



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI
INDIRIZZO DI AGRONOMIA AMBIENTALE - CICLO XXIV
Dipartimento di Agronomia Ambientale e Produzioni Vegetali

*Ottimizzazione agronomica e sostenibilità ambientale
in colza invernale da olio*

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Andrea Battisti

Supervisore: Ch.mo Prof. Giuliano Mosca

Dottorando: Enrico Rampin

DATA CONSEGNA TESI

31 Gennaio 2012

Declaration

I hereby declare that this submission is my own work and that, to the best of my knowledge and belief, it contains no material previously published or written by another person nor material which to a substantial extent has been accepted for the award of any other degree or diploma of the university or other institute of higher learning, except where due acknowledgment has been made in the text.

31 Gennaio 2012

Enrico Rampin

A copy of the thesis will be available at <http://paduaresearch.cab.unipd.it/>

Dichiarazione

Con la presente affermo che questa tesi è frutto del mio lavoro e che, per quanto io ne sia a conoscenza, non contiene materiale precedentemente pubblicato o scritto da un'altra persona né materiale che è stato utilizzato per l'ottenimento di qualunque altro titolo o diploma dell'università o altro istituto di apprendimento, a eccezione del caso in cui ciò venga riconosciuto nel testo.

31 Gennaio 2012

Enrico Rampin

Una copia della tesi sarà disponibile presso <http://paduaresearch.cab.unipd.it/>

INDICE

Capitolo 1. Introduzione generale	9
1.1 IL COLZA (<i>Brassica napus</i> L.)	10
1.1.1 Importanza economica e diffusione.....	10
1.1.2 Botanica della specie	13
1.1.3 Fenologia e sua modellizzazione	15
1.1.4 Struttura produttiva della coltura.....	21
1.1.5 Recenti criteri di miglioramento genetico e varietà disponibili.....	24
1.1.6 Tecnica agronomica.....	27
1.2 L'OLIO DI COLZA	32
1.2.1 Composizione acidica e qualità tecnologiche.....	32
1.2.2 Impieghi 'no food' dell'olio	33
1.3 BIBLIOGRAFIA	37
Capitolo 2. Scopo delle ricerche	45
Capitolo 3. Effetti dell'epoca di semina sulla risposta fenologica e morfo-produttiva di diverse varietà di colza	47
3.1 Riassunto	48
3.2 Introduzione.....	50
3.3 Materiali e metodi.....	52
3.4 Risultati sperimentali.....	56
3.5 Discussione.....	67
3.6 Conclusioni.....	70
3.7 Bibliografia.....	71
Capitolo 4. Adattamenti morfologici e produttivi di diverse varietà di colza a densità di semina decrescenti.....	75
4.1 Riassunto	76
4.2 Introduzione.....	77
4.3 Materiali e metodi.....	79
4.4 Risultati sperimentali.....	84
4.5 Discussione.....	100
4.6 Conclusioni.....	103

4.7 Bibliografia.....	104
Capitolo 5. Produttività ed efficienza d'uso dell'azoto di diverse varietà di colza in risposta ad apporti azotati primaverili decrescenti	107
5.1 Riassunto	108
5.2 Introduzione.....	110
5.3 Materiali e metodi.....	112
5.4 Risultati sperimentali.....	118
5.5 Discussione.....	127
5.6 Conclusioni.....	130
5.7 Bibliografia.....	131
Capitolo 6. Morfologia radicale di ibridi ad <i>habitus</i> vegetativo divergente.....	135
6.1 Riassunto	136
6.2 Introduzione.....	137
6.3 Materiali e metodi.....	138
6.4 Risultati sperimentali.....	140
6.5 Discussione.....	147
6.6 Conclusioni.....	149
6.7 Bibliografia.....	150
Capitolo 7. A phenological model of winter oilseed rape according to the BBCH scale	153
7.1 Riassunto	154
7.2 Abstract	155
7.3 Introduction	157
7.4 Materials and methods.....	159
7.5 Results	173
7.6 Discussion	182
7.7 Conclusions	185
7.8 References	186
Capitolo 8. Conclusioni generali.....	189
Ringraziamenti	193

Riassunto

Il colza invernale da olio (*B. napus* L.) sta godendo di rinnovato interesse negli avvicendamenti colturali nazionali in ragione dei vantaggi agronomici derivanti dal suo inserimento nelle tradizionali rotazioni cerealicole e nell'attuale politica europea in materia di energie rinnovabili (Direttive 2009/28/CE e 2009/30/CE). Tuttavia, il consolidamento della specie nella filiera bioenergetica di riferimento (biodiesel) è strettamente legato all'incremento delle performance produttive e alla sostenibilità ambientale dell'itinerario agronomico. Tali obiettivi non possono prescindere dall'ottimizzazione della tecnica colturale in funzione della sito-specificità ambientale e della scelta varietale. Attualmente la tecnica agronomica va orientata verso regimi colturali *low-input* basati su lavorazioni ridotte del terreno, razionali concimazioni azotate, semine anticipate e basse densità di semina. Tale semplificazione trova ragione nelle performance produttive dei tradizionali genotipi a taglia convenzionale (ibridi CHH e varietà a impollinazione libera), mentre è ancora poco conosciuta l'adattabilità a itinerari tecnici conservativi dei più recenti genotipi ibridi CHH semi-nani.

L'attività di ricerca oggetto di questa tesi di dottorato ha come scopo principale la definizione di una nuova tecnica agronomica ottimizzata da diffondere nell'areale Padano-Veneto. Tale obiettivo è stato perseguito valutando le risposte morfofisiologiche e produttive delle principali tipologie genetiche di colza (ibridi CHH, ibridi CHH semi-nani e varietà a impollinazione libera), sottoposte a diversi input agronomici (epoca e densità di semina, concimazione azotata di copertura). Con l'obiettivo di fornire un valido supporto ai processi decisionali coinvolti nella definizione del management colturale, è stato inoltre sviluppato un modello di simulazione della fenologia.

Per quanto concerne l'epoca di semina, un suo anticipo (inizio di settembre) rappresenta una pratica agronomica perseguibile con successo indipendentemente dalla scelta varietale. La decisione di collocare la semina nella prima decade di settembre ha consentito di raggiungere elevate rese (4,6 t s.s. ha⁻¹), in ragione di un cospicuo numero di semi per unità di superficie. Tale risposta produttiva è in parte riconducibile al prolungamento degli stadi vegetativi (emergenza – inizio fioritura) e post-fiorali (fine fioritura – maturazione). L'estensione delle fasi pre-fiorali ha garantito inoltre una migliore organizzazione dell'azoto (N), contribuendo a mitigare i rischi ambientali legati alla li-

sciviazione del nitrato. Nel caso in cui l'organizzazione aziendale, le condizioni meteo o il precedente colturale rendessero difficile l'applicazione di questa tecnica, è consigliabile orientare la scelta varietale su genotipi a taglia convenzionale. Di fatto, tra le cultivar a confronto, quella semi-nana ha manifestato le maggiori penalizzazioni produttive con la semina tardiva (inizio ottobre), nonostante peggioramenti di resa siano stati osservati in generale per tutte le varietà.

La necessità di ottimizzare la tecnica agronomica variando l'impiego dei fattori colturali in funzione dell'*habitus* vegetativo è risultata evidente anche indagando gli effetti morfo-produttivi indotti da una riduzione del popolamento di campo. Di fatto, l'applicazione di basse densità di semina (<40 semi m^{-2}) è consigliabile per quelle coltivazioni impostate su varietà a taglia convenzionale, mentre il materiale semi-nano sembra trarre vantaggio produttivo da investimenti più intensivi (>60 semi m^{-2}). La propensione dei genotipi privi di geni nanizzanti a popolamenti ridotti è riconducibile a un migliore sviluppo delle principali componenti della resa e, in particolare, a un elevato numero di semi per siliqua.

In un'ottica di riduzione degli input agronomici la scelta di cultivar N-efficienti, capaci cioè di produzioni significative in condizioni nutritive sub-ottimali, risulta imperativa. In tal senso è auspicabile l'impiego di ibridi convenzionali contraddistinti da un uso efficace di N (NUE – Nitrogen Use Efficiency: kg seme / kg N disponibile dal suolo e dalla concimazione) e dal maggiore potenziale produttivo ottenibile con moderate dosi di concime (~ 120 kg N ha^{-1}). I migliori valori di NUE stimati per l'ibrido ad altezza standard sono dovuti a un efficiente assorbimento di N. La cultivar semi-nana invece massimizza la sua resa con apporti azotati più elevati (~ 200 kg N ha^{-1}), che associati a una NUE modesta, esporrebbero le colture ai rischi ambientali legati a eccessi minerali.

La spiccata organizzazione ed efficienza d'assorbimento di N mostrate dall'ibrido convenzionale sono attribuibili a un maggiore accrescimento radicale (peso e lunghezza), in grado di esplorare ampi volumi di terreno e sequestrare elevate quantità di nutrienti. Tali caratteristiche fornite dalla cultivar ad altezza standard già in fasi precoci del ciclo colturale (post-emergenza), sono sfruttabili favorevolmente per mitigare i fenomeni di lisciviazione dei nutrienti tipici dei mesi autunno-vernini (effetto *catch crop*).

In collaborazione con l'istituto Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung dell'Università di Kiel (D) è stato sviluppato un modello ('*BBCH model*') per simulare la fenologia del colza invernale in accordo con la scala BBCH. Un'attendibile previsio-

ne fenologica è fondamentale ai fini di una corretta realizzazione di tutte quelle pratiche agronomiche di post-emergenza la cui esecuzione è strettamente legata allo sviluppo colturale. L'implementazione della scala BBCH nel 'modelling' fenologico ha permesso di realizzare una dettagliata descrizione dell'ontogenesi, assicurando nel contempo, una facile calibrazione e validazione. Il '*BBCH model*', sviluppato e testato utilizzando un ampio database di osservazioni fenologiche collezionate in numerosi siti sperimentali collocati in Francia, Germania e Italia, si è rivelato essere un valido strumento di previsione dello sviluppo colturale. Essendo applicabile in molteplici areali Europei caratterizzati da pratiche agronomiche e scelte varietali anche molto eterogenee tra loro, il modello assumerebbe ampia rilevanza pratica nel management agronomico, agevolandone la programmazione (i.e., scelta del momento d'intervento).

Si può quindi concludere che nell'areale Padano-Veneto l'ottimizzazione dell'itinerario tecnico deve prevedere un impiego diversificato degli input agronomici tra materiali a taglia convenzionale e cultivar ad *habitus* vegetativo ridotto. Tra le principali tipologie varietali disponibili, gli ibridi tradizionali contraddistinti da un elevato potenziale produttivo, massimizzabile con un modesto impiego di fattori tecnici, sono i più indicati per l'attuazione con successo di regimi colturali *low-input*. Gli attuali ibridi semi-nani non rappresentano ancora una valida alternativa ai genotipi più tradizionali, poiché richiedono una maggiore intensificazione colturale per avvicinare il proprio potenziale produttivo, risultato comunque modesto e suscettibile di cospicua variabilità interannuale.

Abstract

Acreage assigned to winter oilseed rape (*B. napus* L.; OSR) is increasing rapidly in Italian crop rotations, owing to its beneficial value as a preceding crop for cereals and also European renewable energy policies (Directives, 2009/28/EC and 2009/30/EC). However, stable introduction of OSR in the biofuel production chain is closely related to yield improvements and the environmental sustainability of cropping systems. Optimized agronomic management according to site-specific conditions and varietal choice is therefore needed.

Actual OSR cropping systems tend to reduce input resource utilization by conservative soil tillage, integrated nitrogen (N) management, early sowing and low sowing densities. These agronomic practices are based on the yield performance of traditional genotypes (CHH hybrids and open-pollinated varieties) and the responses of recently developed semi-dwarf cultivars (CHH semi-dwarf hybrids) have been less fully examined.

The present research aimed at defining an optimal integrated winter OSR management for cropping systems in NE Italy. This aim was achieved by assessing the morpho-physiological and yield responses of various OSR genotypes (CHH hybrids, CHH semi-dwarf hybrids, open-pollinated varieties) to some agronomic inputs (sowing date, sowing density, spring N fertilisation). A dynamic model simulating OSR phenology was also developed to provide an efficient prediction tool for improving crop management scheduling.

Regarding 'sowing date', early seeding (beginning of September) seemed to be appropriate for NE Italian cropping systems. Moving the growth cycle to early September promoted higher seed yield (4.6 t DM ha^{-1}), due to a greater number of grains per unit area. With anticipated sowing, extended vegetative (emergence – beginning of flowering) and reproductive stages (end of flowering – maturation) were highlighted. Prolonging vegetative phases led to greater N recovery that would restrain leaching and therefore environmental pollution. Delayed sowing (early October) caused severe yield reductions, especially for the semi-dwarf hybrid. Consequently, when early or optimal sowing cannot be carried out, the OSR cropping system should be based on standard-height varieties.

Considering 'sowing density', a diversified seeding rate according to the vegetative *habitus* of cultivar resulted necessary. Sparse populations (<40 seeds m^{-2}) are suitable for cropping systems involving conventional varieties, whilst semi-dwarf genotypes need higher sowing density (>60 seeds m^{-2}) to maximize seed yield. The good adaptability of standard-height hybrids to low populations is due to its capacity to support yield components development (e.g., number of seeds per pod) in conditions of low inter-plant competition.

In order to define an optimal OSR cropping system, integrated N management based on highly N-efficient varieties is needed to support yields and to prevent environmental pollution. The conventional hybrid revealed a higher yield potential that was achieved at a lower fertilizer rate (~ 120 kg N ha^{-1}), than the open-pollinated variety (~ 150 kg N ha^{-1}) and semi-dwarf type (~ 200 kg N ha^{-1}). The greater yield potential estimated for the normal-size hybrid was due to more efficient use (NUE: Nitrogen Use Efficiency) and uptake (NUpE: Nitrogen Uptake Efficiency) of the N supplied by fertilizer and soil.

The differences in terms of NUE and NUpE which appeared between conventional and semi-dwarf hybrids depended on root development. Preliminary characterization of root system carried out during seedling establishment in pots (post-emergence stages) gave rise to greater root weights and lengths for standard-height hybrid. This root structure promoted higher N recovery which could restrict N leaching during the winter part of the OSR growth cycle.

In collaboration with the Department of Crop Science of Kiel University (D), the dynamic '*BBCH model*' was developed to predict winter OSR phenology according to the BBCH scale. Phenological models facilitate decision-making processes in agricultural systems. The implementation of the BBCH coding system within OSR phenology simulation led to a comprehensive description of crop ontogeny, avoiding complicated model parameterisation and evaluation. The '*BBCH model*' was developed thanks to an extensive database of phenological observations from several experimental sites in France, Germany and Italy. The '*BBCH model*' reproduced OSR development with a sufficient degree of accuracy for a wide range of years, locations, sowing dates and varieties, resulting in an efficient model widely applicable across Europe with relevant practical purposes in crop management scheduling.

In conclusion, optimal OSR management should diversify exploitation of input resources in harmony with the vegetative *habitus* of cultivars. Among genotypes commercially available for OSR, standard height hybrids characterized by higher yield potential reachable with less agronomic input can successfully be utilized to create integrated OSR cropping systems in NE Italy.

Capitolo 1

Introduzione generale

1.1 IL COLZA (*Brassica napus* L.)

1.1.1 Importanza economica e diffusione

Originariamente presente in popolazioni naturali del nord Africa e dell'Europa, il colza (*B. napus* L.) fu addomesticato assieme al ravizzone (*B. campestris* L.) una volta apprezzati il seme e l'olio in esso contenuto. La coltivazione, praticata in Europa fin dal XII secolo, era finalizzata alla produzione di lipidi per l'illuminazione pubblica e per usi alimentari, soprattutto dove non erano conosciuti l'olivo e il papavero (De Mastro e Bona, 1998).

La seconda guerra mondiale e la generale carenza di olio che ne seguì, mutarono profondamente gli avvicendamenti colturali in diverse parti del mondo. La ricerca di fonti lipidiche alternative spinse numerose nazioni a inserire stabilmente il colza nei propri sistemi colturali. Tuttavia, parallelamente alla crescente diffusione della specie, alcuni studi nutrizionistici evidenziarono i possibili effetti tossici dell'acido erucico nei confronti dell'uomo (Abdellatif, 1972; Vles et al., 1976; Bremer e Norum, 1982). Tale acido grasso, presente in cospicue concentrazioni nell'olio (>45% w/w), (Mosca, 1979), costituì una notevole limitazione all'impiego edibile dell'oleifera, contribuendo a ridurre drasticamente la superficie coltivata. L'intensa attività di breeding che ha successivamente interessato la specie ha permesso di superare tali limiti qualitativi, costituendo genotipi con profili acidi *ad hoc* sia per applicazioni 'food' che 'no-food'.

Il colza è la terza oleaginosa più diffusa al mondo per quanto riguarda la superficie coltivata (~31 Mha, milioni di ettari), la seconda considerando la quantità di seme prodotta (~62 Mt, milioni di tonnellate), (Fig. 1). In questo quadro internazionale, i principali Paesi produttori sono Europa (EU-27)¹, Cina, Canada e India (Fig. 2), (USDA, 2010).

A livello comunitario è la specie oleifera di riferimento con una superficie coltivata pari a 6,1 Mha e una produzione di seme e olio rispettivamente di 22 Mt e 10 Mt.

¹ EU-27 include: Austria, Belgio, Bulgaria, Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Olanda, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna e Svezia.

Germania, Francia, Regno Unito e Polonia, con produzioni granellari rispettivamente di 5,7, 4,8, 2,2 e 2,1 Mt, sono i maggiori produttori europei (Eurostat, 2010).

In Italia, dopo aver corso il rischio di scomparire negli anni '80 per le problematiche legate all'acido erucico, la coltura attualmente sta godendo di un rinnovato interesse. Secondo elaborazioni Istat (2010), nella campagna agraria 2009-10 la superficie investita a colza ha raggiunto quota 20.219 ettari con una produzione complessiva di 505.000 t di seme (Fig. 3). Tra le regioni italiane, quelle presenti nel Nord del paese presentano le maggiori coltivazioni con circa il 70% dell'ettarato nazionale (14.030 ha, superfici al 2010 di Friuli Venezia Giulia, Trentino Alto Adige, Veneto, Lombardia, Liguria, Piemonte e Valle D'Aosta). Dal punto di vista produttivo, il Veneto è la regione più virtuosa con rese in seme del tutto comparabili a quelle ottenibili negli areali tradizionalmente più vocati del nord Europa ($\sim 3,0$ t ha⁻¹, media Veneto nel 2010). L'andamento climatico favorevole e l'elevato sfruttamento di input agronomici permettono di massimizzare il potenziale produttivo della coltura e fornire rese significative di prodotto, compromettendo, talvolta, la sostenibilità ambientale della coltivazione.

L'attuale interesse per tale oleifera trova ragione nei vantaggi agronomici derivanti dal suo inserimento come coltura da rinnovo nelle tradizionali rotazioni cerealicole e nell'attuale politica europea in materia di bioenergie².

² L'UE impone agli stati membri obiettivi ambiziosi da raggiungere entro il 2020, anche per il settore dei biocarburanti (v. par. 1.2.2.2). In particolare, attraverso l'approvazione delle direttive 2009/28/CE e 2009/30/CE, il consiglio europeo fissa dei criteri di sostenibilità ai quali la tecnica agronomica e la filiera dei biocarburanti deve attenersi. L'esigenza di realizzare sistemi produttivi sostenibili comporta la necessità di definire protocolli colturali coerenti con le attuali esigenze di salvaguardia ambientale e di contenimento dei costi di produzione.

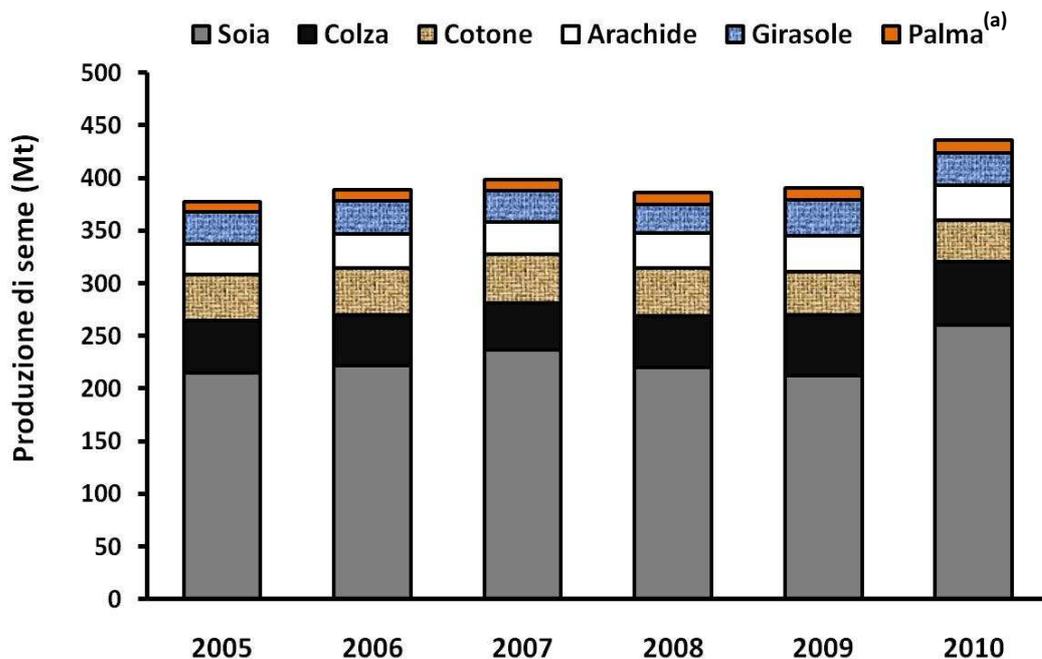


Fig. 1. Produzione mondiale di seme (Mt, milioni di tonnellate) delle principali specie oleaginose dal 2005 al 2010 (Fonti: USDA e FAO, 2010).

^(a) La produzione della palma è riferita al seme.

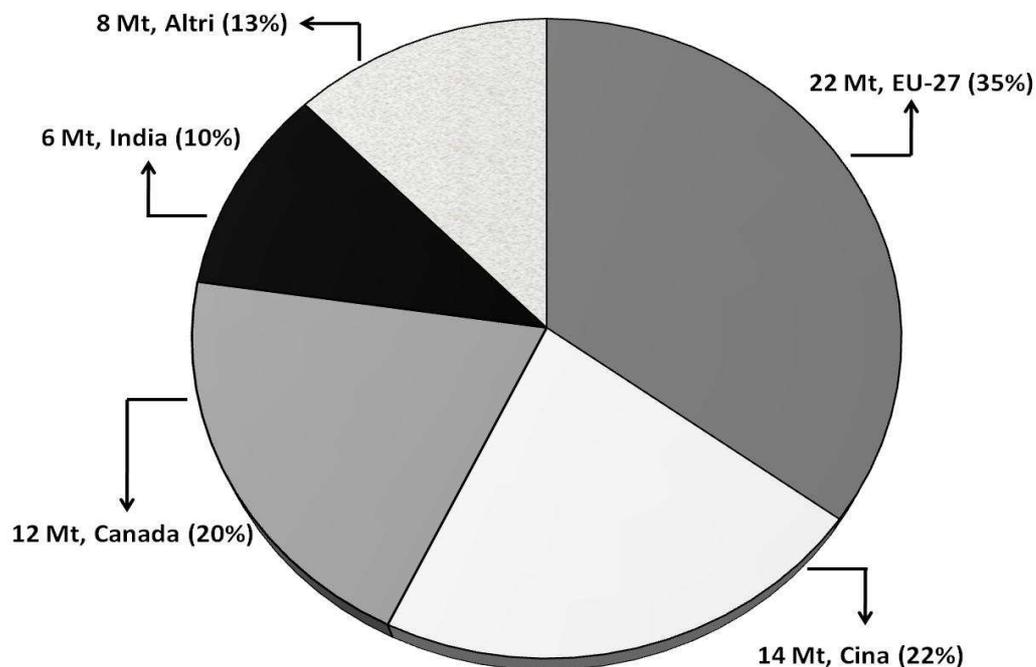


Fig. 2. Principali paesi produttori di seme di colza (Mt, milioni di tonnellate) nel 2010 (Fonti: USDA e FAO, 2010).

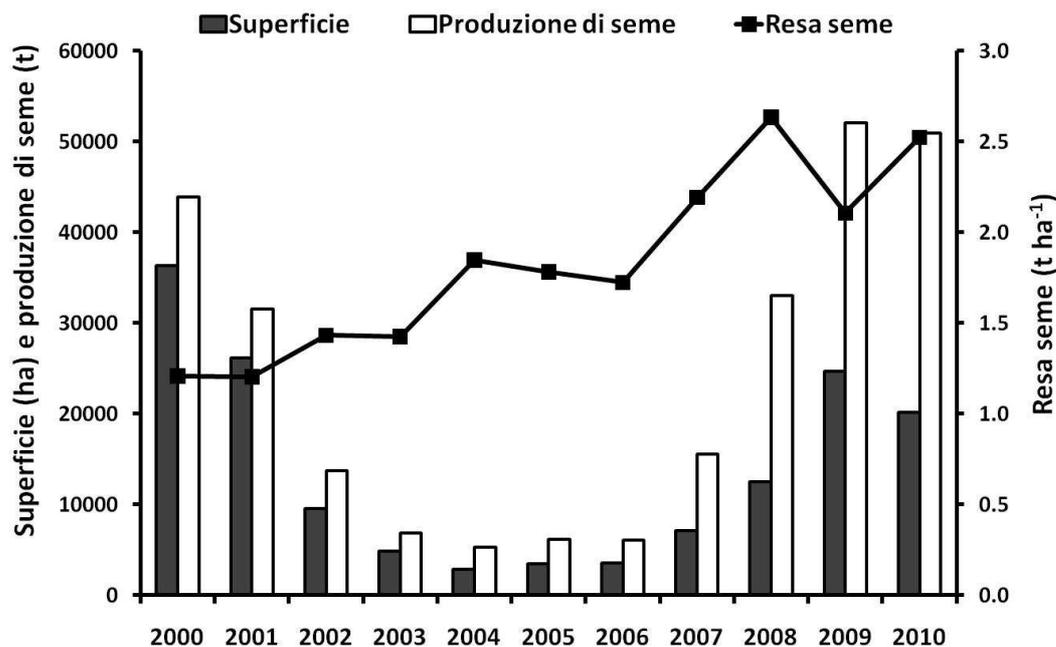


Fig. 3. Andamento decennale (2000-2010) della superficie coltivata (ha), produzione di seme (t) e resa seme (t ha⁻¹) del colza in Italia (Fonte: ISTAT, 2010).

1.1.2 Botanica della specie

Il genere *Brassica* è uno dei 51 afferenti alla Famiglia delle *Brassicaceae* (Gomez Campo, 1980). Delle 37 specie appartenenti a tale genere, le quattro maggiormente coltivate sono *B. rapa* L., *B. juncea* L. Czernj. & Cosson, *B. carinata* A. Braun e *B. napus* L. (Raymer, 2002; Rakow, 2004).

Queste specie, come proposto da U (1935), si sono costituite attraverso processi di ibridazione interspecifica tra 3 specie-base: *B. nigra* L. Koch (genoma BB, $2n = 16$), *B. rapa* L. (AA, $2n = 20$, sin. *B. campestris* L.) e *B. oleracea* L. (CC, $2n = 18$). Il colza attualmente coltivato (*B. napus* L. var. *Oleifera*, AACC, $2n = 4x = 38$) è una specie anfiploide evolutasi dall'ibridazione tra *B. rapa* e *B. oleracea* con successivo raddoppiamento del corredo cromosomico.

Il colza è una pianta erbacea annua (varietà primaverili) o biennale (varietà invernali) con radice fittonante moderatamente ramificata, che supera agevolmente 1 m di profondità, benché la maggior parte delle radici siano presenti nei primi 30-40 cm (Toniole e Mosca, 2001; Zanetti et al., 2011). Il fusto eretto si ramifica per 20-22 internodi raggiungendo nelle varietà a taglia normale ~200 cm di altezza; nelle varietà semi-nane

di più recente costituzione, il racemo principale non supera i 130-150 cm. Lungo il fusto si inseriscono le lamine fogliari che presentano diversa morfologia a seconda del punto d'inserzione; le foglie basali sono lobate, lirato-pennatosette, mentre quelle superiori sono sessili, intere e abbraccianti parzialmente il fusto con parte della lamina (De Mastro e Bona, 1998). L'infiorescenza a racemo è composta da fiori ermafroditi, attinomorfi, con calice e corolla a 4 elementi liberi disposti ortogonalmente. L'androceo presenta 6 stami, i 2 esterni più corti dei 4 interni (stami tetradinami). L'ovario è supero bicarpellare e apparentemente biloculare per la presenza di un falso setto chiamato *replum* (Tonzig, 1956). La fioritura avviene con scalarità acropeta dal basso verso l'alto. Il colza è autofertile ed entomofilo con fecondazione sia autogama (70%), che allogama (30%), (Becker et al., 1992). Il frutto è una siliqua che a maturità deisce lungo due linee longitudinali separanti le foglie carpellari. Le due valve, attraverso placente di tipo parietale, contengono semi bruno-neri, lisci e rotondeggianti, per un numero potenzialmente variabile da 30 (Schulz, 1987), a 40 (Morgan, 1982); in condizioni di campo tale valore varia da 15 a 20 (Diepenbrock, 2000). Il peso unitario del seme è compreso tra 3,5 e 5 mg. Il tegumento seminale rappresenta il 12-20% del peso totale, la restante quota è riferita all'embrione e ai cotiledoni. Questi ultimi contengono circa il 50% dei lipidi estraibili (Toniolo e Mosca, 2001).

1.1.3 Fenologia e sua modellizzazione

1.1.3.1 Fenologia

Lo sviluppo di un organismo vegetale è definito come il progredire ordinato di stadi definiti, che vanno dalla germinazione fino alla morte dello stesso. Le principali grandezze climatiche che influiscono in modo determinante il ciclo biologico delle piante coltivate sono la temperatura e il fotoperiodo. In colza, gli effetti di questi fattori ambientali sono stati ampiamente indagati sia nelle varietà invernali che in quelle primaverili (Nanda et al., 1996; Miralles et al., 2001; Robertson et al., 2002). Nei tipi a semina autunnale (cultivar longidiurne) – principali materiali coltivati negli areali nazionali ed europei – la risposta fotoperiodica (Fig. 4 a), si manifesta principalmente nel periodo compreso tra l'emergenza e l'inizio della fioritura, attraverso un accorciamento del ciclo all'aumentare della lunghezza del giorno. In tal senso, i fotoperiodi compresi tra 12 e 14 h risultano quelli maggiormente efficaci (Nanda et al., 1996; Habekotté, 1997; Robertson et al., 2002). In seguito alla fioritura, la fenologia della specie è condizionata principalmente dalla temperatura (Nanda et al., 1996; Habekotté, 1997; Miralles et al., 2001). Nei materiali 'winter', il regime termico ha decise ripercussioni sulla fenologia culturale anche in periodi più precoci della fioritura; affinché la fase riproduttiva abbia inizio è necessario soddisfare il fabbisogno di freddo (vernalizzazione) attraverso un periodo di esposizione a basse temperature. La risposta alla vernalizzazione (Fig. 4 b) è massima nel range termico compreso tra 0 e 5°C, con il quale sono necessari 20-30 giorni per soddisfare il fabbisogno in freddo (Habekotté, 1997; Robertson et al., 2002).

Il ciclo di sviluppo può essere suddiviso in sei fasi: emergenza, produzione di foglie, allungamento del fusto, sviluppo delle infiorescenze, fioritura, sviluppo di silique e semi (Diepenbrock, 2000).

Successivamente alle operazioni di semina, le sostanze di riserva accumulate nel seme vengono idrolizzate in seguito ai processi di imbibizione. Il tempo richiesto per la fuoriuscita dei cotiledoni dal terreno dipende dal grado di umidità del suolo, dalla sua struttura e temperatura. Rispetto a quest'ultimo fattore, il tasso di emergenza risponde linearmente con una temperatura base pari a 3°C (Marshall e Squire, 1996).

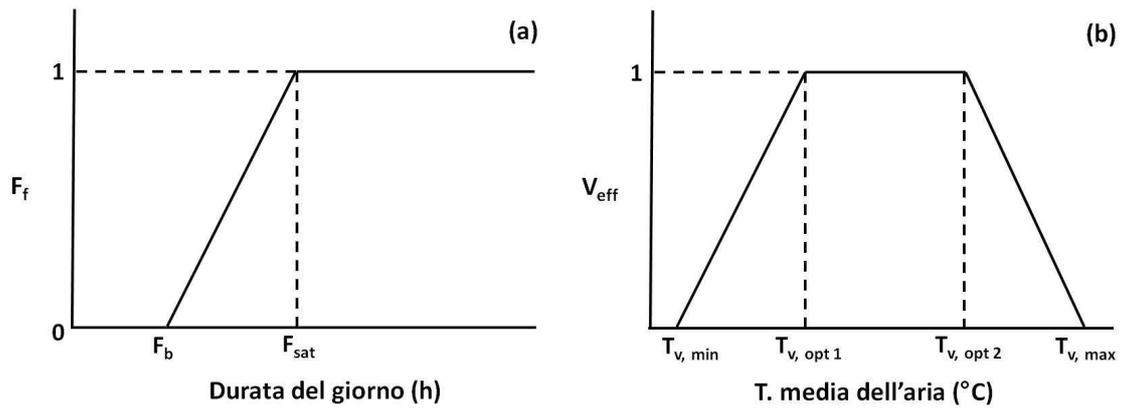


Fig. 4. (a) Rappresentazione schematica della risposta fotoperiodica di specie longigiurne. F_p : fattore fotoperiodo (0-1); F_b : fotoperiodo base; F_{sat} : fotoperiodo saturante.

(b) Rappresentazione schematica della risposta alla vernalizzazione. V_{eff} : efficienza della vernalizzazione (0-1); $T_{v,min}$: temperatura minima per la vernalizzazione; $T_{v,opt1}$: temperatura minima per una vernalizzazione ottimale; $T_{v,opt2}$: temperatura massima per una vernalizzazione ottimale; $T_{v,max}$: temperatura massima per la vernalizzazione (Fonti: Donatelli, 1995; Habekotté, 1997).

Terminato lo sviluppo cotiledonare, ha inizio la parte vegetativa del ciclo che si conclude con la schiusa dei fiori. In questo periodo la coltura promuove la differenziazione fogliare e, successivamente, l'allungamento degli internodi (fase di levata). Il tasso di produzione delle foglie segue un andamento bi-fasico determinato dal fillocrone. Quest'ultimo, definito come la somma termica (GDD: °Cd) necessaria per l'apparizione di due foglie successive, definisce per le lamine basali del fusto ritmi di sviluppo più lenti (62 e 84 °Cd; n° di foglie <15), rispetto a quelli delle foglie più apicali (25-50 °Cd; n° di foglie >15), (Miralles et al., 2001; Gomez e Miralles, 2010).

Raggiunto il numero di 6-8 foglie vere, la pianta presenta lo stadio di 'rosetta'. Tale fase si colloca nei mesi invernali e garantisce alla pianta ampia resistenza al freddo, proteggendo i primordi fiorali precedentemente indotti (Schröder e Makowski, 1996). Le basse temperature e la scarsa intensità luminosa, tipici della stagione, provocano tuttavia una forte defogliazione (Gabrielle et al., 1998 a) e ingenti perdite di azoto organico (Dejoux et al., 1999).

In presenza di regimi termici più miti (T. med. ~5°C; Toniolo e Mosca, 2001) e lunghezze fotoperiodiche di ~12 h (Nanda et al., 1996), hanno inizio la levata e lo sviluppo delle infiorescenze. Tali stadi risultano sovrapposti (Wang et al., 2011), rendendo il loro rilievo fenologico difficile e poco accurato.

La fase di fioritura comincia con l'apertura dei primi bottoni fiorali portati alla base dei racemi e continua, lungo gli stessi, per circa un mese con andamento acropeto. La schiusa dei fiori, particolarmente abbondante nel colza, oltre a conferire un piacevole aspetto alla coltura ha forti implicazioni sulla fisiologia della canopy. Essa provoca un intenso autombreggiamento abbattendo l'intercettazione luminosa della superficie fogliare sottostante e conseguentemente il processo fotosintetico (Berry e Spink, 2006). Questo quadro fisiologico si traduce in un'intensa cascola di fiori.

La mancata intercettazione luminosa delle foglie viene in parte compensata dallo specifico contributo di fusti e silique. Allen e Morgan (1972) hanno dimostrato che il PAI (Pod Area Index), alla sua massima espansione, è comparabile all'ampiezza del LAI. Tuttavia, il lento accrescimento del PAI non compensa prontamente il repentino calo di LAI (Fig. 5), generando una superficie intercettante inadeguata a sostenere la crescita degli organi riproduttivi (Diepenbrock, 2000).

Le fasi finali del ciclo colturale coinvolgono lo sviluppo delle silique e dei semi. Tali strutture sono determinate precocemente a partire dalla piena fioritura per un periodo di ~300 °Cd equivalente a 19-25 giorni (Berry e Spink, 2006). Dal termine della fioritura, il periodo di riempimento dei semi continua per altri 40 giorni_circa. In questa fase, l'accumulo di olio e la perdita di acqua rappresentano i principali processi che coinvolgono il metabolismo seminale.

1.1.3.2 Il riconoscimento fenologico: i codici BBCH

Lo sviluppo fenologico del colza invernale, come descritto in precedenza, risulta definito principalmente da fattori ambientali, quali temperatura (inclusa la vernalizzazione) e fotoperiodo. Questi, in condizioni di pieno campo, variano di continuo e simultaneamente, determinando il contemporaneo sviluppo degli organi vegetativi e riproduttivi (Diepenbrock, 2000; Rathke et al., 2006). Tale sovrapposizione rende la fenologia dell'oleifera di difficile riconoscimento. L'utilizzo di una scala numerica in grado di codificare il ciclo colturale in funzione di precisi tratti morfologici della pianta permetterebbe di aumentare l'accuratezza dei rilievi fenologici, consentendo di determinare con precisione e oggettività il momento in cui avviene ciascun stadio di crescita. Inoltre, i sistemi informatici a supporto dei processi decisionali legati al management colturale,

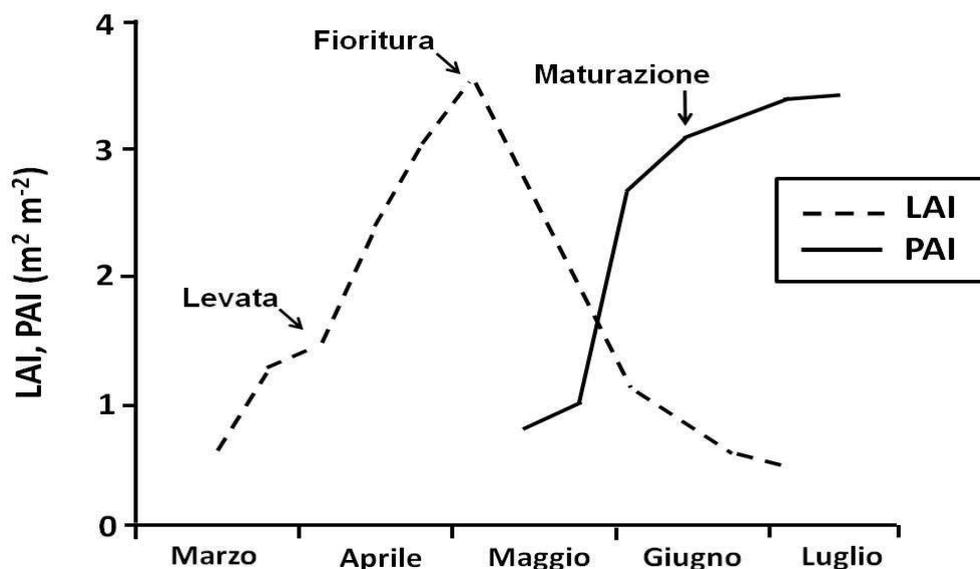


Fig. 5. Dinamica di sviluppo di LAI (Leaf Area Index) e PAI (Pod Area Index) del colza invernale (Fonte: Diepenbrock e Grosse, 1995).

nonché i modelli fenologici previsionali, richiedono una codifica numerica del processo fenologico di agevole archiviazione ed elaborazione.

Ad oggi, la scala BBCH (Biologische bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry) è uno dei sistemi di codifica maggiormente impiegati nella descrizione fenologica di specie coltivate e non (Weber e Bleiholder, 1990; Lancashire et al., 1991). Essa permette di definire stadi fenologici analoghi, osservabili sia in specie monocotiledoni che dicotiledoni. La sua struttura è utilizzabile anche per tutte quelle specie per le quali non sono disponibili scale apposite.

Il sistema BBCH è centesimale e suddivide l'intero ciclo colturale in 10 stadi principali (0-10), a loro volta divisi in 10 stadi secondari (00-99). Dalla combinazione dei numeri primari e secondari risulta un codice binario associato a un preciso stadio di sviluppo. La determinazione dei codici è basata sull'osservazione non distruttiva di semplici tratti morfologici caratteristici di ciascuna fase fenologica (Meier et al., 2009). La semina è codificata con 00, mentre le fasi di post-raccolta e i trattamenti di stoccaggio sono siglati con 99. In riferimento alla scala BBCH adattata al colza, il ciclo di sviluppo è codificato come riportato in Tab. 1. E' da notare che gli stadi BBCH compresi tra 40 e 49 sono omessi, poiché riferiti allo sviluppo di organi vegetativi raccogliibili o destinati alla propagazione.

Tab. 1. Fasi fenologiche e chiavi di identificazione BBCH per colza (Fonti: Weber e Bleiholder, 1990; Lancashire et al., 1991).

<i>0. Germinazione</i>		<i>1. Sviluppo delle foglie</i>		<i>2. Sviluppo dei germogli laterali</i>		<i>3. Allungamento fusto</i>		<i>4. Svil. parti veget. raccogliabili</i>	
00	Seme secco	10	Cotiledoni completamente distesi	20	Nessun germoglio laterale	30	Inizio dell'allungamento dello stelo	40	-
01	Inizio dell'imbibizione del seme	11	Prima foglia vera distesa	21	1 germoglio laterale visibile	31	1 internodo allungato visibile	41	-
03	Imbibizione del seme completata	12	2 foglie vere distese	22	2 germogli laterali visibili	32	2 internodi allungati visibili	42	-
05	Fuoriuscita della radice del seme	13	3 foglie vere distese	23	3 germogli laterali visibili	33	3 internodi allungati visibili	43	-
07	Ipocotile con i cotiledoni fuoriesce dal seme	14	4 foglie vere distese	24	4 germogli laterali visibili	34	4 internodi allungati visibili	44	-
08	Accrescimento dell'ipocotile con i cotiledoni verso la superficie del terreno	1.	Formazione delle foglie successive fino a 9	2.	Formazione di germogli laterali successivi fino a 9	3.	Allungamento di successivi internodi fino a 9	4.	-
09	Emergenza	19	9 o più foglie vere distese	29	9 o più germogli laterali visibili	39	9 o più internodi allungati visibili	49	-
<i>5. Emissione delle infiorescenze</i>		<i>6. Fioritura</i>		<i>7. Sviluppo del frutto</i>		<i>8. Maturazione</i>		<i>9. Senescenza</i>	
50	Boccioli presenti ancora chiusi fra le foglie	60	Primi fiori aperti	71	10% delle silique hanno raggiunto la dimensione finale	80	Inizio maturazione: semi verdi, riempimento della siliqua	97	Piante morte e secche
51	Boccioli visibili dall'alto (" <i>green bud</i> ")	61	10% dei fiori aperti nel racemo principale, allungamento del racemo principale	73	30% delle silique hanno raggiunto la dimensione finale	81	10% delle silique mature con semi secchi e duri	99	Prodotto raccolto
52	Boccioli liberi a livello delle foglie più giovani	63	30% dei fiori aperti nel racemo principale	75	50% delle silique hanno raggiunto la dimensione finale	83	30% delle silique mature con semi secchi e duri		
53	Boccioli al di sopra delle foglie più giovani	65	Piena fioritura: fiori aperti nel racemo principale, caduta dei petali più vecchi	77	70% delle silique hanno raggiunto la dimensione finale	85	50% delle silique mature con semi secchi e duri		
55	Boccioli singoli (infiorescenza principale) visibili ma ancora chiusi	67	Rallentamento della fioritura, maggioranza dei petali caduti	79	Quasi tutte le silique hanno raggiunto la dimensione finale	87	70% delle silique mature con semi secchi e duri		
57	Boccioli singoli (infiorescenza secondaria) visibili ma ancora chiusi	69	Fine fioritura			89	Maturazione piena		
59	Primi petali visibili, boccioli fiorali individuali ancora chiusi (" <i>yellow bud</i> ")								

1.1.3.3 Modelli fenologici per colza

La conoscenza dell'evoluzione fenologica delle colture d'interesse agrario, e delle principali specie infestanti a esse associate, è fondamentale ai fini di una corretta realizzazione di tutte quelle pratiche agronomiche di post-emergenza, come la concimazione, il diserbo, i trattamenti antiparassitari, ecc., la cui esecuzione è strettamente legata allo stadio di crescita. Lo sviluppo di modelli fenologici previsionali desta quindi particolare interesse, soprattutto nella definizione di programmi di assistenza tecnica per la gestione colturale (Bindi et al., 2002). L'utilizzo degli input agronomici in accordo con lo sviluppo della pianta permette di incrementare l'efficacia dei trattamenti, riducendo possibili danni all'ambiente e perdite economiche.

