (tab. 6).

Individuati così i migliori indici, sulla base di quelli che hanno mostrato le maggiori correlazioni con ciascuna stazione, sono stati analizzati in dettaglio i singoli effetti riferiti all'intero areale di produzione del Brunello di Montalcino. E' così possibile osservare che la relazione con la temperatura è direttamente proporzionale (fig. 2), con probabilità di avere qualità migliori all'aumentare dell'accumulo termico disponibile nella stagione vegetativa ($R^2=0.202$, $p=0.001$). Le precipitazioni mostrano (fig. 3), invece, un'influenza negativa sulla qualità, con una diminuzione della possibilità di avere annate ottime o eccezionali quando le precipitazioni sono elevate ($R^2=0.221$, $p=0.001$). Questi risultati sono stati confermati dall'analisi d'indipendenza basata su tabelle di contingenza ottenute riducendo a classi le variabili quantitative. In particolare per quanto riguarda WI il test del χ^2 ha mostrato una significatività pari a 0.017 e pari a 0.021 per le precipitazioni cumulate fra aprile e settembre.

Combinando i due indici, la significatività della regressione multipla risulta elevata ($p<0.001$) e il coefficiente di determinazione evidenzia come il regime termopluviometrico sia responsabile del 30% della variabilità interannuale nella qualità del vino prodotto nella zona del Brunello secondo il modello:

$$Q = (0.00221 \times WI) + (-0.00530 \times P_{apr-set}) + 1.55373$$

Dove: Q = qualità del vino (*), WI = indice di Winkler (gradi giorno), $P_{apr-set}$ = precipitazioni cumulate nel periodo aprile settembre (mm)

Tab. 5 - valori del coefficiente di determinazione (R^2) delle regressioni tra gli indici termici e la qualità del Brunello di Montalcino.

Legenda: WI=indice di Winkler, STA=somma delle temperature attive, HI=indice di Huglin. In grassetto sono evidenziati i migliori R^2 per ciascuna stazione. I valori di significatività al 5%, 1% e 0.1% del coefficiente di determinazione (45 gdl) sono rispettivamente: 0.083, 0.138, 0.216.

Tab. 5 - determination coefficient (R^2) between wine quality and temperature indices.

Legend: WI = Winkler Index, STA = degree day accumulation, IH = Huglin Index. The higher values of R^2 for each weather station are highlighted. Significance levels at 5%, 1% and 0.1% of determination coefficient (45 dof) are respectively: 0.083, 0.138, 0.216.

Indice bioclimatico	Monte Oliveto	Casteldelpiano	Grosseto	Montepulciano	Pienza	Siena
WI	0.153	0.176	0.128	0.191	0.092	0.200
STA apr	0.008	0.008	0.000	0.001	0.004	0.019
STA mag	0.003	0.008	0.000	0.018	0.000	0.010
STA giu	0.027	0.053	0.028	0.055	0.022	0.085
STA lug	0.124	0.107	0.071	0.081	0.106	0.092
STA ago	0.033	0.040	0.082	0.039	0.050	0.096
STA set	0.112	0.080	0.119	0.127	0.069	0.144
STA ott	0.166	0.134	0.112	0.099	0.039	0.111
HI	0.115	0.153	0.083	0.163	0.080	0.175
HI apr	0.014	0.020	0.002	0.002	0.004	0.011
HI mag	0.002	0.011	0.000	0.022	0.000	0.006
HI giu	0.033	0.051	0.025	0.045	0.024	0.080
HI lug	0.144	0.140	0.077	0.081	0.102	0.115
HI ago	0.027	0.050	0.050	0.034	0.037	0.082
HI set	0.125	0.094	0.114	0.135	0.059	0.158

Tab. 6 - valori del coefficiente di determinazione delle regressioni tra gli indici pluviometrici e qualità del Brunello di Montalcino.

Legenda: P=somma delle precipitazioni. In grassetto sono evidenziati i migliori coefficienti di determinazione per ciascuna stazione. I valori di significatività al 5%, 1% e 0.1% del coefficiente di determinazione (45 gdl) sono rispettivamente: 0.083, 0.138, 0.216.

Tab. 6 - determination coefficients (R^2) between wine quality and precipitation indices.