I modelli fenologici sono di tipo matematico e semi-empirico (i.e., non descrivono i processi fisici e biologici che determinano gli eventi, ma si basano su relazioni tra dati di input – es. temperatura dell'aria – e dati di output – es. data di inizio della stagione vegetativa –), creati per simulare l'andamento fenologico a partire da dati climatici. Essi si basano su osservazioni dirette delle diverse fasi di sviluppo, le quali sono utilizzate, inizialmente, per calibrare il modello (calibrazione) e, successivamente, per testarne la capacità predittiva (validazione), (Marletto, 1999).

Numerosi approcci sono stati utilizzati allo scopo di fornire una corretta interpretazione delle relazioni esistenti tra i fattori ambientali e l'evoluzione fenologica. I metodi più semplici considerano la relazione tra le sommatorie termiche e le fasi di sviluppo di tipo lineare, mentre in quelli più complessi la fenologia è determinata dall'effetto iterativo di temperatura, vernalizzazione e fotoperiodo (Bindi et al., 2002).

Limitatamente al colza, i pochi modelli fenologici disponibili in letteratura descrivono lo sviluppo colturale applicando quest'ultimo criterio (Habekotté, 1997; Husson et al., 1998; Gabrielle et al., 1998 b); il tasso di sviluppo è influenzato dagli effetti moltiplicativi della temperatura, fotoperiodo e vernalizzazione. Tali modelli sono stati sviluppati per gli areali di coltivazione del nord e centro Europa mirando a predire solamente gli stadi 'chiave' dello sviluppo colturale (i.e., emergenza, fioritura e maturazione). Modelli in grado di fornire una descrizione più dettagliata del ciclo colturale, capaci di predire la fase di sviluppo fogliare piuttosto che la levata o l'emissione delle infiorescenze e applicabili anche in ambienti di coltivazione del sud Europa, risultano ancora da realizzare.

1.1.4 Struttura produttiva della coltura

Nel colza la resa areica in seme è il prodotto d'interazione tra densità di piante, numero di silique per pianta, numero di semi per siliqua e peso unitario del seme (Diepenbrock, 2000). Oltre a queste componenti principali ne vengono definite anche di secondarie come illustrato in Fig. 6.

Una tale struttura produttiva è ritenuta essere altamente plastica, poiché attraverso adattamenti morfologici è in grado di compensare agevolmente un minore utilizzo di fattori colturali o condizioni ambientali avverse (Christensen e Drabble, 1984; Berti e Mosca, 1987; Bonari et al., 1994; Leto et al., 1994; Merrien et al., 1997).

1.1.4.1 Densità di piante

La densità di piante influenza il grado di competizione all'interno e tra le canopy, con decise ripercussioni sulla fisiologia e morfologia dell'intera struttura produttiva (Diepenbrock, 2000).

Negli odierni itinerari colturali è riscontrabile la tendenza a ridurre il popolamento in campo (Romano, 2009); basse densità di piante limiterebbero l'incidenza di infezioni parassitarie (Twengstrom et al., 1998), garantendo nel contempo il raggiungimento di rese comparabili a quelle ottenibili con investimenti maggiori (Momoh e Zhou, 2001; Angadi et al., 2003).

Le modalità di semina, gli stress biotici o abiotici e lo stesso antagonismo inter-pianta, incidono sia sulla numerosità che sulla distribuzione spaziale della coltura. Popolamenti di campo numericamente simili ma irregolarmente distribuiti, raggiungono performance produttive diversificate e decrescenti all'aumentare della variabilità spaziale. Canopy disomogenee inoltre, sembrano più esposte agli effetti negativi indotti da stress di tipo ambientale, determinando rese di prodotto altalenanti (Sierts et al., 1987).

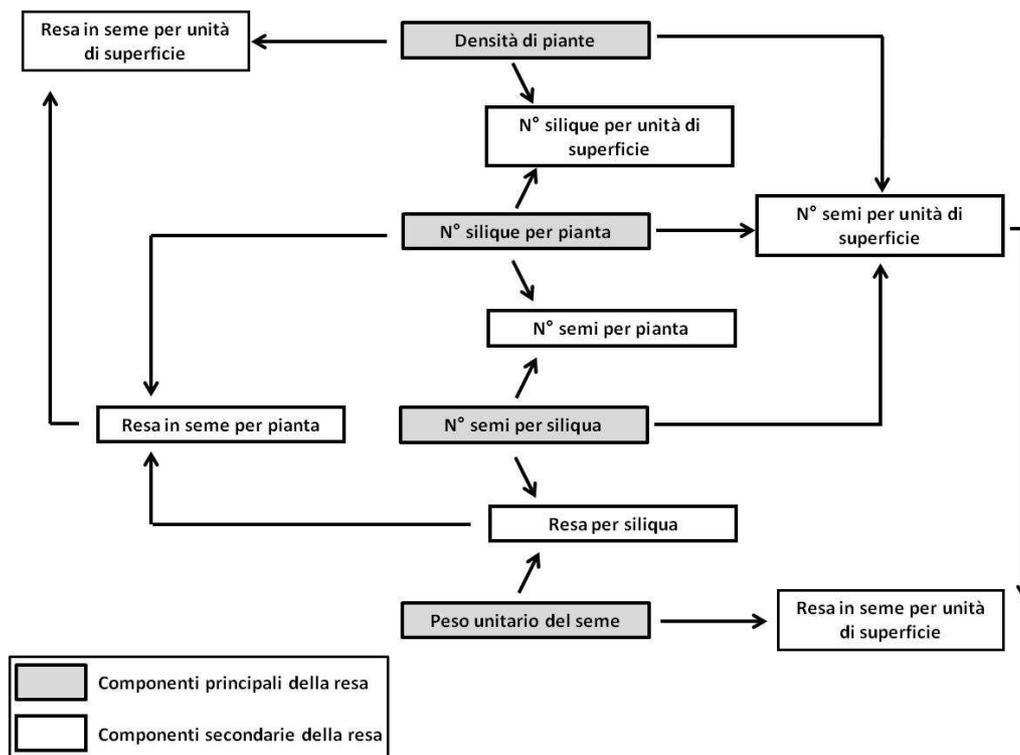


Fig. 6. Struttura produttiva del colza (Fonte: Diepenbrock e Grosse, 1995).

1.1.4.2 Numero di siliques per pianta

Molteplici fattori come la disponibilità di nutrienti (Rood e Major, 1984), il metabolismo ormonale (De Bouille et al., 1989), il numero potenziale di fiori e siliques (Habekottè, 1993), concorrono a determinare la fruttificazione della canopy. In letteratura è ripetutamente confermata la relazione inversa tra il numero di siliques e quello di piante per unità di superficie (Sierts et al., 1987; Chay e Thurling, 1989; Angadi et al., 2003). Di fatto, all'aumentare della densità di popolamento si riduce il numero di branche fertili per pianta e conseguentemente anche quello di siliques.

Effetti macroscopici sulla fruttificazione sono imputabili anche all'epoca di semina e alla concimazione azotata. Per un determinato areale di coltivazione, le epoche ritardate, rispetto a semine ottimali, generalmente determinano una modesta fertilità fiorale e uno scarso differenziamento di siliques, poiché alterano il ciclo culturale accorciandone la fase vegetativa e di conseguenza limitano l'espansione fogliare e la disponibilità di fotosintetati (Jenkins e Leitch, 1986). Esiti simili sono attribuibili anche ad apporti azotati limitati (Scarbrick et al., 1980; Wright et al., 1988).

1.1.4.3 Numero di semi per siliqua e peso unitario del seme

Come descritto in precedenza, il numero di semi per siliqua varia potenzialmente da 20 a 30, ma in condizioni di campo si attesta su valori più modesti, compresi tra 15 e 20 (Morgan, 1982; Schulz, 1987; Diepenbrock, 2000). Esso risulta variabile tra il raso principale e le ramificazioni, assumendo valori decrescenti passando dall'asse centrale alle branche laterali. Tra quest'ultime, quelle di ordine superiore presentano le quantità minori (Diepenbrock, 2000).

Il numero di semi per siliqua è correlato negativamente a quello delle fruttificazioni; epoche di semina ritardate spesso garantiscono silique più fertili poiché associate a una numerosità modesta (Jenkins e Leicht, 1986). Al contrario, semine precoci permettono elevate densità di silique contraddistinte però, da forti aborti seminali (Mendham et al., 1981 a,b).

Il peso unitario del seme completa la struttura produttiva del colza. Esso varia in funzione del numero di silique per pianta, del punto d'inserzione delle stesse e della loro fertilità. Semi leggeri si riscontrano in piante con un'elevata fruttificazione, soprattutto se concentrata alla base della chioma (Stoy, 1983) e in silique contenenti un elevato numero di semi (Léon e Becker, 1995). In generale, il peso del seme assume valori compresi tra 4-5 mg che può incrementare fino a 8 mg considerando i genotipi ibridi (Vamerali e Zanetti, 2007).

Tale componente risulta debolmente correlata alla resa rendendola poco interessante per programmi di miglioramento genetico. Considerando inoltre, le correlazioni negative che intercorrono tra essa e le altre componenti (i.e., numero di silique pianta⁻¹ e semi siliqua⁻¹), processi di selezione mirati a incrementarla potrebbero di fatto, peggiorare gli altri fattori produttivi (Diepenbrock, 2000).

I suddetti adattamenti morfologici che intercorrono tra le varie componenti della resa sono ben descritti per i genotipi più tradizionali a taglia 'normale' cioè privi di riduzioni d'altezza (Lefort-Buson e Dattèe, 1986; Potter et al., 1999; Momoh e Zhou, 2001); evidenze sperimentali in tal senso mancano invece per le cultivar di recente costituzione definite semi-nane.

1.1.5 Recenti criteri di miglioramento genetico e varietà disponibili

Il miglioramento genetico nel colza è molto recente, se confrontato con quello di altre colture, ed è stato avviato inseguito alla carenza di olio verificatasi nel secondo dopoguerra.

A livello europeo il processo di breeding si è sviluppato soprattutto in Francia, Germania e Danimarca su materiale di tipo winter, mentre in Canada su varietà tipo spring. Quest'ultime presentano un ciclo primaverile-estivo e sono normalmente coltivate in quei paesi dove le basse temperature invernali non permettono la sopravvivenza delle piante (e.g., Canada); possono essere impiegate anche in semina autunnale in quegli ambienti caratterizzati da inverni troppo miti per assicurare il soddisfacimento del fabbisogno di vernalizzazione tipico delle cultivar 'winter' (e.g., Australia), (Temple Heald, 2004).

I materiali a ciclo autunno-primaverile caratterizzano i sistemi colturali del nord Europa e per quanto riguarda l'Italia, la Pianura Padana, rappresenta l'areale più idoneo, dove raggiungono significative produzioni (Zanetti et al., 2009).

Gli aspetti qualitativi della resa legati al profilo acidico dell'olio sono stati massicciamente migliorati nel passato a partire dagli anni '70. Ad oggi, sono disponibili varietà sia LEAR (Low Erucic Acid Rapeseed), che HEAR (High Erucic Acid Rapeseed), rispettivamente a basso (<2 w/w) e alto contenuto di acido erucico (>45% w/w). L'ingegneria genetica inoltre, attraverso la modificazione dei pool enzimatici responsabili della desaturazione e allungamento delle catene acidoiche (i.e., *elongasi* e *desaturasi*, rispettivamente), ha costituito cultivar in grado di produrre oli con profili acidici *ad hoc* per diversi utilizzi sia alimentari che industriali. In questo contesto si inseriscono, tra le altre, le varietà HOLL (High Oleic Low Linoleic), ad alto e basso contenuto di acido oleico e linolenico rispettivamente (Baux et al., 2008), e quelle HORO (High Oleic Rapeseed Oil), ad alto contenuto di acido oleico (Schierholt e Becker, 2001). Le matrici lipidiche che derivano da questi materiali sono caratterizzate da una spiccata resistenza all'ossidazione e trovano largo impiego nel settore della friggitoria e nella produzione di biocarburanti (Ratnayake e Daun, 2004).

Il più recente lavoro di breeding è orientato a migliorare la risposta quantitativa della coltura attraverso l'ottimizzazione delle componenti produttive e l'aumento della resistenza alle più diverse situazioni di stress, sia biotiche che abiotiche.

Berry e Spink (2006) definirono il numero di semi m^{-2} e il peso unitario del seme, le principali componenti della resa da ottimizzare per avvicinare il potenziale produttivo della specie. A tale scopo, gli stessi autori indicarono come obiettivo imprescindibile la massimizzazione del processo fotosintetico.

In tal senso, i processi di selezione mirano ad anticipare l'inizio della fase di fioritura, esaltando la precocità varietale. Fioriture anticipate, collocate in periodi dell'anno caratterizzati da temperature meno miti dilaterrebbero la successiva fase di riempimento dei semi, permettendo di incrementare l'intercettazione luminosa e la quantità di fotosintetati potenzialmente traslocabili ai semi. L'attuale tendenza mira a costituire varietà caratterizzate da una fase di riempimento semi di ~50 giorni, rispetto ai ~40 giorni tipici delle cultivar più tradizionali (Berry e Spink, 2006).

La fioritura del colza è molto abbondante e in grado di limitare drasticamente la radiazione assorbibile dalla sottostante superficie fogliare, in ragione di una riflessione pari al 58% della frazione luminosa fotosinteticamente attiva (Yates e Steven, 1987). La necessità di ridurre la massa fiorale ha promosso la costituzione di cultivar definite apetalate, le quali però, forniscono rese di prodotto altalenanti e generalmente afferiscono a materiali di tipo *spring* non adatti agli ambienti di coltivazione europei (Rao et al., 1991; Fray et al., 1996).

Miglioramenti nella capacità d'intercettazione luminosa sono possibili anche attraverso la selezione di cultivar con silique a portamento eretto o di varietà resistenti al fenomeno dell'allettamento.

Genotipi caratterizzati da fruttificazioni erette presentano coefficienti di estinzione della radiazione solare minori (K: 0,35–0,44), rispetto a quelli di varietà con silique patenti (K: 0,45–0,55). La migliore penetrazione luminosa all'interno della canopy garantirebbe una superficie fogliare durevole, in grado di sostenere lo sviluppo delle silique e dei semi anche nelle parti più basali della chioma (Fray et al., 1996).

L'allettamento normalmente occorre durante il periodo di riempimento semi – maturazione, quando l'elevato peso delle fruttificazioni compromette la stabilità strutturale della pianta. La coltura allettata risulta prostrata a terra e i principali organi fotosintetizzanti tipici delle fasi post-fiorali (silique), assumono forzatamente una postura orizzontale. Tale posizione compromette l'efficienza d'uso della radiazione solare; le silique superiori raggiungono facilmente la saturazione luminosa in ragione della loro modesta capacità fotosintetizzante, mentre l'intercettazione delle fruttificazioni inferiori è compromessa dai fenomeni di autombreggiamento (Berry e Spink, 2006). Come calco-

lato da Baylis e Wright (1990) e Armstrong e Nichol (1991), il limitato approvvigionamento luminoso, associato alle altre problematiche legate all'allettamento (raccolta approssimativa, elevata incidenza di fitopatie), provocherebbero cali di resa di seme tra il 16 e il 50%.

La recente costituzione di materiali semi-nani permetterebbe di contenere tale fenomeno. Queste cultivar, prodotte incrociando linee convenzionali e linee *dwarf*, sono contraddistinte da un *habitus* vegetativo ridotto, con internodi più ravvicinati e un'altezza d'inserzione della prima ramificazione basale più bassa rispetto alle varietà tradizionali (Sieling e Kage, 2008; Liu et al., 2010).

Le cultivar semi-nane afferiscono quasi esclusivamente a tipologie genetiche ibride CHH (Composite Hybrid Hybrid), con fertilità maschile completamente ristorata. Unitamente agli ibridi CHH ad altezza convenzionale e alle varietà a impollinazione libera, tali genotipi costituiscono il panorama varietale attualmente disponibile sul mercato sementiero nazionale e internazionale.

Gli ibridi a portamento ridotto tendenzialmente raggiungono rese di prodotto inferiori rispetto ai materiali più tradizionali (Sieling e Kage, 2008). Tuttavia, il loro potenziale produttivo non sembra un fattore limitante per le loro performance di campo (Berry e Spink, 2006). Sono quindi, altre cause, ascrivibili all'influenza dei fattori ambientali e all'applicazione di tecniche agronomiche inadeguate a compromettere la loro risposta produttiva. Di fatto, i genotipi semi-nani potrebbero richiedere itinerari tecnici diversificati rispetto a quelli applicati nella coltivazione delle varietà convenzionali; il minore vigore vegetativo che li contraddistingue potrebbe definire, per esempio, densità di semina o apporti azotati differenti. La maggiore resistenza all'allettamento estenderebbe la risposta positiva della resa a dosi di azoto più elevate rispetto agli ibridi tradizionali. Al contrario, il minore vigore vegetativo potrebbe definire fabbisogni minerali più limitati, determinando dosi inferiori di concime da apportare.

Di qui la necessità di indagare le riposte morfologiche e produttive dei vari genotipi attualmente disponibili sul mercato varietale a differenti input culturali allo scopo di definirne la tecnica agronomica più appropriata.

1.1.6 Tecnica agronomica

In riferimento al colza italiano, la definizione di un idoneo iter colturale desta crescente interesse tra ricercatori e tecnici. La sua recente introduzione negli avvicendamenti e gli incalzanti adempimenti europei in materia di sostenibilità ambientale hanno riavviato delle sperimentazioni nazionali tese ad affinare la tecnica di coltivazione.

L'attuale politica agricola europea mira soprattutto a far calibrare gli input agronomici in ragione delle odierne esigenze di sostenibilità ambientale ed economica.

1.1.6.1 Avvicendamento

Le varietà di colza coltivate nel nord Italia presentano ciclo autunno-primaverile e nell'avvicendamento occupano lo stesso posto del frumento (Toniolo e Mosca, 2001). Normalmente essa è inserita come coltura da rinnovo nelle monosuccessioni cerealicole comportando molteplici vantaggi agronomici. E' ben assodato in letteratura l'effetto positivo del colza sulla risposta produttiva del frumento coltivato in successione (Milford et al., 1993; Panse et al., 1994; Gan et al., 2003). Il terreno alla raccolta si presenta di buona struttura e il basso Harvest Index che contraddistingue l'oleifera (HI: 0,30-0,35) garantisce un elevato apporto di materiale organico prontamente mineralizzabile e utilizzabile dalla coltura che segue in avvicendamento (Rathke et al., 2006).

Una corretta gestione di questa brassicacea deve prevedere rotazioni ampie (quadriennali). Avvicendamenti brevi (biennali), come dimostrato da Sieling et al. (1997), deprimono la produzione granellare di $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ rispetto a rotazione più larghe (triennali). Rotazioni strette peggiorano le condizioni fitosanitarie del sistema colturale incrementando le perdite di resa associate a patologie fungine causate da *Leptosphaeria maculans* e *Sclerotinia sclerotiorum*.

1.1.6.2 Lavorazione del terreno

La preparazione del terreno è uno degli aspetti più delicati della tecnica agronomica (Ciricofolo et al., 2001). Essa, considerate le ridotte dimensioni del seme, deve consentire la massima regolarità e uniformità d'emergenza, quindi un adeguato investimento colturale. E' ritenuto prioritario inoltre, che la lavorazione del letto di semina dia la possibilità alla coltura di svilupparsi sufficientemente prima della stasi di sviluppo

invernale e garantisca, nel medesimo periodo, un tempestivo allontanamento delle acque in eccesso.

Se il terreno è sufficientemente libero da residui colturali si possono adottare tecniche di minima lavorazione (estirpatura + erpicatura, o solo erpicatura), alle quali oggi ci si può orientare senza provocare sensibili riduzioni di resa, in sostituzione all'aratura tradizionale (Bowerman et al., 1995; Sauzet et al., 2003). La semina su sodo risulta di più difficile applicazione soprattutto se applicata in terreni mal strutturati soggetti a costipamento e ristagno idrico (Sauzet et al., 2003). L'aratura, eseguita a una profondità di 35 cm, rimane comunque il tipo di lavorazione più diffusa, seguita dalle operazioni complementari di estirpatura ed erpicatura per la completa preparazione del letto di semina.

1.1.6.3 Semina

La semina può essere eseguita con seminatrici universali da frumento o pneumatiche di precisione a profondità di 2-3 cm. La distanza interfilare può variare da 30-35 cm fino a 45 cm qualora si opti per il controllo meccanico delle malerbe. La densità di semina deve essere almeno doppia rispetto al numero di piante da ottenere alla raccolta (mediamente 35-45 piante m⁻², massimo 50 piante). Negli odierni itinerari colturali è riscontrabile la tendenza a ridurre il popolamento in campo diminuendo la densità di semina a 30-40 semi m⁻² (Romano, 2009). Basse popolazioni, oltre a limitare i rischi di infezioni parassitarie (Twengstrom et al., 1998), garantirebbero rese di prodotto comparabili a quelle ottenibili con investimenti maggiori, esaltando l'elevata adattabilità strutturale tipica dell'oleifera (Momoh e Zhou, 2001; Angadi et al., 2003).

Tuttavia, la scelta della densità di semina deve essere calibrata in funzione delle caratteristiche ambientali dell'areale di coltivazione e della scelta varietale. L'entità dei processi di compensazione alla base della plasticità morfologica del colza risultano largamente dipendenti dalla disponibilità di luce, acqua e nutrienti (Sultan, 2000). Un elevato approvvigionamento di tali risorse e decorsi climatici favorevoli tendono a esaltare l'adattabilità strutturale della coltura, permettendo l'applicazione di densità di semina sub-ottimali (Mc Gregor, 1987; Morrison et al., 1990; Angadi et al., 2003).

Oltre ai fattori ambientali, gli adattamenti strutturali e produttivi associati alla variazione della densità di piante dipenderebbero anche dalla tipologia genetica alla quale afferisce la cultivar in semina. Ciò è deducibile dalle sperimentazioni condotte da

Carver et al. (1999), i quali suggerirono l'adozione di investimenti diversificati per la coltivazione di ibridi e linee a impollinazione libera.

L'epoca di semina deve garantire il raggiungimento dello stadio di rosetta (6-8 foglie vere), prima dell'avvento dei rigori invernali. La coltura raggiunge questo stadio dopo una somma termica di 600-700 °Cd, che nella pianura padana e per il periodo considerato corrispondono a 70-80 giorni (Ciricofolo et al., 2001). Ciò significa che il periodo di semina ottimale per l'areale Padano-Veneto si colloca nell'ultima decade di Settembre. Semine ritardate (prima – seconda decade di Ottobre) sono consigliate in autunni particolarmente caldi e con terreni eccessivamente secchi. L'applicazione di semine anticipate (inizio di Settembre), pratica agronomica riscontrabile negli odierni sistemi colturali al fine di evitare stress idrici durante le fasi riproduttive del ciclo e per garantire l'ottenimento di un eventuale secondo raccolto, risulta razionale qualora l'andamento climatico durante i mesi estivi permetta una corretta preparazione del letto di semina e le condizioni idriche del terreno un'adeguata germinazione del seme.

1.1.6.4 Concimazione minerale: gestione ed efficienza d'uso dell'azoto

Le esigenze nutritive sono elevate; per una resa di 3 t ha⁻¹ le asportazioni sono 210 kg di N, 75 kg di P₂O₅ e 300 kg di K₂O, ma l'effettiva asportazione con la granella riguarda in maggior misura l'azoto (N) con quantità di circa 90-100 kg ha⁻¹, essendo contenuto in ragione del 3% nel seme.

Tali assorbimenti vengono soddisfatti apportando 150-200 kg ha⁻¹ di N, di cui 30-50 kg in presemina unitamente a 100-120 kg ha⁻¹ di P₂O₅ e di K₂O, riservando la quota rimanente di N in copertura poco prima della levata (Toniolo e Mosca, 2001).

Sperimentazioni condotte presso l'Azienda Agraria Sperimentale 'L. Toniolo' dell'Università degli Studi di Padova hanno consentito di verificare la possibilità di coltivare con successo l'oleifera apportando dosi azotate anche inferiori (90 kg N ha⁻¹), (Zanetti et al., 2003). Tuttavia, nell'ambito di una prova condotta utilizzando delle vasche lisimetriche sono state stimate, già a livelli di 80 kg N ha⁻¹, perdite di azoto per lisciviazione pari a 70-100 kg N-NO₃ ha⁻¹ e concentrazioni di nitrati nel percolato (18-27 ppm) superiori al limite definito per le acque destinate al consumo umano (11 ppm), (Zanetti et al., 2011). Di fatto, l'elevato assorbimento azotato riportato in precedenza è associato a un'efficienza d'uso limitata (Rathke et al., 2006); la ridotta capacità di traslocare l'N organico nella biomassa verso le silique e i semi, oltre a limitare la risposta

produttiva della coltura, promuove l'applicazione di concimazioni azotate pregiudicanti la sostenibilità ambientale del sistema colturale (Di e Cameron, 2002; Rathke et al., 2005). L'esigenza di definire itinerari tecnici coerenti con i dettami europei in materia di bioenergie (Direttive 2009/28/CE, 2009/30/CE) e di sostenibilità ambientale del comparto agricolo (direttiva nitrati), rende necessario incrementare l'N-efficienza della coltura.

In letteratura, l'N-efficienza presenta molteplici definizioni (Rathke et al., 2006). Una delle più complete, in quanto non si limita a considerare solamente gli apporti azotati della concimazione, è la definizione proposta da Moll et al. (1982). Secondo questi Autori, la NUE (Nitrogen Use Efficiency) rappresenta la quantità di seme prodotta per unità di N disponibile per la coltura (suolo + concimazione + azotofissazione + deposizione atmosferica). In molti casi, l'N proveniente dagli apporti ambientali è stimato dall'assorbimento della coltura non concimata. La NUE è composta da due componenti: l'efficienza di assorbimento (NUpE: $N \text{ assorbito} / N \text{ disponibile}$, kg kg^{-1}) e l'efficienza di utilizzo (NUtE: $\text{resa seme} / N \text{ assorbito}$, kg kg^{-1}). La NUpE dipende largamente dallo sviluppo radicale e definisce la quantità totale di N organicato nella biomassa. La NUtE è invece legata alla capacità di traslocare le forme azotate di riserva da foglie e fusti a silique e semi.

L'entità di questi parametri dipende da numerosi fattori. Tra gli altri, la dose di fertilizzante e la scelta varietale rivestono particolare importanza. Se la relazione negativa tra la dose di N e i parametri di N-efficienza risulta associata in letteratura, la variabilità genotipica non permette di definire risposte univoche (Berry et al., 2010). Paulmann (1993) e Beherens et al. (2003) osservarono maggiori efficienze azotate, soprattutto in condizioni nutritive limitanti, nelle tipologie varietali ibride rispetto a quelle tradizionali. Al contrario, Berry et al. (2010) non determinarono differenze nell'N-efficienza riconducibili al grado di eterosi presente nei genotipi testati. Indagini in tal senso condotte su genotipi semi-nani mancano in letteratura.

1.1.6.5 Controllo della flora infestante e delle avversità biotiche

La ridotta disponibilità di erbicidi di pre-emergenza registrati per colza in Italia, praticamente limitati al solo p.a. metazachlor, suggerisce l'opportunità di indirizzare il contenimento delle malerbe attraverso il controllo meccanico, con sarchiature da eseguire già Ottobre (con semina nell'ultima decade di Settembre), se l'andamento climatico è

favorevole. Il controllo chimico di post-emergenza viene eseguito raramente per l'elevato sviluppo fogliare della coltura utilizzando p.a. dicotiledonici (metazachlor, clopyralid) e graminicidi (fluazifop-p-butile, haloxyfop-etossietile, cicloxidim).

La crescente diffusione del colza in Italia risulta associata all'espansione di potenziali parassiti già ben conosciuti negli areali del nord Europa. Tra questi, erosioni fiorali causate dalle larve del dittero *Athalia rosae*, dalle larve di cavolaia (*Pieris brassicae*), e dall'altica (*Psylliodes chrysocephala*), controllabili attraverso l'uso di piretroidi, manifestano incidenze crescenti. Sono possibili anche pesanti attacchi di limacce soprattutto in concomitanza di andamenti stagionali umidi e piovosi. Allo stadio di fioritura sono invece pericolosi gli attacchi di meligete (*Meligethes aeneus*) i cui adulti, erodendo i bottoni fiorali per nutrirsi del polline, sono responsabili di significative cascole fiorali, ma per le quali la soglia d'intervento chimico è relativamente alta in ragione dell'elevata potenzialità fiorale del colza.

Per quanto riguarda le patologie fungine, l'assenza di varietà resistenti a *Leptosphaeria maculans* e *Sclerotinia sclerotiorum*, pone l'attenzione, come già segnalato in precedenza, sull'adozione di un'adeguata rotazione culturale che non preveda il ritorno del colza sullo stesso terreno troppo frequentemente.

1.1.6.6 Raccolta

Il complesso sviluppo che contraddistingue la struttura produttiva del colza determina momenti di maturazione delle silique e dei semi asincroni. Le fruttificazioni portate nei racemi principali acquisiscono i tratti tipici della maturazione più precoce rispetto alle silique differenziate sulle branche. Tra queste, le ramificazioni di ordine elevato presentano i momenti di maturazione più tardivi (Diepenbrock, 2000; Rathke et al., 2006).

Il momento ottimale di raccolta si realizza con umidità del seme nell'ordine del 10-12% e contenuti di clorofilla prossimi a 0 (Rathke et al., 2006). Le operazioni di raccolta richiedono una mietitrebbia munita di barra di taglio verticale per agevolare l'avanzamento nella fitta biomassa, e va eseguita tempestivamente per contenere il fenomeno naturale della deiscenza delle silique, causa di perdita di prodotto e dell'insorgenza di infestazione di colza per la coltura in successione.

1.2 L'OLIO DI COLZA

1.2.1 Composizione acidica e qualità tecnologiche

Il principale elemento caratterizzante un olio vegetale è il suo profilo acidico. Esso influenza sensibilmente le qualità tecnologiche della matrice lipidica definendone di fatto, l'applicazione oleochimica (Ratnayake e Daun, 2004).

L'olio di colza è composto per il 90-95% da trigliceridi (TAG), (Unger, 1991), la restante quota è determinata da steroli, tocoferoli, carotenoidi, cere e lipidi polari. I TAG sono costituiti da una catena di glicerolo e tre acidi grassi esterificati. Questi ultimi sono definiti molecole anfifiliche con un gruppo carbossilico polare idrofilo (-COOH), a cui sono legate catene carboniose lineari di natura lipofila. In questa struttura, la presenza di doppi legami divide gli acidi grassi in due categorie: saturi nel caso in cui i legami tra i carboni siano singoli e insaturi se nella catena carboniosa sono presenti uno o più doppi legami. Tra questi ultimi se ne possono distinguere di monoinsaturi e polinsaturi; i primi hanno un solo doppio legame, mentre i secondi almeno due.

Comunemente ad altre specie afferenti alla Famiglia della *Brassicaceae*, l'olio prodotto da *B. napus* è contraddistinto dalla presenza di acidi grassi a lunga catena ($C > 16$), e da un elevato grado di monoinsaturazione (Tab. 2). L'alta concentrazione di acidi grassi monoinsaturi deriva, nelle varietà 'HEAR' (High Erucic Acid Rapeseed), dall'elevato tenore di acido erucico ($>45\%$ w/w), mentre nei materiali 'LEAR' (Low Erucic Acid Rapeseed) da quello di acido oleico ($\sim 60\%$ w/w). Tali composizioni acidi- che, rispetto a quelle riscontrabili nei lipidi prodotti da altre specie oleaginose ben adattate agli areali europei come soia e girasole, conferiscono all'olio di colza un minore numero di iodio, indice di un basso grado d'insaturazione e maggiore stabilità all'ossidazione (Serdari et al., 2000; Rousseau, 2004). Altre qualità tecnologiche, quali la viscosità cinematica e il punto di fumo, risultano differire maggiormente tra cultivar ad alto e basso erucico. Valori più modesti per entrambi questi parametri, indicativi di una bassa resistenza allo scorrimento e maggiore stabilità alle alte temperature, sono riscontrabili nei lipidi prodotti dai genotipi LEAR (Przybylski, 2005).

Tab. 2. Composizione acidica media dell'olio (% w/w) di alcune *Brassicaceae* (Fonte: Ratnayake e Daun, 2004)^a.

Coltura	Acido palmitico (C16:0)	Acido stearico (C18:0)	Acido oleico (C18:1)	Acido linoleico (C18:2)	Acido linolenico (C18:3)	Acido erucico (C22:1)
<i>B. juncea</i>	0,5-4,5	0,5-2,0	8,0-23,0	10,0-24,0	6,0-18,0	22,0-50,0
<i>B. napus</i> LEAR	2,5-7,0	0,8-3,0	51,0-70,0	15,0-30,0	5,0-14,0	<2
<i>B. napus</i> HEAR	1,5-6,0	0,5-3,0	8,0-15,0	11,0-23,0	5,0-13,0	>45

^a Per il colza (*B. napus*) sono riportati i profili acidi medi delle varietà LEAR e HEAR a basso e alto tenore di acido erucico (C22:1), rispettivamente.

1.2.2 Impieghi 'no food' dell'olio

Le matrici grasse di origine vegetale trovano molteplici impieghi in numerosi processi industriali. In Europa, dove l'olio di Palma, girasole e oliva rappresentano le principali fonti lipidiche a destinazione 'food', la composizione acidica dell'olio di *B. napus* risulta maggiormente apprezzata in applicazioni 'no food' (AOCS, 2011). Bioenergia (Bessou et al., 2011), lubrificanti (Ravasio et al., 2002), polimeri, cosmetica, solventi e vernici (Javni et al., 2000), sono alcuni dei settori nei quali esso trova largo impiego. In particolare, nella filiera dei biocombustibili l'olio di colza è considerato la materia prima fondamentale per la produzione di biodiesel (Mittelbach, 1996; Bessou et al., 2011).

La sostituzione dei derivati del petrolio con oli vegetali garantisce numerosi vantaggi sia economici che ecologici. I lipidi ottenuti da oleaginose dedicate sono commercializzati come *commodities* e rispetto ai grassi minerali presentano una maggiore stabilità di prezzo e assicurano previsioni di approvvigionamento sul lungo periodo più certe. Rendono inoltre, i sistemi industriali più rinnovabili, oltre a definire condizioni di lavoro più salubri abbattendo eventuali esalazioni tossiche (Ravasio et al., 2002).

1.2.2.1 Biodiesel

Il biodiesel è un combustibile liquido ottenuto da un processo di esterificazione (metilazione) dell'olio, che può essere utilizzato nei motori diesel tal quale o in miscela con il gasolio di origine fossile (Bessou et al., 2011).

L'olio di colza tipo LEAR, in ragione dell'elevato grado di monoinsaturazione per la buona presenza di acido oleico (Tab. 2), è quello che meglio risponde ai dettami europei (EN 14214) in materia di qualità del biodiesel (Tab. 3). Il biocarburante che ne deriva è contraddistinto da un elevato numero di cetano, espressione della capacità di combustione, e da una maggiore stabilità ossidativa (Vameralli e Zanetti, 2007).

1.2.2.2 Politica europea in materia di biocombustibili

Gli attuali dettami europei in materia di biocombustibili si rifanno principalmente alle direttive 2009/28/CE e 2009/30/CE. Attraverso l'approvazione di tali norme, la Commissione Europea ha fissato un pacchetto di misure allo scopo di garantire approvvigionamenti energetici più sicuri congiuntamente a una riduzione delle emissioni di gas clima alteranti (GHG). La strategia impostata in sede Europea consiste nel favorire l'utilizzo di energia proveniente da fonti rinnovabili attraverso la definizione di quote che gli stati membri devono obbligatoriamente raggiungere entro termini temporali prestabiliti. Limitatamente al settore dei trasporti, è obbligatorio il raggiungimento entro il 2020 dell'obiettivo minimo del 10% per quanto riguarda la quota di biocarburanti sul consumo di benzine e diesel per autotrazione.

Per essere considerati ai fini dell'obiettivo 10%, i 'biofuels' dovranno consentire, in una logica di 'Life Cycle Assessment' (LCA), una riduzione dei GHG, rispetto ai carburanti fossili, del 50% a partire dal 2017. Dopo tale data i biocombustibili dovranno raggiungere un coefficiente di 'CO₂ saving' del 60%. Essi dovranno anche soddisfare dei criteri di sostenibilità nel rispetto degli ecosistemi, con la richiesta, ad esempio, che la biomassa di partenza non provenga da terreni considerati al 2008 ad alto livello di biodiversità. Inoltre, le materie prime non dovranno provenire da suoli che contengano negli strati più superficiali elevati quantitativi di carbonio. Sono previsti anche criteri di sostenibilità sociale, come la considerazione di eventuali criticità alimentari per la popolazione locale.

Tab. 3. Caratteristiche chimico-fisiche di alcuni esteri metilici in confronto con i parametri di riferimento europeo (EN 14214).

Coltura	N. cetano	Stabilità ossidativa (h)	N. iodio	Viscosità cinematica ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	CP ^a (°C)	PP ^b (°C)	FP ^c (°C)	Fonte
Colza ^d	55	2,0	109	4,4	-2	-9	170	Peterson et al. (1987); Ramos et al. (2009).
Girasole	50	0,8	132	4,2	0	-4	177	Kaufman et al. (1984); Ramos et al. (2009).
Soia	49	1,3	128	4,2	2	-1	171	Vamerali e Zanetti, (2007); Ramos et al. (2009).
EN 14214	>51	>6	<120	3,5-5	-	-	>120	

^a Cloud point (punto di intorbidimento): temperatura minima di pompaggio del combustibile nel sistema di alimentazione.

^b Pour point (punto di scorrimento): temperatura minima alla quale il combustibile è fluido.

^c Flash point (punto di infiammabilità): temperatura minima di infiammabilità dei vapori.

^d Per il colza si fa riferimento alle varietà LEAR, mentre per il girasole al tipo alto oleico (HOSO).

I contesti economico-sociale e ambientale in cui si inseriscono i biocarburanti vincolano la loro produzione al rispetto di numerose altre normative (Tab. 4); la coltivazione delle materie prime agricole, oltre a garantire i suddetti criteri di sostenibilità, deve essere conforme ai requisiti minimi per il mantenimento delle buone pratiche agricole (Rural Environmental Protection Scheme), includendo tecniche agronomiche razionali orientate verso regimi colturali estensivi finalizzati al contenimento dell'inquinamento di origine agricola (direttive 91/676/CE e 200/60/CE).

1.2.2.3 Bilancio energetico e del carbonio della filiera colza-biodiesel

L'applicazione dei biocombustibili in sostituzione dei carburanti fossili in linea di principio comporta un abbattimento di emissioni pericolose (e.g., SO₂, NO_x), senza ulteriori mobilitazioni di carbonio. Tuttavia, il successo ambientale delle filiere dei biocombustibili dipende da altri aspetti, quali il bilancio energetico e del carbonio (Smyth et al., 2010; Zamboni et al., 2011). Valori positivi per entrambi questi bilanci dipendono largamente dalla fase di coltivazione delle materie prime agricole e dagli input tecnici con essa applicati.

Tab. 4. Principali normative vincolanti la produzione dei biocarburanti (Fonti: Smyth et al., 2010; Sorda et al., 2010).

Direttiva	Obiettivo
2009/28/CE	Promozione di fonti energetiche rinnovabili (in sostituzione della direttiva 2003/30/CE).
2003/96/CE	Incentivi ed esenzioni a supporto della produzione e consumo di biocarburanti.
National Biofuels Obligation	Quote obbligatorie di energia rinnovabile per ciascun stato membro da produrre entro il 2020 per il raggiungimento degli obiettivi europei fissati nella direttiva 2009/28/CE.
National Electric Vehicles Plan and Renewable Electricity Target	Promozione di fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica.
Politica Agricola Comune	Incentivi per la coltivazione di colture a scopi energetici.
Rural Environmental Protection Scheme	Promozione di pratiche agronomiche razionali e sostenibili sotto il profilo ambientale.
Altre	Direttiva nitrati, direttiva quadro sulle risorse idriche e piano d'azione per la biodiversità.

Secondo Fore et al. (2011) la fase di campo del colza conta per ~66% degli input energetici totali impiegati nell'intera filiera biodiesel. Tra le pratiche agronomiche, la concimazione minerale azotata è quella con il maggiore impatto ambientale; Rathke e Diepenbrock (2006), valutando il bilancio energetico dell'oleifera in risposta a differenti apporti azotati (0-240 kg N ha⁻¹), stimarono dispendi energetici legati all'input azoto (produzione + distribuzione) tra lo 0 e il 51% dell'energia totale impiegata durante la fase di coltivazione. In termini di emissioni clima-alteranti³ (kg CO₂ eq. ha⁻¹), D'Avino et al. (2011), stimarono per la medesima pratica agronomica rilasci di GHGs pari al 57% delle emissioni di CO₂ eq. rilasciate durante il ciclo colturale.

Questi risultati, associati alla relazione negativa di tipo asintotico che lega il dispendio e l'efficienza energetica di immobilizzazione della CO₂, la quale assume valori progressivamente minori all'aumentare dell'input energetico (Mosca e Bona, 1994; Mosca e Bona, 1999; Bona et al., 2003), rendono necessaria l'applicazione di itinerari colturali *low-input* per la coltivazione del colza a destinazione biodiesel. Particolare attenzione deve essere posta nella definizione di piani di concimazione razionali e nell'utilizzo di genotipi caratterizzati da un elevato potenziale produttivo e da una spiccata efficienza azotata.

³ Sono inclusi: CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, PFCs e FCs.