Legend: P = rainfall summation. The higher values of R^2 for each weather station are highlighted. Significance levels at 5%, 1% and 0.1% of determination coefficient (45 dof) are respectively: 0.083, 0.138, 0.216.

Indice bioclimatico	Monte Oliveto	Casteldelpiano	Grosseto	Montepulciano	Pienza	Siena
P apr	0.041	0.002	0.032	0.018	0.020	0.018
P mag	0.012	0.064	0.001	0.004	0.001	0.011
P giu	0.003	0.007	0.019	0.009	0.050	0.001
P lug	0.078	0.094	0.050	0.210	0.071	0.114
P ago	0.012	0.035	0.010	0.000	0.028	0.058
P set	0.078	0.079	0.092	0.069	0.094	0.129
P ott	0.010	0.033	0.002	0.000	0.000	0.022
P apr-set	0.146	0.156	0.152	0.170	0.188	0.210
P lug-set	0.118	0.140	0.116	0.137	0.144	0.246
P lug-ott	0.112	0.037	0.053	0.087	0.102	0.192
P annua	0.076	0.005	0.033	0.042	0.081	0.082

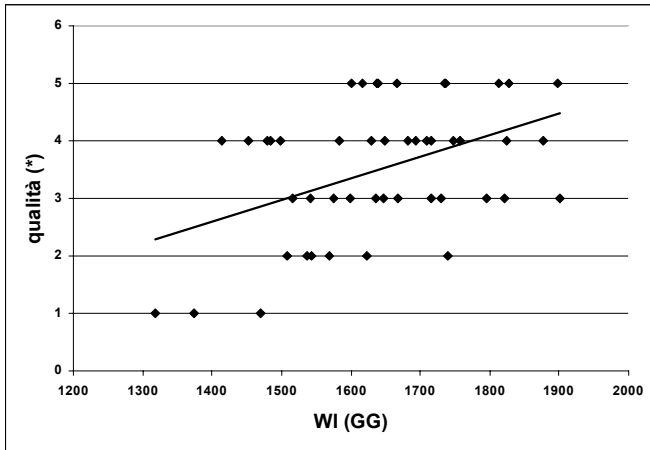


Fig. 2 - relazione tra indice di Winkler (WI) e qualità del Brunello. Legenda: GG=gradi giorno (°C).

Fig. 2 - Winkler index (WI) versus quality of Brunello di Montalcino wine. Legend: GG=degree days (°C).

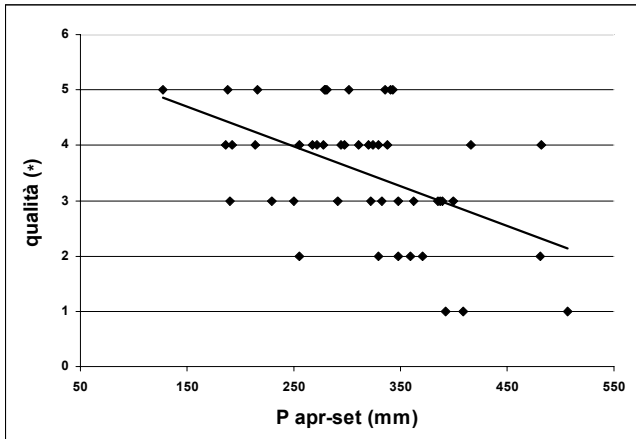


Fig. 3 - relazione tra precipitazioni nel periodo aprile - settembre e qualità del Brunello.

Fig. 3 - rainfall summation during the period April - September versus quality of Brunello di Montalcino wine.

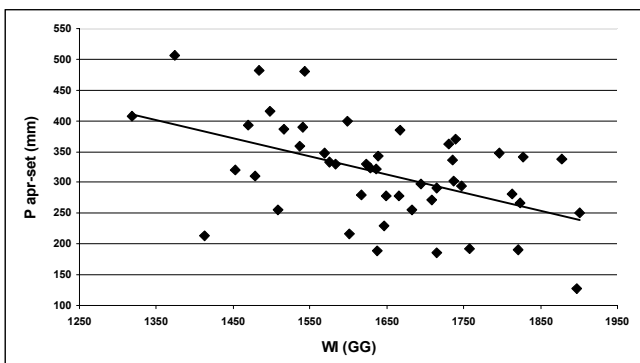


Fig. 4 - relazione tra l'indice di Winkler (WI) e somma delle precipitazioni nel periodo aprile - settembre. Legenda: GG=gradi giorno (°C).

Fig. 4 - Winkler index (WI) versus rainfall summation during the period April - September. Legend: GG=degree days (°C).

Appare inoltre interessante evidenziare come i due indici impiegati sono risultati molto correlati tra loro con $R^2 = 0.25$ e $p < 0.001$ (fig. 4). Infatti ad annate con elevate disponibilità termiche sono corrisposti bassi valori delle precipitazioni e viceversa, facendo sì che le probabilità che entrambi i fattori climatici risultino nello stesso anno favorevoli (o sfavorevoli) sia elevata.

Al fine di evidenziare la variabilità climatica osservata negli ultimi anni e gli effetti sulla qualità, è stata calcolata la differenza annuale dei due indici rispetto alla media climatica di riferimento relativa al periodo 1961-1990. I risultati hanno mostrato un aumento di frequenza delle annate con valori di WI sopra la media nell'ultima decade del periodo analizzato (fig. 5a), mentre per le precipitazioni non è possibile rilevare la presenza di particolari trend (fig. 5b). La migliore qualità della produzione evidenziata negli ultimi anni (tab. 2) sembra quindi climaticamente imputabile soprattutto ad una più elevata disponibilità termica.

Analisi degli indici climatici

La correlazione fra l'indice NAO e la qualità del Brunello di Montalcino ha mostrato i maggiori valori dei coefficienti di determinazione per i mesi di aprile ($R^2 = 0.063$, $p=0.090$) e maggio ($R^2 = 0.067$, $p=0.078$) e in en-

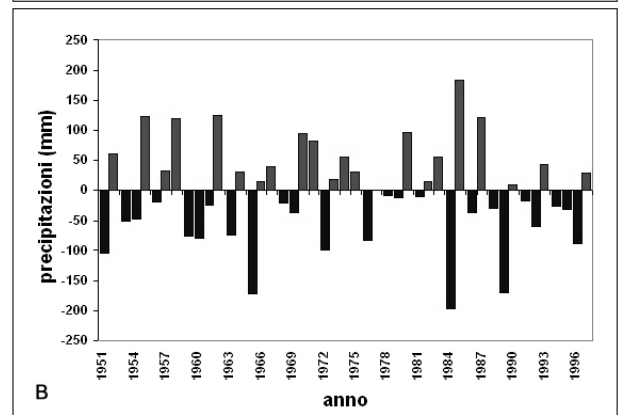
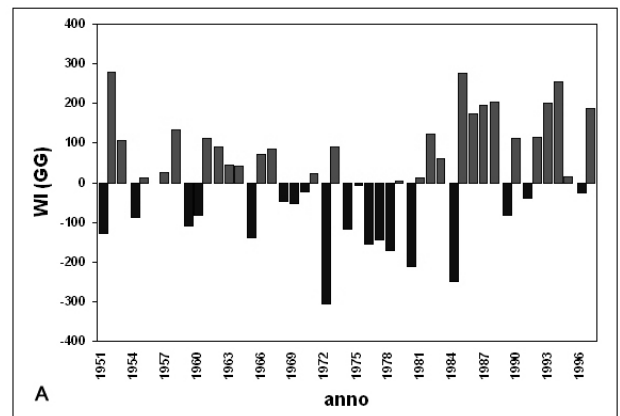


Fig. 5 - variabilità, rispetto alla media 1961 - 1990, dell'indice di Winkler (WI) (A) e delle precipitazioni nel periodo aprile - settembre (B). Legenda: GG=gradi giorno (°C).

Fig. 5 - deviations from the climatic average 1961-1990 of Winkler index (WI) (A) and rainfall summation during the period April - September (B). Legend: GG=degree days (°C).

trambi i casi la correlazione è stata inversamente proporzionale. Il valore medio di questi due mesi è stato impiegato per sviluppare una nuova correlazione (fig. 6) che è risultata statisticamente significativa ($R^2 = 0.13$, $p = 0.018$).