1.3 BIBLIOGRAFIA

- Abdellatif A.M.M., (1972). Cardiopathogenic effects of dietary rapeseed oil. *Nutrition Rev.*, 30: 2-6.
- Allen E.J., Morgan D.G., (1972). A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. *J. Agric. Sci.*, 78: 315-324.
- Angadi S.V., Cutforth H.W., McConkey B.G., Gan Y., (2003). Yield adjustment by canola growth at different plant populations under semiarid conditions. *Crop Sci.*, 43: 1358-1366.
- Armstrong E.L., Nicol H.I., (1991). Reducing height and lodging in rapeseed with growth regulators. *Austr. J. Exp. Agric.*, 31: 245-250.
- Baux A., Hebeisen T., Pellet D., (2008). Effects of minimal temperatures on low-linolenic rapeseed oil fatty-acid composition. *Eur. J. Agron.*, 29: 102-107.
- Baylis A.D., Wright I.T.J., (1990). The effects of lodging and a paclobutrazol-chlormequat chloride mixture on the yield and quality of oilseed rape. *Ann. App. Biol.*, 116: 287-295.
- Becker H.C., Damgaard C., Karlsson B., (1992). Environmental variation for outcrossing rate in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Theor. Appl. Genet.*, 84: 303-306.
- Behrens T., Horst W.J., Wiesler F., (2003). Bedeutung von Spross-Wurzel-Interaktionen für die Stickstoffeffizienz von Winterraps (*Brassica napus* L.). *UFOP-Schriften Heft*, 20: 239-243.
- Berry P.M., Spink J., Foulkes M.J., White P.J., (2010). The physiological basis of genotypic differences in nitrogen use efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res.*, 119: 365-373.
- Berry P.M., Spink J.H., (2006). A physiological analysis of oilseed rape yields: Past and future. *J. Agric. Sci.*, 144: 381-392.
- Berti A., Mosca G., (1987). Effetti della concimazione azotata sulla fruttificazione del colza invernale da olio (*Brassica napus* var. *oleifera* D.C.). *Riv. Agron.*, 1: 45-49.
- Bessou C., Ferchaud F., Gabrielle B., Mary B., (2011). Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 31: 1-79.
- Bindi M., Cosentino S., Danuso F., Donatelli M., Marletto V., (2002). Modelli di previsione fenologica. *Atti Conv. PHENAGRI "Fenologia per l'agricoltura"*, 5-6 Dic. 2002, Roma: 1-3.
- Bona S., Mosca G., Riello L., Vamerli T., (2003). Contribution of soil to CO₂ balance in industrial crop. *Ital. J. Agron.*, 7:145-150.
- Bonari E., Mazzoncini M., Peruzzi A., (1994). Effect of conventional and minimum tillage on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in a sandy soil. *Soil Till. Res.*, 33: 91-108.

- Bowerman P., Chambers B.J., Jones A.E., (1995). Winter rape establishment methods on clay soils. In rapeseed today and tomorrow: Proceedings of the 9th international rapeseed congress, volume 2 (Ed. D. Murphy), pp. 220-222. Cambridge, UK.
- Bremer J., Norum K.R., (1982). Metabolism of very long-chain monounsaturated fatty acids (22:1) and the adaptation to their presence in the diet. *J. Lipid Res.*, 23: 243-56.
- Carver M., Phillips H., Freer B., (1999). The influence of drilling date on the performance of winter oilseed rape. HGCA Oilseeds Project: OS40. Home-Grown Cereal Authority, London.
- Chay P., Thurling N., (1989). Variation in pod length in spring rape (*Brassica napus* L.) and its effect on seed yield and yield components. *J. Agric. Sci.*, 113: 139-147.
- Ciricofolo E., Natalini A., Bruni R., (2001). Manuale di corretta prassi per la produzione integrata del colza. Progetto per la valorizzazione delle produzioni agroalimentari umbre. 3A Parco Tec. Agroalimentare dell'Umbria: pp. 1-30.
- Cristensen J.V., Drabble J.C., (1984). Effect of row spacing and seeding rate on rapeseed yield in Northwest Alberta. *Can. J. Plant Sci.*, 64: 1011-1013.
- D'Avino L., Lazzeri L., Rampin E., Zanetti F., Spugnoli P., Dainelli R., Mosca G., (2011). Oil crop sustainability assessment: three years of *Brassica napus* L. cultivation in North East Italy for biodiesel production. 19th Biomass Conf. and Exhib. 6-10 June 2011, Berlin: 2617-2622.
- De Bouille P., Solta B., Miginiac E., Merrien A., (1989). Hormones and pod development in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant Physiol.*, 90: 876-880.
- De Mastro G., Bona S., (1998). Il Colza. In: G. Mosca (Ed), *Oleaginose non alimentari*. Edagricole, Bologna, pp. 29-35.
- Dejoux J.F., Recous S., Meynard J.M., Trinsoutrot I., Leterme P., (1999). The fate of nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. *Plant Soil*, 218: 257-272.
- Di H.J., Cameron K.C., (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 64: 237-256.
- Diepenbrock W., (2000). Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Field Crop Res.*, 67: 35-43.
- Diepenbrock W., Grosse F., (1995). Rapeseed (*Brassica napus* L.) physiology. In: Diepenbrock W., Becker H.C., (Eds.), *Physiological Potentials for Yield Improvement of Annual Oil and Protein Crops*. *Adv. Plant Breeding*, 17: 21-53.
- Donatelli M., (1995). Sistemi nella gestione integrate delle colture – appunti delle lezioni. Pub. Sp. Istituto Sper. Agronomico, ISA-Sezione di Modena, Modena, pp. 133.
- Fore S.R., Porter P., Lazarus W., (2011). Net energy balance of small-scale on-farm biodiesel production from canola and soybean. *Biomass Bioenerg.*, 35: 2234-2244.
- Fray M.J., Evans E.J., Lydiate D.J., Arthur A.E., (1996). Physiological assessment of apetalous flowers and erectophile pods in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agric. Sci.*, 127: 193-200.

- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Anderson M.N., (1998 a). A model of leaf area development and senescence for oilseed rape, *Field Crop Res.*, 57: 209-222.
- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Andersen M.N., (1998 b). Development and evaluation of CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crop Res.*, 57: 95-111.
- Gan Y.T., Miller P.R., McConkey B.G., Zentner R.P., Stevenson F.C., McDonald C.L., (2003). Influence of diverse cropping sequences on durum wheat yield and protein in the semiarid northern Great Plains. *Agron. J.*, 95: 245-252.
- Gomez Campo C., (1980). Morphology and morphotaxonomy of the tribe *Brassicaceae*. In: Tsunoda S., Hinata K., Gomez Campo C., (eds). *Brassica crops and wild allies*. Japan Scientific Society Press, Tokyo, pp 3-31.
- Gomez N.V., Miralles D.J., (2010). Factors that modify early and late reproductive phases in oilseed rape (*Brassica napus* L.): Its impact on seed yield and oil content. *Ind. Crops Prod.*, 34: 1277-1285.
- Habekotté B., (1993). Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions. *Field Crops Res.*, 35: 21-33.
- Habekotté B., (1997). A model of the phenological development of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crop Res.*, 54: 127-136.
- Husson F., Wallach D., Vandeputte A., (1997). Evaluation of CECOL, a model of winter rape (*Brassica napus* L.). *Eur. J. Agron.*, 8: 205-214.
- Javni L., Petrović Z.S., Guo A., Fuller R., (2000). Thermal stability of polyurethanes based on vegetable oils. *J. Appl. Polym. Sci.*, 77: 1723-1734.
- Jenkins P.D., Leitch M.H., (1986). Effects of sowing date on the growth and yield of winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agric. Sci.*, 105: 405-420.
- Kaufman K.R., Ziejewski M., (1984). Sunflower methyl esters for direct injected diesel engines, *Transaction of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers*, 27: 1626-1633.
- Lancashire P.D., Bleiholder H., Langelüddecke P., Stauss R., Van den Boom T., Weber E., Witzemberger A., (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.*, 119: 561-601.
- Lefort-Buson M., Dattée Y., (1986). Influence of plant density on yield of homozygous and heterozygous winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Euphytica*, 35: 823-834.
- Léon J., Becker H.C., (1995). Rapeseed (*Brassica napus* L.) genetics. In: Diepenbrock W., Becker H.C., (Eds.), *Physiological Potentials for Yield Improvement of Annual Oil and Protein Crops*. *Adv. Plant Breeding*, 17: 54-81.
- Leto C., Carruba A., Cibella R., Trapani P., (1994). Effetti della concimazione azotata su caratteri bioagronomici e qualitativi del colza (*Brassica napus* var. *oleifera* D.C.) in ambiente semi-arido. *Riv. Agron.*, 28: 199-205.

- Liu C., Wang J., Huang T., Wang F., Yuan F., Cheng X., Zhang Y., Shi S., Wu J., Liu K., (2010). A missense mutation in the VHYNP motif of a DELLA protein causes a semi-dwarf mutant phenotype in *Brassica napus*. *Theor. App. Genet.*, 121: 249-258.
- Marletto V., (1999). Fenologia vegetale. In: Aspetti generali delle osservazioni agrofenologiche, a cura di Botarelli et al.. Collana di Agrofenologia, MiPAF, P.F. Phenagri. Vol. 1: p. 7-13.
- Marshall B., Squire G.R., (1996). Non-linearity in rate-temperature relations of germination in oilseed rape. *J. Exp. Bot.*, 47: 1369-1375.
- McGregor D.I., (1987). Effect of plant density on development and yield of rapeseed and its significance to recovery from hail injury. *Can. J. Plant Sci.*, 67: 43-51.
- Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hack H., Heß M., Lancashire P.D., Schnock U., Stauß R., Van Den Boom T., Weber E., Zwerger P., (2009). The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants -history and publications-. *J. Für Kulturpflanzen*, 61: 41-52.
- Mendham N.J., Shipway P.A., Scott R.K., (1981 a). The effects of seed size, autumn nitrogen and plant population density on the response to delayed sowing in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agric. Sci.*, 96: 417-428.
- Mendham N.J., Shipway P.A., Scott R.K., (1981b). The effects of delayed sowing and weather on growth, development and yield of winter oil-seed rape (*Brassica napus*). *J. Agric. Sci.*, 96: 389-416.
- Merrien A., Jung L., Maisonneuve C., (1997). Valorisation réelle de l'azote apporté e a l'automne. *Oleoscope*, 20: 9-16.
- Milford G.F.J., Penny A., Prew R.D., Darby R.J., Todd A.D., (1993). Effects of previous crop, sowing date, and winter and spring applications of nitrogen on growth, nitrogen uptake and yield of winter wheat. *J. Agric. Sci.*, 121:1-12.
- Miralles D.J., Ferro B.C., Slafer G.A., (2001). Development responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *Field Crops Res.*, 71: 211-223.
- Mittelbach M., (1996). Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: specifications and quality control of biodiesel. *Bioresource Technology*, 56: 7-11.
- Moll R.H., Kamprath E.J., Jackson W.A., (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.*, 74: 562-564.
- Momoh E.J., Zhou W., (2001). Growth and yield responses to plant density and stage of transplanting in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agron. Crop Sci.*, 186: 253-259.
- Morgan D.G., (1982). The regulation of yield components in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Sci. Food Agric.*, 33: 1266-1268.
- Morrison M.J., McVetty P.B.E., Scarth R., (1990). Effect of altering plant density on growth characteristics of summer rape. *Can. J. Plant Sci.*, 70: 139-149.
- Mosca G., (1979). Comportamento agronomico e qualità del seme in varietà di colza di recente costituzione. *Riv. Agr.*, 4: 423-430.

- Mosca G., Bona S., (1994). Oilseed crops for methylester production: Energy analysis and productivity of some species. Riv. Ing. Agr., 3: 151-161.
- Mosca G., Bona S., (1999). Bilancio energetico e della CO₂ nella filiera di produzione di biodiesel da girasole e colza. Atti XXXIII Conv. SIA "Le colture non alimentari", 20-23 Sett. 1999, Legnaro-Padova: 80-91.
- Nanda R., Bhargava S.C., Tomar D.P.S., Rawson H.M., (1996). Phenological development of *B. campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata* grown in controlled environments and from 14 sowing dates in the field. Field Crop Res., 46: 93-103.
- Panse A., Maidl F.X., Dennert J., Brunner H., Fischbeck G., (1994). Yield formation in cereal-rich crop rotations and monocultures in an extensive and intensive crop-management system. J. Agron. Crop Sci., 173: 160-171.
- Paulmann W., (1993). Stand der Entwicklung von Hybridsorten bei Raps. Raps 11: 43-46.
- Peterson C.L., Korus R.A., Mora P.G., Madsen J.P., (1987). Fumigation with propane and transesterification effects on injector coking with vegetable oil fuels. TASAE, 30: 28-35.
- Potter T.D., Kay J.R., Ludwig I.R., (1999). Effect of row spacing and sowing rate on canola cultivars with varying early vigor. In: Proceedings of the 10th GCIRC International Rapeseed Congress, Canberra, Australia, 26-29 Sept. 1999, 4pp.
- Przybylski R., Mag T., Eskin N.A.M., McDonald B.E., (2005). Canola oil. In: Bailey's industrial oil and fat products. Fereidoon Shahidi, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 61-99.
- Rakow G., (2004). Species origin and economic importance of Brassica. p. 3–11. In E.C. Pua and C.J. Douglas (ed.). Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol. 54 Brassica. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Ramos M.J., Fernández C.M., Casas A., Rodríguez L., Pérez Á., (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. Bioresource Technol., 100: 261-268.
- Rao M.S.S., Mendham N.J., Buzza G.C., (1991). Effect of the apetalous flower character on radiation distribution in the crop canopy, yield and its components in oilseed rape (*Brassica napus* L.). J. Agric. Sci., 117: 189-196.
- Rathke G.W., Christen O., Diepenbrock W., (2005). Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. Field Crops Res., 94: 103-113.
- Rathke G.W., Behrens T., Diepenbrock W., (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. Agric. Ecosyst. Environ., 117: 80-108.
- Rathke G.W., Diepenbrock W., (2006). Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. Eur. J. Agron., 24: 35-44.

- Ratnayake W.M.N., Daun J.K., (2004). Chemical composition of canola and rapeseed oils. In: Rapeseed and Canola oil production, processing, properties and uses. Gunstone F.D., Blackwell publishing Ltd (Oxford, U.K.): 37-78.
- Ravasio N., Zaccheria F., Gargano M., Recchia S., Fusi A., Poli N., Psaro R., (2002). Environmental friendly lubricants through selective hydrogenation of rapeseed oil over supported copper catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 233: 1-6.
- Raymer P.L., (2002). Canola: an emerging oilseed crop. p. 122–126. In J. Janick and A. Whipkey (ed.) Trends in new crops and new uses. ASHS Press, Alexandria, VA.
- Robertson A.S., Kirkegaard J.A., Watkinson A.R., Holland J.F., Wratten N., Potter T.D., Burton W., Walton G.H., Moot D.J., Farre I., (2002). Environmental and genotypic control of time to flowering in canola and Indian mustard. *Aust. J. Agric. Res.*, 53: 793-809.
- Romano P.M., (2009). La resa del colza aumenta con la corretta densità di semina. *L'informatore Agrario*, 35: 48-51.
- Rood S.B., Major D.J., (1984). Influence of plant density, nitrogen, water supply and pod or leaf removal on growth of oilseed rape. *Field Crops Res.*, 8: 323-331.
- Rousseau D., (2004). Chemical and physical properties of canola and rapeseed oil. In: Rapeseed and Canola oil production, processing, properties and uses. Gunstone F.D., Blackwell pub. Ltd (Oxford, U.K.): 79-110.
- Sauzet G., Reau R., Palleau J.P., (2003). Evaluation of oil seed rape crop managements with minimum tillage. In: H. Soerensen, J.C. Soerensen, N.B. Muguerza and C. Bjerregaard, Ed., Towards Enhanced Value of Cruciferous Oilseed Crops by Optimal Production and Use of the High Quality Seed, pp. 863-864.
- Scarbrick D.H., Daniels R.W., Chapman J., Parr M., (1980). The effect of nitrogen on the development of spring oilseed rape. *Exp. Husb.*, 37: 63-73.
- Schierholt A., Becker H.C., (2001). Environmental variability and heritability of high oleic acid content in winter oilseed rape. *Plant Breeding*, 120: 63-66.
- Schroder G., Makowski N., (1996). Betrachtungen zur Ertragsbildung bei Winterraps. *Arch. Acker- Pfl. Boden*, 40: 175-181.
- Schulz S., (1987). Ertragsphysiologische Untersuchungen zur Ontogenese der Rapsfrucht (*Brassica napus* L.). Ph.D. Thesis. Christian-Albrechts-University, Faculty of Agriculture, Kiel.
- Serdari A., Frangioudakis K., Kalligeros S., Stournas S, Lois E., (2000). Impact of using biodiesel of different origins and additives on the performance of a stationary diesel engine. *J. Eng. Gas Turb. Power*, 122: 624-631.
- Sieling K., Christen O., Nemati B., Hanus H., (1997). Effects of previous cropping on seed yield and yield components of oil-seed rape (*Brassica napus* L.). *Eur. J. Agron.*, 6: 215-223.
- Sieling K., Kage H., (2008). The potential of semi-dwarf oilseed rape genotypes to reduce the risk of N leaching. *J. Agric. Sci.*, 146: 77-84.

- Sierts H.P., Geisler G., Léon J., Diepenbrock W., (1987). Stability of yield components from winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.). J. Agron. Crop Sci., 158: 107-113.
- Smyth B.M., Ó Gallachóir B.P., Korres N.E., Murphy J.D., (2010). Can we meet targets for biofuels and renewable energy in transport given the constraints imposed by policy in agriculture and energy?. Journal Clean Prod., 18: 1671-1685.
- Sorda G., Banse M., Kemfert C., (2010). An overview of biofuel policies across the world. Energ. Policy, 38: 6977-6988.
- Stoy A., (1983). Untersuchungen zur Konkurrenz bei Winterraps (*Brassica napus* L.) vor und nach dem UÈ berwintern und deren Bedeutung fuÈ r das Ertragspotential des Bestandes. Ph.D. Thesis. Christian-Albrechts-University, Faculty of Agriculture, Kiel.
- Sultan S.E., (2000). Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. Trends Plant Sci., 5: 537-542.
- Temple Heald C., (2004). Non-food uses. In: Rapeseed and Canola oil production, processing, properties and uses. Gunstone F.D., Blackwell pub. Ltd (Oxford, U.K.):154-185.
- Toniolo L., Mosca G., (2001). Colza (*Brassica napus* L. var *oleifera* D.C.). In: Giardini L. e Baldoni R. (Ed.), Coltivazioni Erbacee. Patron, Bologna, pp. 31-47.
- Tonzig S., (1956). Elementi di botanica. Ambrosiana, Milano. Pp. 1235-1237.
- Twengstrom E., Sigvald R., Svensson C., Yuen J., (1998). Forecasting Sclerotinia stem rot in spring sown oilseed rape. Crop Prot., 17: 405-411
- U N., (1935). Genomic analysis in Brassica with special reference to the experimental formation of *B. napus* and peculiar mode of fertilization. Japan J. Bot., 7: 309-452.
- Unger E.H., (1991). In: canola and rapeseed: Production, chemistry, nutrition and processing technology, van Nostrand Reinhold, New York, pp. 235-248.
- Vamerali T., Zanetti F., (2007). Tecnica di coltivazione di colza e girasole per biodiesel. In: Bordin A. (Ed.), Biocombustibili e biocarburanti: soluzioni, tecnologie e agevolazioni. IPSOA, pp. 111-124.
- Vles R.O., Bijster G.M., Kleinekoort J.S.W., Timmer W.G., Zaalberg J., (1976). Nutritional Status of Low-Erucic-Acid Rapeseed Oils, 78: 128–131.
- Wang X., Mathieu A., Cournède P.H., Allirand J.M., Jullien A, Reffye P., Zhang B.G., (2011). Variability and regulation of the number of ovules, seeds and pods according to assimilate availability in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Field Crops Res., 122: 60-69.
- Weber E., Bleiholder H., (1990). Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse - mit Abbildungen. Gesunde Pflanzen, 42: 308-321.
- Wright G.C., Smith C.J., Woodroffe M.R., (1988). The effect of irrigation and nitrogen fertilizer on rapeseed (*Brassica napus*) production in south-eastern Australia. Irrig. Sci., 9: 1-13.

- Yates D.J., Steven M.D., (1987). Reflexion and absorption of solar radiation by flowering canopies of oil-seed rape (*Brassica napus* L.). J. Agric. Sci., 109: 495-502.
- Zamboni A., Murphy R.J., Woods J., Bezzo F., Shah N., (2011). Biofuels carbon footprints: Whole-systems optimisation for GHG emissions reduction. Biores. Technol., 102: 7457-7465.
- Zanetti F., Rampin E., Vamerali T., Mosca G., (2011). Relevance of soil texture for root growth of oilseed rape and potential reduction of nitrate leaching, in atti del 7th Int. Symp. "Structure and Function of Roots", Novy Smokovec, Slo, 5-9 Sett. 2011: 214.
- Zanetti F., Vamerali T., Bona S., Mosca G., (2003). Razionalizzazione della concimazione azotata in colza destinato alla produzione di biodiesel. Atti XXXV Conv. SIA 'Obiettivo qualità integrale: il ruolo della ricerca agronomica', Napoli, 16-18 Sett. 2003: 227-228.
- Zanetti F., Vamerali T., Mosca G., (2009). Yield and oil variability in modern varieties of high-erucic winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) and Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) under reduced agricultural inputs. Ind. Crop Prod., 30: 265-270.

Capitolo 2

Scopo delle ricerche

L'inserimento duraturo e proficuo del colza invernale da olio negli avvicendamenti colturali nazionali e nella filiera bioenergetica di riferimento (biodiesel) risulta essere strettamente legato all'incremento delle performance produttive e alla sostenibilità ambientale del sistema colturale. Tali obiettivi non possono prescindere dall'adozione di una tecnica agronomica ottimizzata in funzione della sito-specificità ambientale e della scelta varietale.

In questo contesto si colloca l'attività di ricerca descritta in questa tesi di dottorato il cui obiettivo principale è definire una tecnica agronomica ottimale per l'areale Padano-Veneto. Allo scopo di fornire inoltre, uno strumento di supporto al management colturale basato su utilizzi razionali degli input agronomici in accordo con lo sviluppo della coltura, è stato realizzato un modello per simulare la fenologia della specie.

Tali obiettivi sono stati perseguiti indagando le risposte morfo-fisiologiche e produttive di cultivar definite, attraverso screening varietali preliminari, 'testimoni' per ciascuna delle principali tipologie genetiche di colza (ibridi CHH a taglia normale, ibridi CHH semi-nani e varietà a impollinazione libera), a diversi input agronomici. In particolare sono stati dosati alcuni fattori culturali ritenuti cruciali per il successo produttivo della coltura: epoca di semina, densità di semina e concimazione azotata di copertura.

I risultati di tali ricerche sono stati integrati da alcuni specifici approfondimenti:

- effetti dell'epoca di semina sulla risposta fenologica e morfo-produttiva di diverse varietà;
- adattamenti morfologici e produttivi di diverse varietà a densità di semina decrescenti;
- produttività ed efficienza d'uso dell'azoto di diverse varietà in risposta ad apporti azotati primaverili decrescenti;
- indagine sulla morfologia radicale di ibridi ad *habitus* vegetativo divergente;
- modellizzazione fenologica della specie.

Quest'ultima tematica è stata sviluppata attraverso un periodo di ricerca trascorso presso l'Istituto Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung della CAU University di Kiel (D), al termine del quale è stato prodotto un articolo a carattere scientifico (titolo: '*A Phenological Model of Winter Oilseed Rape According to the BBCH Scale*') sottoposto alla rivista *Field Crop Research* per la pubblicazione (IF al momento della sottomissione: 2,232).

Capitolo 3

**Effetti dell'epoca di semina sulla risposta fenologica e
morfo-produttiva di diverse varietà di colza**

3.1 Riassunto

Nell'areale Veneto, l'epoca di semina ottimale si colloca nell'ultima decade di settembre. Tuttavia, negli odierni itinerari colturali è riscontrabile la tendenza ad anticipare le operazioni di messa a dimora del seme (inizio di settembre), al fine di evitare stress termici e idrici durante le fasi riproduttive del ciclo. L'applicabilità di questa pratica agronomica è stata valutata indagando gli adattamenti morfo-produttivi di tre cultivar rappresentative delle principali tipologie genetiche della specie (ibrido CHH vs. ibrido CHH semi-nano vs. varietà a impollinazione libera), a un'epoca di semina precoce (05 Sett.), ottimale (29 Sett.) e tardiva (15 Ott.), per l'areale Veneto.

L'epoca di semina anticipata ha mostrato un ciclo di sviluppo prolungato (GDD emergenza – maturazione: 2472 °Cd) rispetto alla data ottimale (2074 °Cd) e posticipata (1904 °Cd). In particolare, le tesi seminate a inizio settembre hanno palesato le somme termiche maggiori per gli stadi di emergenza, crescita vegetativa (emergenza – inizio fioritura) e per il periodo post-fiorale (fine fioritura – maturazione). Il prolungamento dello sviluppo pre-invernale ha favorito l'assorbimento di azoto (N), il quale a fine gennaio era di 140 kg ha⁻¹ per la prima epoca di semina, 74 kg ha⁻¹ per la seconda e 7 kg ha⁻¹ per la terza.

I genotipi a confronto hanno diversificato la ripartizione della biomassa e di N all'interno della canopy in funzione dell'epoca. L'ibrido semi-nano con il posticipare della semina ha favorito lo sviluppo e l'accumulo di N sulle strutture vegetative (fusto e ramificazioni), mentre le cultivar convenzionali sono risultate più abili a sostenere la crescita degli organi riproduttivi (silique). In accordo con tale risposta morfologica, la cultivar ad *habitus* ridotto è risultata quella più penalizzata dalla semina tardiva, nonostante peggioramenti produttivi siano emersi per tutti i genotipi. Di fatto, le rese maggiori sono state stimate per l'epoca anticipata, la quale ha prodotto 4,6 t s.s. ha⁻¹, contro 4,1 e 3,0 t s.s. ha⁻¹ della seconda e terza data, rispettivamente ($P < 0,05$). Tra le componenti della resa, il numero di semi m⁻² è risultato quello maggiormente influenzato dalla data di semina.

Epoche di semina precoci sembrano applicabili con successo nel NE Italia per realizzare itinerari colturali sostenibili dal punto di vista sia produttivo che ambientale. Nel caso in cui l'organizzazione aziendale, le condizioni meteo o il precedente colturale

rendessero difficile l'applicazione di questa pratica, è consigliabile orientare la scelta varietale su genotipi a taglia convenzionale.

3.2 Introduzione

L'epoca di semina ha decise ripercussioni sul successo finale della coltura, alterandone la dinamica di sviluppo, la risposta quanti-qualitativa e la suscettibilità ad avversità biotiche e abiotiche (Taylor e Smith, 1992; Hocking, 1993; Hocking et al., 1997; Hocking, 2001; Miralles et al., 2001; Ozer, 2003). Dejoux et al. (2003) identificarono tre obiettivi che il momento di messa a dimora della coltura deve garantire: (i) un'emergenza rapida e uniforme, (ii) uno sviluppo sufficiente (i.e., stadio di rosetta, 6-8 foglie vere) prima dell'avvento dei rigori invernali, (iii) una superficie fogliare e un apparato radicale in grado di sostenere una pronta ripresa vegetativa in primavera.

Nell'areale Padano-Veneto, l'epoca di semina ottimale si colloca nell'ultima decade di settembre (Toniolo e Mosca, 2001). Negli odierni itinerari colturali tuttavia è riscontrabile la tendenza ad anticipare le operazioni di messa a dimora del seme (inizio di settembre), al fine di evitare stress termici e idrici durante le fasi riproduttive del ciclo. Di fatto, eccessi di calore o eventi siccitosi durante gli stadi di post-antesi favoriscono aborti fiorali, incidendo negativamente sulla fruttificazione della canopy, lo sviluppo dei semi e la resa finale (Johnson et al., 1995; Champolivier e Merrien, 1996; Angadi et al., 2000)

Dejoux et al. (1999, 2003) definirono l'anticipo della semina una scelta agronomica utile per la realizzazione di itinerari colturali sostenibili e '*low-input*'. L'estensione del periodo di sviluppo vegetativo pre-invernale promosso da semine precoci, garantisce elevati assorbimenti azotati, mitigando quei rischi ambientali legati alla lisciviazione nitrica. Inoltre, l'intenso utilizzo autunnale dell'azoto è sfruttabile favorevolmente per ridurre gli apporti minerali in primavera (Reau et al., 1997; Rathke et al., 2006).

Coltivazioni basate su semine precoci favorirebbero anche una riduzione degli interventi volti a controllare le avversità fitopatologiche. L'asincronia tra il periodo di massima suscettibilità colturale ad attacchi parassitari e quello di diffusione degli agenti patogeni, agevolato dallo spostamento della data di semina, permetterebbe di limitare le applicazioni di prodotti anticrittogamici (Pérès et al., 1996; Khangura e Barbetti, 2001; Rathke et al., 2006).

Risultati contrastanti sono emersi invece nella gestione della flora infestante. Se da una parte la vigorosa crescita autunnale conferisce alla coltura spiccata capacità

competitiva (Rathke et al., 2006), dall'altra l'emergenza ritardata delle plantule, provocata dalla bassa dotazione idrica dei suoli a fine estate, favorisce l'infestazione e l'attuazione di interventi di controllo (Dejoux et al., 1999).

Dal punto di vista produttivo, l'anticipo dell'epoca di semina è associabile a performance altalenanti imputabili alla sito-specificità degli ambienti testati. Graf e Heydrich (2000), nel nord Germania, rivelarono cali di resa legati a un'umidità del suolo limitante per l'emergenza dei semi, al contrario Walton et al. (1999), in Australia, notarono produzioni elevate e stabili indipendentemente dalla località considerata.

Le evidenze scientifiche concordano maggiormente nel definire la risposta produttiva della coltura seminata in date tardive, generalmente modesta (Schulz et al., 1994; Walton et al., 1999; Graf e Heydrich, 2000; Ozer, 2003; Sieling et al., 2005). Epochen ritardate limitano il numero di silique per pianta, producendo semi poco pesanti (Scott et al., 1973). Degenhardt e Kondra (1981) notarono inoltre, peggioramenti dell'indice di raccolta (Harvest index) e uno scarso differenziamento di ramificazioni per unità di superficie.

Le suddette risposte produttive derivano tuttavia da sperimentazioni condotte principalmente negli areali del nord-Europa con genotipi tradizionali (varietà a impollinazione libera e ibridi a taglia convenzionale). Evidenze scientifiche in tal senso, mancano per gli ambienti di coltivazione mediterranei e per cultivar ad *habitus* vegetativo ridotto (ibridi semi-nani).

In questo studio sono stati indagati gli adattamenti fenologici e morfo-produttivi di tre cultivar rappresentative delle principali tipologie genetiche disponibili sul panorama varietale della specie (ibrido CHH, ibrido CHH semi-nano e varietà a impollinazione libera), a un'epoca di semina precoce, ottimale e tardiva per l'areale Veneto.

3.3 Materiali e metodi

Protocollo sperimentale e ambiente di prova

Nelle annate 2009-10 presso l'Azienda Agraria Sperimentale dell'Università degli Studi di Padova (Legnaro, 45°21'N, 11°58'E), un ibrido CHH (Excalibur; Dekalb, Italia), un ibrido CHH semi-nano (PR45D01; Pioneer, Italia) e una varietà a impollinazione libera (Catalina; Dekalb, Italia), sono stati seminati in epoca anticipata (05/09/09), ottimale (29/09/09) e ritardata (15/10/09) per l'areale Veneto. Lo schema sperimentale adottato, a split-plot con 3 repliche, ha previsto il posizionamento del fattore 'epoca di semina' nei parcelloni e il fattore 'cultivar' nelle sub-parcelle. Le unità sperimentali avevano dimensioni di 135 m².

La scelta delle cultivar rappresentative di ciascuna tipologia genetica si è basata sui dati produttivi ottenuti in screening varietali preliminari condotti nel medesimo areale.

La tecnica agronomica applicata ha previsto la preparazione del letto di semina attraverso tecniche di lavorazione ridotte, applicando in successione discatura (profondità: ~15 cm), estirpatura (~20 cm) ed erpicatura (~15 cm). Le semine sono state realizzate con una seminatrice di precisione tarata a una densità di 44 semi m⁻². La distanza interfilare è stata mantenuta costante e corrispondente a 0,45 m così da permettere il controllo meccanico delle malerbe attraverso sarchiatura. L'apporto di nutrienti minerali è stato frazionato in due interventi svoltisi uno in pre-semine e uno in copertura. Durante la messa a dimora del seme sono stati distribuiti 0-60-60 kg ha⁻¹ di NPK sottoforma di 130 kg ha⁻¹ di perfosfato triplo (46% P₂O₅) e di 120 kg ha⁻¹ di solfato di potassio (50% K₂O). La concimazione di copertura primaverile si è limitata al solo apporto di N in quantità pari a 80 kg ha⁻¹, sottoforma di solfato ammonico (20,5% N).

Un trattamento insetticida volto al controllo del meligete (*Meligethes aeneus*) e del punteruolo delle silique (*Ceutorhynchus assimilis*) è stato eseguito alla schiusa dei primi fiori nelle parcelle seminate nella data ottimale. L'intervento è consistito nella distribuzione di 130 ml ha⁻¹ di Karate Zeon (lambda-cialotrina 9,48%, Syngenta).

La raccolta meccanica del seme è avvenuta nel mese di giugno una volta determinata la fase di maturazione per ciascuna epoca di semina.

L'andamento termo-pluviometrico registrato durante il ciclo colturale è quello rilevabile nella Tab. 1. La stagione di prova è stata mediamente più calda (+0,5 °C rispetto al periodo 1995-08) e più piovosa rispetto alla serie storica di riferimento (+218 mm rispetto al periodo 1995-08). Il surplus idrico è riconducibile alle precipitazioni straordinarie rilevate nel mese di settembre (189 mm, + 108 rispetto alla media di lungo periodo, di cui 170 mm il 16/09/09). La coltura ha usufruito inoltre, di piogge abbondanti nella parte invernale (da Dicembre a Febbraio) e terminale (Maggio e Giugno) del ciclo colturale.

L'appezzamento impiegato nella sperimentazione presentava tessitura (USDA) franco-limosa con precessione colturale a frumento. Le principali caratteristiche chimico-fisiche del suolo sono mostrate in Tab. 2.

Rilievi, campionamenti e analisi

Gli adattamenti morfologici e le risposte produttive delle cultivar in prova sono stati indagati valutando l'accumulo di biomassa e di N, la loro ripartizione tra le parti epigee della pianta, la resa di seme e alcune sue componenti (n. di semi siliqua⁻¹, n. di silique m⁻², n. di semi m⁻², peso unitario del seme).

A 20 giorni dalla semina è stata monitorata l'emergenza dei semi (%) in ciascuna parcella. A tale scopo, le plantule emerse in 3 aree di saggio (3 m²) sono state contate e rapportate all'investimento di semi applicato alla semina.

L'evoluzione fenologica di ciascun genotipo è stata esaminata datando le fasi di emergenza (BBCH 09), inizio fioritura (BBCH 60), fine fioritura (BBCH 69), riempimento semi (BBCH 80) e maturazione (BBCH 89). Tali stadi sono stati determinati quando il 50% delle piante presenti per ciascuna unità sperimentale manifestava i criteri morfologici fissati dalla scala BBCH adattata al colza (Lancashire et al., 1991).

Tab. 1. Dati pluviometrici e termici mensili registrati durante il ciclo culturale^a.

Mese	Precipitazioni (mm)			Temperatura media (°C)		
	2009-10	1995-08	Var.	2009-10	1995-08	Var.
Set.	189,8	81,4	+108,4	20,8	18,2	+2,6
Ott.	43,8	87,9	-44,1	14,3	13,9	+0,4
Nov.	91,6	87,0	+4,6	10,1	8,3	+1,8
Dic.	113,0	72,1	+40,9	3,8	4,1	-0,3
Gen.	58,6	44,1	+14,5	2,5	3,1	-0,6
Feb.	127,4	44,1	+83,3	5,0	4,4	+0,6
Mar.	38,2	46,5	-8,3	8,1	8,5	-0,4
Apr.	45,0	78,3	-33,3	14,0	12,6	+1,4
Mag.	109,6	90,1	+19,5	17,7	18,0	-0,3
Giu.	111,2	79,2	+32,0	22,1	21,6	+0,5
<i>Periodo</i>	<i>928,2</i>	<i>710,7</i>	<i>+217,5</i>	<i>11,8</i>	<i>11,3</i>	<i>+0,5</i>

^a I dati climatici sono stati rilevati presso la stazione meteorologica dell'ARPAV installata presso l'Azienda Agraria Sperimentale 'L. Toniolo' dell'Università degli Studi di Padova.

Tab. 2. Principali proprietà chimico-fisiche e precessione culturale del suolo utilizzato nella sperimentazione.

Parametro	2009-10
Sabbia (%)	21
Limo (%)	61
Argilla (%)	21
pH	7,95
S.O. (%)	2,26
N (%)	0,11
C/N	12,3
CSC (cmol (+) kg ⁻¹)	13,5
P tot. (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	594
P ass. (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	13
K scamb. (mg K ₂ O kg ⁻¹)	177
Precessione culturale	Frumento

Campionamenti di biomassa epigea sono stati condotti a fine gennaio, a marzo, aprile, maggio e giugno. In ciascun rilievo, le piante presenti in 2 aree di saggio per parcella (2 m²) sono state contate, recise al colletto, pesate e seccate per 48 h a 65°C.

L'indagine morfologica è stata approfondita eseguendo un '*biomass partitioning*' a BBCH 69 e BBCH 80. 15 piante consecutive per parcella sono state tagliate al colletto e separate in foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique. Il materiale vegetale così ottenuto è stato essiccato per 48 h a 65°C, e pesato.

Allo stadio di riempimento semi è stato eseguito il conteggio delle ramificazioni e delle silique. La conta delle branche ha considerato solamente quelle di primo ordine, mentre le fruttificazioni sono state suddivise a seconda della loro presenza sul racemo principale (silique principali), o sulle ramificazioni (silique laterali).

Determinata la fase di maturazione per ciascuna epoca di semina, la resa in seme è stata determinata correggendo le quantità di granella ottenute con la trebbiatura per l'umidità residua. Sub-campioni di seme essiccati sono stati successivamente utilizzati per definire il peso unitario degli stessi (3 repliche da 100 semi per parcella). Il numero di semi per unità di superficie è stato derivato dal rapporto tra la resa e il peso di 1000 semi, mentre il numero di semi per singola fruttificazione è stato stimato dal numero di semi e di silique m^{-2} .

Sub-campioni di biomassa, delle strutture epigee collezionate con il '*biomass partitioning*', nonché di seme e paglie sono stati sottoposti all'analisi Kjeldahl per la determinazione della concentrazione di N totale.

Analisi statistica dei dati

Gli effetti 'epoca di semina', 'cultivar', 'epoca di campionamento' (solo per l'accumulo di biomassa e l'assorbimento azotato), e delle loro interazioni sono stati saggiati attraverso l'analisi della varianza (ANOVA), utilizzando il programma CoStat 6,2⁴. Quando il test F ha indicato significatività per valori di $P \leq 0,05$, la separazione tra le medie è avvenuta tramite test di Duncan.

La somma termica accumulata in ciascuna fase fenologica è stata espressa in GDD (Growing Degree Days; °Cd), con temperatura base di 3°C (Marshall e Squire, 1996).

I valori relativi alla ripartizione della biomassa e di N all'interno della canopy sono espressi come % (w/w), rispettivamente sul totale della biomassa secca e di N accumulati per unità di superficie da ciascun genotipo in ogni epoca di semina.

⁴ CoHort Software, Monterey, CA, USA.

3.4 Risultati sperimentali

Sviluppo colturale

L'epoca di semina ha alterato in maniera decisa l'evoluzione fenologica delle cultivar a confronto (Fig. 1 e 2). Tuttavia quest'ultime, all'interno di ciascuna data di semina, hanno manifestato precocità comparabili.

Le piante messe a dimora all'inizio di settembre hanno rivelato un ciclo colturale più lungo (semina – maturazione: 286 dd) con una somma termica maggiore (2472 °Cd) rispetto a quelle seminate a fine settembre (262 dd; 2074 °Cd) e all'inizio di ottobre (251 dd; 1904 °Cd), ($P \leq 0,05$).

Considerando le singole fasi fenologiche, l'emergenza è avvenuta dopo 175 °Cd (9 dd) nelle parcelle seminate anticipatamente e dopo 110 e 46 °Cd in quelle messe a dimora in epoca ottimale e posticipata (6 dd sia per l'epoca ottimale che posticipata), ($P \leq 0,05$). In termini percentuali (Tab. 3), nella data precoce il 55% dei semi seminati è fuoriuscito dal suolo, mentre in quella ottimale e ritardata rispettivamente l'85% e il 91% ($P \leq 0,05$). Considerando i genotipi a confronto, l'ibrido semi-nano (PR45D01) ha rivelato un vigore seminale ridotto che si è tradotto in emergenze inferiori (72%), rispetto alla varietà a impollinazione libera (Catalina: 77%) e all'ibrido convenzionale (Excalibur: 81%), ($P \leq 0,05$).

Tra le altre fasi di sviluppo, la crescita vegetativa (emergenza-inizio fioritura: E-IF) e gli stadi post-fiorali (fine fioritura-maturazione: FF-M) sono risultati quelli maggiormente influenzati dalla data di semina (Fig. 1 e 2). In particolare, le somme termiche maggiori sia per E-IF che FF-M sono state osservate nella semina anticipata. Di fatto, le piante seminate all'inizio di settembre hanno richiesto 1196 °Cd (204 dd) tra E e IF, mentre quelle messe a dimora a fine settembre e inizio ottobre 901 °Cd (187 dd) e 790 °Cd (179 dd), rispettivamente. Considerando il periodo FF-M, la data anticipata ha accumulato 810 °Cd (49 dd), rispetto ai 771 °Cd (46 dd) dell'ottimale e i 755 °Cd (43 dd) della ritardata ($P \leq 0,05$). La fase di fioritura (IF-FF) ha mostrato una durata in giorni stabile tra i periodi di semina (24, 23 e 23 dd rispettivamente per anticipata, ottimale e ritardata; $P > 0,05$), mentre considerando la somma termica sono stati osservati valori significativamente maggiori nella tesi seminata più tardi (291, 292 e 313 °Cd per l'epoca anticipata, ottimale e ritardata, rispettivamente; $P \leq 0,05$).