Per ottenere una conferma delle relazioni esistenti fra la qualità del Brunello di Montalcino e la distribuzione dei campi di pressione sull'area atlantica, precedentemente espressa dal NAO, nel periodo oggetto di studio è stata elaborata la mappa delle correlazioni riportata in figura 7, che ha confermato la sensibilità della qualità ai livelli

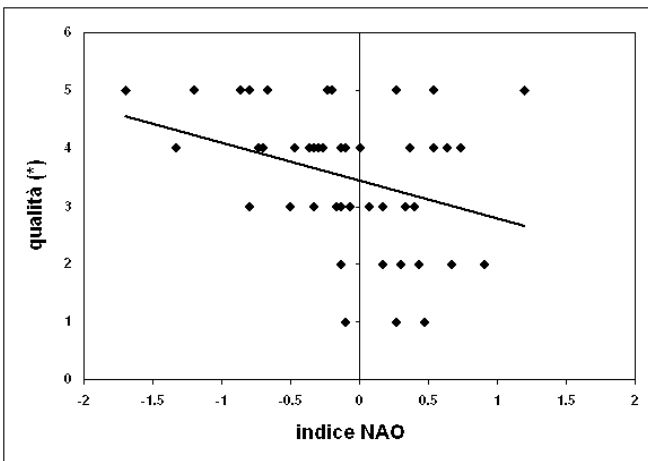


Fig. 6 - relazione fra la qualità del Brunello di Montalcino e l'indice NAO medio per i mesi di aprile e maggio.

Fig. 6 - NAO index of April - May period versus quality of Brunello di Montalcino wine.

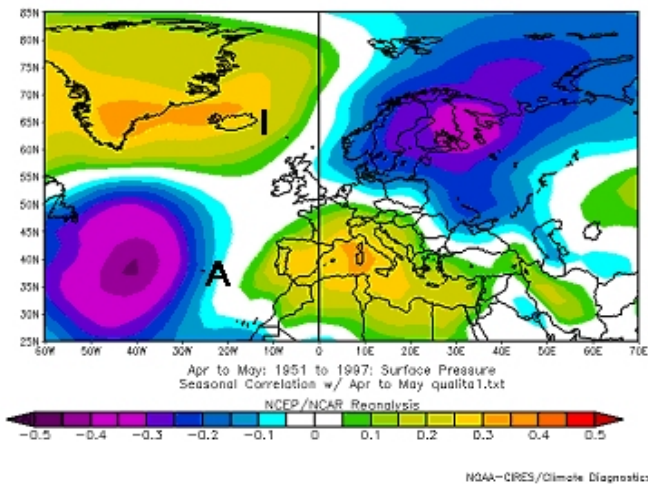


Fig. 7 - mappa di correlazione fra la qualità del Brunello di Montalcino e la pressione al suolo per il periodo aprile - maggio. I colori rappresentano i coefficienti di correlazione. Le mappe sono state ottenute grazie al NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (<http://www.cdc.noaa.gov/>).

Fig. 7 - correlation map between quality of Brunello di Montalcino wine and surface pressure for the period April - May. Maps have been obtained from NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (<http://www.cdc.noaa.gov/>).

di pressione al suolo che si stabiliscono su Azzorre ed Islanda. Dall'analisi della mappa emerge che migliori correlazioni, rispetto a quelle ottenute con il NAO, potrebbero probabilmente essere ottenute impiegando campi di pressione ad ovest delle Azzorre e dell'Islanda.

I risultati così ottenuti possono avere importanti applicazioni previsionali, in quanto già nelle prime fasi della stagione vegetativa sarà possibile ottenere indicazioni sulla qualità della produzione. Ciò consentirà di intervenire per ottimizzare la commercializzazione e aumentare la qualità in annate meteorologicamente sfavorevoli.

Possibili scenari futuri al 2050

I due indici bioclimatici, calcolati sui valori di temperatura e di precipitazioni ottenuti dall'analisi degli scenari futuri, sono stati messi a confronto con gli andamenti passati. La somma delle temperature attive ha mostrato un forte trend di incremento, per i prossimi 50 anni e peraltro tale tendenza è bene evidente anche per gli ultimi 10 anni di dati misurati (fig. 8a). Per le precipitazioni i valori sono maggiormente discordanti: dopo una fase senza tendenze ben marcate sembra esserci una diminu-