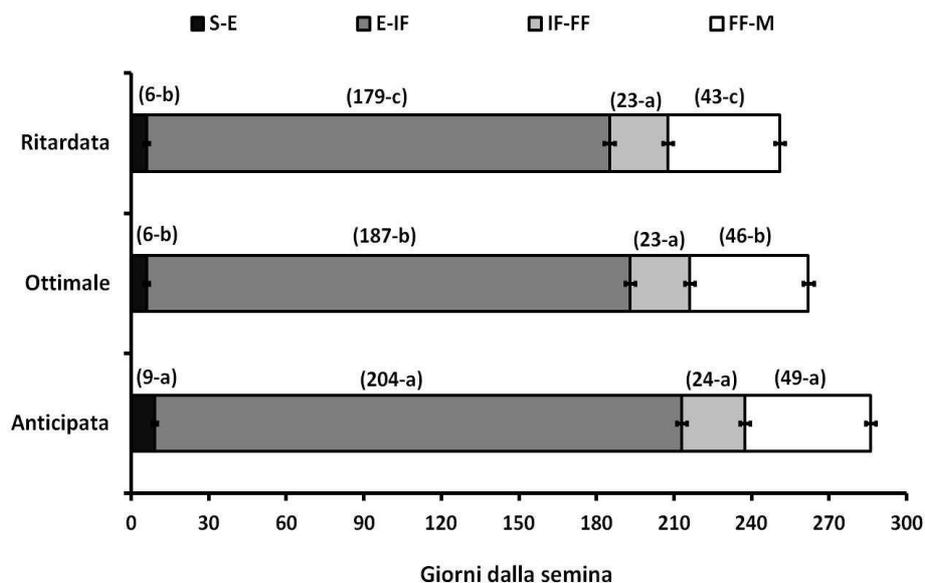


Fig. 1. Durata in giorni (entro parentesi) di alcune fasi di sviluppo al variare dell'epoca di semina (barre orizzontali: \pm e.s.). S-E: semina-emergenza; E-IF: emergenza-inizio fioritura; IF-FF: inizio fioritura-fine fioritura; FF-M: fine fioritura-maturazione. Valori medi delle cultivar a confronto. Entro ciascuna fase di sviluppo, a lettere uguali i valori medi non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

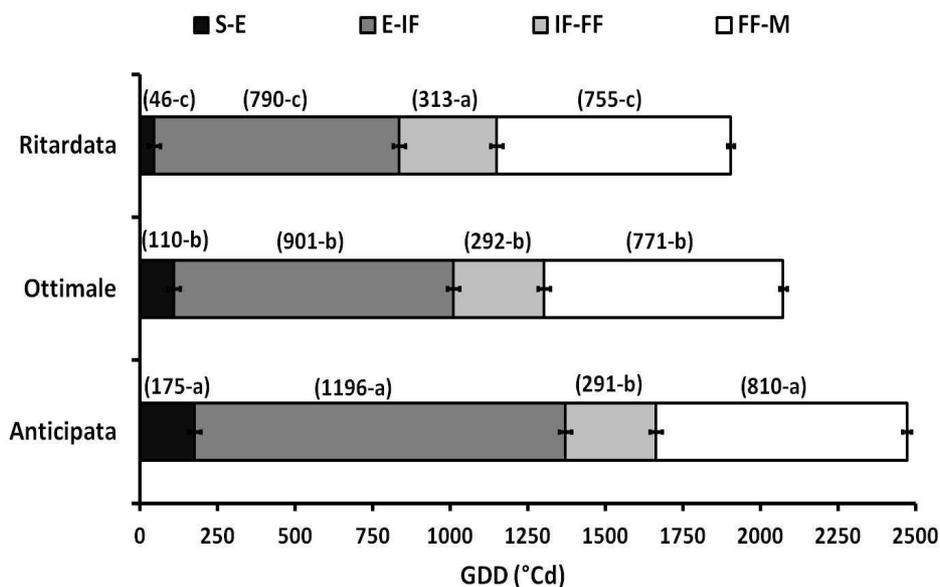


Fig. 2. Somma termica in GDD ($^{\circ}\text{Cd}$) per alcune fasi di sviluppo al variare dell'epoca di semina (barre orizzontali: \pm e.s.). S-E: semina-emergenza; E-IF: emergenza-inizio fioritura; IF-FF: inizio fioritura-fine fioritura; FF-M: fine fioritura-maturazione. Valori medi delle cultivar a confronto. Entro ciascuna fase di sviluppo, a lettere uguali i valori medi non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

Tab. 3. Emergenza (%) a 20 giorni dalla semina (GDS)^{a,b}.

Cultivar	Ep. semina			MEDIA	Effetto	ANOVA	
	Ant.	Ott.	Rit.			<i>g.l.</i>	Significatività
PR45D01	50	85	81	72 b	Blocchi	2	n.s. ^b
Excalibur	63	81	100	81 a	Ep. semina (S)	2	**
Catalina	51	88	91	77 ab	Cultivar (C)	2	*
MEDIA	55 B	85 A	91 A		S × C	4	n.s.

^a L'emergenza è stata calcolata dal rapporto tra il numero di piante m⁻² a 20 GDS e la densità di semi m⁻². Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere in grassetto indicano l'ipotesi di diversità tra le cultivar (effetto principale), mentre le lettere in maiuscolo tra le epoche di semina (effetto principale).

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Accumulo di biomassa e assorbimento azotato

La diversa evoluzione fenologica emersa tra le epoche di semina ha inciso sull'accumulo della biomassa (Tab. 4). Com'era atteso, la prima data ha prodotto una quantità media maggiore (1077 g s.s. m⁻²; media di cinque campionamenti) rispetto alla seconda e alla terza (927 e 666 g s.s. m⁻² per l'epoca ottimale e ritardata, rispettivamente; medie di cinque campionamenti), ($P \leq 0,05$). Tali differenze sembrano legate alla lunghezza delle fasi pre-fiorali: una relazione positiva e significativa è emersa tra la produzione media di sostanza secca e la somma termica accumulata durante la crescita vegetativa (E-IF), ($R^2=0,58$; $n=18$; $P \leq 0,05$). Tra i genotipi, l'ibrido semi-nano, coerentemente con il proprio *habitus* vegetativo ridotto, ha fornito una produzione media minore rispetto ai genotipi convenzionali in tutte e tre le epoche di semina (797, 964 e 910 g s.s. m⁻² rispettivamente per PR45D01, Excalibur e Catalina; medie di cinque campionamenti; $P \leq 0,05$).

Considerando l'assorbimento azotato (Tab. 5), l'estensione del periodo di sviluppo vegetativo e la maggiore produzione di biomassa favoriti dall'anticipo della semina hanno garantito l'organizzazione di 211 kg N ha⁻¹ rispetto a 164 e 109 kg N ha⁻¹ dell'epoca ottimale e tardiva, rispettivamente (medie di cinque campionamenti), ($P \leq 0,05$). Dinamiche di assorbimento diversificate sono emerse tra le epoche di semina in funzione delle date di campionamento (interazione 'ep. semina × ep. camp.': $P \leq 0,05$); utilizzi crescenti fino allo stadio BBCH 80 sono stati determinati per la seconda e terza data di semina, mentre un certo rallentamento è stato osservato tra le fasi BBCH 35 e 65 nell'epoca precoce.

Tab. 4. Effetti ‘epoca di semina’, ‘epoca di campionamento’ e ‘cultivar’ sulla produzione di biomassa (g s.s. m⁻²)^a.

Effetto	Ep. di semina			MEDIA	Effetto	ANOVA	
	Ant.	Ott.	Rit.			g.l.	Significatività
Ep. campion.							
F. gennaio	373	195	18	195 (e)	Blocchi	2	n.s. ^b
Marzo	568	424	106	366 (d)	Ep. semina (S)	2	***
Aprile	1058	921	747	909 (c)	Cultivar (C)	2	***
Maggio	1745	1709	1392	1615 (a)	Ep. campion. (E)	4	***
Giugno	1643	1387	1069	1366 (b)	S × C	4	n.s.
					S × E	8	n.s.
Cultivar							
PR45D01	999	849	542	797 b	C × E	8	n.s.
Excalibur	1102	1046	744	964 a	S × C × E	16	n.s.
Catalina	1131	886	713	910 a			
MEDIA	1077 A	927 B	666 C				

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità tra le epoche di campionamento (effetto principale), le lettere in grassetto tra le cultivar (effetto principale) e le lettere in maiuscolo tra le epoche di semina (effetto principale).

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Tab. 5. Effetti ‘epoca di semina’, ‘epoca di campionamento’ e ‘cultivar’ sull'assorbimento azotato (kg N ha⁻¹)^a.

Effetto	Ep. di semina			MEDIA	Effetto	ANOVA	
	Ant.	Ott.	Rit.			g.l.	Significatività
Epoca camp.							
F. gennaio	140 <i>de</i>	74 <i>f</i>	7 <i>g</i>	74 (d)	Blocchi	2	n.s. ^b
Marzo	212 <i>b</i>	144 <i>de</i>	46 <i>f</i>	134 (c)	Ep. semina (S)	2	***
Aprile	210 <i>b</i>	171 <i>cd</i>	135 <i>e</i>	172 (b)	Cultivar (C)	2	*
Maggio	277 <i>a</i>	256 <i>a</i>	211 <i>b</i>	248 (a)	Ep. campion. (E)	4	***
Giugno	218 <i>b</i>	177 <i>c</i>	146 <i>c-e</i>	180 (b)	S × C	4	n.s.
					S × E	8	***
Cultivar							
PR45D01	204	159	86	150 b	C × E	8	n.s.
Excalibur	212	172	120	168 a	S × C × E	16	n.s.
Catalina	218	162	121	167 a			
MEDIA	211 A	164 B	109 C				

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità tra le epoche di campionamento (effetto principale), le lettere in grassetto tra le cultivar (effetto principale) e le lettere in maiuscolo tra le epoche di semina (effetto principale). Le lettere in italico indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione ‘ep. semina × ep. campionamento’.

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

In un'ottica di mitigazione della lisciviazione nitrica è interessante analizzare l'organizzazione di N a fine gennaio, successivamente al periodo di massima percolazione dei nitrati, che per l'areale in prova di norma si realizza tra dicembre e gennaio (Zanetti et al., 2011). In tal senso, il vantaggio ambientale dell'epoca anticipata risulta macroscopico; a fine gennaio, le piante seminate precocemente hanno assorbito 140 kg N ha⁻¹ mentre quelle messe a dimora a fine settembre e inizio ottobre 74 e 7 kg N ha⁻¹, rispettivamente (medie delle cultivar a confronto), ($P \leq 0,05$).

Considerando il fattore cultivar, Excalibur e Catalina hanno mostrato assorbimenti medi (168 e 167 kg N ha⁻¹, rispettivamente; medie di cinque campionamenti), maggiori rispetto a PR45D01 (150 kg N ha⁻¹, media di cinque campionamenti), ($P \leq 0,05$).

Ripartizione della biomassa e dell'azoto all'interno della canopy

Le incidenze di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique sul totale della biomassa prodotta per unità di superficie sono risultate mutevoli in funzione sia della cultivar che dell'epoca di semina (interazioni 'cultivar × struttura vegetativa' ed 'epoca di semina × struttura vegetativa': $P \leq 0,05$ in entrambi i campionamenti). Considerando i genotipi, i materiali a taglia convenzionale (Excalibur e Catalina) hanno ripartito più biomassa sul fusto, mentre l'ibrido semi-nano ha fornito le incidenze maggiori per le ramificazioni (Fig. 3 a,b), ($P \leq 0,05$). Limitatamente alle fruttificazioni non sono definibili differenze significative tra i genotipi in prova.

Dall'analisi dell'interazione 'epoca di semina × struttura vegetativa' è emersa la tendenza della coltura a favorire, con il ritardare della semina, la ripartizione della biomassa verso le silique, limitando soprattutto l'incidenza delle branche (Fig. 3 a,b).

I genotipi a confronto tuttavia hanno modificato la struttura della canopy in funzione della data di semina (interazione 'cultivar × epoca di semina × struttura vegetativa': $P \leq 0,05$ sia a BBCH 69 che BBCH 80). In particolare le cultivar ad altezza standard con il posticipare della semina hanno ripartito quantità crescenti di s.s. verso le silique a scapito delle ramificazioni. Strategia opposta è apparsa esaminando l'ibrido semi-nano, il quale passando dalla prima alla terza data ha mostrato percentuali decrescenti di silique associate a crescenti pesi delle ramificazioni (Fig. 3 a,b).

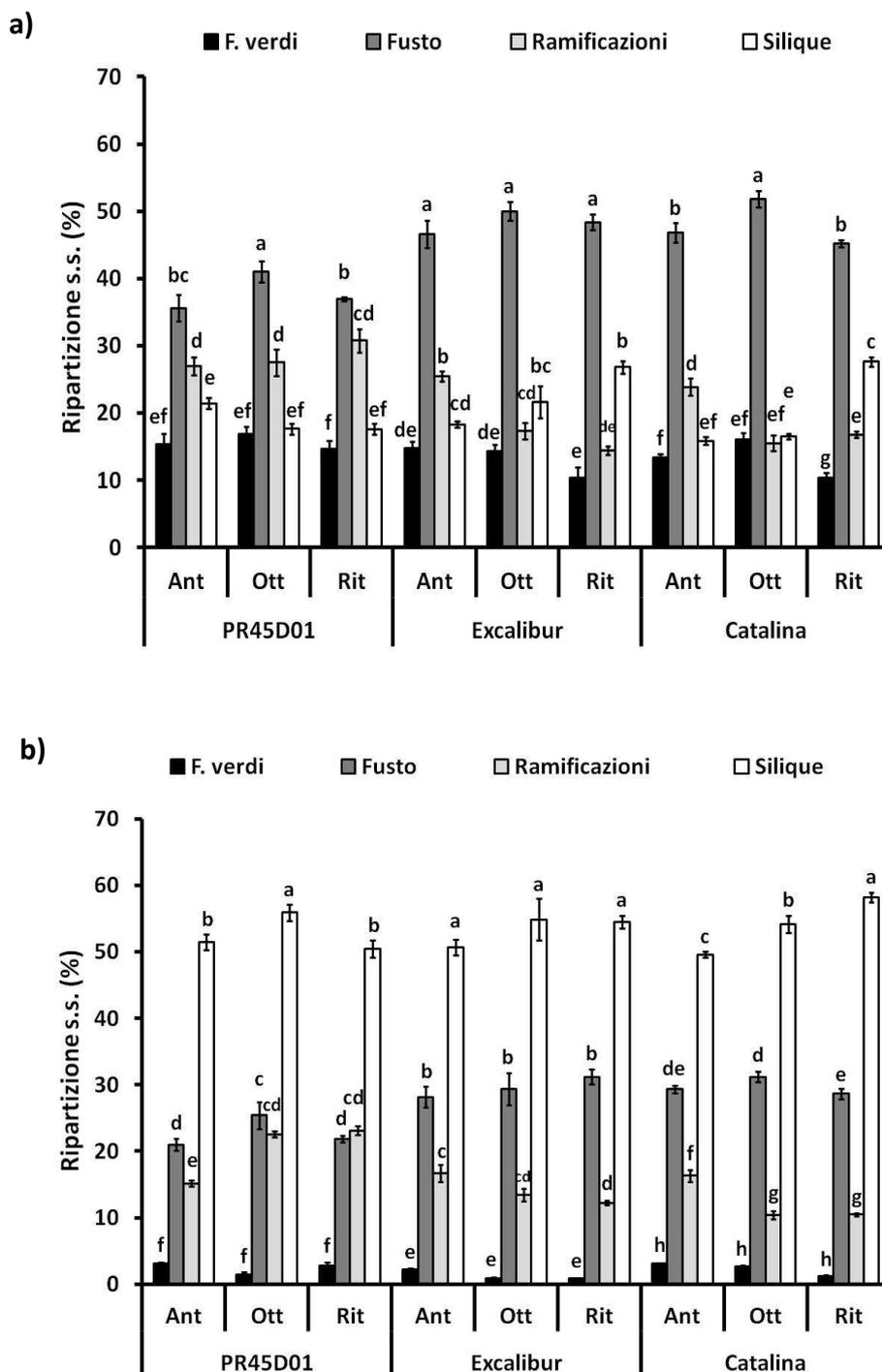


Fig. 3. a) stadio di fine fioritura (BBCH 69): incidenze (% w/w) di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale della sostanza secca prodotta per unità di superficie dalle cultivar a confronto al variare dell'epoca di semina. Entro ciascuna cultivar, a lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

b) stadio di riempimento semi (BBCH 80): incidenze (% w/w) di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale della sostanza secca prodotta per unità di superficie dalle cultivar a confronto al variare dell'epoca di semina. Entro ciascuna cultivar, a lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

La diversa ripartizione della biomassa epigea mostrata dai genotipi al variare dell'epoca di semina ha inciso anche sulla distribuzione di N all'interno della canopy (Fig. 4 a,b). Considerando il rilievo condotto a fine fioritura è emerso come Excalibur e Viking al ritardare della semina distribuiscano maggiormente l'N verso le silique tendendo a ridurre l'accumulo nei fusti/ramificazioni e nelle foglie. PR45D01 invece, in accordo con quanto emerso per la biomassa, assegna contenuti crescenti nei fusti/ramificazioni a discapito delle fruttificazioni. Tali strategie tuttavia non sono state confermate dal rilievo condotto a BBCH 80 nel quale sono emerse strategie di ripartizione dell'N comparabili tra le cultivar a confronto (interazione 'cultivar × epoca di semina × struttura vegetativa': $P \leq 0,05$ solo a BBCH 69).

Ramificazione e fruttificazione della canopy

L'ANOVA condotta per il numero di ramificazioni e di silique m^{-2} ha messo in luce come l'epoca di semina condizioni significativamente il differenziamento di branche laterali, senza incidere sulla fruttificazione totale. Ciò nonostante, il periodo di semina ha avuto ripercussioni sulla distribuzione delle silique tra i racemi principali e quelli laterali (Tab. 6). Considerando invece l'effetto principale 'cultivar', differenze significative sono emerse solamente riguardo al numero di silique principali, le quali sono state prodotte in maniera differente dalle varietà nelle tre epoche a confronto (interazione 'cultivar × epoca di semina': $P \leq 0,05$).

Riguardo al numero di branche (Tab. 7), le tesi seminate in epoca ottimale hanno raggiunto i valori maggiori (300 ramificazioni m^{-2}), rispetto a quelle di inizio settembre (201 ramificazioni m^{-2}) e ottobre (191 ramificazioni m^{-2}), ($P \leq 0,05$). L'elevata produzione di branche laterali della seconda semina non si è tradotta però, in una maggiore produzione di frutti; di fatto, la numerosità delle silique è risultata del tutto comparabile tra le date (9040, 9694 e 8324 silique m^{-2} nell'ordine per l'epoca anticipata, ottimale e ritardata; $P > 0,05$). In accordo con quanto emerso dall'ANOVA, la distribuzione dei frutti all'interno della chioma è stata significativamente influenzata dal momento di semina; le piante derivate dalla semina di inizio settembre hanno distribuito ~83% delle silique totali sui racemi laterali (7480 silique laterali m^{-2}), contro il 72% (6970 silique laterali m^{-2}) e il 69% (5718 silique laterali m^{-2}) dell'epoca ottimale e tardiva, rispettivamente ($P \leq 0,05$).

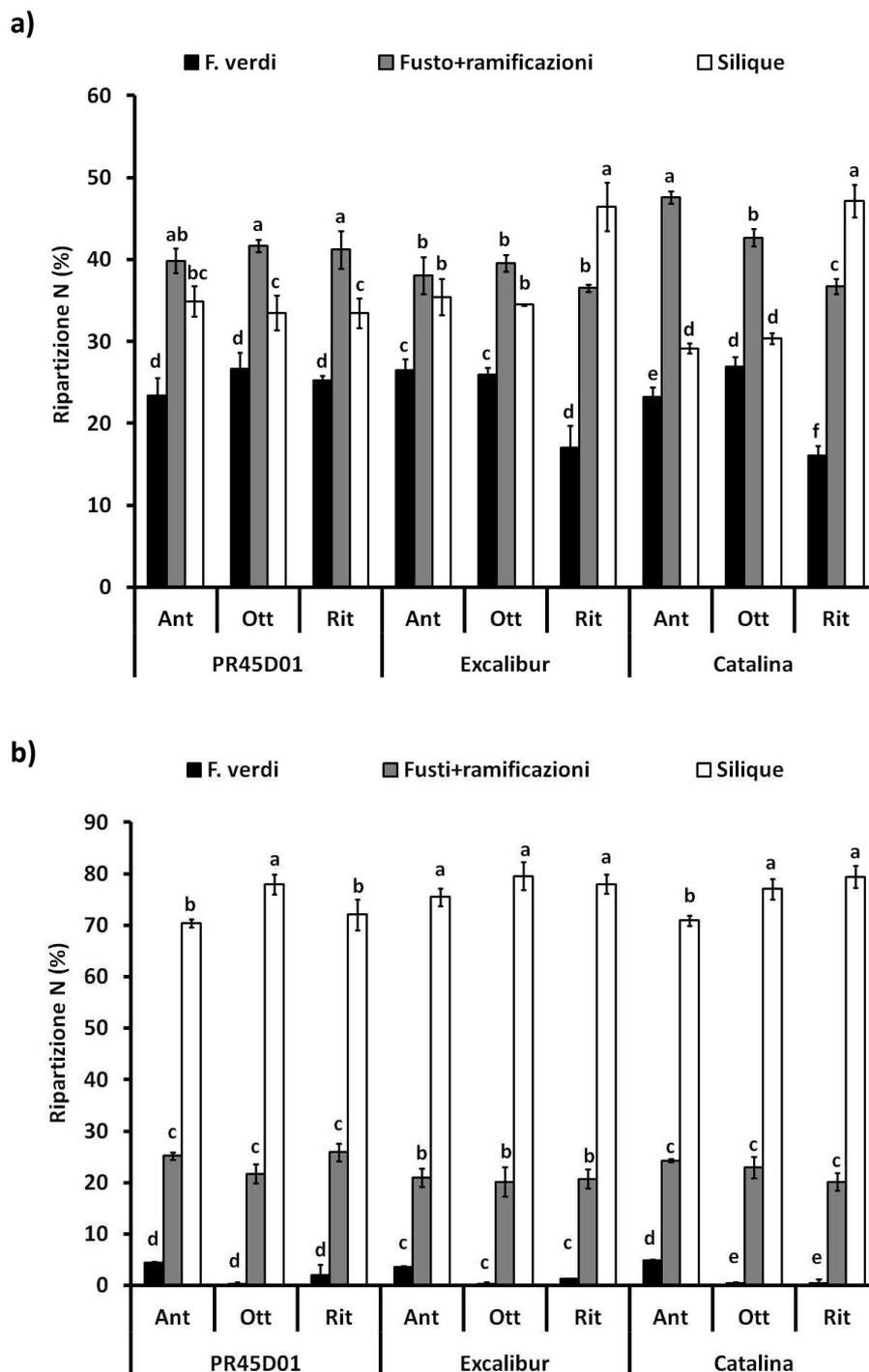


Fig. 4. a) stadio di fine fioritura (BBCH 69): incidenza (% w/w) dell'azoto contenuto in foglie verdi, fusto, ramificazione e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale dell'azoto assorbito per unità di superficie dalle cultivar a confronto al variare dell'epoca di semina. Entro ciascuna cultivar, a lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

b) stadio di riempimento semi (BBCH 80): incidenza (% w/w) dell'azoto contenuto in foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale dell'azoto accumulato per unità di superficie dalle cultivar a confronto al variare dell'epoca di semina. Entro ciascuna cultivar, a lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

Tab. 6. ANOVA per il numero di ramificazioni, silique totali, silique principali e silique laterali prodotte per unità di superficie^a.

ANOVA					
Effetto	<i>g.l.</i>	Ramificazioni	Sil. tot.	Sil. principali	Sil. secondarie
Blocchi	2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Ep. semina (S)	2	***	n.s.	***	*
Cultivar (C)	2	n.s.	n.s.	**	n.s.
S × C	4	n.s.	n.s.	*	n.s.

^a *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Tab. 7. Numero di ramificazioni, silique totali, silique principali e silique laterali prodotte dalle cultivar a confronto al variare dell'epoca di semina^a.

Cultivar	Ramificazioni (n. m ⁻²)				Sil. totali (n. m ⁻²)			
	Ant.	Ott.	Rit.	MEDIA	Ant.	Ott.	Rit.	MEDIA
PR45D01	195	308	151	218	8894	10225	6482	8534
Excalibur	211	296	226	244	8273	9136	9153	8854
Catalina	198	296	196	230	9954	9721	9337	9671
MEDIA	201 B	300 A	191 B		9040	9694	8324	
Cultivar	Sil. principali (n. m ⁻²)				Sil. laterali (n. m ⁻²)			
	Ant.	Ott.	Rit.	MEDIA	Ant.	Ott.	Rit.	MEDIA
PR45D01	1312 <i>e</i>	2826 <i>ab</i>	1637 <i>de</i>	1925 b	7582	7398	4845	6608
Excalibur	1338 <i>e</i>	2339 <i>bc</i>	3108 <i>a</i>	2262 b	6936	6796	6044	6592
Catalina	2033 <i>cd</i>	3005 <i>a</i>	3074 <i>a</i>	2704 a	7921	6716	6264	6967
MEDIA	1561 B	2723 A	2606 A		7480 A	6970 AB	5718 B	

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Per ciascuna variabile, le lettere in grassetto indicano l'ipotesi di diversità tra le cultivar (effetto principale), mentre le lettere in maiuscolo tra le epoche di semina (effetto principale). Le lettere in italico indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione 'cultivar × ep. di semina'.

Un ritardo dell'epoca di semina sembra invece concentrare la fruttificazione sui racemi principali; la seconda e la terza data hanno differenziato circa il 30% delle silique totali sui racemi principali (2723 e 2606 silique principali m⁻² nell'epoca ottimale e ritardata, rispettivamente), mentre la prima data il 17% (1561 silique principali m⁻²).

Sulla produzione di silique principali sono emersi effetti ascrivibili anche alla cultivar (effetto principale 'cultivar': $P \leq 0,05$): Viking ha fornito la numerosità maggiore (Tab. 7).

Le varietà a confronto hanno inoltre modificato la fruttificazione dei racemi principali al variare dell'epoca di semina (interazione 'cultivar × epoca di semina': $P \leq 0,05$). I genotipi a taglia convenzionale hanno fornito valori crescenti passando dall'epoca anticipata a quella ritardata, mentre l'ibrido seminano ha massimizzato la loro produzione con la semina di fine settembre.

Resa in seme e componenti produttive

Le performance produttive della coltura sono risultate significativamente influenzate dagli effetti principali ‘epoca di semina’, ‘cultivar’ e dalla loro interazione (Tab. 8). Di fatto, i suddetti fattori hanno condizionato significativamente le componenti della resa (peso unitario del seme, n. semi m⁻² e n. semi siliqua⁻¹).

L’anticipo dell’epoca di semina a inizio settembre ha determinato una resa in seme di 4,6 t s.s. ha⁻¹, +13% rispetto all’epoca ottimale e +54% rispetto a quella ritardata ($P \leq 0,05$), (Tab. 9). Il vantaggio produttivo legato alla semina precoce è riconducibile a un elevato numero di semi per unità di superficie (101.860, 91.880 e 66.160 semi m⁻² per l’epoca anticipata, ottimale e ritardata, rispettivamente; $P \leq 0,05$) e a una migliore fertilità delle silique (11,7, 9,8 e 8,1 semi siliqua⁻¹ per l’epoca anticipata, ottimale e ritardata, rispettivamente; $P \leq 0,05$).

Esaminando l’effetto principale ‘cultivar’, l’ibrido convenzionale è risultato il genotipo più produttivo fornendo una resa di 4,3 t s.s. ha⁻¹ contro 4,0 e 3,5 t s.s. ha⁻¹ della varietà a impollinazione libera e dell’ibrido semi-nano, rispettivamente ($P \leq 0,05$). Le elevate produzioni mostrate da Excalibur si basano su una maggiore numerosità di semi m⁻² (100.750, 80.850 e 78.310 semi m⁻² per Excalibur, PR45D01 e Viking, rispettivamente; $P \leq 0,05$), e per fruttificazione (11,9, 9,5 e 8,1 semi siliqua⁻¹ per Excalibur, PR45D01 e Viking, rispettivamente; $P \leq 0,05$). Per quanto riguarda il peso del seme invece, la varietà a impollinazione libera ha mostrato valori più elevati (5,1 mg) rispetto ai materiali ibridi (4,3 e 4,2 mg per PR45D01 ed Excalibur, rispettivamente), ($P \leq 0,05$).

Le performance produttive fornite dai genotipi in prova sono risultate mutevoli in funzione dell’epoca di semina (interazione ‘cultivar × epoca di semina: $P \leq 0,05$). Nonostante tutte le cultivar abbiano manifestato peggioramenti di resa con il ritardo della semina, PR45D01 è risultato particolarmente inadatto a epoche tardive; l’ibrido semi-nano, rispetto alla produzione fornita nella prima data, ha contratto la resa del 48% contro il 34% di Excalibur e il 23% di Viking (Tab. 9). La scarsa propensione manifestata da PR45D01 al ritardo dell’epoca di semina è riconducibile a una limitata capacità di sostenere la componente produttiva ‘numero di semi m⁻². Le parcelle seminate a inizio ottobre hanno prodotto 49.560 semi m⁻² con l’ibrido a taglia ridotta, 67.470 con la varietà a impollinazione libera e 81.450 con l’ibrido convenzionale ($P \leq 0,05$).

Tab. 8. ANOVA per la resa in seme, peso unitario del seme, numero di semi per m² e numero di semi per siliqua^a.

ANOVA					
Effetto	<i>g.l.</i>	Resa seme	Peso seme	N. semi m ⁻²	N. semi siliqua ⁻¹
Blocchi	2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Ep. semina (S)	2	**	n.s.	*	*
Cultivar (C)	2	***	***	***	*
S × C	4	**	n.s.	*	n.s.

^a *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Tab. 9. Resa in seme, peso unitario del seme, numero di semi m⁻² e numero di semi siliqua⁻¹ prodotti dalle cultivar a confronto al variare dell'epoca di semina^a.

Cultivar	Resa seme (t s.s. ha ⁻¹)				Peso seme (mg)			
	Ant.	Ott.	Rit.	MEDIA	Ant.	Ott.	Rit.	MEDIA
PR45D01	4,28 <i>b</i>	3,88 <i>bc</i>	2,22 <i>d</i>	3,46 c	4,17	4,32	4,51	4,33 b
Excalibur	5,15 <i>a</i>	4,28 <i>b</i>	3,38 <i>c</i>	4,27 a	4,34	4,19	4,20	4,24 b
Catalina	4,46 <i>ab</i>	4,09 <i>bc</i>	3,42 <i>c</i>	3,99 b	5,30	4,94	5,08	5,11 a
MEDIA	4,63 A	4,08 B	3,01 C		4,60	4,48	4,60	
	N. semi m ⁻² ($\times 10^3$)				N. semi siliqua ⁻¹			
PR45D01	102,71 <i>ab</i>	90,28 <i>bc</i>	49,56 <i>e</i>	80,85 b	11,61	9,12	7,64	9,46 b
Excalibur	118,70 <i>a</i>	102,09 <i>a-c</i>	81,45 <i>cd</i>	100,75 a	14,75	11,63	9,35	11,91 a
Catalina	84,18 <i>b-d</i>	83,27 <i>b-d</i>	67,47 <i>de</i>	78,31 b	8,64	8,57	7,22	8,14 b
MEDIA	101,86 A	91,88 B	66,16 C		11,67 A	9,77 AB	8,07 B	

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Per ciascuna variabile, le lettere in grassetto indicano l'ipotesi di diversità tra le cultivar (effetto principale), mentre le lettere in maiuscolo tra le epoche di semina (effetto principale). Le lettere in italico indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione 'cultivar × ep. di semina'.

3.5 Discussione

L'applicabilità di semine precoci collocate nella prima decade di settembre – pratica agronomica riscontrabile negli attuali itinerari colturali – è stata indagata valutando gli adattamenti fenologici e morfo-produttivi di tre cultivar rappresentative delle principali tipologie genetiche disponibili per la specie a epoche di semina anticipate, ottimali e tardive per l'areale Veneto.

La data di messa a dimora del seme ha significativamente influenzato l'evoluzione fenologica della coltura, alterando la lunghezza sia del ciclo colturale che delle singole fasi di crescita. In particolare, il posizionamento della semina all'inizio di settembre (epoca anticipata) ha determinato un ciclo più lungo, contraddistinto da una crescita vegetativa (emergenza – inizio fioritura) e stadi post-fiorali (fine fioritura – maturazione) prolungati (Fig. 1 e 2). Tali risultati concordano con quanto osservato da Mendham et al. (1990), Hocking (1993), Hocking e Stapper (2001) e Uzun et al. (2009), i quali rilevarono un'estensione degli stadi vegetativi e riproduttivi in piante seminate precocemente per gli areali di riferimento. La fenologia della specie è controllata principalmente dalla temperatura (inclusa vernalizzazione) e dal fotoperiodo (Hodgson, 1978; Nanda et al., 1996; Robertson et al., 2002). In particolare, l'interazione tra la lunghezza del giorno e la temperatura influenza lo sviluppo colturale tra l'emergenza e l'inizio della fioritura (Gomez e Miralles 2010), mentre in seguito all'antesi l'evoluzione fenologica è definita solamente dal regime termico (Habekotté, 1997). Da tale premessa è deducibile che l'anticipo della semina a inizio settembre abbia collocato la prima parte del ciclo colturale in un periodo dell'anno caratterizzato da una combinazione di fotoperiodo e temperatura capace di prolungare lo sviluppo vegetativo, mentre gli stadi post-fiorali sarebbero stati caratterizzati da temperature miti, ritardanti i processi tipici della maturazione. Esaminando la lunghezza della fioritura (inizio fioritura – fine fioritura) non sono emerse differenze tra le epoche a confronto per la durata in giorni. Tale fenomeno, osservato anche da Hocking e Stapper (2001), stabilirebbe per il decorso fiorale un forte controllo genetico (precocità varietale).

Per quanto concerne l'emergenza dei semi, essa è risultata prolungata e caratterizzata da percentuali inferiori nell'epoca anticipata rispetto all'ottimale e alla ritardata (Tab. 3). Il basso contenuto idrico che ha caratterizzato probabilmente il terreno a fine

estate ha frenato la fuoriuscita dei cotiledoni, determinando bassi popolamenti di campo. In accordo con Dejoux et al. (2003), la ridotta densità di piante che ha distinto le tesi seminate a inizio settembre non ha rappresentato un fattore limitante per il successo della coltura. Di fatto, le temperature estive che hanno caratterizzato le prime fasi di sviluppo delle piante seminate precocemente avrebbero facilitato lo sviluppo del sistema radicale (Thorup Christensen, 1993), il quale avrebbe favorito accumuli di biomassa e assorbimenti azotati tali da bilanciare la scarsa densità di piante per unità di superficie.

L'elevata organicazione di N osservata nella prima epoca di semina garantisce alla stessa ampia rilevanza nella definizione di itinerari colturali sostenibili e '*low-input*'. Considerando l'assorbimento azotato di fine gennaio, successivo quindi al periodo di massima percolazione dei nitrati per l'areale in prova (Zanetti et al., 2011), le piante seminate anticipatamente hanno organicato 140 kg N ha^{-1} , mentre quelle messe a dimora nella data ottimale e tardiva 74 e 7 kg N ha^{-1} , rispettivamente (Tab. 5). Tali utilizzi indicano chiaramente che semine precoci possono rappresentare una strategia agronomica efficace per mitigare quei rischi ambientali legati alla lisciviazione nitrica. Conclusioni simili sono state raggiunte anche da Dejoux et al. (2003), i quali, considerando la dotazione minerale del terreno e la concentrazione di NO_3 nel percolato, hanno confermato i vantaggi ambientali di sistemi colturali basati su semine anticipate. Inoltre, come proposto da Reau et al. (1997) e Rathke et al. (2006), l'intenso utilizzo autunnale di N associato a semine precoci può essere sfruttato per impostare piani di concimazione primaverili razionali in accordo con i reali fabbisogni della coltura.

L'adozione di epoche anticipate, oltre a determinare vantaggi di tipo ambientale, sembra anche esaltare le performance produttive della coltura. La prima data ha fornito una resa in seme di $4,6 \text{ t s.s. ha}^{-1}$, +13% e +54% rispetto a quella ottimale e ritardata (Tab. 9). Vantaggi produttivi riconducibili all'anticipo della semina sono stati rilevati anche da Walton et al. (1999) e Dejoux et al. (2003).

Le ragioni delle produzioni elevate fornite dalle tesi seminate a inizio settembre sono riconducibili innanzitutto a un migliore differenziamento di semi per unità di superficie (Tab. 9). Questa componente della resa è determinata a partire dalla piena fioritura per un periodo equivalente a 19-25 giorni (Berry e Spink, 2006). Nell'epoca anticipata questa fase sarebbe stata interessata da regimi termici inferiori rispetto a quelli che hanno caratterizzato lo stesso stadio delle epoche più tardive. Temperature più miti durante l'antesi permetterebbero di contenere l'incidenza di aborti fiorali e seminali, favorendo un migliore differenziamento di semi (Johnson et al., 1995).

Un'altra causa delle maggiori rese fornite dall'epoca anticipata è identificabile nella crescita vegetativa prolungata, la quale promuoverebbe la formazione di un apparato fogliare espanso, in grado di assicurare un elevato approvvigionamento di fotosintetati (Hocking e Stapper, 2001). Considerando inoltre, gli inverni miti che caratterizzano gli areali mediterranei, la defogliazione della canopy risulta contenuta e quindi, anche le perdite di N organico. Di conseguenza, le piante seminate precocemente disporrebbero di un'ampia dotazione azotata impiegabile alla ripresa vegetativa.

Nonostante il ritardo delle operazioni di semina a inizio ottobre abbia compromesso la risposta produttiva di tutti i genotipi a confronto, particolarmente svantaggiato è risultato l'ibrido semi-nano (Tab. 9). Di fatto, PR45D01 con il posticipare della semina ha adottato strategie di ripartizione della biomassa e di N a favore delle strutture vegetative della canopy (fusto e ramificazioni), mentre le cultivar convenzionali sono risultate più abili a sostenere lo sviluppo degli organi riproduttivi (silique), (Fig. 3 e 4). Tale risposta morfologica si è tradotta in un basso differenziamento di semi per m² che ha inficiato il modesto potenziale produttivo dell'ibrido semi-nano.

3.6 Conclusioni

L'adozione di semine precoci (prima decade di settembre) rappresenta una strategia agronomica perseguibile con successo per impostare sistemi colturali sostenibili sia ambientalmente che economicamente nell'areale Veneto. L'anticipo del ciclo di sviluppo permette di avvicinare il potenziale produttivo della specie, prolungando la crescita vegetativa e promuovendo, tra le componenti principali della resa, la formazione di un consistente numero di semi m^{-2} .

L'estensione del periodo di sviluppo pre-invernale favorisce inoltre un'elevata organizzazione dell'azoto, mitigando tutti quei rischi ambientali legati alla lisciviazione nitrica.

Nel caso in cui l'organizzazione aziendale o le condizioni meteorologiche rendessero difficile l'applicazione di questa pratica, è consigliabile basare il sistema colturale sulla coltivazione di genotipi a taglia convenzionale poiché maggiormente abili a compensare i peggioramenti produttivi provocati da semine ritardate.

3.7 Bibliografia

- Angadi S.V., Cutforth H.W., Miller P.R., McConkey B.G., Entz M.H., Brandt A., Olkmar K.M., (2000). Response of three Brassica species to high temperature stress during reproductive growth. *Can. J. Plant Sci.*, 80: 693-701.
- Berry P.M., Spink J.H., (2006). A physiological analysis of oilseed rape yields: past and future. *J. Agric. Sci.*, 144: 381-392.
- Champolivier L., Merrien A., (1996). Effects of water stress applied at different growth stages to *Brassica napus* L. *oleifera* on yield, yield components and seed quality. *Eur. J. Agron.*, 5: 153-160.
- Degenhardt D.F., Kondra Z.P., (1981). The influence of seeding date and seeding rate on seed yield and yield components of five genotypes of *Brassica napus*. *Can. J. Plant Sci.*, 61: 175-183.
- Dejoux J.F., Meynard J.M., Reau R., (1999). Rapeseed new crop management with very early sowing in order to reduce N-leaching and N-fertilization. In: Wratten N., Salisbury P.A. (Eds.). *New horizons for an old crop. Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress. Canberra, Australia.*
- Dejoux J.F., Meynard J.M., Reau R., Roche R., Saulas P., (2003). Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomy*, 23: 725-736.
- Gomez N.V., Miralles D.J., (2010). Factors that modify early and late reproductive phases in oilseed rape (*Brassica napus* L.): its impact on seed yield and oil content. *Ind. Crop Prod.*, 34: 1277-1285.
- Graf T., Heydrich R., (2000). Optimierungsmöglichkeiten des Winterrapsanbaus. *UFOP-Schriften*, 14: 73-78.
- Habekotté B., (1997). A model of the phenological development of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res.*, 54: 127-136.
- Hocking P.J., (1993). Effects of sowing time and plant age on critical nitrogen concentrations in canola (*Brassica napus* L.). *Plant Soil*, 155: 387-390.
- Hocking P.J., Randall P.J., DeMarco D., (1997). The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen, and nitrogen effects on yield components. *Field Crops Res.*, 54: 201-220.
- Hocking P.J., (2001). Effect of sowing time on nitrate and total nitrogen concentrations in field-grown canola (*Brassica napus* L.), and implications for plant analysis. *J. Plant Nutr.*, 24: 43-59.
- Hocking P.J., Stapper M., (2001). Effect of sowing time and nitrogen fertilizer on canola and wheat, and nitrogen fertiliser on Indian mustard. I. Dry matter production, grain yield, and yield components. *Aust. J. Agric. Res.*, 52: 623-634.

- Hodgson A.S., (1978). Rapeseed adaptation in northern New South Wales. I. Phenological responses to vernalization, temperature and photoperiod by annual and biennial cultivars of *Brassica campestris* L. *Brassica napus* L. and wheat cv. Timgalen. *Aust. J. Agr. Res.*, 29: 693-710.
- Johnson B.L., McKay K.R., Schneiter A.A., Hanson B.K., Schatz B.G., (1995). Influence of planting date on canola and crambe production. *J. Prod. Agric.*, 8: 594-599.
- Khangura R., Barbetti M.J., (2001). Prevalence of blackleg (*Leptosphaeria maculans*) on canola (*Brassica napus* L.) in Western Australia. *Austr. J. Exp. Agric.*, 41: 71-80.
- Lancashire P.D., Bleiholder H., Langelüddecke P., Stauss R., Van den Boom T., Weber E., Witzemberger A., (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.*, 119: 561-601.
- Marshall B., Squire G.R., (1996). Non-linearity in rate-temperature relations of germination in oilseed rape. *J. Exp. Bot.*, 47: 1369-1375.
- Mendham N.J., Russell J., Jarosz N.K., (1990). Response to sowing time of three contrasting Australian cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agric. Sci.*, 144: 275-283.
- Miralles D.J., Ferro B.C., Slafer G.A., (2001). Development responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *Field Crops Res.*, 71: 211-223.
- Nanda R., Bhargava S.C., Tomar D.P.S., Rawson H.M., (1996). Phenological development of *B. campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata* grown in controlled environments and from 14 sowing dates in the field. *Field Crop Res.*, 46: 93-103.
- Ozer H., (2003). Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapeseed cultivars. *Eur. J. Agron.* 19: 453-463.
- Peres A., Poisson B., Maisonneuve C., (1996). Phoma du colza: comment le champignon progresse dans le plante?. *Oleoscope*, 35: 10-12.
- Rathke G.W., Behrens T., Diepenbrock W., (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 117: 80-108.
- Reau R., Jung L., Wagner D., (1997). Les bases de la fertilization azotée prévisionnelle, in: Le Page R., Reau R., (Eds.), *Fertilisation azotée du colza d'hiver*, *Oleoscope* n° 20, CETIOM, Paris, pp. 29-37.
- Robertson M.J., Asseng S., Kirkegaard J.A., Watkinson A.R., Holland J.F., Wratten N., Potter T.D., Burton W., Walton G.H., Moot D.J., Farre I., (2002). Environmental and genotypic control of time to flowering in canola and Indian mustard. *Aust. J. Agr. Res.*, 53: 793-809.
- Schulz R.R., Michel H.J., Makowski N., (1994). Hohe oder niedrige Intensität beim Rapsanbau. *Raps*, 12: 102-106.
- Scott R.K., Ogunremi E.A., Irvins J.D., Mendham N.J., (1973). The effect of fertilizers and harvest date by growth and yield of oilseed rape sown in autumn and spring. *J. Agric. Sci.*, 81: 287-293.