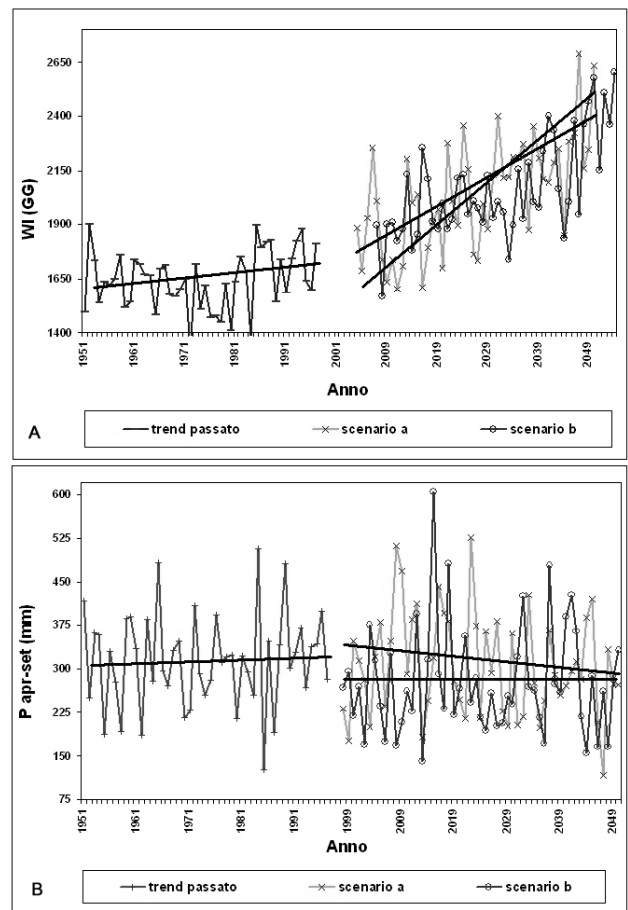


Fig. 8 - andamento passato e futuro dell'indice di Winkler (WI) (A) e della somma delle precipitazioni nel periodo aprile - settembre (B). Legenda: GG=gradi giorno (°C).

Fig. 8 - future and past climatic trends of Winkler Index (WI) (A) and rainfall summation during the period April - September (B). Legend: GG=degree days (°C).

zione di valori che conferma i risultati ottenuti precedentemente, in base ai quali ad incrementi delle sommatorie termiche corrispondono decrementi di precipitazioni (fig. 8b). Molto difficile risulta ipotizzare l'impatto di tali cambiamenti climatici sulla qualità del vino, ma in particolare l'effetto delle elevate sommatorie termiche, protratte per più anni, potrebbe essere rilevante.

Conclusioni

Gli indici climatici e bioclimatici adottati hanno evidenziato una correlazione significativa con la qualità del Brunello di Montalcino. In particolare la temperatura ha mostrato di influire positivamente sul prodotto e, almeno nei limiti di variazione attuale, l'analisi dei trend climatici ha evidenziato un miglioramento della qualità, soprattutto per un aumento della sommatoria termica per l'intera stagione vegetativa. Nei prossimi anni il mantenimento di questa tendenza incrementale porterà probabilmente ad una eccessiva disponibilità termica con ripercussioni sulla qualità. Per quanto riguarda le precipitazioni, gli eccessi idrici sono risultati negativamente correlati col prodotto finale. L'analisi dei dati meteorologici non ha mostrato particolari tendenze negli ultimi anni, mentre nei prossimi decenni i segnali di riduzione delle precipitazioni possono far ipotizzare il raggiungimento dei limiti inferiori di disponibilità idrica compatibile con una soddisfacente attività viti-vinicola.

È opportuno che questi studi vengano condotti anche in altre realtà produttive per definire le prospettive della viticoltura regionale e nazionale, soprattutto in funzione di un sempre maggiore sviluppo dei modelli di simulazione degli scenari futuri e quindi di una loro maggiore attendibilità. In questo modo sarà possibile individuare gli interventi necessari a gestire i cambiamenti, riducendo le conseguenze negative per la produzione e valorizzando i possibili effetti positivi.