- Sieling K., Stahl C., Winkelmann C., Christen O., (2005). Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. *Eur. J. Agron.*, 22: 71-84.
- Taylor A.J., Smith C.J., (1992). Effect of sowing date and seeding rate on yield components of irrigated canola (*Brassica napus* L.) grown on a red-brown earth in south-eastern Australia. *Aust. J. Agric. Res.*, 43: 1629-1641.
- Thorup Christensen K., (1993). Root development of nitrogen catch crops and of a succeeding crop of broccoli. *Acta Agric. Scand. Soil Plant Sci.*, 43: 58-64.
- Toniolo L., Mosca G., (2001). Colza (*Brassica napus* L. var *oleifera* D.C.). In: Giardini L. Baldoni R. (Editor), *Coltivazioni Erbacee*. Patron, Bologna, pp. 31-47.
- Uzun B., Zengin U., Furat S., Akdesir O., (2009). Sowing date effects on growth, flowering, oil content and seed yield of canola cultivars. *Asian J. Chem.*, 21: 1957-1965.
- Walton G., Si P., Bowden B., (1999). Environmental impact on canola yield and oil. In: Wratten N., Salisbury P.A. (Eds.), *New horizons for an old crop*. Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress. Canberra, Australia.
- Zanetti F., Rampin E., Vamerli T., Mosca G., (2011). Relevance of soil texture for root growth of oilseed rape and potential reduction of nitrate leaching. In proceedings of 7th International Root Symposium on Structure and Function of Roots, Novy Smokovec (Slovakia) 5-9 Sept. pp. 214-215.

Capitolo 4

Adattamenti morfologici e produttivi di diverse varietà di colza a densità di semina decrescenti

4.1 Riassunto

Il portamento ridotto e il marcato accorciamento degli internodi che contraddistinguono le varietà semi-nane di recente costituzione potrebbero richiedere itinerari agronomici diversificati rispetto a quelli applicati nella coltivazione di varietà tradizionali. In questo studio, l'adozione di bassi popolamenti di campo – pratica agronomica consigliabile negli odierni itinerari colturali – è stata valutata per due anni indagando gli adattamenti morfo-produttivi attuati da cultivar ad *habitus* vegetativi contrastanti (ibrido CHH vs. ibrido CHH semi-nano vs. varietà a impollinazione libera), seminate a densità di semina decrescenti (63, 44, 22 semi m⁻²).

In media nelle due stagioni di prova, l'ibrido convenzionale (Excalibur) ha messo in luce maggiori produzioni di biomassa rispetto al genotipo seminano (PR45D01) e alla varietà a impollinazione libera (Viking), soprattutto nelle fasi BBCH 19 (sviluppo fogliare, fine Gennaio) e 35 (levata, Marzo). Le cultivar hanno presentato differenti strategie di ripartizione della biomassa: PR45D01 ha favorito la ramificazione della canopy, mentre Excalibur e Viking hanno promosso lo sviluppo del fusto. L'ibrido semi-nano, coltivato alla massima densità (63 semi m⁻²), ha formato il maggior numero di branche laterali e di silique, invece le cultivar a taglia convenzionale hanno fruttificato più intensamente a basse densità. In accordo con detta risposta adattativa, le varietà hanno differenziato la resa in seme in relazione alla popolazione di piante. Excalibur e Viking hanno fornito le produzioni migliori rispettivamente a 22 (4,1 t s.s. ha⁻¹) e 44 semi m⁻² (3,1 t s.s. ha⁻¹), mentre PR45D01 ha tratto vantaggio dall'intensificazione della densità (3,6 t s.s. ha⁻¹ a 63 semi m⁻²). La propensione di Excalibur per popolamenti ridotti è riconducibile a un'ottimizzazione delle principali componenti della resa (e.g., semi siliqua⁻¹) in condizioni di bassa competizione inter-pianta. PR45D01, in corrispondenza di elevate densità, favorisce la fruttificazione, anche sulle branche laterali. Riduzioni del popolamento quindi, sono attuabili con successo se associati a una scelta varietale orientata verso cultivar con portamento e statura convenzionali. L'analisi di regressione ha messo in evidenza che la risposta produttiva è strettamente legata alla biomassa prodotta allo stadio BBCH 19 (R^2 : 0,36; $P \leq 0,05$). Questo parametro, facilmente determinabile in pieno campo, fornisce una realistica previsione di resa permettendo così di calibrare i successivi interventi agronomici (e.g., concimazione N in copertura), al potenziale produttivo della coltura.

4.2 Introduzione

Come è ben noto in colza, la resa areica in seme è la risultante di diverse componenti principali che interagiscono tra loro: densità di piante, numero di silique per pianta, numero di semi per siliqua e peso unitario del seme (Diepenbrock, 2000). I risultati presenti in letteratura permettono di considerare tale struttura produttiva altamente plastica, in grado quindi di compensare con una certa elasticità anche una modesta disponibilità di fattori colturali (Delhay, 1980; Mendham et al., 1981; Berti e Mosca, 1987; Merrien et al., 1991; Bonari et al., 1994; Leto et al., 1994; Diepenbrock, 2000; Zanetti et al., 2009).

Tra le componenti produttive, la densità di piante è quella che presenta il maggiore impatto sull'architettura e produzione della canopy (Diepenbrock, 2000). Essa è determinata anche durante le operazioni di semina attraverso la scelta dell'investimento. Negli odierni itinerari colturali è riscontrabile la tendenza a ridurre il numero di semi m^{-2} dai 100 ai 30-40 (Romano, 2009). Bassi popolamenti di piante, oltre a limitare i rischi di infezioni parassitarie (Twengstrom et al., 1998; Aubertot et al., 2006), garantirebbero rese di prodotto comparabili a quelle ottenibili con maggiori investimenti, esaltando l'elevata adattabilità strutturale tipica dell'oleifera (Momoh e Zhou, 2001; Angadi et al., 2003; Bilgili et al., 2003). In condizioni di ridotta densità, la pianta differenzia un elevato numero di branche e di fruttificazioni, incrementando però la scalarità di fioritura e di maturazione. Al contrario a densità intensive, le piante risultano più suscettibili all'allettamento, tuttavia la minore produzione di rami e di silique permette momenti di maturazione più omogenei e contemporanei (Christensen e Drabble, 1984; Morrison et al., 1990; Leach et al., 1999; Momoh e Zhou, 2001). E' determinabile inoltre una relazione negativa tra la numerosità di piante e il numero di semi per siliqua in ragione della minore fertilità che caratterizza soprattutto le fruttificazioni portate sulle branche laterali (Diepenbrock, 2000; Momoh e Zhou, 2001). Altre componenti della resa, come il peso unitario del seme, sembrano indifferenti alla variazione del popolamento in campo (Angadi et al., 2003).

L'intensità dei processi di ramificazione e fruttificazione tuttavia dipendono largamente dalle caratteristiche ambientali dell'areale di coltivazione (Sultan, 2000). Ampia disponibilità di luce, acqua e nutrienti, associate a decorsi climatici favorevoli, esal-

tano la plasticità morfologica della coltura, permettendo l'applicazione di densità di semina sub-ottimali (Mc Gregor, 1987; Morrison et al., 1990; Angadi et al., 2003). La definizione di un idoneo investimento quindi, non può prescindere da studi *in situ* miranti a una valutazione morfo-produttiva della coltura.

Oltre ai fattori ambientali, gli adattamenti strutturali e produttivi associati alla variazione della densità di piante dipenderebbero anche dalla tipologia genetica alla quale afferisce la cultivar in semina. Ciò è deducibile dalle sperimentazioni condotte da Carver et al. (1999), i quali suggerirono l'adozione di investimenti diversificati per la coltivazione di ibridi e linee a impollinazione libera.

Detti studi si rifanno a varietà contraddistinte da *habitus* vegetativi convenzionali, cioè privi di riduzioni d'altezza della pianta. La recente costituzione di ibridi CHH semi-nani, caratterizzati da vigore vegetativo ridotto e da un marcato accorciamento degli internodi del fusto (Sieling e Kage, 2008; Liu et al., 2010), potrebbe aver modificato il rapporto tra le varie strutture della pianta, promuovendo risposte diversificate agli input agronomici rispetto alle cultivar tradizionali. Appare quindi, necessario approfondire la propensione di tali varietà a itinerari colturali basati su limitati investimenti di seme.

A tal proposito, nelle annate 2008-09 e 2009-10 sono stati messi a confronto gli adattamenti morfo-produttivi di tre cultivar rappresentative delle principali tipologie genetiche disponibili per la specie (ibrido CHH vs. ibrido CHH semi-nano vs. varietà a impollinazione libera), al variare della densità di semina.

4.3 Materiali e metodi

Protocollo sperimentale e ambiente di prova

Nelle annate 2008-09 e 2009-10, presso l'Azienda Agraria Sperimentale dell'Università degli Studi di Padova (Legnaro, 45°21'N, 11°58'E), un ibrido CHH (Excalibur; Dekalb, Italia), un ibrido CHH semi-nano (PR45D01; Pioneer, Italia) e una varietà a impollinazione libera (Viking; NPZ-Lembke, Germania), sono stati seminati a densità di 22, 44 e 63 semi m⁻², secondo uno schema sperimentale a split-plot con 3 repliche. Il fattore 'cultivar' è stato applicato nei parcelloni, mentre il fattore 'densità di semina' nelle sub-parcelle. Le unità sperimentali avevano dimensioni di 54 m² nel 2008-09 e di 27 m² nel 2009-10.

La scelta delle cultivar rappresentative di ciascuna tipologia genetica è stata basata sui dati produttivi ottenuti in screening varietali preliminari condotti nel medesimo areale di coltivazione.

La tecnica agronomica applicata è stata la stessa in ambedue gli anni. La preparazione del letto di semina è avvenuta attraverso tecniche di lavorazione ridotta applicando in successione discatura (profondità: ~15 cm), estirpatura (~20 cm) ed erpicatura (~15 cm). La semina è stata realizzata nell'epoca ottimale per l'areale considerato (26/09/2008 e 28/09/2009), utilizzando una seminatrice di precisione dotata di dischi da colza a una profondità di ~3 cm. La distanza interfilare è stata mantenuta costante e corrispondente a 0,45 m, così da permettere un controllo meccanico delle malerbe attraverso sarchiatura. Le diverse densità di semina sono state quindi attuate modificando la distanza dei semi sulla fila (10, 5 e 3,5 cm rispettivamente per 22, 44 e 63 semi m⁻²). L'apporto di nutrienti minerali in entrambe le annate è stato frazionato in due interventi svoltisi uno in pre-semina e uno in copertura. Durante la messa a dimora del seme sono stati distribuiti 0-60-60 kg ha⁻¹ di NPK sottoforma di 130 kg ha⁻¹ di perfosfato triplo (46% P₂O₅) e di 120 kg ha⁻¹ di solfato di potassio (50% K₂O). La concimazione di copertura primaverile si è limitata al solo apporto di N in quantità pari a 80 kg ha⁻¹ sottoforma di solfato ammonico (20,5% N).

La coltura non ha richiesto particolari interventi di controllo della popolazione patogena, nonostante nel 2009-10 sia stato eseguito un trattamento insetticida allo stadio

di fioritura contro il meligete (*Meligethes aeneus*) e il punteruolo delle silique (*Ceutorhynchus assimilis*), a base di Karate Zeon (lambda-cialotrina 9,48%, Syngenta), in dose di 130 ml ha⁻¹.

A maturazione si è proceduto alle operazioni di raccolta meccanica delle parcelle precedentemente sbordate utilizzando una mietitrebbiatrice con testata da grano.

Gli andamenti termo-pluviometrici registrati durante i cicli colturali delle annate 2008-09 e 2009-10 sono rilevabili rispettivamente nelle Tab. 1 e 2. Entrambi le stagioni sono state più calde e piovose rispetto alle serie storiche di riferimento. In particolare, considerando le precipitazioni, nella stagione 2008-09 la coltura ha usufruito di quantità maggiori della media di lungo periodo nella parte invernale e primaverile del ciclo, mentre valori inferiori sono emersi per i mesi di settembre, ottobre e maggio. Nell'annata 2009-10 invece, abbondanti precipitazioni sono state osservate a settembre, nel trimestre dicembre – gennaio – febbraio, e nel bimestre maggio – giugno.

Gli appezzamenti utilizzati nella sperimentazione presentavano classi di tessitura (USDA) di medio-impasto nel 2008-09 e franco-limoso nel 2009-10 (Tab. 3). Il pH (~8) e la dotazione azotata (~0,1% N) erano simili tra i due siti sperimentali. I contenuti in fosforo (P₂O₅ totale e assimilabile) e potassio (K₂O scambiabile) sono risultati invece maggiori nel campo prova del primo anno (2008-09).

Tab. 1. Dati pluviometrici e termici mensili registrati durante il ciclo colturale 2008-09^a.

Mese	Precipitazioni (mm)			Temperatura media (°C)		
	2008-09	1995-07	Var.	2008-09	1995-07	Var.
Set.	60,0	83,0	-23,0	18,0	18,2	-0,2
Ott.	45,8	91,1	-45,3	14,6	13,9	+0,7
Nov.	150,8	82,1	+68,7	8,8	8,2	+0,6
Dic.	133,2	67,1	+66,1	4,7	4,1	+0,6
Gen.	57,2	42,3	+14,9	2,9	2,9	0,0
Feb.	57,2	46,2	+11,0	5,2	4,4	+0,8
Mar.	104,6	46,2	+58,4	9,0	8,5	+0,5
Apr.	126,0	76,0	+50,0	14,3	12,6	+1,7
Mag.	25,8	89,7	-63,9	20,2	18,0	+2,2
Giu.	86,6	79,1	+7,5	21,6	21,6	0,0
<i>Periodo</i>	<i>847,2</i>	<i>702,8</i>	<i>+144,4</i>	<i>11,9</i>	<i>11,2</i>	<i>+0,7</i>

^a I dati climatici sono stati rilevati presso la stazione meteorologica dell'ARPAV installata presso l'Azienda Agraria Sperimentale 'L. Toniolo' dell'Università degli Studi di Padova.

Tab. 2. Dati pluviometrici e termici mensili registrati durante il ciclo colturale 2009-10^a.

Mese	Precipitazioni (mm)			Temperatura media (°C)		
	2009-10	1995-08	Var.	2009-10	1995-08	Var.
Set.	189,8	81,4	+108,4	20,8	18,2	+2,6
Ott.	43,8	87,9	-44,1	14,3	13,9	+0,4
Nov.	91,6	87,0	+4,6	10,1	8,3	+1,8
Dic.	113,0	72,1	+40,9	3,8	4,1	-0,3
Gen.	58,6	44,1	+14,5	2,5	3,1	-0,6
Feb.	127,4	44,1	+83,3	5,0	4,4	+0,6
Mar.	38,2	46,5	-8,3	8,1	8,5	-0,4
Apr.	45,0	78,3	-33,3	14,0	12,6	+1,4
Mag.	109,6	90,1	+19,5	17,7	18,0	-0,3
Giu.	111,2	79,2	+32,0	22,1	21,6	+0,5
<i>Periodo</i>	<i>928,2</i>	<i>710,7</i>	<i>+217,5</i>	<i>11,8</i>	<i>11,3</i>	<i>+0,5</i>

^a I dati climatici sono stati rilevati presso la stazione meteorologica dell'ARPAV installata presso l'Azienda Agraria Sperimentale 'L. Toniolo' dell'Università degli Studi di Padova.

Tab. 3. Principali proprietà chimico-fisiche e precessioni colturali dei suoli utilizzati nel 2008-09 e 2009-10.

Parametro	2008-09	2009-10
Sabbia (%)	24	35
Limo (%)	62	49
Argilla (%)	14	16
pH	8,27	8,04
S.O. (%)	1,60	1,51
N (%)	0,08	0,1
C/N	11,1	8,9
CSC (cmol (+) kg ⁻¹)	10,2	14,8
P tot. (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	904	770
P ass. (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	25	35
K scamb. (mg K ₂ O kg ⁻¹)	109	60
Precessione colturale		
2008-09	Frumento	
2009-10	Orzo	

Rilievi e campionamenti

Gli adattamenti morfologici e le risposte produttive delle cultivar in prova sono stati indagati valutando l'accumulo di biomassa, la ripartizione della stessa tra le varie strutture della pianta (*'biomass partitioning'*) e alcune componenti della resa (peso unitario del seme, n. di semi m⁻² e n. di semi siliqua⁻¹). Le metodiche di rilievo e campionamento sono rimaste rigorosamente le stesse in entrambi le annate e condotte nelle medesime fasi di sviluppo.

L'evoluzione fenologica di ciascun genotipo è stata esaminata datando le fasi di emergenza (BBCH 09), produzione di foglie (BBCH 19), piena levata (BBCH 35), piena fioritura (BBCH 65), riempimento semi (BBCH 80) e maturazione (BBCH 89). Tali stadi sono stati determinati quando il 50% delle piante presenti per ciascuna unità sperimentale manifestava i criteri morfologici fissati dalla scala BBCH adattata al colza (Lancashire et al., 1991).

Nella fase di post-emergenza, precisamente a 20 GDS (Giorni Dalla Semina), e in levata, in seguito ai rigori invernali, è stata monitorata la densità reale di piante presente in ciascuna parcella. A tale scopo, sono state definite 3 aree di saggio (3 m²) rappresentative delle condizioni di ogni unità sperimentale.

Campionamenti di biomassa epigea sono stati condotti nelle fasi fenologiche BBCH 19 (fine gennaio), 35 (marzo), 65 (aprile), 80 (maggio) e 89 (giugno). In ciascun rilievo, le piante presenti in 2 aree di saggio per parcella (2 m²) sono state contate, recise al colletto, pesate e seccate per 48 h a 65°C.

L'indagine morfologica è stata approfondita eseguendo un *'biomass partitioning'* a BBCH 69 (solo 2009-10) e BBCH 80 (2008-09 e 2009-10). 15 piante consecutive per parcella sono state tagliate al colletto e separate in foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique. Il materiale vegetale così ottenuto è stato essiccato per 48 h a 65°C, e pesato.

Alla fase di riempimento semi è stato eseguito anche il conteggio delle ramificazioni e silique. La conta delle branche ha considerato solamente quelle di primo ordine, mentre le fruttificazioni sono state suddivise a seconda della loro presenza sul racemo principale (silique principali), o sulle ramificazioni (silique laterali).

A maturazione è stata stimata la resa in seme correggendo le quantità ottenute per l'umidità residua. Campioni di seme essiccati sono stati successivamente utilizzati per determinare il peso unitario degli stessi (3 repliche da 100 semi per parcella). Il nu-

mero di semi per unità di superficie è stato derivato dal rapporto tra la resa di prodotto e il peso di 1000 semi, mentre il numero di semi per singola fruttificazione è stato stimato dal numero di semi e di silique m^{-2} .

Analisi statistica dei dati

Gli effetti ‘anno’, ‘cultivar’, ‘densità di semina’, ‘epoca di campionamento’ (solo per l’accumulo di biomassa), e delle loro interazioni sono stati saggiati attraverso l’analisi della varianza (ANOVA), utilizzando il programma CoStat 6,2⁵. Quando il test F ha indicato significatività per valori di $P \leq 0,05$, la separazione tra le medie è avvenuta tramite test di Duncan.

I valori relativi alla ripartizione della biomassa sono stati espressi come % (w/w) sul totale della biomassa secca prodotta per unità di superficie.

Allo scopo di approfondire gli adattamenti morfo-produttivi degli ibridi alla densità di semina è stato utilizzato l’approccio multivariato. L’analisi delle componenti principali e discriminate sono state applicate ai valori di produzione di biomassa e sua ripartizione all’interno della canopy (variabile considerata solamente allo stadio BBCH 80 per un biennio), resa in seme e sue componenti⁶.

⁵ CoHort Software, Monterey, CA, USA.

⁶ XLStat, Addinsoft SARL, Parigi, Francia.

4.4 Risultati sperimentali

Emergenza

In entrambi gli anni di sperimentazione, l'emergenza dei semi (%) è stata analizzata a 20 Giorni Dalla Semina (GDS), e in fase di levata, allo scopo di valutare se la densità reale di piante riflettesse gli investimenti impostati durante le operazioni di messa a dimora del seme (Tab. 4).

Nella stagione 2008-09 sono state osservate emergenze superiori e vicine alla totalità rispetto al 2009-10 ($P \leq 0,05$). Nel primo anno di prova, le maggiori dimensioni delle unità sperimentali (54 m² nel 2008-09, 27 m² nel 2009-10), avrebbero permesso una semina più agevole con probabilmente, una profondità più omogenea. La densità di piante nel primo anno ha rispecchiato quindi, gli investimenti di seme stabiliti alla semina.

L'emergenza nel 2009-10 è risultata inoltre diversificata tra gli investimenti; le percentuali maggiori sono state determinate per le densità a 44 e 63 semi m⁻² ($P \leq 0,05$).

Tra le cultivar, PR45D01 sembra caratterizzata da un vigore seminale limitato, che si è tradotto in percentuali di emergenza ridotte in entrambi gli anni (effetto principale 'cultivar': $P \leq 0,05$ sia nel 2008-09 che nel 2009-10), indipendentemente dalla densità di semina (interazione 'cultivar × densità di semina': $P > 0,05$ sia nel 2008-09 che nel 2009-10).

La densità reale di piante valutata alla ripresa vegetativa, allo scopo di determinare eventuali alterazioni provocate dalle rigidità invernali ai popolamenti autunnali, ha mostrato riduzioni molto contenute (~0,8% media dei due anni; dati non mostrati) e uniformi tra gli anni, cultivar e investimenti (effetti principali e loro interazioni: $P > 0,05$).

Tab. 4. Emergenza (%) rilevata a 20 Giorni Dalla Semina (GDS) nelle annate 2008/09 e 2009/10^a.

Cultivar	2008-09				2009-10			
	22	44	63	MEDIA	22	44	63	MEDIA
PR45D01	84	84	87	85 <i>b</i>	48	54	53	52 <i>c</i>
Excalibur	100	100	100	100 <i>a</i>	58	72	66	65 <i>b</i>
Viking	99	100	99	99 <i>a</i>	69	78	75	74 <i>a</i>
MEDIA	94	95	95	95 A	58 b	68 a	65 a	64 B

^a L'emergenza è stata calcolata dal rapporto tra il numero di piante m⁻² a 20 GDS e la densità di semi m⁻². Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere maiuscole indicano l'ipotesi di diversità tra i due anni (effetto principale). All'interno dello stesso anno, le lettere in *italico* indicano l'ipotesi di diversità tra le cultivar (effetto principale), mentre le lettere in **grassetto** tra le densità di semina (effetto principale).

Produzione di biomassa

L'indagine sulle basi morfologiche della resa ha caratterizzato inizialmente l'accumulo di biomassa sostenuto dalla coltura. Considerando l'effetto principale 'cultivar', Excalibur ha fornito, in entrambi le stagioni di prova, una quantità media di sostanza secca maggiore rispetto a Viking e PR45D01 ($P \leq 0,05$), (Tab. 5). L'elevato accumulo messo in luce dall'ibrido convenzionale si è manifestato lungo tutto il ciclo colturale e in maniera significativamente maggiore nelle fasi BBCH 19 (9 o più foglie vere, fine gennaio), 35 (levata, marzo) e 89 (maturazione, giugno), (interazione 'cultivar × epoca di campionamento': $P \leq 0,05$).

Tab. 5. Effetti ‘anno’, ‘epoca di campionamento’ e ‘densità di semina’ sulla produzione di biomassa (g s.s. m⁻²) delle cultivar a confronto^a.

Effetto	Cultivar			MEDIA
	PR45D01	Excalibur	Viking	
Anno				
2008-09	683	883	723	763
2009-10	811	861	809	827
Epoca camp.				
BBCH 19	150 (g)	209 (f)	173 (g)	177 e
BBCH 35	284 (f)	370 (e)	317 (f)	324 d
BBCH 65	832 (d)	915 (d)	875 (d)	874 c
BBCH 80	1138 (c)	1207 (bc)	1150 (c)	1165 b
BBCH 89	1332 (b)	1659 (a)	1315 (b)	1435 a
Densità				
22	732	799	738	756
44	768	925	760	818
63	741	893	800	811
MEDIA	747 <i>b</i>	872 <i>a</i>	766 <i>b</i>	

ANOVA		
Effetto	<i>g.l.</i>	Significatività
Blocchi	2	n.s. ^b
Anno (A)	1	n.s.
Cultivar (C)	2	**
Densità (D)	2	n.s.
Epoca camp. (E)	4	**
A × C	2	*
A × D	2	n.s.
A × E	4	***
C × D	4	n.s.
C × E	8	*
D × E	8	n.s.
A × C × D	4	n.s.
A × C × E	8	n.s.
A × D × E	8	n.s.
C × D × E	16	n.s.
A × C × D × E	16	n.s.

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere normali indicano l'ipotesi di diversità tra le epoche di campionamento (effetto principale), mentre le lettere in italico tra le cultivar (effetto principale). Le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione ‘cultivar × epoca di campionamento’.

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Ripartizione della biomassa

Le incidenze di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique sul totale della biomassa prodotta per unità di superficie sono risultate mutevoli in funzione sia della cultivar che della densità di semina (interazioni 'cultivar × struttura vegetativa' e 'densità di semina × struttura vegetativa': $P \leq 0,05$ in entrambi i campionamenti del 2008-09 e nel 2009-10).

Considerando i genotipi, le cultivar a taglia convenzionale (Excalibur e Viking) hanno ripartito più biomassa sul fusto, mentre PR45D01 ha fornito le incidenze maggiori di ramificazioni, soprattutto a BBCH 80 (Fig. 1 a,b), ($P \leq 0,05$). L'ibrido semi-nano ha allocato nelle branche il ~26% e il 19% (media di due anni) della biomassa prodotta a BBCH 69 e 80, rispettivamente; Excalibur e Viking hanno invece destinato alle ramificazioni il ~24% e 20% a BBCH 69 e il ~14% e 15% a BBCH 80 (medie di due anni). Esaminando i pesi relativi del fusto, le cultivar ad altezza convenzionale hanno mostrato valori simili e pari a ~44% a BBCH 69 e ~36% (media di due anni) a BBCH 80, mentre per PR45D01 le percentuali sono risultate più basse: 39% a 69 BBCH e 29% (media di due anni) a 80 BBCH ($P \leq 0,05$).

L'analisi dell'interazione 'densità di semina × struttura vegetativa' ha evidenziato la tendenza della coltura a favorire, con il decrescere dell'investimento, lo sviluppo delle ramificazioni, limitando quello del fusto (Fig. 2 a,b). A 22 semi m^{-2} , le percentuali delle branche sono pari a ~29% (BBCH 69) e ~20% (BBCH 80; media di due anni), mentre a 63 semi m^{-2} i pesi relativi si sono ridotti a ~18% a BBCH 69 e ~13% (media di due anni) a BBCH 80 ($P \leq 0,05$). Riguardo ai fusti, nella tesi a 22 semi m^{-2} le incidenze sono risultate del ~36% e 28% (media di due anni) nei rilievi condotti rispettivamente a BBCH 69 e 80, mentre nella densità a 63 semi m^{-2} di ~49 e 37% (media di due anni), ($P \leq 0,05$).

Interessante per i suoi possibili risvolti produttivi è la ripartizione della sostanza secca verso le silique, la quale è risultata indipendente dalla numerosità delle piante in entrambe le epoche di campionamento.

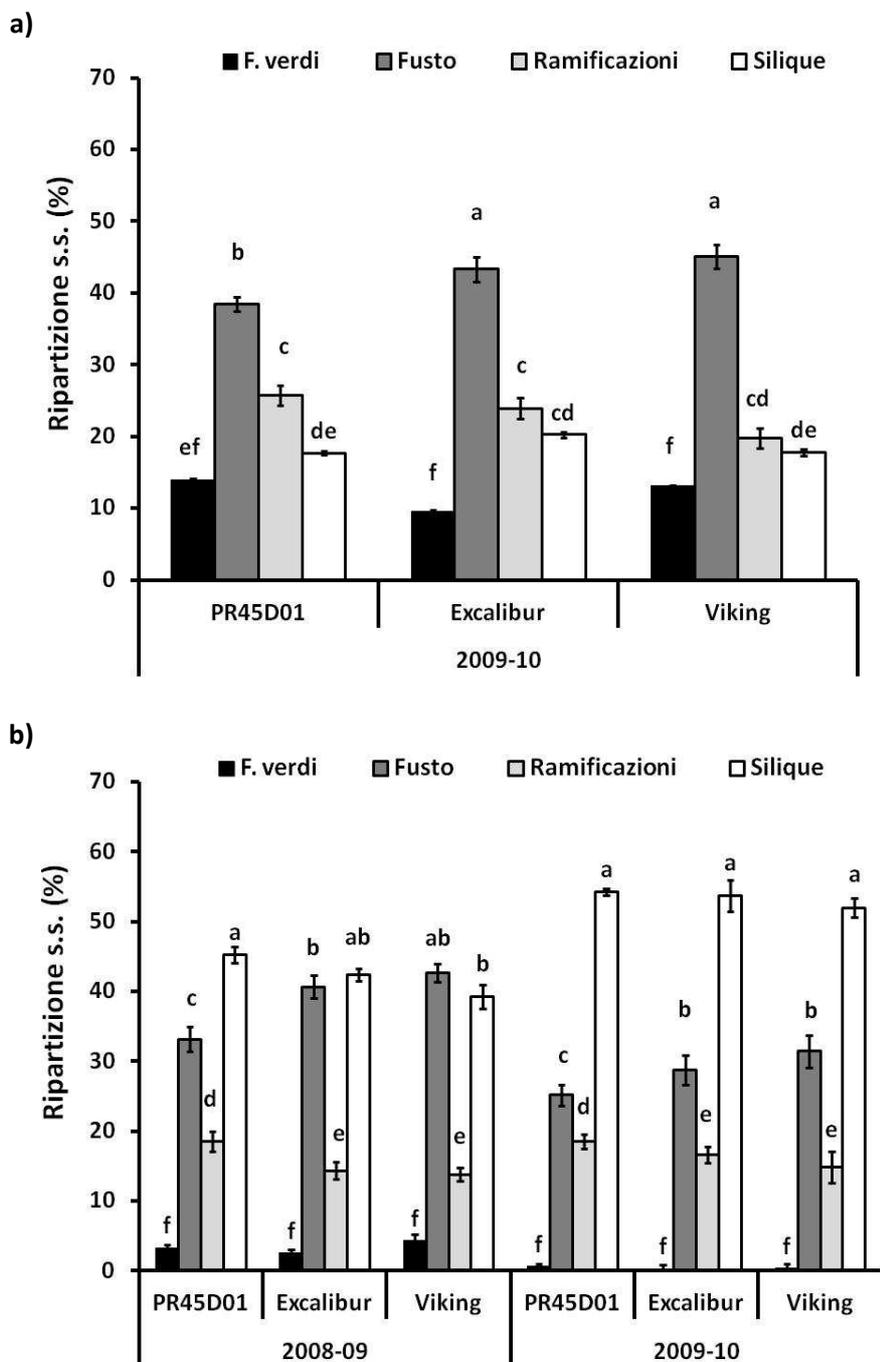


Fig. 1. a) stadio di fine fioritura (BBCH 69): incidenze (% w/w) di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale della sostanza secca prodotta per unità di superficie dalle cultivar a confronto. A lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

b) stadio di riempimento semi (BBCH 80): incidenze (% w/w) di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale della sostanza secca prodotta per unità di superficie dalle cultivar a confronto. Entro ciascun anno, a lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

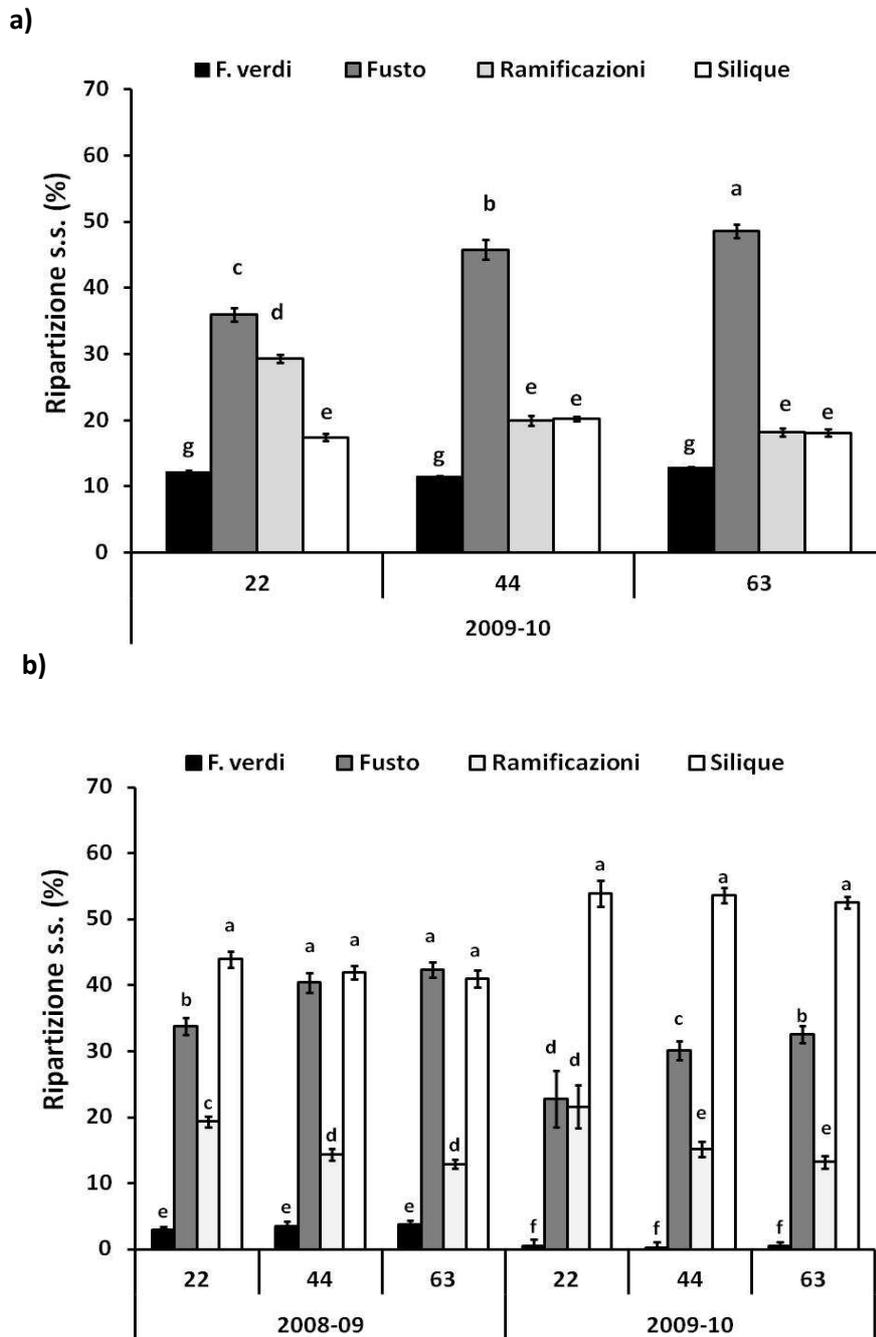


Fig. 2. a) stadio di fine fioritura (BBCH 69): incidenze (% w/w) di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale della sostanza secca prodotta per unità di superficie dalla coltura al variare della densità di semina. A lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

b) stadio di riempimento semi (BBCH 80): incidenze (% w/w) di foglie verdi, fusto, ramificazioni e silique (barre verticali: \pm e.s.) sul totale della sostanza secca prodotta per unità di superficie dalla coltura al variare della densità di semina. Entro ciascun anno, a lettere uguali i valori non differiscono secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$).

Ramificazione e fruttificazione della canopy

Considerando il numero di ramificazioni (Tab. 6), com'era atteso l'effetto della densità di semina è risultato ben definito (effetto principale 'densità di semina': $P \leq 0,05$) e univoco in entrambi gli anni (interazione 'densità di semina \times anno': $P > 0,05$); all'aumentare dell'investimento la coltura tende a incrementare il numero di branche per unità di superficie. Questa tendenza è legata al maggiore numero di piante presenti nella densità più intensiva piuttosto che a un migliore differenziamento di ramificazioni da parte della coltura. Di fatto, in letteratura è assodata la relazione inversa tra il numero di branche pianta⁻¹ e il popolamento di campo (Sierts et al., 1987; Chay e Thurling, 1989; Leach et al., 1999; Angadi et al., 2003).

La significatività osservata per l'effetto 'densità di semina' non si è ripetuta considerando i genotipi (effetto principale 'cultivar': $P > 0,05$), nonostante quest'ultimi tendano a ramificare diversamente in funzione dell'investimento di semi (interazione 'cultivar \times densità di semina', $P = 0,08$); PR45D01 ha esaltato la produzione di branche a 63 semi m⁻², mentre Excalibur e Viking non hanno differenziato dal punto di vista statistico la propria ramificazione a investimenti superiori i 44 semi m⁻² (Tab. 6).

Esaminando la produzione di fruttificazioni (Tab. 7), nel 2009-10 le silique totali (principali + laterali), sono risultate più numerose rispetto al 2008-09, in ragione di un elevato numero di silique portate sulle branche ($P \leq 0,05$).

Tra gli investimenti in prova (effetto principale 'densità di semina': $P \leq 0,05$), la tesi a 44 semi m⁻² ha fornito il numero maggiore di silique totali (6579 silique totali m⁻²), distribuite per il 29% sulle infiorescenze principali (principali: 1931 silique m⁻²) e per il 71% sulle branche (laterali: 4648 silique m⁻²). Le densità a 63 e 22 semi m⁻² hanno prodotto rispettivamente 6189 e 5866 silique totali m⁻²; le quote maggiori di silique principali sono state osservate nell'investimento più denso (~40% delle silique totali m⁻²), mentre quelle di silique laterali nella densità meno intensiva (~82% delle silique totali m⁻²).

Tab. 6. Effetti ‘anno’ e ‘densità di semina’ (semi m⁻²) sul numero di ramificazioni (n. m⁻²) prodotte dalle cultivar a confronto^a.

Effetto	Cultivar			MEDIA
	PR45D01	Excalibur	Viking	
Anno				
2008-09	292	249	263	268
2009-10	200	219	222	214
Densità				
22	209 (bc)	188 (c)	198 (bc)	198 b
44	233 (bc)	255 (a-c)	263 (ab)	250 a
63	296 (a)	261 (a-c)	267 (ab)	275 a
MEDIA	246	234	243	

ANOVA		
Effetto	<i>g.l.</i>	Significatività
Blocchi	2	n.s. ^b
Anno (A)	1	n.s.
Cultivar (C)	2	n.s.
Densità (D)	2	***
A × C	2	n.s.
A × D	2	n.s.
C × D	4	n.s.
A × C × D	4	n.s.

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere in grassetto indicano l'ipotesi di diversità tra le densità di semina (effetto principale), mentre le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione ‘cultivar × densità di semina’.

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Tab. 7. Effetti ‘anno’ e ‘densità di semina’ (semi m⁻²) sul numero di silique totali, principali e laterali prodotte dalle cultivar a confronto^a.

Effetto	Cultivar			MEDIA	ANOVA		
	PR45D01	Excalibur	Viking		Effetto	g.l.	Significatività
<i>Silique totali (n. m⁻²)</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s. ^b
2008-09	5922	5996	5515	5811 B			
2009-10	6680	6972	6186	6613 A	Anno (A)	1	*
					Cultivar (C)	2	n.s.
Densità					Densità (D)	2	*
22	5886 (c)	5903 (c)	5809 (c)	5866 b			
44	6099 (bc)	7435 (a)	6207 (bc)	6580 a	A × C	2	n.s.
63	6919 (ab)	6114 (bc)	5537 (c)	6190 ab	A × D	2	n.s.
					C × D	4	*
MEDIA	6301	6484	5851		A × C × D	4	n.s.
<i>Silique principali (n. m⁻²)</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s.
2008-09	2054	2156	1987	2066 A			
2009-10	1508	1621	1662	1597 B	Anno (A)	1	*
					Cultivar (C)	2	n.s.
Densità					Densità (D)	2	***
22	1001 (e)	1214 (de)	1014 (e)	1076 c			
44	1633 (cd)	2085 (bc)	2076 (bc)	1931 b	A × C	2	n.s.
63	2710 (a)	2367 (ab)	2384 (ab)	2487 a	A × D	2	n.s.
					C × D	4	*
MEDIA	1781	1889	1825		A × C × D	4	n.s.
<i>Silique laterali (n. m⁻²)</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s.
2008-09	3868	3840	3526	3745 B			
2009-10	5172	5350	4525	5016 A	Anno (A)	1	*
					Cultivar (C)	2	n.s.
Densità					Densità (D)	2	**
22	4885	4691	4796	4791 a			
44	4465	5349	4129	4648 a	A × C	2	n.s.
63	4209	3745	3152	3702 b	A × D	2	n.s.
					C × D	4	n.s.
MEDIA	4520	4595	4026		A × C × D	4	n.s.

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Entro ciascuna variabile, le lettere maiuscole indicano l'ipotesi di diversità tra gli anni (effetto principale), mentre le lettere in grassetto tra le densità di semina (effetto principale). Le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione ‘cultivar × densità di semina’.

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

I genotipi in prova hanno differenziato la fruttificazione in funzione dell'investimento; l'analisi dell'interazione 'cultivar × densità di semina' ($P \leq 0,05$ per silique totali) ha rivelato per PR45D01 quantità crescenti di silique passando da 22 a 63 semi m^{-2} (massimo: ~ 6900 silique m^{-2} a 63 semi m^{-2}). Excalibur e Viking hanno risposto similmente, producendo il numero massimo di silique a 44 semi m^{-2} (~ 7400 e 6200 silique m^{-2} , rispettivamente).

L'elevata fruttificazione evidenziata dall'ibrido semi-nano a 63 semi m^{-2} è riconducibile alla sua capacità di esaltare la produzione di silique sui racemi principali, senza deprimere eccessivamente lo sviluppo delle fruttificazioni sulle branche laterali (Tab. 7).

Se l'interazione 'cultivar × densità di semina' si confermasse significativa anche nell'analisi della resa, sarebbe opportuno adottare densità di semina diversificate tra genotipi a statura convenzionale e ibridi semi-nani.

Resa in seme e componenti produttive

La resa è risultata comparabile tra gli anni e tra gli investimenti (Tab. 8). Effetti maggiori sono ascrivibili invece, alla scelta varietale (effetto principale 'cultivar': $P \leq 0,05$); l'ibrido a taglia convenzionale ha fornito una quantità di seme maggiore (3,91 t s.s. ha^{-1}), rispetto a PR45D01 e Viking (3,26 e 3,00 t s.s. ha^{-1} , rispettivamente). Le migliori produzioni messe in luce da Excalibur si basano su semi più pesati (4,11 mg), e su elevate numerosità di semi sia per unità di superficie (95.550 semi m^{-2}), che per fruttificazione (15,11 semi siliqua $^{-1}$), ($P \leq 0,05$).

Tab. 8. Effetti ‘anno’ e ‘densità di semina’ (semi m⁻²) sulla resa in seme, peso unitario del seme, numero di semi m⁻² e numero di semi siliqua⁻¹ prodotti dalle cultivar a confronto^a.

Effetto	Cultivar			MEDIA	ANOVA		
	PR45D01	Excalibur	Viking		Effetto	g.l.	Significatività
<i>Resa in seme (t s.s. ha⁻¹)</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s. ^b
2008-09	3,12	4,06	2,96	3,38			
2009-10	3,39	3,76	3,04	3,40	Anno (A)	1	n.s.
					Cultivar (C)	2	***
Densità					Densità (D)	2	n.s.
22	3,08 (b)	4,05 (a)	2,94 (b)	3,36			
44	3,05 (b)	3,88 (a)	3,08 (b)	3,34	A × C	2	n.s.
63	3,64 (a)	3,80 (a)	2,99 (b)	3,48	A × D	2	n.s.
					C × D	4	*
MEDIA	3,26 <i>b</i>	3,91 <i>a</i>	3,00 <i>c</i>		A × C × D	4	n.s.
<i>Peso unitario del seme (mg)</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s.
2008-09	4,28	4,43	4,13	4,28 A			
2009-10	3,84	3,78	3,51	3,71 B	Anno (A)	1	*
					Cultivar (C)	2	***
Densità					Densità (D)	2	n.s.
22	4,04 (ab)	4,19 (a)	3,85 (ab)	4,03			
44	4,03 (ab)	4,07 (ab)	3,85 (ab)	3,98	A × C	2	n.s.
63	4,11 (ab)	4,07 (ab)	3,76 (b)	3,98	A × D	2	n.s.
					C × D	4	*
MEDIA	4,06 <i>a</i>	4,11 <i>a</i>	3,82 <i>b</i>		A × C × D	4	n.s.
<i>N. semi m⁻² (×10³)</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s.
2008-09	73,10	91,75	71,78	78,88 B			
2009-10	88,36	99,34	86,59	91,43 A	Anno (A)	1	*
					Cultivar (C)	2	**
Densità					Densità (D)	2	n.s.
22	76,34	97,22	76,98	83,51			
44	76,11	95,89	80,13	84,04	A × C	2	n.s.
63	89,74	93,53	80,45	87,91	A × D	2	n.s.
					C × D	4	n.s.
MEDIA	80,73 <i>b</i>	95,55 <i>a</i>	79,19 <i>b</i>		A × C × D	4	n.s.
<i>N. semi siliqua⁻¹</i>							
Anno					Blocchi	2	n.s.
2008-09	12,44	15,78	13,56	13,93			
2009-10	13,33	14,44	14,44	14,07	Anno (A)	1	n.s.
					Cultivar (C)	2	*
Densità					Densità (D)	2	n.s.
22	13,00 (b)	16,83 (a)	13,83 (b)	14,55			
44	12,67 (b)	13,17 (b)	13,50 (b)	13,11	A × C	2	n.s.
63	13,00 (b)	15,33 (ab)	14,67 (ab)	14,33	A × D	2	n.s.
					C × D	4	*
MEDIA	12,89 <i>b</i>	15,11 <i>a</i>	14,00 <i>ab</i>		A × C × D	4	n.s.

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Per ciascuna variabile, le lettere maiuscole indicano l'ipotesi di diversità tra gli anni (effetto principale), mentre le lettere in italiano tra le cultivar (effetto principale). Le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità per l'interazione ‘cultivar × densità di semina’.

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

In accordo con i risultati emersi dall'indagine morfologica, l'ANOVA ha definito statisticamente significativa, anche per la resa in seme, l'interazione 'cultivar × densità di semina'. PR45D01 è risultato più performante a densità elevate (massimo: 3,64 t s.s. ha⁻¹ a 63 semi m⁻²), mentre Excalibur e Viking hanno fornito produzioni comparabili tra gli investimenti in prova ($P \leq 0,05$). Considerando l'ibrido convenzionale è possibile tuttavia notare una certa tendenza a incrementare la resa al decrescere della densità di semina (massimo: 4,05 t s.s. ha⁻¹ a 22 semi m⁻²).

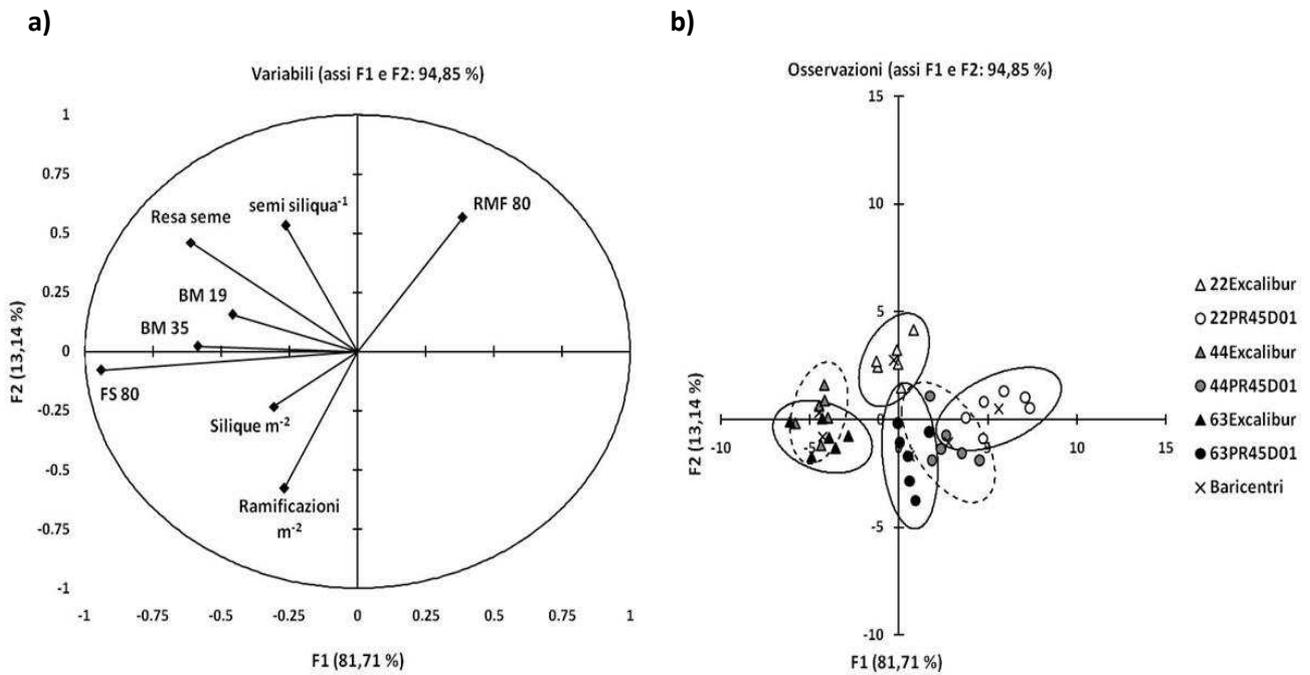
Il buon adattamento di Excalibur a bassi investimenti è riconducibile a fruttificazioni dall'elevata fertilità (16,83 semi siliqua⁻¹ a 22 semi m⁻²), caratterizzate da semi pesanti (4,19 mg a 22 semi m⁻²), (interazione 'cultivar × densità di semina': $P \leq 0,05$ per peso unitario del seme e n. semi siliqua⁻¹). L'ibrido semi-nano invece, tende a esaltare il peso e la numerosità dei semi per unità di superficie in condizioni di elevata competizione spaziale (4,11 mg e 89.741 semi m⁻² a 63 semi m⁻²), (interazione 'cultivar × densità di semina': $P = 0,11$ per n. semi m⁻²).

Analisi delle componenti principali (PCA) e analisi di discriminanza (AD)

Metodi multivariati sono stati applicati allo scopo di approfondire gli adattamenti morfo-produttivi alla base della risposta produttiva fornita dai genotipi ibridi, PR45D01 ed Excalibur (Fig. 3).

La PCA ha identificato due componenti principali in grado di spiegare il 95% della varianza totale (Fig. 3, sinistra). Il primo fattore (F1) descrive l'82% della variabilità ed è correlato (coefficiente di correlazione $> 0,5$) alla resa in seme, alla biomassa prodotta a BBCH 19 (BM 19) e 35 (BM 35), al peso del fusto (FS 80); il secondo fattore (F2) spiega il 13% della varianza ed è associato al numero di semi siliqua⁻¹, al peso delle ramificazioni (RMF 80) e alla loro numerosità per m². Sulla base dell'analoga direzione dei vettori, correlazioni positive sono identificabili tra le variabili 'resa seme', 'semi siliqua⁻¹', 'FS 80', 'BM 35' e 'BM 19'. Relazioni negative sono invece definibili per 'RMF 80 – silique m⁻²' e 'RMF 80 – ramificazioni m⁻²'.

L'analisi discriminante, attraverso la posizione dei baricentri e le sovrapposizioni delle elissi (Fig. 3, destra), ha determinato quattro gruppi omogenei.



Variabile	F1	F2
Resa seme	-0,611	0,461
Semi siliqua ⁻¹	-0,264	0,533
RMF 80	0,385	0,566
Ramificazioni m ⁻²	-0,268	-0,577
Silique m ⁻²	-0,307	-0,233
FS 80	-0,940	-0,079
BM 35	-0,587	0,022
BM 19	-0,500	0,157

Fig. 3. PCA (a), analisi discriminante (b) e grado di correlazione delle variabili con le componenti principali (F1 e F2) per Excalibur e PR45D01 seminati a tre densità di semina (22, 44 e 63 semi m⁻²). Le variabili incluse nelle analisi sono: resa seme (t s.s. ha⁻¹), numero di semi siliqua⁻¹, di ramificazioni m⁻² e di silique m⁻² (laterali + principali), peso a BBCH 80 (g s.s. m⁻²) del fusto (FS 80) e delle ramificazioni (RMF 80), biomassa prodotta (g s.s. m⁻²) a BBCH 19 (BM 19) e BBCH 35 (BM 35).

Gli insiemi riconducibili a Excalibur sono caratterizzati da un'elevata resa in seme stabile tra le densità di semina. L'indifferenza al popolamento di campo emersa per la resa dell'ibrido convenzionale è associabile a un'elevata fertilità delle silique a 22 semi m⁻², mentre negli investimenti più intensivi a maggiori accumuli di biomassa primaverile e peso del fusto.

Considerando i gruppi omogenei riconducibili all'ibrido semi-nano sono identificabili rese in seme minori rispetto a Excalibur e crescenti all'intensificarsi della densità di semina. Di fatto, in condizioni di elevata competizione spaziale, PR45D01 intensifica la ramificazione e la fruttificazione della canopy.

Basi morfologiche e produttive della resa dei genotipi ibridi

Le relazioni emerse nell'analisi multivariata tra le rese fornite dai genotipi ibridi e gli accumuli di biomassa primaverili (a BBCH 19, fine gennaio e BBCH 35, levata) e il peso del fusto a BBCH 80, sono state confermate da correlazioni significative (Tab. 9).

Di particolare interesse è la relazione positiva emersa tra la 'resa in seme - BM 19' caratterizzata da un coefficiente di determinazione (R^2) pari a 0,36 ($P \leq 0,05$), (Fig. 4 a). Considerando separatamente PR45D01 ed Excalibur, tale correlazione è risultata significativa solamente per l'ibrido convenzionale (Excalibur: 'Resa - BM 19', R^2 : 0,55; $P \leq 0,05$). In particolare, la varianza comune tra la resa di Excalibur e la sua produzione di biomassa a fine gennaio è apparsa crescente all'intensificarsi del popolamento di campo (Excalibur: 'Resa - BM 19', R^2 : 0,89 a 63 semi m^{-2} ; $P \leq 0,05$), (Fig. 4 b). Il legame tra la risposta produttiva e la s.s. accumulata dall'ibrido convenzionale a BBCH 19 sembra riconducibile all'effetto positivo che elevati accumuli di s.s. a fine gennaio hanno sul peso unitario del seme (Fig. 5).

La resa di PR45D01 è risultata maggiormente associata alla biomassa prodotta a riempimento semi ('Resa - BM 80', R^2 : 0,26; $P \leq 0,05$) e a quei tratti morfologici riconducibili alle fruttificazioni come, il peso delle silique a riempimento semi ('Resa - SLQ 80', R^2 : 0,20; $P \leq 0,05$), e la loro numerosità totale ('Resa - N SLQ TOT', R^2 : 0,44; $P \leq 0,05$), (Tab. 9). Entrambi queste variabili mostrano la tendenza ad aumentare il grado di correlazione con la resa all'intensificarsi della densità di semina (Fig. 6 a,b).

Tab. 9. Coefficienti di correlazione (R) tra alcune variabili morfologiche e la resa in seme (t s.s. ha⁻¹) prodotta dagli ibridi a confronto^{a,b}.

Variabile	Ibridi (n=36)	Cultivar	
		PR45D01 (n=18)	Excalibur (n=18)
BM 19 ^c	0,60	0,18	0,74
BM 35	0,49	0,41	0,04
BM 65	-0,06	-0,12	-0,25
BM 80	0,19	0,51	0,01
FV 80	0,17	-0,04	0,65
FS 80	0,63	0,38	0,25
RMF 80	-0,10	0,10	-0,04
SLQ 80	0,08	0,45	-0,36
N RMF	0,03	0,07	0,15
N SLQ PR	0,29	0,35	0,24
N SLQ LT	0,04	0,27	-0,05
N SLQ TOT	0,26	0,66	0,05

^a Per ciascuna variabile sono stati considerati i valori di due anni.

^b I coefficienti di correlazione in grassetto sono significativi per $P \leq 0,05$.

^c BM 19: biomassa prodotta a BBCH 19 (fine gennaio; g s.s. m⁻²), BM 35: biomassa prodotta a BBCH 35 (levata; g s.s. m⁻²), BM 65: biomassa prodotta a BBCH 65 (fioritura; g s.s. m⁻²), BM 80: biomassa prodotta a BBCH 80 (riempimento semi; g s.s. m⁻²), FV 80: peso delle foglie verdi a BBCH 80 (g s.s. m⁻²), FS 80: peso del fusto a BBCH 80 (g s.s. m⁻²), RMF 80: peso delle ramificazioni a BBCH 80 (g s.s. m⁻²), SLQ 80: peso delle silique a BBCH 80 (g s.s. m⁻²), N RMF: numero di ramificazioni m⁻², N SLQ PR: numero di silique principali m⁻², N SLQ LT, numero di silique laterali m⁻², N SLQ TOT: numero di silique totali m⁻².

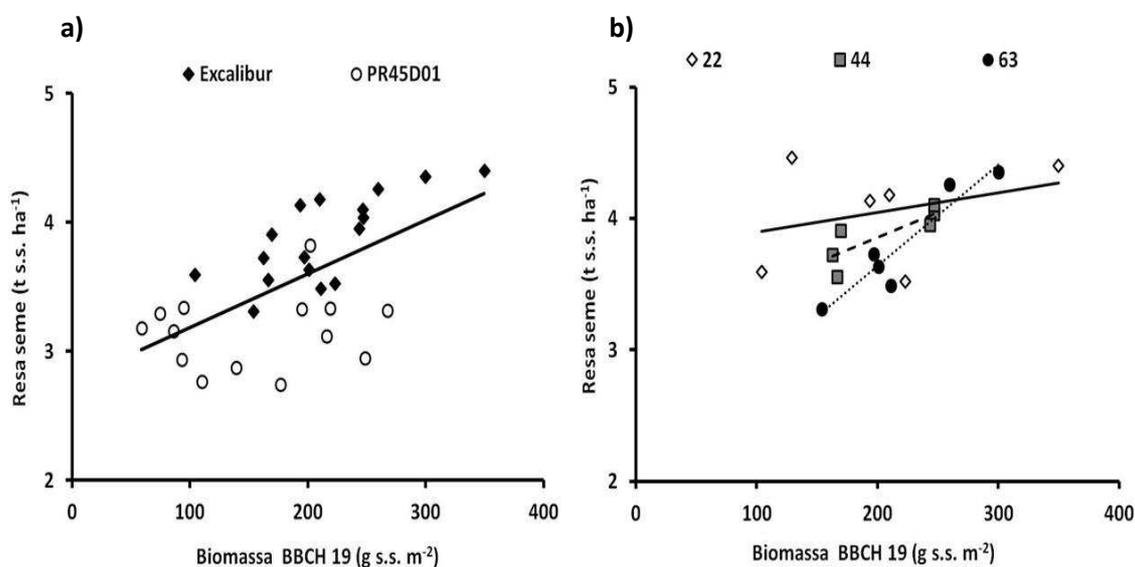


Fig. 4. a) Relazione (n=36) tra la resa in seme e la biomassa prodotta a BBCH 19 da Excalibur e PR45D01 (valori di due anni). Regressione lineare: $y=0,004x + 2,77$; $R^2= 0,36^{***}$.

b) Relazione (n=6) tra la resa in seme e la biomassa prodotta a BBCH 19 da Excalibur a 22, 44 e 63 semi m⁻² (valori di due anni). Regressioni lineari: $y=0,002x + 3,75$; $R^2= 0,11^{ns}$ (22 semi m⁻²), $y=0,004x + 3,08$; $R^2= 0,68^*$ (44 semi m⁻²), $y=0,008x + 2,10$; $R^2= 0,89^{**}$ (63 semi m⁻²).

n.s., *, **, *** rispettivamente per valori di $P > 0,05$, $\leq 0,05$, $\leq 0,01$, $\leq 0,001$.

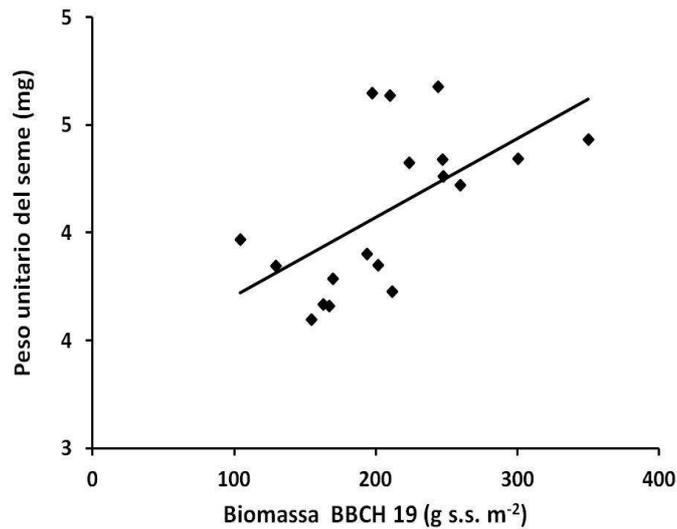


Fig. 5. Relazione (n=18) tra il peso unitario del seme e la biomassa prodotta a BBCH 19 da Excalibur (valori di due anni). Regressione lineare: $y=0,004x + 3,34$; $R^2= 0,36^{**}$. n.s., *, **, *** rispettivamente per valori di $P>0,05, \leq 0,05, \leq 0,01, \leq 0,001$.

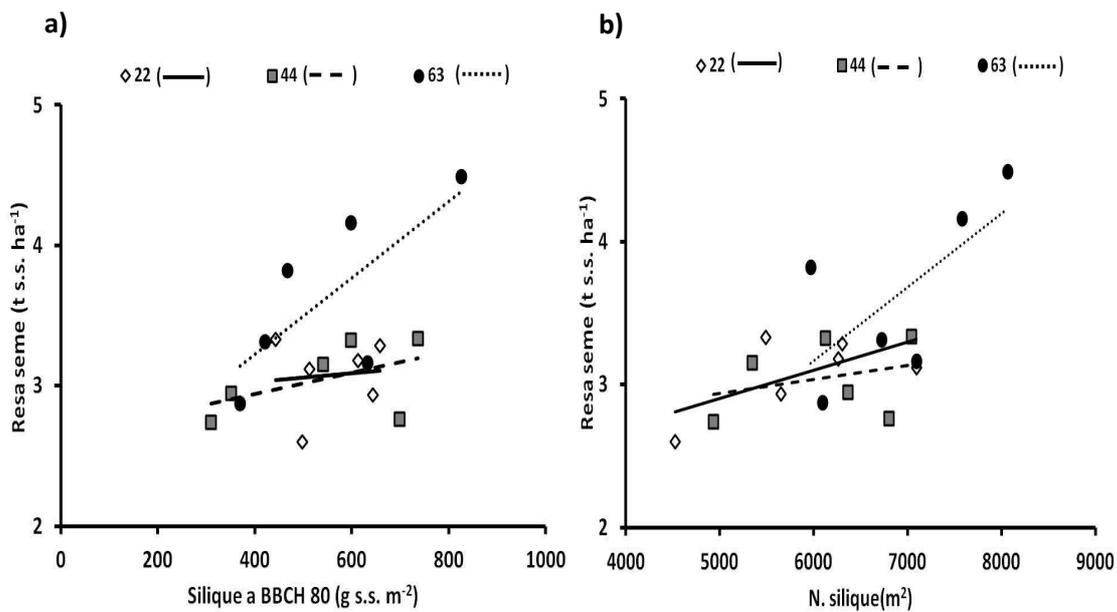


Fig. 6. a) Relazione (n=6) tra la resa di seme e il peso delle silique a BBCH 80 di PR45D01 (valori di due anni). Regressioni lineari: $y=0,0003x + 2,91$ $R^2= 0,01^{ns}$ (22 semi m^{-2}), $y=0,001x + 2,64$; $R^2= 0,25^{ns}$ (44 semi m^{-2}), $y=0,003x + 2,13$; $R^2= 0,54^*$ (63 semi m^{-2}).

b) Relazione (n=6) tra la resa di seme e numero di silique m^{-2} di PR45D01 (valori di due anni). Regressioni lineari: $y=0,0002x + 1,92$; $R^2= 0,40^{ns}$ (22 semi m^{-2}), $y=1E-04x + 2,45$; $R^2= 0,09^{ns}$ (44 semi m^{-2}), $y=0,0005x + 0,07$; $R^2= 0,46^*$ (63 semi m^{-2}).

n.s., *, **, *** rispettivamente per valori di $P > 0,05, \leq 0,05, \leq 0,01, \leq 0,001$.

4.5 Discussione

L'adozione di bassi popolamenti di campo – pratica agronomica già riscontrabile negli attuali itinerari agronomici – è stata valutata indagando la risposta morfo-produttiva di tre cultivar rappresentative delle principali tipologie genetiche disponibili per colza a densità di semina decrescenti.

La coltura ha mantenuto invariata la resa di prodotto tra gli investimenti confermando un'elevata plasticità morfologica e produttiva (Tab. 8). Tale adattabilità strutturale sembra manifestarsi già in fasi precoci come quelle corrispondenti allo stadio di 9 o più foglie vere (fine gennaio) e levata (marzo). Di fatto, i campionamenti di biomassa condotti in tali stadi hanno fornito quantità di sostanza secca (s.s.) comparabili tra le densità di semina. Contrariamente a questi risultati, studi canadesi condotti alla fase di rosetta (ca. 6 foglie vere), hanno determinato produzioni crescenti di biomassa all'aumentare dell'investimento (Morrison et al., 1990). Secondo questi Autori il maggiore indice di area fogliare (i.e., LAI) che caratterizza inizialmente popolamenti elevati, garantisce alla coltura una rapida crescita vegetativa. L'autunno più mite che di norma contraddistingue l'areale Padano-Veneto probabilmente ha permesso una pronta espansione fogliare anche a basse densità di semina, uniformando precocemente lo sviluppo vegetativo e le produzioni di s.s. tra le varie densità.

Gli adattamenti morfologici posti alla base di detta plasticità sembrano basarsi innanzitutto su una ripartizione della sostanza secca diversificata tra fusto e ramificazioni. I rilievi di '*biomass partitioning*' hanno messo in luce come a bassi investimenti la coltura tenda ad allocare più biomassa sulle branche laterali, mentre a densità maggiori favorisce lo sviluppo del fusto principale (Fig. 2 a,b). Tali differenze tuttavia, non hanno influito sullo sviluppo delle silique, le quali sia in termini di peso che di numero non hanno mostrato differenze significative. Di fatto, a 22 semi m⁻² la bassa numerosità di fruttificazioni principali è risultata bilanciata da una migliore densità di silique laterali, mentre a 63 semi m⁻² la minore produzione di fruttificazioni sulle branche è stata compensata da numerose silique centrali. Una relazione negativa tra numero di silique laterali e densità di piante è stata osservata anche da Angadi et al. (2003), i quali hanno determinato una riduzione delle fruttificazioni secondarie per pianta del 52%, passando da 5 a 80 piante m⁻².

Da un punto di vista produttivo tali fenomeni di compensazione hanno uniformato la risposta alle varie densità di semina, concordando ampiamente con numerosi altri studi che sottolineano l'indifferenza della resa al variare dell'investimento (Leach et al., 1999; Momoh e Zhou, 2001; Angadi et al., 2003; Bilgili et al., 2003). Per l'areale considerato quindi, una riduzione della densità di semina può essere applicabile con successo senza determinare variazioni significative della produzione finale. Considerando le componenti della resa, la variazione del popolamento non ha determinato alcuna significatività (Tab. 8). Per esempio, già McGregor (1987) riscontrò che la fertilità delle silique e il peso dei semi non sono influenzati dalla densità di piante. Di fatto, nel presente studio tali variabili sono risultate maggiormente legate a fattori ambientali (effetto 'anno') e genetici (effetto 'cultivar').

L'indifferenza produttiva mostrata dalla coltura al variare della densità di semina non si è confermata considerando i singoli genotipi; le cultivar a taglia convenzionale (Excalibur e Viking) sono risultate accumulate da rese in seme omogenee tra le densità di semina (Tab. 8). La stabilità di resa mostrata da Excalibur e Viking è in accordo con i risultati ottenuti da Potter et al. (1999), i quali osservarono stabilità di resa tra ibridi e varietà a impollinazione libera considerando investimenti variabili dai 50 ai 130 semi m⁻².

La tolleranza alla riduzione della densità di semina evidenziata dai genotipi più tradizionali sembra estremizzabile considerando Excalibur. Quest'ultimo tende a massimizzare la resa di prodotto a 22 semi m⁻² (~4,1 t s.s. ha⁻¹), concordando con quanto osservato da Carver et al. (1999), i quali già allora raccomandarono l'applicazione di itinerari agronomici basati su bassi investimenti di seme (20-30 semi m⁻²) per la coltivazione degli ibridi.

La propensione di Excalibur per i bassi investimenti di seme sembra riconducibile alla sua capacità di ottimizzare le componenti principali della resa in condizioni di bassa competizione inter-pianta (Tab. 8 e Fig. 3). Momoh e Zhou (2001), valutando la risposta di un ibrido convenzionale a popolamenti decrescenti (13, 10 e 7 piante m⁻²) determinarono una fertilità crescente dei frutti (24, 26, 27 semi siliqua⁻¹, rispettivamente; $P \leq 0,05$).

L'elevato potenziale produttivo dimostrato da Excalibur sembra indursi precocemente, già a fine gennaio. Una correlazione significativa è emersa tra la resa in seme e la biomassa prodotta (g s.s. m⁻²) a BBCH 19 (fine gennaio), soprattutto in riferimento alla densità più intensiva. Habekotté (1993) stabilì essere la biomassa prodotta fino alla

fioritura determinante per la definizione del potenziale produttivo della specie. Lo stesso Autore, allo stadio di fioritura, individuò, in areali nordeuropei (Wageningen, NL), delle relazioni lineari tra la sostanza secca (da 200 a 500 g s.s. m⁻²) e componenti produttive tra cui la densità di semi a maturazione, il numero di semi per frutto e la numerosità delle silique. Nell'areale di coltivazione Padano-Veneto, la quantità di biomassa citata nello studio olandese è raggiunta già nelle fasi post-invernali (BBCH 19 e 35; Tab. 5). Ciò spiega almeno in parte come la biomassa di fine inverno dell'ibrido Excalibur appaia essere un buon precursore del suo potenziale produttivo.

La relazione 'resa seme – BM 19' assume inoltre una particolare valenza pratica, considerando l'importanza che un'attendibile previsione di resa in fasi precoci può avere nel calibrare le successive tecniche agronomiche (e.g., concimazione N primaverile), in funzione del potenziale produttivo da raggiungere. In tal senso, il metodo francese denominato '*Reglette Azote*', sulla base del peso della biomassa fresca a fine inverno, della tipologia di terreno e di un realistico obiettivo di resa, consente di definire la dose di azoto da distribuire in copertura (CETIOM, 1998).

L'ibrido seminano (PR45D01) ha mostrato vantaggio produttivo in corrispondenza dell'investimento maggiore (63 semi m⁻²), (Tab. 8). Gli adattamenti morfologici alla base di tale performance produttiva sono riconducibili a un'elevata ramificazione della canopy associata a una migliore fruttificazione. Sieling e Kage (2008), confrontando ibridi a portamento sia ridotto che convenzionale, coltivati a 60 semi m⁻², contarono ~9300 silique m⁻² nelle piante semi-nane e il 21,5% in meno in quelle ad altezza tradizionale. In particolare, PR45D01 in condizioni di elevata competizione inter-pianta è risultato in grado di esaltare la fruttificazione dei racemi principali senza deprimere eccessivamente lo sviluppo delle silique portate sulle branche laterali (Tab. 7). La criticità della produzione di silique nel definire il vantaggio produttivo dell'ibrido a 63 semi m⁻² è stata confermata dall'analisi di regressione condotta per le coppie di variabili 'resa seme – peso delle silique a BBCH 80' e 'resa seme – numero di silique m⁻²'.

4.6 Conclusioni

La riduzione della densità di semina a 30-40 semi m^{-2} riscontrabile negli odierni itinerari tecnici per colza invernale da olio risulta una scelta agronomica perseguibile solamente in quei sistemi colturali impostati su cultivar a taglia convenzionale. La diminuzione del popolamento di campo può essere addirittura estremizzata, anche a 22 semi m^{-2} , considerando i genotipi ibridi CHH tradizionali, poiché capaci in condizioni di bassa competizione inter-pianta di massimizzare alcune componenti produttive come il numero di semi per siliqua. Per le coltivazioni basate su ibridi semi-nani è consigliabile invece incrementare l'investimento iniziale sopra i 60 semi m^{-2} , allo scopo di sfruttare la loro maggiore capacità di ramificare e fruttificare in condizioni di elevata competizione.

La quantità di biomassa (s.s.) allo stadio BBCH 19 (fine gennaio) rappresenta un'attendibile previsione di resa, soprattutto per gli ibridi convenzionali coltivati a elevata densità di seme. Una verosimile prospettiva di produzione in periodi del ciclo così precoci permette di adeguare le successive pratiche agronomiche al potenziale produttivo della coltura, contribuendo al raggiungimento di una buona sostenibilità sia ambientale che economica.

4.7 Bibliografia

- Angadi S.V., Cutforth H.W., McConkey B.G., Gan Y., (2003). Yield adjustment by canola growth at different plant populations under semiarid conditions. *Crop Sci.*, 43: 1358-1366.
- Aubertot J.N., West J.S., Bousset-Vaslin L., Salam M.U., Barbetti M.J., Diggle A.J., (2006). Modelling for Integrated Management: case study of phoma stem canker of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Eur. J. Plant Pathol.*, 114: 91-106.
- Berti A., Mosca G., (1987). Effetti della concimazione azotata sulla fruttificazione del colza invernale da olio (*Brassica napus* L. var. *oleifera* D.C.). *Riv. Agron.*, 1: 45-49.
- Bilgili U., Sincik M., Uzun A., Acikgoz E., (2003). The influence of row spacing and seeding rate on seed yield and yield components of forage turnip (*Brassica rapa* L.). *J. Agron. Crop Sci.*, 189: 250-254.
- Bonari E., Mazzoncini M., Peruzzi A., (1994). Effect of conventional and minimum tillage on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in a sandy soil. *Soil Till. Res.*, 33: 91-108.
- Carver M., Phillips H., Freer B., (1999). The influence of drilling date on the performance of winter oilseed rape. HGCA Oilseeds Project: OS40. Home-Grown Cereal Authority, London.
- Chay P., Thurling N., (1989). Variation in pod length in spring rape (*Brassica napus* L.) and its effect on seed yield and yield components. *J. Agric. Sci.*, 113: 139-147.
- Christensen J.V., Drabble J.C., (1984). Effect of row spacing and seeding rate on rape-seed yield in Northwest Alberta. *Can. J. Plant Sci.*, 64: 1011-1013.
- Delhay R., (1980). Fractionnement de la fumure azotée dans des cultures de colza d'hiver en Hesbaye. *Rev. Agric.*, 1: 69-77.
- Diepenbrock W., (2000). Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Field Crop Res.*, 67: 35-43.
- Habekotté B., (1993). Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions. *Field Crops Res.*, 35: 21-33.
- Lancashire P.D., Bleiholder H., Langelüddecke P., Stauss R., Van den Boom T., Weber E., Witzinger A., (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.*, 119: 561-601.
- Leach J.E., Stevenson H.J., Rainbow A.J., Mullen L.A., (1999). Effects of high populations on the growth and yield of winter oilseed rape. *J. Agric. Sci.*, 132: 173-180.
- Leto C., Carruba A., Cibella R., Trapani P., (1994). Effetti della concimazione azotata su caratteri bioagronomici e qualitativi del colza (*Brassica napus* L. var. *oleifera* D. C.) in ambiente semi-arido. *Riv. Agron.*, 28: 199-205.

- Liu C., Wang J., Huang T., Wang F., Yuan F., Cheng X., Zhang Y., Shi S., Wu J., Liu K., (2010). A missense mutation in the VHYNP motif of a DELLA protein causes a semi-dwarf mutant phenotype in *Brassica napus*. *Theor. App. Gen.*, 121: 249-258.
- McGregor D.I., (1987). Effect of plant density on development and yield of rapeseed and its significance to recovery from hail injury. *Can. J. Plant Sci.*, 67: 43-51.
- Mendham N.J., Shipway P.A., Scott R.K., (1981). The effect of seed size, autumn nitrore and plant population density on the response to delayed sowing in winter oilseed-rape (*Brassica napus* L.). *J. Agric. Sci.*, 96: 417-428.
- Merrien A., Jung L., Maisonneuve C., (1991). Valorisation réelle de l'azote apporté e a l'automne. *Oleoscope*, 20: 9-16.
- Momoh E.J., Zhou W., (2001). Growth and yield responses to plant density and stage of transplanting in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agron. Crop Sci.*, 186: 253-259.
- Morrison M.J., McVetty P.B.E., Scarth R., (1990). Effect of altering plant density on growth characteristics of summer rape. *Can. J. Plant Sci.*, 70: 139-149.
- Potter T.D., Kay J.R., Ludwig I.R., (1999). Effect of row spacing and seeding rate on canola cultivars with varying early vigour. *Proc. 10th GCIRC Int. Rapeseed Cong.*, Canberra, Australia, 26-29 Sept. 1999, 4 pp.
- Romano P.M., (2009). La resa del colza aumenta con la corretta densità di semina. *L'informatore Agrario*, 35: 48-51.
- Sieling K., Kage H., (2008). The potential of semi-dwarf oilseed rape genotypes to reduce the risk of N leaching. *J. Agric. Sci.*, 146: 77-84.
- Sierts H.P., Geisler G., Léon J., Diepenbrock W., (1987). Stability of yield components from winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.). *J. Agron. Crop Sci.*, 158: 107-113.
- Sultan S.E., (2000). Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. *Trends Plant Sci.*, 5: 537-542.
- Twengstrom E., Sigvald R., Svensson C., Yuen J., (1998). Forecasting Sclerotinia stem rot in spring sown oilseed rape. *Crop Prot.*, 17: 405-411.
- Zanetti F., Vamerli T., Mosca G., (2009). Yield and oil variability in modern varieties of high-erucic winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) and Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) under reduced agricultural inputs. *Ind. Crop Prod.*, 30: 265-270.

Capitolo 5

**Produttività ed efficienza d'uso dell'azoto di diverse varietà di colza in
risposta ad apporti azotati primaverili decrescenti**

5.1 Riassunto

La coltivazione di genotipi di colza N-efficienti capaci di rese granellari significative in condizioni nutritive sub-ottimali risulta imperativa in un'ottica di razionalizzazione dell'input azoto (N). Una riduzione delle applicazioni minerali è di fatto auspicabile per garantire sostenibilità ambientale ed economica ai sistemi culturali. In questo studio condotto negli anni 2008-09 e 2010-11, la risposta produttiva e l'N-efficienza di tre cultivar di colza rappresentative delle principali tipologie genetiche disponibili per la specie (ibrido CHH, Excalibur vs. ibrido CHH semi-nano, PR45D01 vs. varietà a impollinazione libera, Viking), sono stati investigati in risposta ad apporti azotati primaverili decrescenti (150, 100, 50 e 0 kg N ha⁻¹).

In media nelle due stagioni di prova, Excalibur e Viking hanno presentato gli assorbimenti maggiori (155 e 146 kg N ha⁻¹, rispettivamente), mentre PR45D01, contraddistinto da *habitus* vegetativo ridotto, ha rivelato utilizzi di N inferiori (134 kg N ha⁻¹), ($P \leq 0,05$). La resa in seme della coltura è risultata superiore alle 3 t s.s. ha⁻¹ in entrambi gli anni, confermando buona adattabilità all'areale Padano-Veneto. L'ibrido convenzionale si è rivelato il genotipo più performante (3,52 t s.s. ha⁻¹), fornendo produzioni maggiori di PR45D01 (3,23 t s.s. ha⁻¹) e Viking (3,20 t s.s. ha⁻¹), ($P \leq 0,05$).

L'interpolazione delle rese osservate in campo ha messo in luce risposte produttive alla concimazione diversificate tra i genotipi convenzionali e la cultivar semi-nana. Per massimizzare la produzione di seme Excalibur e Viking hanno rivelato fabbisogni minerali inferiori (126 e 150 kg N ha⁻¹, rispettivamente) rispetto a quelli di PR45D01 (207 kg N ha⁻¹). Di fatto, l'elevata stabilità strutturale e la conseguente resistenza all'allettamento che caratterizzerebbe i materiali semi-nani estenderebbero l'effetto positivo della concimazione ad apporti minerali maggiori di quelli definibili per genotipi a taglia convenzionale.

Considerando i parametri di N-efficienza, Excalibur ha mostrato l'efficienza d'uso migliore (NUE: 20,0 kg seme / kg N disponibile dal suolo e concime), in funzione di un'elevata efficienza di assorbimento (NUpE: 0,83 kg N assorbito / kg N disponibile dal suolo e concime), ($P \leq 0,05$). L'ibrido semi-nano e la varietà a impollinazione libera hanno espresso NUE inferiori (18,4 e 18,3 kg kg⁻¹, rispettivamente). In particolare, PR45D01 ha rivelato una modesta NUpE (0,74 kg kg⁻¹), nonostante un'elevata efficien-

za di utilizzo di N (NUE: 24,9 kg seme / kg N assorbito), ($P \leq 0,05$). La NUE ridotta palesata da Viking è riconducibile invece, sia a utilizzi (NUE: 22,9 kg kg⁻¹) che assorbimenti di N (NUE: 0,78 kg kg⁻¹), poco efficienti ($P \leq 0,05$).

In conclusione per la realizzazione di itinerari agronomici impostati su un utilizzo razionale dell'input 'azoto' è auspicabile l'impiego di cultivar ibride a taglia convenzionale.

5.2 Introduzione

Le rese di prodotto elevate fornite dalle attuali coltivazioni di colza sono riconducibili all'impiego di genotipi altamente produttivi e al considerevole sfruttamento di input agronomici. Tra questi, i concimi minerali, su tutti quelli azotati, rivestono un ruolo cruciale (Rathke e Schuster, 2001; Barlog e Grzebisz, 2004 a,b). Di fatto, il colza presenta esigenze nutritive elevate, quelle di azoto (N) ammontano a $\sim 200 \text{ kg ha}^{-1}$ per produzioni di 3 t ha^{-1} di seme (Toniolo e Mosca, 2001).

Durante il ciclo colturale l'assorbimento azotato avviene soprattutto nelle fasi pre-fiorali, in particolare durante l'autunno in cui è organicato il 25-30% dell'N totale (Cramer, 1993). Gli stadi riproduttivi sono contraddistinti da modesti utilizzi minerali e da un'incompleta traslocazione di N dalle parti vegetative della pianta (foglie e fusto), verso silique e semi (Wiesler et al., 2001 a,b).

Tale quadro fisiologico si traduce in una ridotta efficienza azotata (NUE: Nitrogen Use Efficiency), in grado di pregiudicare la sostenibilità ambientale del sistema colturale (Rossato et al., 2001). Rathke et al. (2006) stimarono valori di NUE (quantità di seme prodotta per unità di N disponibile dal suolo e dal concime) di 17 kg di seme per kg di N utilizzabile, rispetto ai 21, 25 e 69 di orzo, frumento e bietola (Sylvester-Bradley e Kindred, 2009). La NUE modesta, associata al basso indice di raccolta tipico dell'oleifera (Rathke et al., 2005), promuove considerevoli rilasci al suolo di N facilmente mineralizzabile dalle paglie, nonché concimazioni eccedenti le esigenze colturali. Gli elevati surplus minerali espongono le coltivazioni a tutti quei rischi ambientali legati alla lisciviazione nitrica (Di e Cameron, 2002), pregiudicandone nel contempo i bilanci energetici e carboniosi (Rathke e Diepenbrock, 2006; D'Avino et al., 2011), per i quali valori positivi sono imprescindibili considerando l'applicazione dell'olio di colza nella filiera 'biodiesel'.

Numerose strategie sono state sviluppate allo scopo di mitigare gli effetti negativi legati alla concimazione azotata (Wiesler et al., 2001 a). Tra le tante, l'utilizzo razionale del concime risulta di fatto quella più efficace. In tal senso, l'odierna tecnica colturale prevede un unico apporto di nutrienti minerali in copertura ovviando ad applicazioni autunnali. L'effetto di concimazioni pre-invernali sulla resa finale risulta trascurabile,

mentre più marcate sono le conseguenze sul bilancio di N e sul suo peggioramento (Sie-ling e Kage 2007; Engström et al., 2009).

Una riduzione degli apporti azotati primaverili è comunque auspicabile in un'ottica di tutela ambientale. Questa strategia tuttavia risulta perseguibile se drastiche penalizzazioni produttive sono evitate. Considerando inoltre, la marginalità che spesso caratterizza i terreni destinati all'oleifera nazionale, riveste particolare interesse l'individuazione di materiali N-efficienti tra le principali tipologie genetiche disponibili per la specie (ibridi CHH, ibridi CHH semi-nani e varietà a impollinazione libera). Tale obiettivo non può prescindere da indagini tese a valutare la variabilità genotipica della resa e della NUE in condizioni nutritive contrastanti.

L'efficienza d'uso dell'azoto può essere scomposta in efficienza di assorbimento (NUpE: quantità di N assorbito per unità di N disponibile per la coltura) ed efficienza di utilizzo (NUtE: quantità di seme prodotta per unità di N assorbito nella biomassa aerea), (Moll et al., 1982). Esperienze tedesche hanno evidenziato come la variabilità di resa in condizioni N-limitanti sia legata maggiormente alla NUpE, mentre in corrispondenza di elevate dotazioni azotate alla NUtE (Horst et al., 2003). Risultati simili sono stati osservati anche in altre specie, come frumento (Ortiz-Monasteiro et al., 1997), mais (Coque e Gallais, 2007) e orzo (Anbessa et al., 2009).

NUE elevate sono in genere ascrivibili a genotipi ibridi convenzionali (ibridi CHH), i quali rispetto a varietà più tradizionali (varietà a impollinazione libera), valorizzano maggiormente condizioni nutritive sfavorevoli (Paulmann, 1993). Evidenze scientifiche in merito all'N-efficienza mancano invece per i recenti ibridi semi-nani caratterizzati da un *habitus* vegetativo ridotto.

L'obiettivo di questo studio è valutare l'effetto di apporti azotati decrescenti sull'assorbimento, risposta produttiva e NUE delle principali tipologie genetiche disponibili sul panorama varietale della specie. A tale scopo, 1 ibrido CHH, 1 ibrido CHH semi-nano e 1 varietà a impollinazione libera sono stati concimati con dosi decrescenti da 150 a 0 kg N ha⁻¹.

5.3 Materiali e metodi

Protocollo sperimentale e ambiente di prova

L'esperimento è stato condotto nelle annate 2008-09 e 2010-11, presso l'Azienda Agraria Sperimentale dell'Università degli Studi di Padova (Legnaro, 45°21'N - 11°58'E). In entrambi le stagioni, un ibrido CHH (Excalibur; Dekalb, Italia), un ibrido CHH semi-nano (PR45D01; Pioneer, Italia), e una varietà a impollinazione libera (Viking; NPZ-Lembke, Germania), sono stati coltivati con apporti azotati di 0, 50, 100 e 150 kg N ha⁻¹, secondo uno schema sperimentale a split-plot con 3 repliche. Il fattore 'cultivar' è stato applicato nei parcelloni, mentre il fattore 'dose N' nelle sub-parcelle. Le unità sperimentali avevano dimensioni di 65 m² nel 2008-09 e di 90 m² nel 2010-11.

La scelta delle cultivar rappresentative di ciascuna tipologia genetica è stata basata sui dati produttivi ottenuti in screening varietali preliminari condotti nel medesimo areale di coltivazione.