Particolarmente importante è inoltre la possibilità di approfondire lo studio, soprattutto relativo agli indici climatici generali (NAO, AO, etc.), in quanto questi sono in grado di descrivere nel complesso l'evoluzione delle condizioni atmosferiche a grande scala. La loro applicazione potrà quindi fornire importanti indicazioni anche per prevedere la qualità del vino e fornire così agli operatori (agricoltori, tecnici, ricercatori e amministratori pubblici) un importante supporto per migliorare le loro tecniche produttive e commerciali.

Ringraziamenti

Si ringrazia il "Consorzio Del Vino Brunello Di Montalcino" per aver fornito la valutazione qualitativa delle annate, come riportato nel presente articolo.

Bibliografia

- Azzi, G., 1933. *Gli equivalenti meteorologici e la climatologia agraria. Met. Pratica*, 14, n° 1.
- Beniston, M., Tol, R. S. J., Decolle, R., Hormann, G., Iglesias, A., Innes, J., Mc Michael, A. J., Martens, A. J. M., Nemesova, I., Nicholls, R. J., Toth, F. L., 1998. *Europe. In: The Regional Impacts of Climate Change – An Assessment of Vulnerability* (ed. Watson, R. T., Zinyowera, M. C., Moss, R. H.) *Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 289-324
- Bertrand, A., Kotserids, Y., Guedes de Pinho, P., 2000. *Il ruolo dei componenti delle uve sulla qualità del vino. Atti del International Symposium "Il Sangiovese". Firenze 15-17 febbraio 2000*, 341-362.
- Bertuccioli, M., 2000. *Qualità sensoriale. In "Contributo della scuola italiana al progresso delle scienze vitivinicole" volume 2. Accademia italiana della vite e del vino*, 318-340.
- Bindi, M., Triossi, A., Moriondo, M., 2002. *Mutamenti climatici e produzione viticola europea. L'Informatore Agrario* 45, 31-34.
- Branas, J., 1974. *Viticulture. Impr. Dèhan, Montpellier*.
- Costacurta, A., Roselli, G., 1980. *Fattori climatici ed edafici che condizionano gli impianti dei vigneti. Rivista di viticoltura e di enologia di Conegliano. Anno 33°, n° 10*, 469 – 480.
- Esteves, M. A., Manso Orgaz, M. D., 2001. *The influence of climatic variability on the quality of wine. Int. J. Biometeorol.* 45, 13-21.
- Fregoni, M., 1998. *Viticultura di qualità. Edizioni L'Informatore Agrario, Verona*.
- Fregoni, M., Biondi Santi, F., Pezzato, S., 2002. *L'indice bioclimatico di qualità Fregoni applicato al Brunello di Montalcino. L'Informatore Agrario* 22, 53-54.
- Fregoni, M., Zamboni, M., Venturi, A., Vespignani, G., Laruccia, N., Simoni, M., Zinoni, F., Soldi, A., 1998. *La zonazione viticola della Collina cesenate. Vignevisi* 1|2, 39-57.
- Grifoni, D., Mancini, M., Orlandini, S., Rossi, M., Zipoli, G., 2003. *Analysis of grapevine production using some meteorological indices. In Atti del "Sixth European Conference on Applications of Meteorology". Roma 15-19 settembre 2003 (CD-ROM)*.
- Huglin, P., 1986. *Biologie et écologie de la vigne. Payot Lousanne, Parigi*.
- Hurrell, J.W., Van Loon, H., 1997. *Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure. Clim Change* 36, 301-326.
- Intrieri, C., Filippetti, I., Silvestroni, O., Marchigiani, E., Murri, A., 1993. *Zonazione bioclimatica e primi rilievi fenologici nella viticoltura della regione Marche. Vignevisi* 6, 62-70.
- Manaresi, A., 1946. *Trattato di Viticoltura. Edizioni agricole, Bologna*.
- Mancini, M., 1999. *La caratterizzazione microclimatica di un'area viticola della Toscana. Tesi di laurea, Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Agraria, AA 1998-1999*.
- Maracchi, G., 2003. *Meteorologia e Climatologia applicate. Editrice L'Universo, Istituto Geografico Militare, Firenze*.
- Osborn, T.J., Briffa, K.R., Tett, S.F.B., Jones, P.D., Trigo, R.M., 1999. *Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled model. Lim. Dyn.*, 15, 685-702.
- Winkler, A., Cook, J. A., Kliewer, W. M., Lider, L. A., 1962. *General Viticulture. University of California Press*.