Il protocollo colturale è stato lo stesso per ambedue i periodi di prova; la preparazione del letto di semina è stata eseguita attraverso tecniche di lavorazione ridotta, applicando in successione discatura (profondità: ~15 cm), estirpatura (~20 cm) ed erpicatura (~15 cm). La semina è stata realizzata nell'epoca ottimale per l'areale considerato (27/09/2008 e 23/09/2010), con una seminatrice di precisione tarata a una densità di semina pari a 63 semi m⁻². L'apporto di nutrienti minerali è stato frazionato in due interventi svoltisi uno in pre-semina e uno in copertura. Durante la messa a dimora del seme sono stati distribuiti 0-60-60 kg ha⁻¹ di NPK sottoforma di 130 kg ha⁻¹ di perfosfato triplo (46% P₂O₅) e di 120 kg ha⁻¹ di solfato di potassio (50% K₂O). La concimazione di copertura primaverile si è limitata al solo apporto di N; le prime 100 unità sono state distribuite alla ripresa vegetativa (BBCH 30; Lancashire et al., 1991), sottoforma di solfato ammonico (20,5% N), le restanti 50 in piena levata (BBCH 35), come nitrato ammonico (26% N). Il controllo delle malerbe e dei patogeni è stato realizzato allo scopo di garantire alla coltura le migliori condizioni di sviluppo.

Gli andamenti termo-pluviometrici registrati durante i cicli colturali delle annate 2008-09 e 2010-11 sono rilevabili rispettivamente nelle Tab. 1 e 2.

Tab. 1. Dati pluviometrici e termici mensili registrati durante il ciclo colturale 2008-09^a.

Mese	Precipitazioni (mm)			Temperatura media (°C)		
	2008-09	1995-07	Var.	2008-09	1995-07	Var.
Set.	60,0	83,0	-23,0	18,0	18,2	-0,2
Ott.	45,8	91,1	-45,3	14,6	13,9	+0,7
Nov.	150,8	82,1	+68,7	8,8	8,2	+0,6
Dic.	133,2	67,1	+66,1	4,7	4,1	+0,6
Gen.	57,2	42,3	+14,9	2,9	2,9	0,0
Feb.	57,2	46,2	+11,0	5,2	4,4	+0,8
Mar.	104,6	46,2	+58,4	9,0	8,5	+0,5
Apr.	126,0	76,0	+50,0	14,3	12,6	+1,7
Mag.	25,8	89,7	-63,9	20,2	18,0	+2,2
Giu.	86,6	79,1	+7,5	21,6	21,6	0,0
Periodo	847,2	702,8	+144,4	11,9	11,2	+0,7

^a I dati climatici sono stati rilevati presso la stazione meteorologica dell'ARPAV installata presso l'Azienda Agraria Sperimentale 'L. Toniolo' dell'Università degli Studi di Padova.

Tab. 2. Dati pluviometrici e termici mensili registrati durante il ciclo colturale 2010-11^a.

Mese	Precipitazioni (mm)			Temperatura media (°C)		
	2010-11	1995-09	Var.	2010-11	1995-09	Var.
Set.	111,8	89,3	+22,5	17,9	18,3	-0,4
Ott.	86,6	84,9	+1,7	12,7	14,0	-1,3
Nov.	72,4	87,3	-14,9	8,8	8,4	+0,4
Dic.	112,2	74,7	+37,5	2,6	4,1	-1,5
Gen.	4,6	45,0	-40,4	1,6	3,0	-1,4
Feb.	45,2	45,3	-0,1	5,4	4,5	+0,9
Mar.	98,4	50,4	+48,0	9,3	8,5	+0,8
Apr.	4,4	81,5	-77,1	15,4	12,7	+2,7
Mag.	25,0	85,8	-60,8	19,5	18,2	+1,3
Giu.	59,0	79,8	-20,8	22,0	21,6	+0,4
Periodo	619,6	724,0	-104,4	11,5	11,3	+0,2

^a I dati climatici sono stati rilevati presso la stazione meteorologica dell'ARPAV installata presso l'Azienda Agraria Sperimentale 'L. Toniolo' dell'Università degli Studi di Padova.

La stagione 2008-09 è stata mediamente più calda (+0,7 °C rispetto al periodo 1995-07), e più piovosa rispetto alla serie storica di riferimento (+144 mm rispetto al periodo 1995-07). In particolare, la coltura ha usufruito di quantità pluviometriche maggiori della media di lungo periodo nella parte invernale e primaverile del ciclo, mentre valori inferiori sono emersi per i mesi di settembre e maggio. Il ciclo colturale 2010-11 è stato anch'esso caratterizzato da un decorso termico mediamente più caldo di quello storico (+0,2 °C rispetto al periodo 1995-09). Considerando le precipitazioni invece, le quantità cumulate sono risultate inferiori di 104 mm rispetto al periodo 1995-09. In particolare marcati deficit idrici sono emersi nel trimestre aprile – maggio – giugno.

Tab. 3. Principali proprietà chimico-fisiche e precessioni colturali dei suoli utilizzati nelle stagioni 2008-09 e 2010-11.

Parametro	2008-09	2010-11
Sabbia (%)	24	29
Limo (%)	62	57
Argilla (%)	14	15
pH	8,27	8,38
S.O. (%)	2,07	2,15
N (%)	0,08	0,10
C/N	11,1	15,5
CSC (cmol (+) kg ⁻¹)	10,2	22,6
P tot. (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	904	822
P ass. (mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹)	35	36
K scamb. (mg K ₂ O kg ⁻¹)	109	117
Precessione culturale		
2008-09	Frumento	
2010-11	Frumento	

Ambedue gli appezzamenti utilizzati nella sperimentazione presentavano tessitura franco-limoso (USDA) con precessione culturale a frumento (Tab. 3).

Il pH alcalino (~8,3) e la dotazione fosfatica (P assimilabile) sono risultati simili tra i due siti sperimentali. Contenuti moderatamente maggiori di sostanza organica e azoto (N totale) sono stati determinati nel campo prova del secondo anno (2010-11).

Rilievi, campionamenti e analisi

L'evoluzione fenologica di ciascuna varietà è stata valutata applicando le chiavi di identificazione BBCH (Lancashire et al., 1991). I genotipi in prova hanno rivelato precocità comparabili con un certo aumento della tardività conseguentemente alle operazioni di concimazione. La data di fioritura è risultata anticipata nel secondo anno, tuttavia la sua durata ha manifestato un decorso comparabile tra le stagioni di sperimentazione (Tab. 4). La fase di maturazione ha rispecchiato l'omogeneità osservata all'antesi permettendo operazioni di trebbiatura contemporanee (13/06/2009 e 10/06/2011). La raccolta meccanica della granella è avvenuta su parcelle precedentemente sbordate, correggendo per l'umidità residua la quantità di seme ottenuta.

A maturazione, le piante presenti in tre aree di saggio (3 m²) rappresentative di ciascuna unità sperimentale sono state tagliate al colletto. La biomassa è stata suddivisa in seme e residui colturali. Entrambi le matrici vegetali sono state seccate e sottoposte ad analisi Kjeldahl per la determinazione della concentrazione di azoto totale.

Tab. 4. Date di piena fioritura (BBCH 65; Lancashire et al., 1991) per PR45D01, Excalibur e Viking concimati con quattro dosi di azoto. Tra parentesi sono mostrati i giorni tra l'inizio (BBCH 60) e fine della fioritura (BBCH 69).

Dose N (kg N ha ⁻¹)	2008-09			2010-11		
	PR45D01	Excalibur	Viking	PR45D01	Excalibur	Viking
0	12-Apr (20)	11-Apr (20)	10-Apr (20)	04-Apr (19)	04-Apr (19)	03-Apr (18)
50	12-Apr (21)	11-Apr (21)	11-Apr (21)	06-Apr (20)	05-Apr (19)	03-Apr (18)
100	13-Apr (22)	12-Apr (22)	13-Apr (22)	07-Apr (21)	06-Apr (20)	06-Apr (20)
150	14-Apr (24)	13-Apr (23)	13-Apr (24)	07-Apr (21)	07-Apr (21)	06-Apr (20)

Calcolo dei parametri di efficienza azotata

L'efficienza d'uso dell'azoto (NUE) è stata definita come la quantità di seme prodotta per unità di N disponibile per la coltura (Moll et al., 1982):

$$\text{NUE (kg kg}^{-1}\text{)} = R_s / N_{\text{disp}} \quad (1)$$

dove R_s è la resa in seme (kg s.s. ha⁻¹) e N_{disp} è l'N disponibile per la coltura dalla concimazione a dal suolo (kg N ha⁻¹). Concordando con Limon-Ortega et al. (2000), N_{disp} è stato stimato dalla somma tra l'N apportato sottoforma di concime e l'N assorbito a maturazione dalle tesi controllo (0 N).

La NUE può essere suddivisa in due componenti: l'efficienza d'utilizzo di N (NUtE), e l'efficienza di assorbimento di N (NUpE).

$$\text{NUtE (kg kg}^{-1}\text{)} = R_s / N_{\text{tot}} \quad (2)$$

dove N_{tot} è l'N assorbito dalla coltura, stimato moltiplicando le concentrazioni di N (% N s.s.) dei residui colturali e del seme con i rispettivi quantitativi di sostanza secca (kg s.s. ha⁻¹).

$$\text{NUpE (kg kg}^{-1}\text{)} = N_{\text{tot}} / N_{\text{disp}} \quad (3)$$

Gli altri parametri considerati al fine di indagare l'N-efficienza dei genotipi in prova sono stati: l'indice di raccolta per il seme (HI: kg seme ha⁻¹ / kg biomassa epigea ha⁻¹) e l'indice di raccolta per l'azoto (N-HI: kg N seme ha⁻¹ / kg N biomassa epigea ha⁻¹).

Analisi statistica dei dati

Gli effetti principali ‘anno’, ‘cultivar’, ‘dose N’ e le loro interazioni sono stati saggiati attraverso l’analisi della varianza (ANOVA), utilizzando il programma CoStat 6,2⁷. Quando il test F ha indicato significatività per valori di $P \leq 0,05$, la separazione tra le medie è avvenuta tramite test di Duncan.

In accordo con Sieling e Kage (2008), la risposta produttiva di ciascun genotipo alla concimazione azotata è stata simulata applicando una funzione quadratica:

$$Y = a + bN + cN^2 \quad (4)$$

dove Y è la resa in seme (t s.s. ha⁻¹), N la dose di azoto (kg N ha⁻¹), e a , b , c parametri dell’equazione. Quest’ultimi sono stati stimati impiegando il programma CoStat 6,2, mentre la dose di N in grado di ottimizzare la resa è stata derivata massimizzando l’Eq. 4 attraverso la componente ‘risolutore’ di Excel.

⁷ CoHort Software, Monterey, CA, USA.

Tab. 5. ANOVA per assorbimento azotato, resa in seme, parametri di N-efficienza e indici di raccolta^{a,b}.

Effetto	g.l.	BM_{tot}	N_{BM}	N_{tot}	N_{tot} 0N	Resa	NUE	NUtE	NUpE	HI	N-HI	N seme
Blocchi	2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Anno (A)	1	*	n.s.	*	**	n.s.	n.s.	*	n.s.	*	*	*
Cultivar (C)	2	***	*	**	n.s.	***	**	***	**	**	n.s.	***
Dose N (N)	3	***	*	***	-	**	***	***	***	*	***	*
A × C	3	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
A × N	2	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
C × N	1	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
A × C × N	2	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

^aBM_{tot}: biomassa aerea (seme + residui colturali); N_{BM}: concentrazione N della biomassa aerea; N_{tot}: assorbimento N (N seme + N residui colturali); N_{tot} 0N: assorbimento N in assenza di concimazione azotata; NUE: efficienza d'uso dell'azoto; NUtE: efficienza di utilizzo dell'azoto; NUpE: efficienza di assorbimento dell'azoto; HI: indice di raccolta per il seme; N-HI: indice di raccolta per l'azoto; N seme: concentrazione di azoto nel seme.

^b*,**,***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

5.4 Risultati sperimentali

Accumulo di biomassa e assorbimento azotato

Coerentemente con l'*habitus* vegetativo ridotto, l'ibrido semi-nano (PR45D01) ha mostrato in ambedue gli anni produzioni di biomassa inferiori rispetto ai genotipi convenzionali (Excalibur e Viking), (Tab. 6). A maturazione, PR45D01 ha accumulato mediamente 1042 g s.s. m⁻², -17% e 16% rispetto a Excalibur e Viking (effetto principale 'cultivar': $P \leq 0,05$). L'effetto della concimazione azotata è risultato univoco per tutte le cultivar con accumuli crescenti all'aumentare dell'apporto minerale (interazione 'cultivar × dose N': $P > 0,05$).

La coltura si è rivelata forte utilizzatrice di N, arrivando a organizzare 168 kg N ha⁻¹ nel 2008-09 e 122 kg N ha⁻¹ nel 2010-11 (effetto principale 'anno': $P \leq 0,05$). L'ibrido convenzionale e la varietà a impollinazione libera hanno mostrato assorbimenti maggiori del genotipo semi-nano (155, 146 e 134 kg N ha⁻¹ per Excalibur, Viking e PR45D01, rispettivamente; $P \leq 0,05$), nonostante quest'ultimo tenda a concentrare maggiormente l'elemento nella biomassa (1,30, 1,24 e 1,19% N s.s. per PR45D01, Excalibur e Viking, rispettivamente; $P \leq 0,05$).

Com'era atteso l'utilizzo di N è risultato crescente all'aumentare dell'applicazione minerale (effetto principale 'dose N': $P \leq 0,05$). Al livello massimo di concimazione (150 kg N ha⁻¹), la coltura ha assimilato 182 kg N ha⁻¹ (media di due anni), +69 kg rispetto alla tesi controllo (0 kg N ha⁻¹). L'ANOVA non ha determinato significatività statistica per l'interazione 'cultivar × dose N', indicando risposte comparabili tra i genotipi al variare della disponibilità azotata ($P > 0,05$).

Considerando esclusivamente le tesi 0N, gli assorbimenti si sono differenziati tra gli anni (effetto principale 'anno' a 0N: $P \leq 0,05$); utilizzi significativamente maggiori sono stati osservati nel 2008-09 (126 kg N ha⁻¹), rispetto al 2010-11 (100 kg N ha⁻¹), (dati non mostrati). I genotipi in prova invece hanno fornito utilizzi comparabili dal punto di vista statistico, in entrambi le stagioni (effetto principale 'cultivar' e interazione 'cultivar × anno' a 0N: $P > 0,05$).

Tab. 6. Effetti ‘anno’, ‘cultivar’ e ‘dose N’ (kg N ha⁻¹) sull’accumulo di biomassa, sulla concentrazione di N nella biomassa e sull’assorbimento di N^a.

Effetto	Accumulo biomassa (g s.s. m ⁻²)	Concentrazione N (% s.s.)	Assorbimento N (kg N ha ⁻¹)
Anno			
2008-09	1379 a	1,23	168 a
2010-11	984 b	1,25	122 b
Cultivar			
PR45D01	1042 (b)	1,30 (a)	134 (b)
Excalibur	1261 (a)	1,24 (ab)	155 (a)
Viking	1241 (a)	1,20 (b)	146 (a)
Dose N			
0	919 <i>d</i>	1,24 <i>ab</i>	113 <i>c</i>
50	1141 <i>c</i>	1,17 <i>b</i>	131 <i>c</i>
100	1268 <i>b</i>	1,23 <i>ab</i>	153 <i>b</i>
150	1397 <i>a</i>	1,34 <i>a</i>	182 <i>a</i>

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Entro ciascuna colonna, le lettere in grassetto indicano l’ipotesi di diversità tra gli anni (effetto principale), mentre le lettere entro parentesi e quelle in italico tra le cultivar (effetto principale) e le dosi di N (effetto principale), rispettivamente.

Risposta produttiva

L’ibrido convenzionale ha fornito le rese in seme maggiori in ambedue le stagioni di prova (Tab. 7). Considerando i valori medi degli anni, Excalibur ha prodotto 3,52 t s.s. ha⁻¹, superando di 0,29 t PR45D01 e di 0,32 t Viking (effetto principale ‘cultivar’: $P \leq 0,05$).

La concimazione azotata ha migliorato le produzioni di seme con incrementi significativi riscontrabili fino a 100 unità (effetto principale ‘dose N’: $P \leq 0,05$). Di fatto, le tesi 100 e 150N, fornendo rispettivamente 3,57 e 3,68 t s.s. ha⁻¹, non si sono differenziate dal punto di vista statistico ($P > 0,05$).

Dall’ANOVA non è emersa significatività per l’interazione ‘cultivar × dose N’ (Tab. 5): i genotipi hanno risposto in maniera univoca e positiva alla concimazione. Excalibur tuttavia ha mostrato incrementi di resa fino a 100N (3,92 t s.s. ha⁻¹ a 100N), senza avvantaggiarsi della dose massima (-0,06 t s.s. ha⁻¹ rispetto a 100N). L’ibrido semi-nano al contrario, ha esteso la risposta positiva della resa anche all’apporto minerale più intensivo, rendendo 3,66 t s.s. ha⁻¹ a 150N (+0,29 t rispetto a 100N), (dati non mostrati).

Tab. 7. Effetti ‘anno’, ‘cultivar’ e ‘dose N’ (kg N ha⁻¹) sulla resa in seme^a.

Effetto	Resa in seme
	(t s.s. ha ⁻¹)
Anno	
2008-09	3,45
2010-11	3,18
Cultivar	
PR45D01	3,23 (b)
Excalibur	3,52 (a)
Viking	3,20 (b)
Dose N	
0	2,92 <i>b</i>
50	3,10 <i>b</i>
100	3,57 <i>a</i>
150	3,68 <i>a</i>

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Le lettere entro parentesi indicano l'ipotesi di diversità tra le cultivar (effetto principale) mentre le lettere in italico tra le dosi di N (effetto principale), rispettivamente.

L'interpolazione della resa è stata condotta separatamente per ciascuna cultivar, utilizzando funzioni quadratiche. Come mostrato in Fig. 1, tutte le cultivar a confronto hanno risposto positivamente alla dose di N attuando però, dinamiche diversificate.

Il modello adattato alle produzioni di Excalibur ha rivelato una resa crescente fino 3,93 t s.s. ha⁻¹ (resa max.), successivamente è rilevabile un decremento produttivo (Tab. 8). La resa massima di Excalibur corrisponde ad una dose N (N_{ott}) di 126 kg ha⁻¹. Per la varietà a impollinazione libera è stata definita una dinamica di risposta comparabile a quella dell'ibrido convenzionale. Tuttavia, Viking incrementa la resa fino a 3,51 t s.s. ha⁻¹ (resa max.), equivalente a un N_{ott} maggiore rispetto a quello stimato per Excalibur (N_{ott} Viking: 150 kg N ha⁻¹). L'ibrido semi-nano ha rivelato un andamento produttivo crescente con il range di dosi testate; la resa è massimizzata con una concimazione di 207 kg N ha⁻¹ corrispondente a 3,73 t s.s. ha⁻¹ (resa max.).

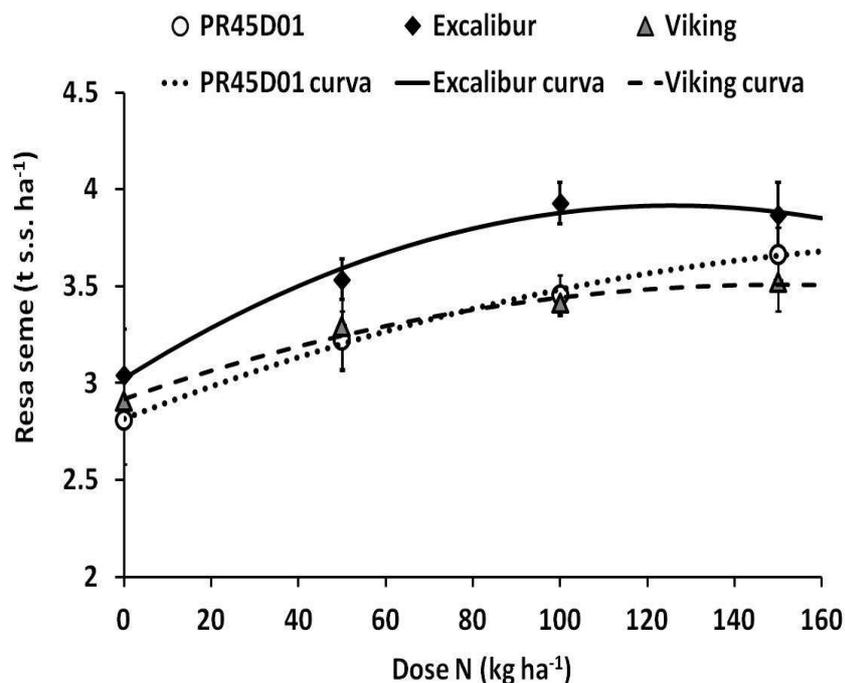


Fig. 1. Risposta produttiva di PR45D01, Excalibur e Viking alla concimazione azotata. Valori medi di due anni (barre verticali: \pm e.s.).

Tab. 8. Intercetta (a), coefficiente lineare (b), coefficiente quadratico (c), RMSE, R^2 , n , resa max. e N_{ott} dell'Eq. 4 usata per descrivere le risposte produttive di PR45D01, Excalibur e Viking alla concimazione azotata. Valori tra parentesi: e.s.^{a,b}

Cultivar	Parametro			RMSE	R^2	n	Resa max	N_{ott}
	a	$b \times 10^{-2}$	$c \times 10^{-5}$					
PR45D01	2,81 (0,159)	0,88 (0,005)	-2,12 (<0,001)	0,37	0,45**	24	3,73	(207)
Excalibur	3,02 (0,158)	1,42 (0,005)	-5,64 (<0,001)	0,30	0,48**	24	3,93	126
Viking	2,92 (0,135)	0,79 (0,004)	-2,62 (<0,001)	0,31	0,37*	24	3,51	150

^a RMSE: radice dell'errore quadratico medio; R^2 : coefficiente di determinazione; n : numerosità; Resa max.: t s.s. ha⁻¹; N_{ott} : kg N ha⁻¹ necessari per massimizzare la resa.

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

N-efficienza

La NUE (kg kg^{-1}) è stata stimata rapportando la resa in seme (kg s.s. ha^{-1}) alla quantità di N disponibile (N_{disp}) dal suolo e dalla concimazione. L' N_{disp} (kg N ha^{-1}) dal terreno è stato stimato dall'N organico nelle tesi controllo (0N), (Limon-Ortega et al., 2000). L'ANOVA condotta per l'assorbimento a 0N ha determinato significatività solamente per l'effetto principale 'anno', senza che rilevanza statistica fosse determinata per l'effetto 'cultivar' e per l'interazione 'cultivar \times anno'. In accordo con tali risultati, l' N_{disp} dal suolo è stato definito separatamente per ciascun anno, considerando l'assorbimento medio dei genotipi a 0N (2008-09: 126 kg N ha^{-1} a 0N; 2010-11: 100 kg N ha^{-1} a 0N).

La resa di seme ottenuta per kg di N_{disp} (NUE) è risultata decrescente all'aumentare della dose azotata (Tab. 9). In assenza di concimazione la coltura ha mostrato una NUE di $25,8 \text{ kg kg}^{-1}$, maggiore del 46% rispetto a quella stimata per la dose 150N (effetto principale 'dose N': $P \leq 0,05$). Excalibur è risultata la cultivar che meglio valorizza l' N_{disp} rivelando una NUE pari a $20,0 \text{ kg kg}^{-1}$ contro i $18,4$ e $18,3 \text{ kg kg}^{-1}$ di PR45D01 e Viking (effetto principale 'cultivar': $P \leq 0,05$). Come mostrato in Fig. 2, la maggiore NUE stimata per Excalibur si è rivelata tale in entrambi le stagioni (interazione 'anno \times cultivar': $P > 0,05$).

Come proposto da Moll et al. (1982), la NUE può essere suddivisa in efficienza di utilizzo (NUtE: $\text{kg seme} / \text{kg N assorbito}$) ed efficienza di assorbimento di N (NUpE: $\text{kg N assorbito} / \text{kg } N_{\text{disp}}$).

Considerando la NUtE, i materiali ibridi hanno rivelato efficienze maggiori, su tutti il genotipo semi-nano, il quale con $24,9 \text{ kg kg}^{-1}$ ha mostrato il rapporto migliore tra resa in seme e N assorbito ($P \leq 0,05$), (Tab. 9). Tale variabilità genotipica emersa considerando i valori medi degli anni è stata osservata in entrambi le stagioni senza che l'interazione 'anno \times cultivar' risultasse significativa (Fig. 3). L'efficienza di utilizzo dell'azoto è risultata decrescente per tutte le cultivar all'aumentare della concimazione (interazione 'cultivar \times dose N': $P > 0,05$). PR45D01 ha riportato tuttavia una flessione più contenuta rispetto a Excalibur e Viking; l'ibrido semi-nano passando da 0 a 150 kg N ha^{-1} ha ridotto la NUtE di $3,4 \text{ kg kg}^{-1}$, rispetto ai $5,0 \text{ kg kg}^{-1}$ della varietà a impollinazione libera e ai $6,2 \text{ kg kg}^{-1}$ dell'ibrido a taglia convenzionale (dati non mostrati).

Tab. 9. Effetti ‘anno’, ‘cultivar’ e ‘dose N’ (kg N ha⁻¹) sull’efficienza d’uso (NUE), efficienza di utilizzo (NUE) ed efficienza di assorbimento di N (NUE)^a.

Effetto	NUE	NUE	NUE
	(kg kg ⁻¹)	(kg kg ⁻¹)	(kg kg ⁻¹)
Anno			
2008-09	19,34	21,34 b	0,84
2010-11	18,44	26,28 a	0,72
Cultivar			
PR45D01	18,36 (b)	24,90 (a)	0,74 (b)
Excalibur	20,01 (a)	23,62 (b)	0,83 (a)
Viking	18,31 (b)	22,91 (b)	0,78 (b)
Dose N			
0	25,78 <i>a</i>	25,88 <i>a</i>	0,94 <i>a</i>
50	18,91 <i>b</i>	24,36 <i>ab</i>	0,79 <i>b</i>
100	16,83 <i>bc</i>	23,94 <i>b</i>	0,71 <i>b</i>
150	14,04 <i>c</i>	21,06 <i>c</i>	0,69 <i>b</i>

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Entro ciascuna colonna, le lettere in grassetto indicano l’ipotesi di diversità tra gli anni (effetto principale), mentre le lettere entro parentesi e quelle in italico tra le cultivar (effetto principale) e le dosi di N (effetto principale), rispettivamente.

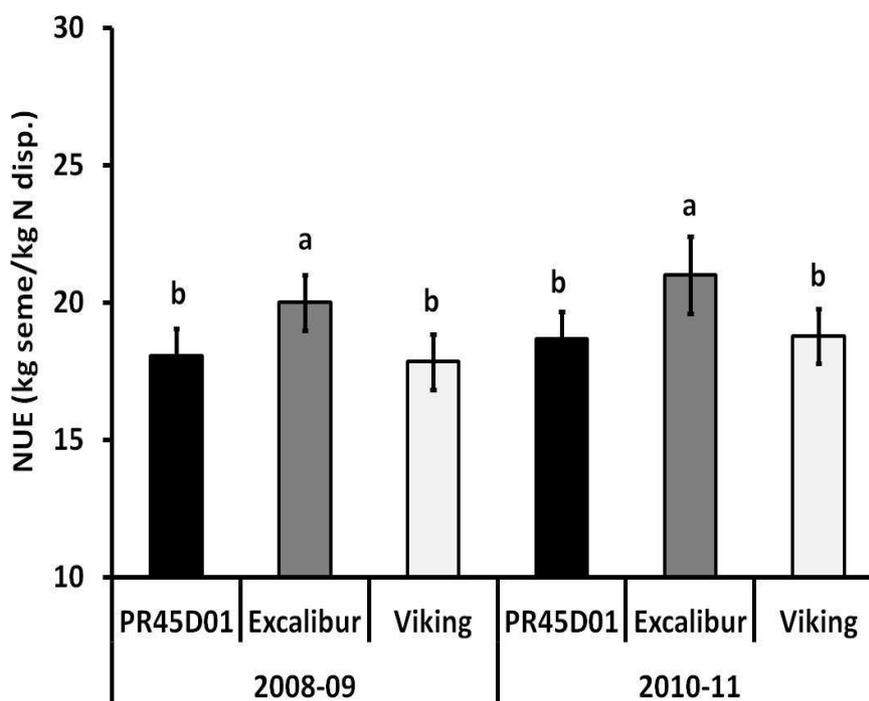


Fig. 2. Efficienza d’uso di N (NUE) di PR45D01, Excalibur e Viking nel 2008-09 e 2010-11. Valori medi delle quattro dosi N (barre verticali: ± e.s.).

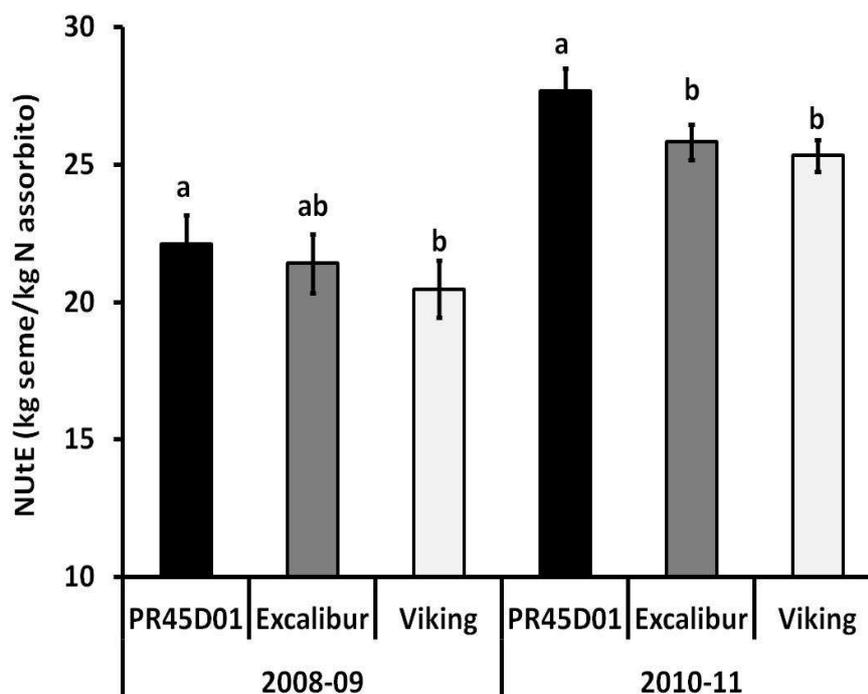


Fig. 3. Efficienza d'utilizzo di N (NUtE) di PR45D01, Excalibur e Viking nel 2008-09 e 2010-11. Valori medi delle quattro dosi N (barre verticali: \pm e.s.).

Relazione negativa è emersa tra la NUtE e la dose di N; nella tesi 0N la coltura ha prodotto 25,9 kg di seme per kg di N assorbito contro i 21,1 kg stimati con la concimazione di 150 kg N ha⁻¹ (effetto principale 'dose N': $P \leq 0,05$).

Effetti macroscopici della concimazione sono stati rilevati anche sull'efficienza di assorbimento (NUpE); aumentando la dose da 0 a 150 unità, l'incidenza dell'N assorbito su quello disponibile scende da 0,94 a 0,69 kg kg⁻¹ (effetto principale 'dose N': $P \leq 0,05$). Considerando l'effetto principale 'cultivar' ($P \leq 0,05$), Excalibur ha mostrato la NUpE maggiore: 0,83 kg kg⁻¹ rispetto a 0,78 e 0,74 kg kg⁻¹ di Viking e PR45D01, rispettivamente. L'elevata efficienza di assorbimento manifestata dall'ibrido convenzionale è risultata tale in ambedue le stagioni (Fig. 4), (interazione 'anno \times cultivar': $P > 0,05$).

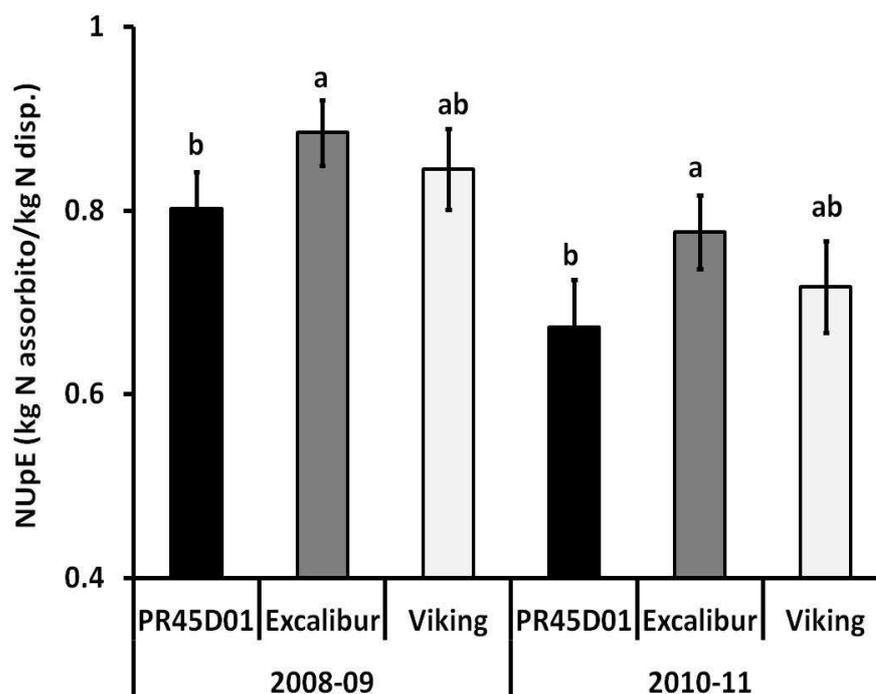


Fig. 4. Efficienza d'assorbimento di N (NUpE) di PR45D01, Excalibur e Viking nel 2008-09 e 2010-11. Valori medi delle quattro dosi N (barre verticali: \pm e.s.).

Indici di raccolta

La coltura conferma un'incidenza della granella sul totale della biomassa modesta (HI); 0,26 nel 2008-09 e 0,32 nel 2010-11 (effetto principale 'anno': $P \leq 0,05$), (Tab. 10). Tra i genotipi, com'era atteso, l'HI migliore è stato stimato per l'ibrido semi-nano (0,32; $P \leq 0,05$), a fronte di una produzione di biomassa aerea inferiore rispetto alle cultivar ad *habitus* convenzionale. Considerando l'effetto principale 'dose N' ($P \leq 0,05$), è identificabile un trend decrescente all'intensificarsi degli apporti minerali. Di fatto, le tesi controllo (0N) hanno fornito un HI medio di 0,32, il quale, all'aumentare della dotazione azotata e di conseguenza del vigore vegetativo della coltura, tende a ridursi, arrivando a 0,28 nelle parcelle concimate con 150 kg N ha⁻¹.

L'indice di raccolta dell'azoto (N-HI) ha mostrato valori compresi tra 0,70 del 2008-09 e 0,77 del 2010-11 (effetto principale 'anno': $P \leq 0,05$), (Tab. 10). Differenze significative sono emerse anche tra le dosi N (effetto principale 'dose N': $P \leq 0,05$).

Tab. 10. Effetti ‘anno’, ‘cultivar’ e ‘dose N’ (kg N ha⁻¹) sull’indice di raccolta del seme (HI), indice di raccolta dell’azoto (N-HI) e concentrazione di N nel seme^a.

Effetto	HI	N-HI	% N seme
Anno			
2008-09	0,26 b	0,70 b	3,33 a
2010-11	0,33 a	0,77 a	2,94 b
Cultivar			
PR45D01	0,32 (a)	0,74	3,03 (b)
Excalibur	0,29 (b)	0,73	3,12 (b)
Viking	0,28 (b)	0,74	3,26 (a)
Dose N			
0	0,32 <i>a</i>	0,78 <i>a</i>	3,03 <i>b</i>
50	0,28 <i>b</i>	0,74 <i>b</i>	3,07 <i>b</i>
100	0,30 <i>ab</i>	0,74 <i>b</i>	3,14 <i>ab</i>
150	0,28 <i>b</i>	0,68 <i>c</i>	3,30 <i>a</i>

^a Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Entro ciascuna colonna, le lettere in grassetto indicano l’ipotesi di diversità tra gli anni (effetto principale), mentre le lettere entro parentesi e quelle in italico tra le cultivar (effetto principale) e le dosi di N (effetto principale), rispettivamente.

E’ definibile infatti, all’intensificarsi della concimazione, una diminuzione dell’incidenza dell’N seminale sul totale dell’N assorbito nella biomassa epigea. Tra le cultivar, le differenze riscontrate in termini di ripartizione della biomassa tra gli organi raccolti e i residui colturali (i.e., HI), non si sono ripetute per l’N (effetto principale ‘cultivar’: $P > 0,05$ per N-HI). L’ibrido semi-nano, nonostante abbia mostrato l’HI maggiore, ha fornito tenori di N seminale modesti (3,03%), incapaci di garantire un elevato N-HI. Al contrario, la varietà a impollinazione libera, caratterizzata dall’HI minore, ha rivelato le maggiori concentrazioni di N nella granella (3,26%), determinando un indice di raccolta azotato equiparabile a quelli degli altri genotipi.

5.5 Discussione

La coltivazione di genotipi di colza N-efficienti capaci di rese granellari significative in condizioni nutritive sub-ottimali risulta imprescindibile in un'ottica di razionalizzazione della concimazione azotata. Di fatto, una riduzione delle applicazioni minerali è auspicabile al fine di non inficiare la sostenibilità ambientale ed economica del sistema culturale (Di e Cameron, 2002; Rathke e Diepenbrock, 2006; D'Avino et al., 2011).

In questo studio sono stati indagati gli effetti di apporti primaverili decrescenti di N sull'assorbimento, la produttività e l'N-efficienza di alcune cultivar rappresentative delle principali tipologie genetiche disponibili per colza (ibrido CHH, Excalibur vs. ibrido CHH semi-nano, PR45D01 vs. varietà a impollinazione libera, Viking).

Variabilità genotipica è stata determinata per tutti i parametri valutati. Tuttavia, le cultivar hanno risposto in maniera comparabile alla variazione della fertilità azotata senza determinare interazioni significative (Tab. 5). La mancanza di risposte diversificate tra i genotipi sarebbe riconducibile all'elevata fertilità costituzionale dei terreni in prova (Tab. 3). L'abbondante dotazione organica associata a un rapporto C/N favorevole ai processi di mineralizzazione, avrebbe reso alla coltura importanti quantità di nutrienti, mascherando eventuali adattamenti varietali soprattutto in assenza di concimazione.

La coltura ha assorbito a maturazione 168 kg N ha^{-1} nel 2008-09 e 122 kg N ha^{-1} nel 2010-11 (Tab. 6). Considerando le cultivar, Excalibur e Viking, a fronte di elevati accumuli di biomassa, hanno presentato gli assorbimenti maggiori. PR45D01 invece, contraddistinto da *habitus* vegetativo ridotto, ha rivelato produzioni di s.s. e utilizzi azotati inferiori. Contrariamente a tali risultati, Sieling e Kage (2008) e Clarke et al. (2010), osservarono 'N-uptake' comparabili tra genotipi convenzionali e semi-nani; quest'ultimi, concentrando maggiormente l'N nella s.s., riuscirono a bilanciare le minori produzioni di biomassa. Tale comportamento è stato in parte osservato anche in questa prova, tuttavia i maggiori tenori di N forniti dall'ibrido semi-nano (1,30, 1,24 e 1,20% N s.s. per PR45D01, Excalibur e Viking, rispettivamente, $P \leq 0,05$) non sono risultati tali da compensare gli scarsi accumuli di s.s..

La resa in seme della coltura è risultata superiore alle 3 t s.s. ha⁻¹ in ambedue gli anni di sperimentazione, confermando buona adattabilità all'areale Padano-Veneto. Excalibur si è rivelata la cultivar più performante indipendentemente dal livello di concimazione (Tab. 7). La superiorità produttiva dei genotipi ibridi rispetto a varietà più tradizionali è stata notata anche da Paulmann (1993). Le modeste produzioni dell'ibrido semi-nano tuttavia, non concordano con tali risultati; PR45D01, nonostante il migliore HI, sembra caratterizzato da un potenziale produttivo e da un livello di eterosi inferiore rispetto all'ibrido convenzionale. A queste conclusioni arrivarono anche Frick et al. (1994) e Soeparjono (2000), dopo aver determinato in ibridi a portamento ridotto, rese di seme e 'N-uptake' minori di quelli forniti da cultivar ad altezza standard.

L'effetto positivo della concimazione azotata sulla produttività della coltura è risultato evidente fino a 100 unità di N. L'apporto massimo (150N) ha determinato una certa stagnazione di resa, senza fornire incrementi sensibili di produzione. Tendenze analoghe sono state osservate anche da Sieling e Christen (1997) e da Rathke e Schuster (2001); quest'ultimi notarono rese crescenti fino ad apporti di 140 kg N ha⁻¹ e decrementi tra 140 e 240 kg N ha⁻¹. E' quindi giustificata l'implementazione di curve quadratiche per l'interpolazione dei dati di resa (Fig. 1). Tali funzioni, rispetto ad altri modelli statistici (e.g., Cerrato e Blackmer, 1990; Bélanger et al., 2000), sono meno suscettibili alla variabilità inter-annuale che caratterizza la risposta azotata della coltura, garantendo una stima robusta dei parametri (Henke et al., 2007).

L'introduzione di geni nanizzanti ha tuttavia alterato la dinamica con cui la resa risponde alla concimazione azotata. La maggiore stabilità strutturale che avrebbe caratterizzato l'ibrido semi-nano a maturazione ha limitato i rischi legati all'allettamento, estendendo la risposta positiva della resa a dosi di N più elevate rispetto agli ibridi tradizionali. Di fatto PR45D01 raggiunge il massimo di resa apportando 207 kg N ha⁻¹, mentre Excalibur e Viking con 126 e 150 kg N ha⁻¹, rispettivamente (Tab. 8). Nonostante i maggiori fabbisogni azotati, l'ibrido semi-nano ha mostrato un massimo produttivo (3,73 t s.s. ha⁻¹) inferiore a quello dell'ibrido convenzionale (3,93 t s.s. ha⁻¹). La diffusione degli ibridi a taglia convenzionale sembra quindi raccomandabile sia dal punto di vista produttivo che in un'ottica di tutela ambientale.

Excalibur, oltre a rivelare un potenziale di resa elevato e avvicinabile con modesti apporti azotati, ha mostrato l'efficienza d'uso di N (NUE) migliore (Tab. 9). La spiccata NUE dell'ibrido convenzionale è risultata legata a un efficace assorbimento dell'N

messo a disposizione dal suolo e dalla concimazione (NUpE). In tal senso, Wiesler et al. (2001 b) e Horst et al. (2003), suggerirono che la NUE e le performance produttive sono strettamente legate all'efficienza d'assorbimento di N durante gli stadi post-fiorali del ciclo colturale.

La NUpE dipende largamente dallo sviluppo spaziale delle radici (Rathke et al., 2006); l'elevata efficienza mostrata dall'ibrido convenzionale potrebbe quindi basarsi su un apparato radicale più espanso, capace di cospicui assorbimenti minerali.

L'ibrido semi-nano e la varietà a impollinazione libera hanno manifestato efficienze d'uso inferiori. Il fattore limitante la NUE di PR45D01 è risultato essere la NUpE, a fronte di un efficace utilizzo dell'N organico (NUtE), (Tab. 9). Le ragioni dell'elevata NUtE dell'ibrido semi-nano sono riconducibili al migliore HI, in grado di allocare sulle parti raccogliabili della pianta quantità maggiori di biomassa a parità di N assorbito. Clarke et al. (2010) notarono NUtE comparabili tra un ibrido convenzionale e uno semi-nano senza però determinare differenze significative per l'HI.

La NUE ridotta palesata da Viking è riconducibile invece a un inefficace utilizzo e assorbimento di N (Tab. 9). La varietà a impollinazione libera ha fornito rese di seme ridotte in funzione di un basso HI, nonostante abbia mostrato assorbimenti azotati prossimi a quelli di Excalibur.

5.6 Conclusioni

In un'ottica di riduzione e ottimizzazione degli input agronomici, la coltivazione di cultivar di colza N-efficienti, capaci cioè di produzioni significative in condizioni nutritive sub-ottimali, risulta imperativa.

Per la realizzazione di itinerari agronomici impostati su un utilizzo razionale dell'input 'azoto' è auspicabile usufruire di cultivar ibride a taglia convenzionale. Tali genotipi contraddistinti da un'elevata N-efficienza e dal maggiore potenziale produttivo, raggiungibile con moderate dosi di concime, garantiscono al sistema colturale sostenibilità ambientale ed economica, anche se confinato in terreni marginali.

I più recenti ibridi semi-nani caratterizzati da *habitus* vegetativo ridotto ottimizzano la resa di seme con apporti minerali elevati che, associati a una modesta NUE, espongono l'ecosistema ai classici rischi legati alla lisciviazione nitrica. Al fine di incrementare l'N-efficienza di tali genotipi è necessario promuovere una maggiore efficienza di assorbimento favorendo per esempio pratiche colturali non limitanti per l'espansione dell'apparato radicale (e.g., lavorazioni preparatorie del terreno profonde).

Particolarmente interessante risulta essere l'elevata efficienza d'utilizzo di N espressa dal genotipo a taglia ridotta, riconducibile al maggiore Harvest Index. Il miglioramento di quest'ultimo carattere dovrebbe quindi rappresentare un obiettivo primario dei processi di selezione, anche degli ibridi convenzionali, allo scopo di incrementarne ulteriormente le performance sia produttive che ambientali.

5.7 Bibliografia

- Anbessa Y., Juskiw P., Good A., Nyachiro J., Helm J., (2009). Genetic variability in nitrogen use efficiency of spring barley. *Crop Sci.*, 49: 1259-1269.
- Barlog P., Grzebisz W., (2004 a). Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). I. Growth dynamics and seed yield. *J. Agron. Crop Sci.*, 190: 305-313.
- Barlog P., Grzebisz W., (2004 b). Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). II. Nitrogen uptake dynamics and fertilizer efficiency. *J. Agron. Crop Sci.*, 190: 314-323.
- Bélanger G., Walsh J.R., Richards J.E., Milburn P.H., Ziadi N., (2000). Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.*, 92: 902-908.
- Cerrato M.E., Blackmer A.M., (1990). Comparison of models for describing corn yield response to nitrose fertilizer. *Agron. J.*, 82: 138-143.
- Clarke S.M., Berry P.M., Roques S., (2010). A comparison of semi-dwarf and standard height oilseed rape varieties on N use efficiency and its components. *Asp. Appl. Biol.*, 105: 1-9.
- Coque M., Gallais A., (2007). Genetic variation among European maize varieties for nitrogen use efficiency under low and high nitrogen fertilization. *Maydica*, 52: 383-397.
- Cramer N., (1993). Umweltvertraglichkeit der N-Versorgung des Rapses. *Raps*, 11: 4-7.
- D'Avino L., Lazzeri L., Rampin E., Zanetti F., Spugnoli P., Dainelli R., Mosca G., (2011). Oil crop sustainability assessment: three years of *Brassica napus* L. cultivation in North East Italy for biodiesel production. *Atti del 19th Eur. Biomass Conf. and Exhibition (EU BC&E)*, Berlin, Germania. Pp. 2617-2622.
- Di H.J., Cameron K.C., (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 64: 237-256.
- Engström L., Stenberg M., Lindén B., (2009). Methods to reduce nitrate leaching after winter oilseed rape and peas. *Eur. Workshop 'N fertilization of winter oilseed rape'*, 23–24, March 2009, Berlin, D.
- Frick J., Nielsen S.S., Mitchell C.A., (1994). Yield and seed oil content response of dwarf, rapid-cycling Brassica to nitrogen treatments, planting density, and carbon dioxide enrichment. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 119: 1137-1143.
- Henke J., Breustedt G., Sieling K., Kage H., (2007). Impact of uncertainty on the optimum nitrogen fertilization rate and agronomic, ecological and economic factors in an oilseed rape based crop rotation. *J. Agr. Sci.*, 145: 455-468.

- Horst W.J., Behrens T., Heuberger H., Kamh M., Reidenbach G., Wiesler F., (2003). Genotypic differences in nitrogen use-efficiency in crop plants. In: Lynch J.M., Schepers J.S., Unver I., (Eds.). Innovative Soil-Plant Systems for Sust. Agr. Prod. Pp. 75-92.
- Lancashire P.D., Bleiholder H., Langelüddecke P., Stauss R., Van den Boom T., Weber E., Witzemberger A., (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.*, 119: 561-601.
- Limon-Ortega A., Sayre K.D., Francis C.A., (2000). Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in Northwest Mexico. *Agron. J.*, 86: 637-642.
- Moll R.H., Kamprath E.J., Jackson W.A., (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.*, 74: 562-564.
- Ortiz-Monasterio J.I., Sayre K.D., Rajaram S., McMahon M., (1997). Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Sci.*, 37: 898-904.
- Paulmann W., (1993). Stand der Entwicklung von Hybridsorten bei Raps. *Raps*, 11: 43-46.
- Rathke G.W., Behrens T., Diepenbrock W., (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 117: 80-108.
- Rathke G.W., Christen O., Diepenbrock W., (2005). Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. *Field Crops Res.*, 94: 103-113.
- Rathke G.W., Diepenbrock W., (2006). Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. *Eur. J. Agron.*, 24: 35-44.
- Rathke G.W., Schuster C., (2001). Yield and quality of winter oilseed rape related to nitrogen supply. In: Horst W.J., et al. (Eds.), Plant nutrition: Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems through Basic and Applied Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pp. 798-799.
- Rossato L., Lainé P., Ourry A., (2001). Nitrogen storage and remobilization in *Brassica napus* L. during the growth cycle: nitrogen fluxes within the plant and changes in soluble protein patterns. *J. Exp. Bot.*, 52: 1655-1663.
- Sieling K., Christen O., (1997). Effect of preceding crop combination and N fertilization on yield of six oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.). *Eur. J. Agron.*, 7: 301-306.
- Sieling K., Kage H., (2007). Autumnal N fertilization of late sown oilseed rape after minimum tillage. Proc. 12th Int. Rapeseed Cong. (Wuhan, China), III (Agronomy), pp. 375-378.
- Sieling K., Kage H., (2008). The potential of semi-dwarf oilseed rape genotypes to reduce the risk of N leaching. *J. Agric. Sci.*, 146: 77-84.

- Soeparjono S., (2000). The influence of varied nitrogen rates on growth, seed yield and yield components of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Diploma Thesis, Univ. Newcastle Upon Tyne.
- Sylvester-Bradley R., Kindred D.R., (2009). Analysing nitrogen responses of cereals to prioritise routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *J. Exp. Bot.*, 116: 1-13.
- Toniolo L., Mosca G., (2001). Colza (*Brassica napus* L. var *oleifera* D.C.). In: Giardini L. Baldoni R. (Ed.), *Coltivazioni Erbacee*. Patron, Bologna. Pp. 31-47.
- Wiesler F., Behrens T., Horst W.J., (2001 a). The role of nitrogen-efficient cultivars in sustainable agriculture. In: *Optimizing nitrogen management in food and energy production and environmental protection*, Proc. 2nd Int. Nitrogen Conf. on Sci. and Policy, The Sci. World (1).
- Wiesler F., Behrens T., Horst W.J., (2001 b). Nitrogen efficiency of contrasting rape ideotypes. In: Horst, W.J., et al. (Eds.), *Plant Nutrition: Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems through Basic and Applied Research*. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht. Pp. 60-61.

Capitolo 6

Morfologia radicale di ibridi ad *habitus* vegetativo divergente

6.1 Riassunto

Nel precedente capitolo (5) sono state messe in luce differenze tra cultivar convenzionali (ibrido CHH e varietà a impollinazione libera) e semi-nane (ibrido) in termini di assorbimento azotato e NUpE (efficienza d'assorbimento dell'azoto). E' ipotizzabile che tali diversità siano legate a una morfologia radicale propria e coerentemente diversificata con l'*habitus* vegetativo che caratterizza le varietà. Allo scopo di verificare tale ipotesi è stata allestita una prova in ambiente confinato (vaso) attraverso la quale sono stati analizzati gli apparati radicali di un ibrido CHH a taglia convenzionale (Excalibur) e un ibrido CHH semi-nano (PR45D01).

I risultati ottenuti confermano differenze morfologiche a livello radicale tra le cultivar a confronto. Lungo tutto il periodo di sperimentazione (da 0 a 49 giorni dalla semina), l'ibrido a taglia normale ha fornito biomasse e lunghezze radicali maggiori rispetto al genotipo semi-nano ($P \leq 0,05$). Questi aspetti morfologici, associati all'elevata produzione di biomassa epigea, hanno garantito a Excalibur assorbimenti azotati più intensi rispetto a PR45D01. L'elevata organizzazione di N palesata dalla cultivar convenzionale sembra connessa alla lunghezza delle radici, la quale tra tutti i parametri investigati è risultato quello più strettamente legato all'N assorbito nella biomassa aerea (R^2 : 0,91; $P \leq 0,05$). Particolarmente interessanti sono le relazioni emerse tra l'accrescimento radicale e il peso fresco (p.f.) della biomassa epigea (p.f. radici vs. p.f. biomassa aerea: R^2 : 0,77; $P \leq 0,05$), (lunghezza radici vs. p.f. biomassa aerea: R^2 : 0,87; $P \leq 0,05$), le quali rendono il p.f. aereo un attendibile indicatore dello sviluppo radicale.

I risultati raggiunti in questa sperimentazione, condotta in stadi precoci del ciclo colturale, vanno tuttavia considerati integrativi a quelli ottenibili in indagini riguardanti fasi di sviluppo più tardive, la cui attuazione è auspicabile per valutare la permanenza delle suddette differenze radicali.

6.2 Introduzione

La coltivazione di genotipi N-efficienti capaci di raggiungere rese areiche in granella significative, anche in condizioni nutritive sub-ottimali, è divenuta ormai obbligatoria in un'ottica di razionalizzazione dell'input di azoto (N). Una riduzione delle applicazioni minerali è di fatto auspicabile per garantire sostenibilità ambientale ed economica ai sistemi culturali.

Nel precedente capitolo (5) sono state messe in luce differenze in termini di assorbimento azotato e NUE (efficienza d'uso dell'azoto), tra cultivar ad *habitus* vegetativo convenzionale (ibrido CHH e varietà a impollinazione libera) e semi-nano. In particolare, la varietà ibrida ad altezza standard ha rivelato un'elevata NUE riconducibile a un efficace assorbimento minerale (NUpE). L'ibrido a taglia ridotta ha mostrato invece una NUE modesta dovuta a un inefficiente organizzazione dell'N disponibile nel sistema culturale. Tali risultati, in accordo con quanto osservato da Wiesler et al. (2001) e Horst et al. (2003), determinano uno stretto legame tra NUE e NUpE.

La NUpE dipende largamente dallo sviluppo radicale (Wiesler e Horst, 1994; Rathke et al., 2006). Kamh et al. (2005), indagando il sistema 'radice' di cultivar classificate N-efficienti e N-inefficienti per l'assorbimento azotato in assenza di apporti minerali, determinarono una maggiore densità di lunghezza radicale (RLD: Root Length Density) per il genotipo definito N-efficiente.

E' quindi ipotizzabile che le dissomiglianze emerse tra ibridi convenzionali e semi-nani per l'assorbimento azotato e la NUpE siano legate a una morfologia radicale diversificata. In frumento, Manske et al. (2002) e Wojciechowski et al. (2009), indagando a livello radicale gli effetti dell'introduzione di geni nanizzanti, hanno osservato valori di RLD e pesi ridotti nelle varietà ad altezza contenuta, soprattutto in stadi precoci del ciclo culturale (accestimento).

In questo studio sono stati indagati la morfologia radicale e l'assorbimento azotato di due ibridi di colza caratterizzati da *habitus* vegetativo divergente.

6.3 Materiali e metodi

Protocollo sperimentale e campionamenti

Presso l'Azienda Agraria Sperimentale dell'Università degli Studi di Padova (Legnaro, 45°21'N - 11°58'E), un ibrido convenzionale (Excalibur; Dekalb, Italia) e un ibrido CHH semi-nano (PR45D01; Pioneer, Italia) sono stati seminati in 56 vasi ciascuno (sezione quadrata; lato: 13 cm; altezza: 12 cm), riempiti con sabbia quarzifera di fiume e posizionati all'aperto secondo uno schema sperimentale a randomizzazione completa (n= 8). La semina è stata realizzata nell'epoca ottimale per l'areale considerato, ponendo tre semi per vaso. In seguito all'emergenza, la presenza di una singola piantula è stata garantita attraverso operazioni di diradamento manuale. L'apporto di nutrienti minerali è avvenuto mediante fertirrigazione settimanale con l'apporto di 100 ml di soluzione Hoagland (N: 1 mM; P: 0,08 mM; K: 0,28 mM).

Lo sviluppo sia epigeo che ipogeo è stato monitorato fino a 49 Giorni Dalla Semina (GDS), campionando 8 vasi per volta, con scadenza settimanale. La parte aerea delle plantule campionate è stata pesata ed essiccata a 65°C per 48 h, mentre le radici sono state conservate a -18°C.

Gli apparati radicali, una volta scongelati, sono stati separati dal substrato sabbioso attraverso lavaggio manuale. Eliminate eventuali impurità, le radici pulite sono state conservate in una soluzione di etanolo (10% v/v) a 4°C fino alla determinazione della loro morfologia attraverso analisi d'immagine.

Il tenore di N (% s.s.) della biomassa aerea è stato determinato applicando metodologia Kjeldahl.

Analisi d'immagine

Tecniche d'analisi d'immagine sono state utilizzate allo scopo di determinare la lunghezza e il diametro delle radici collezionate. Le immagini radicali sono state acquisite in formato TIFF mediante scansione digitale a una risoluzione di 1 bit 400-dpi (11,8 pixel mm⁻¹). Avvalendosi del software KS 300 rel. 3,0 (Carl Zeiss Vision GmbH, Monaco, Germania), la lunghezza radicale è stata calcolata con la procedura proposta

da Vamerali et al. (2003 a). In breve, tale metodo discrimina automaticamente le radici da oggetti estranei (e.g., residui organici, semi) in funzione dell'indice di allungamento (EI: $\text{perimetro}^2 / \text{area}$). In tal senso è stato applicato un $EI > 60$. La lunghezza delle radici è stata calcolata applicando la funzione *FbL* (Fiberlength) basata sul perimetro (P) e l'area (A) degli oggetti digitalizzati:

$$FbL = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16 A}}{4} \quad (1)$$

Il diametro radicale è stato calcolato dal rapporto tra l'area e la lunghezza degli oggetti digitalizzati.

Analisi statistica dei dati

Gli effetti 'cultivar', 'epoca di campionamento' e la loro interazione sono stati saggiati attraverso l'analisi della varianza (ANOVA), utilizzando il software Statgraphics Centurion XVI (Manugistic Inc., Rockville, MD, USA). Quando il test F ha indicato significatività per valori di $P \leq 0,05$, la separazione tra le medie è avvenuta tramite test di Duncan. Per le variabili 'concentrazione di N nella biomassa epigea', 'assorbimento azotato' e 'assorbimento azotato per unità di lunghezza radicale', l'ANOVA ha testato unicamente l'effetto principale 'cultivar'. In ciascuna epoca di campionamento, le singole repliche di biomassa area si sono dimostrate quantitativamente insufficienti per attuare la titolazione Kjeldahl. Si sono quindi uniti per ogni rilievo e genotipo i campioni collezionati, permettendo di valutare statisticamente solamente l'effetto della scelta varietale. Funzioni di Gompertz (Eq. 2) sono state utilizzate per descrivere l'evoluzione temporale (GDS: Giorni Dalla Semina) dei parametri radicali (peso e lunghezza radicale) e aerei (accumulo biomassa) indagati durante la sperimentazione:

$$y = ce^{-e^{-b(t-m)}} \quad (2)$$

dove c (massimo di y), b (pendenza della curva a $c/2$) e m (GDS in cui si raggiunge $c/2$) sono costanti, t : tempo in GDS, e : logaritmo naturale (Vamerali et al., 2003 b).

6.4 Risultati sperimentali

Accrescimento radicale

Variabilità genotipica è stata determinata per quasi tutti i parametri radicali considerati. Solamente il diametro non è influenzato dalla scelta varietale (Tab. 1).

L'ibrido convenzionale ha mostrato una biomassa ipogea mediamente più pesante dell'ibrido semi-nano (1,7 e 1,2 g p.f. pp⁻¹ per Excalibur e PR45D01, rispettivamente; medie di 7 campionamenti; $P \leq 0,05$), (Fig. 1). Il sistema radicale di Excalibur è risultato associato anche a radici di lunghezza superiore rispetto a PR45D01 (17,3 e 14,3 m pp⁻¹ per Excalibur e PR45D01, rispettivamente; medie di 7 campionamenti; $P \leq 0,05$). Tuttavia il rapporto tra la lunghezza radicale e il suo peso fresco (SRL: Specific Root Length), espressione dell'efficacia d'impiego di carboidrati per l'acquisizione delle risorse presenti nel suolo (Vameralli, 2000), è risultato a favore dell'ibrido seminano. Di fatto PR45D01, per unità di biomassa radicale (g⁻¹ p.f. radice), produce radici lunghe 21,5 m, mentre Excalibur 18,1 m ($P \leq 0,05$). Il parametro SLR ha rivelato valori decrescenti lungo il periodo d'indagine per ambedue i genotipi, passando da 32,9 m g⁻¹ p.f. a 7 GDS agli 11,4 m g⁻¹ p.f. stimati nel rilievo a 49 GDS (valori medi delle cultivar; $P \leq 0,05$).

L'elevato vigore ipogeo dell'ibrido convenzionale si è manifestato in tutte le epoche di campionamento (Fig. 2 e 3). L'implementazione del modello di Gompertz nell'interpolazione dell'evoluzione temporale del peso e lunghezza radicale, ha messo in luce dinamiche accelerate per Excalibur, il quale, rispetto a PR45D01, impiega meno unità di tempo (GDS) per raggiungere la metà del peso e dell'estensione radicale massima (valore della costante m dell'Eq. 1).

Considerando il diametro radicale, le cultivar a confronto non si sono differenziate; l'ibrido convenzionale e semi-nano hanno mostrato valori di 376 e 374 μm , rispettivamente ($P > 0,05$), (dati non mostrati).

Tab. 1. ANOVA per i parametri radicali, la produzione di biomassa aerea e l'assorbimento azotato^{a,b}.

Effetto	<i>g.l.</i>	P_{rad}	L_{rad}	D_{rad}	SRL	P_{fst}	Rad/Fst	N_{conc}	N_{ass}	N_{lung}
Cultivar (C)	1	***	**	n.s.	*	**	n.s.	*	*	n.s.
Epoca camp. (E)	6	***	***	***	***	***	***	-	-	-
C × E	6	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	-	-

^a P_{rad} : peso dell'apparato radicale (g p.f. pp^{-1}); L_{rad} : lunghezza delle radici (m pp^{-1}); D_{rad} : diametro delle radici (μm); SRL: lunghezza radicale specifica (m g^{-1} p.f. radice); P_{fst} : peso della biomassa aerea (g p.f. pp^{-1}); Rad/Fst: rapporto tra il p.f. dell'apparato radicale e il p.f. della biomassa aerea; N_{conc} : concentrazione di N nella biomassa aerea (% N s.s.); N_{ass} : assorbimento azotato nella biomassa aerea (mg N pp^{-1}); N_{lung} : assorbimento azotato per unità di lunghezza radicale (mg N m^{-1} radice).

^b *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

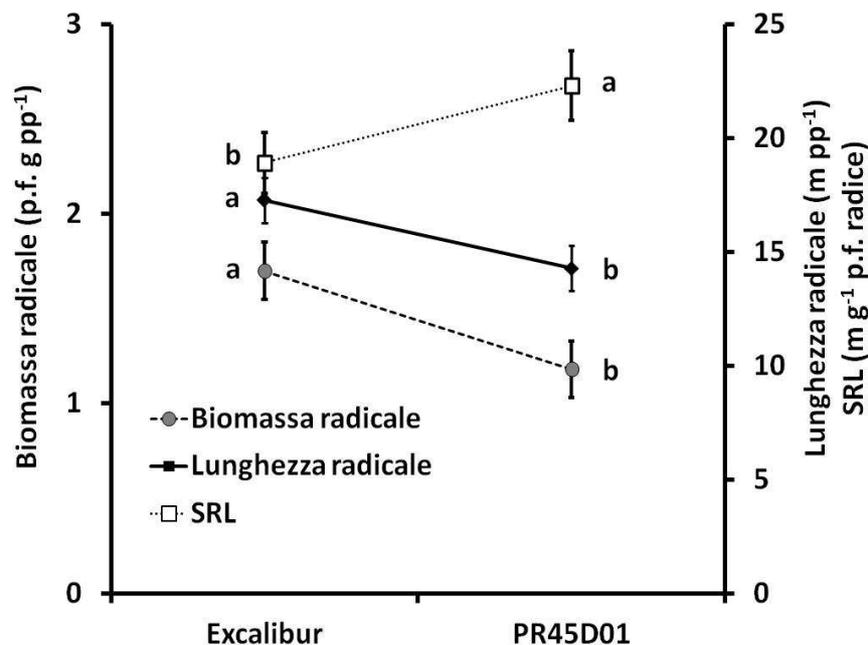


Fig. 1. Biomassa radicale, lunghezza radicale e lunghezza radicale specifica (SRL) di Excalibur e PR45D01 (barre verticali: \pm e.s.). Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Valori medi di 7 campionamenti.

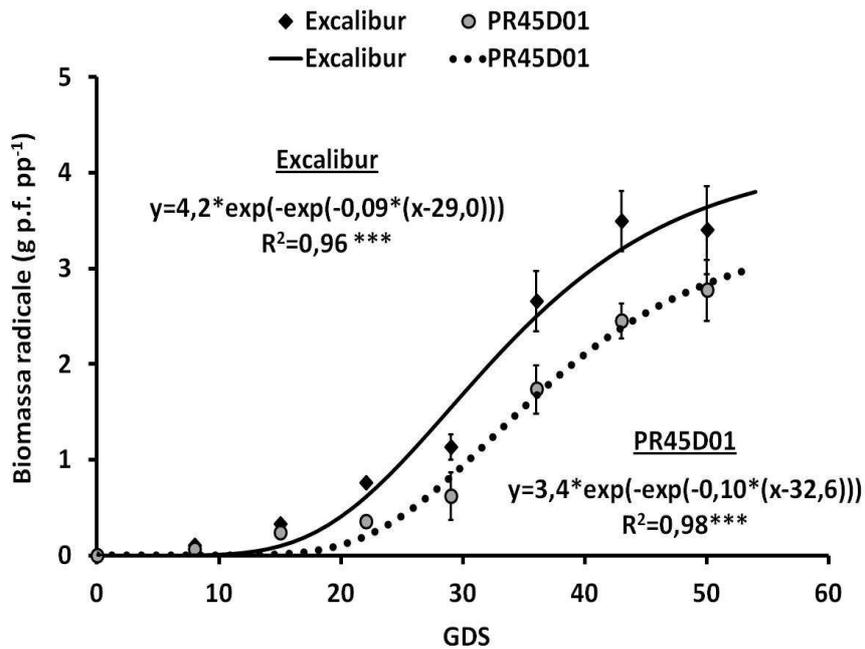


Fig. 2. Evoluzione della biomassa radicale di Excalibur e PR45D01 durante il periodo di indagine (barre verticali: \pm e.s.). GDS: Giorni Dalla Semina. *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

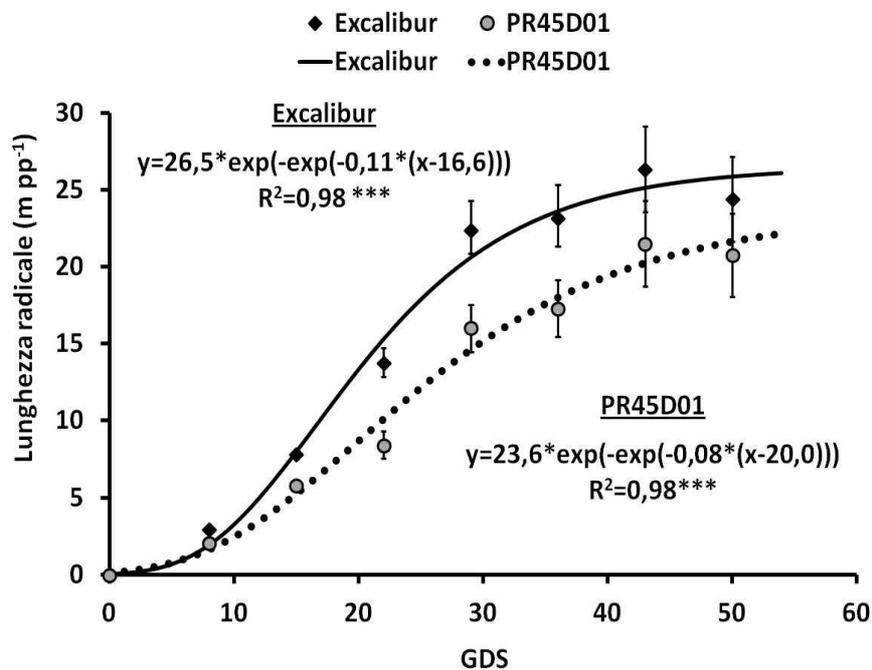


Fig. 3. Evoluzione della lunghezza radicale di Excalibur e PR45D01 durante il periodo di indagine (barre verticali: \pm e.s.). GDS: Giorni Dalla Semina. *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

Biomassa aerea e assorbimento azotato

L'analisi statistica dei pesi freschi epigei ha determinato differenze statisticamente significative sia tra i genotipi che tra le epoche di campionamento (Tab. 1). Considerando l'effetto principale 'cultivar' ($P \leq 0,05$) è confermata anche a livello aereo la maggiore vigoria dell'ibrido a taglia normale (Fig. 4). Excalibur ha prodotto mediamente 0,67 g p.f. pp⁻¹ (media di 7 campionamenti), mentre PR45D01 ha fornito un peso medio inferiore pari a 0,51 g p.f. pp⁻¹ (media di 7 campionamenti), ($P \leq 0,05$).

La dinamica di crescita della vegetazione aerea è stata ben interpretata per entrambi i genotipi dal modello di Gompertz (Fig. 5). L'ibrido convenzionale ha mostrato un accumulo di biomassa accelerato rispetto al genotipo ad *habitus* ridotto; Excalibur raggiunge la metà del peso epigeo massimo a 18 GDS, mentre PR45D01 a 28 GDS.

Rapportando per ciascun genotipo il peso dell'apparato radicale a quello delle strutture aeree, è emersa la tendenza dell'ibrido convenzionale ad allocare maggiori quantità di biomassa sulle radici rispetto alla cultivar semi-nana. Il rapporto tra il p.f. delle radici e il p.f. della biomassa epigea ha rivelato valori di 1,95 e 1,73 per Excalibur e PR45D01, rispettivamente ($P=0,10$; dati non mostrati).

L'elevato vigore espresso dall'ibrido convenzionale sia a livello ipogeo che epigeo si è tradotto in utilizzi di N superiori (Fig. 6); Excalibur ha organicato 2,90 mg N pp⁻¹, mentre PR45D01 2,40 mg N pp⁻¹ ($P \leq 0,05$). Nonostante ciò, l'ibrido a taglia ridotta, in funzione di una modesta produzione di biomassa, ha concentrato maggiormente l'elemento nella matrice vegetale (4,00 e 3,50% N s.s. per PR45D01 ed Excalibur, rispettivamente; $P \leq 0,05$).

Variabilità genotipica non è stata determinata considerando l'assorbimento azotato per unità di lunghezza radicale (Tab. 1). Le cultivar a confronto hanno organicato mediamente ~0,18 mg N per m di radice (media delle cultivar a confronto), (dati non mostrati).

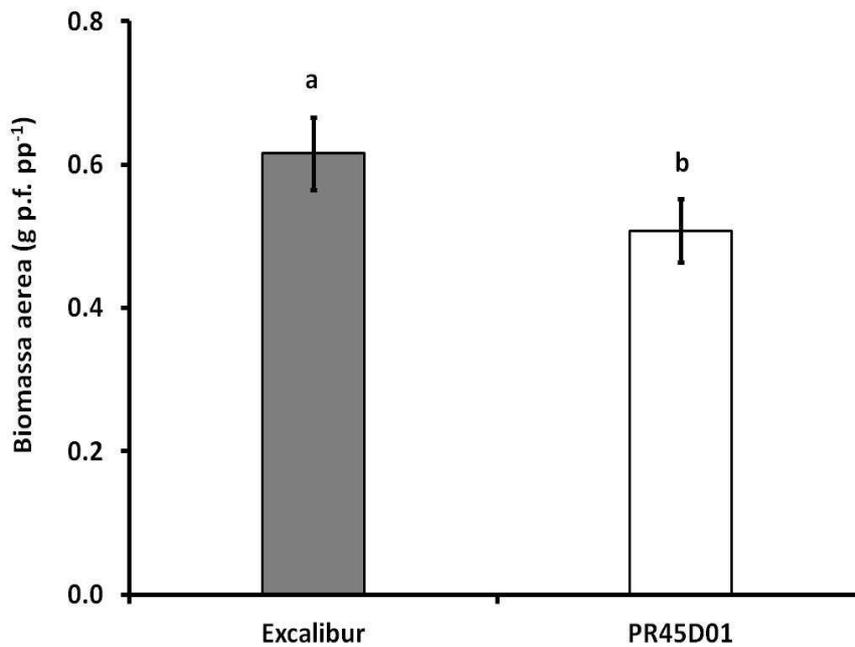


Fig. 4. Biomassa aerea di Excalibur e PR45D01 (barre verticali: \pm e.s.). Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Valori medi di 7 campionamenti.

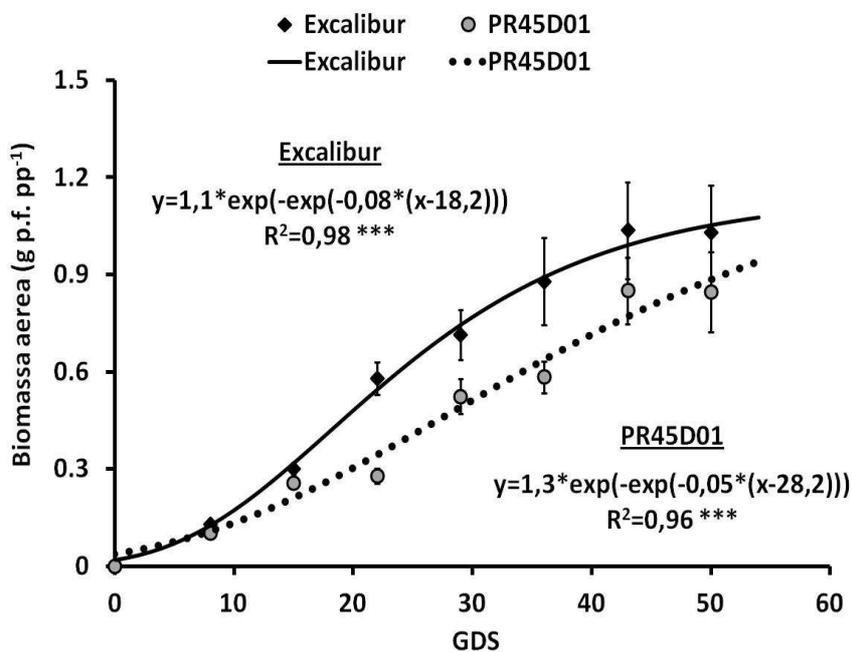


Fig. 5. Evoluzione della biomassa aerea di Excalibur e PR45D01 (barre verticali: \pm e.s.) durante il periodo di indagine. GDS: Giorni Dalla Semina. *, **, ***: significativo per valori di $P \leq 0,05$, $\leq 0,01$ e $\leq 0,001$, rispettivamente. n.s.: non significativo per valori di $P > 0,05$.

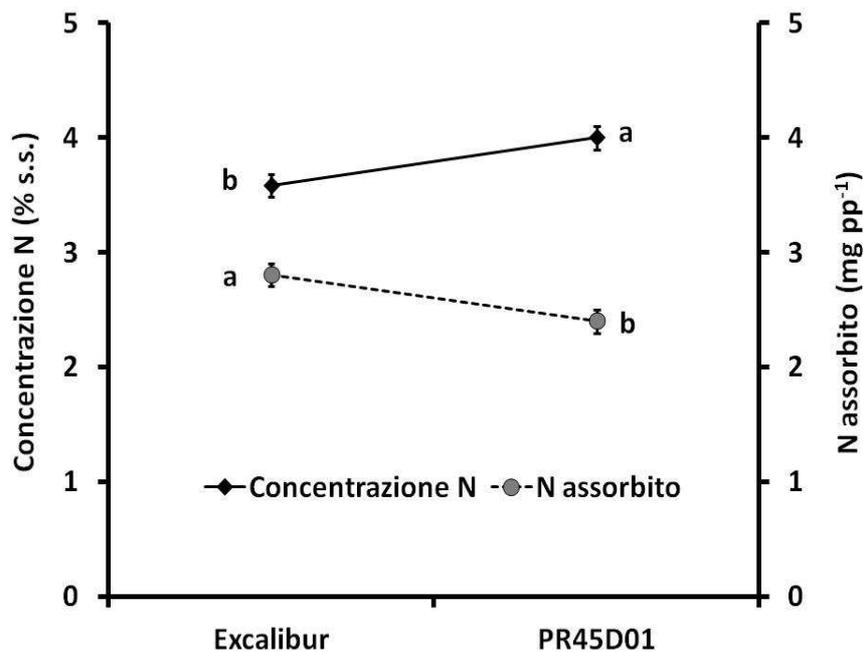


Fig. 6. Concentrazione e assorbimento azotato di Excalibur e PR45D01 (barre verticali: \pm e.s.). Lettere uguali indicano valori medi non differenti secondo il test di Duncan ($P \leq 0,05$). Valori medi di 7 campionamenti.

Relazioni tra parametri radicali, sviluppo aereo e assorbimento azotato

Particolarmente interessanti sono le relazioni emerse tra il p.f. della biomassa epigea e alcuni parametri di accrescimento radicale. In particolare, il p.f. aereo è risultato positivamente e significativamente correlato sia al p.f. ($R^2: 0,77; P \leq 0,05$) che alla lunghezza delle radici ($R^2: 0,87; P \leq 0,05$), (Fig. 7).

Introducendo nell'analisi delle regressioni lineari l'assorbimento azotato, la lunghezza complessiva del sistema radicale tra i parametri indagati è quello che spiega la maggiore quota di variabilità osservata nell'utilizzo di N; la correlazione positiva emersa tra l'N organico nella biomassa aerea e l'estensione delle radici ha fornito un coefficiente di determinazione (R^2) pari a 0,91 ($P \leq 0,05$), (Fig. 8). Anche il p.f. dell'apparato radicale ha mostrato un elevato grado di correlazione con l'assorbimento azotato spiegandone però, una quota minore di variabilità ($R^2: 0,88; P \leq 0,05$).

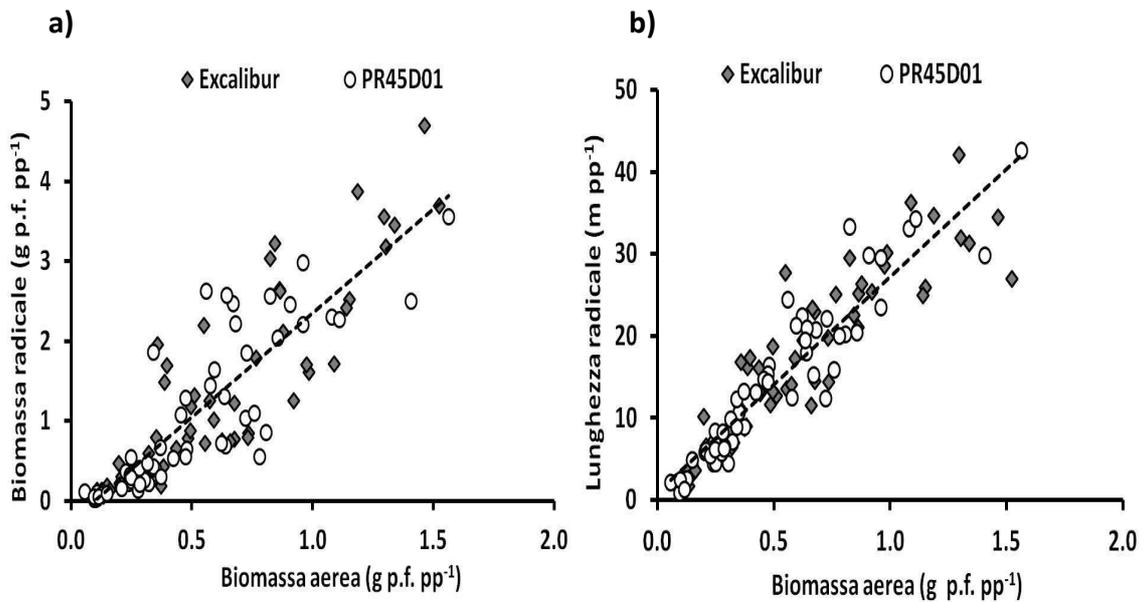


Fig. 7. a) Relazione tra la biomassa radicale e la biomassa aerea di Excalibur e PR45D01 (n=112). Regressione lineare: $y=2,60x - 0,26$; $R^2= 0,77^{***}$.

b) Relazione tra la lunghezza radicale e la biomassa aerea di Excalibur e PR45D01 (n=112). Regressione lineare: $y=26,2x + 0,98$; $R^2= 0,87^{***}$.

n.s., *, **, *** rispettivamente per valori di $P>0,05$, $\leq 0,05$, $\leq 0,01$, $\leq 0,001$.

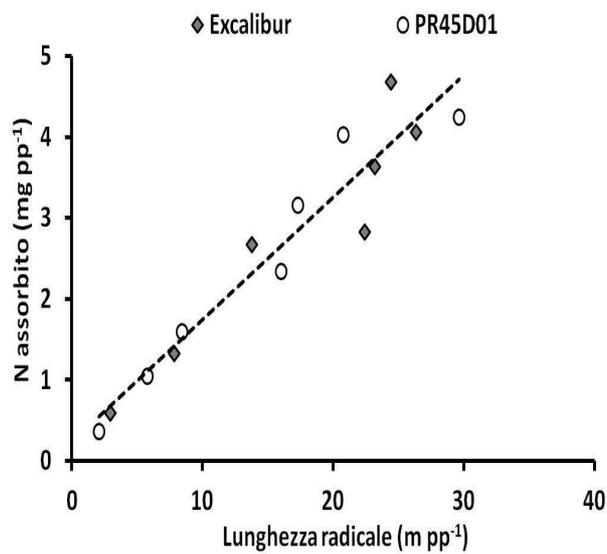


Fig. 8. Relazione tra l'assorbimento azotato e la lunghezza radicale di Excalibur e PR45D01 (n=14). Regressione lineare: $y=0,15x + 0,24$; $R^2= 0,91^{***}$.

n.s., *, **, *** rispettivamente per valori di $P>0,05$, $\leq 0,05$, $\leq 0,01$, $\leq 0,001$.

6.5 Discussione

L'accrescimento della radice è studiato sotto molteplici aspetti e attraverso l'indagine di diversi tratti morfologici. Le ricerche sulla fisiologia dell'assorbimento e le relazioni con la rizosfera sono legate alla determinazione della superficie radicale e quindi, alla caratterizzazione di parametri come la lunghezza, diametro e biomassa radicale (Amato, 2000). Sulla base delle differenze in termini di assorbimento e NUpE (efficienza d'assorbimento dell'azoto) emerse tra cultivar ad altezza convenzionale e genotipi semi-nani (Cap. 5) è stata allestita una prova in ambiente confinato allo scopo di determinare eventuali differenze genotipiche per quei parametri radicali legati all'acquisizione delle risorse idriche e nutrizionali.

I risultati di questa prova hanno messo in luce una morfologia radicale diversificata tra i genotipi a confronto. L'introduzione di geni nanizzanti oltre ad aver ridotto l'*habitus* vegetativo, accorciando gli internodi del fusto e abbassando il punto d'inserzione della prima ramificazione basale (Sieling e Kage, 2008; Liu et al., 2010), hanno influenzato anche l'apparato radicale. Il genotipo semi-nano (PR45D01) ha presentato radici più leggere con una lunghezza complessiva inferiore rispetto all'ibrido convenzionale (Excalibur). In frumento, Manske et al. (2002) e Wojciechowski et al. (2009), osservarono RLD (Root Length Density) e pesi radicali minori nei genotipi ad *habitus* vegetativo contenuto rispetto a materiali convenzionali, soprattutto in stadi precoci del ciclo colturale (accestimento).

Considerando la lunghezza radicale specifica (SRL), PR45D01 ha allungato maggiormente il proprio apparato radicale a parità di biomassa ipogea. La variabilità genotipica emersa per SRL può essere in parte spiegata analizzando le sue componenti: la finezza (diametro della radice) e la densità del tessuto radicale (Eissenstat, 1991; Ryser e Lambers, 1995). Per quanto riguarda il diametro radicale, in questo studio non sono emerse differenze tra le cultivar quindi, la migliore SRL dell'ibrido semi-nano potrebbe essere riconducibile a un tessuto radicale metabolicamente meno oneroso da sviluppare (i.e., minore densità di tessuto radicale). In particolare, una bassa densità di tessuto radicale sarebbe legata a uno scarso differenziamento di tessuti vascolari e a pareti sottili dei vasi xilematici (Wahl e Ryser, 2000).

La stima di SLR ha considerato il peso fresco delle radici e non la sostanza secca. Tale accorgimento si è reso necessario per non inficiare l'esamina morfologica delle radici attraverso l'analisi d'immagine, la quale sarebbe poco realistica se basata su un sistema radicale disidratato. Nonostante ciò, considerando lo stadio di sviluppo della coltura, la tipologia di substrato, l'uniformità degli interventi di fertirrigazione e di campionamento che hanno interessato le cultivar a confronto, le differenze varietali in termini di contenuto d'acqua delle radici possono considerarsi trascurabili.

L'ibrido convenzionale ha mostrato un apparato radicale pesante ed espanso (lunghezza radici) in grado di colonizzare maggiori volumi di terreno. Il conseguente migliore approvvigionamento idrico e minerale avrebbe garantito un rapido sviluppo delle strutture epigee ed elevati assorbimenti azotati. La capacità di Excalibur di intercettare maggiori quantità N durante le fasi autunnali successive alla semina, è di particolare interesse in un'ottica di contenimento dei fenomeni di lisciviazione, che per l'areale considerato si realizzano principalmente in corrispondenza delle copiose precipitazioni invernali (Zanetti et al., 2011).

6.6 Conclusioni

I processi di selezione tesi a ridurre la statura e l'*habitus* epigeo hanno influito sull'accrescimento radicale, alterando l'accesso alle risorse nutritive presenti nella rizosfera. I risultati emersi da questa sperimentazione hanno messo in luce per l'ibrido convenzionale un sistema ipogeo più espanso (maggiore peso e lunghezza radicale), in grado di colonizzare rapidamente il terreno, sostenendo un migliore accrescimento delle strutture vegetali aeree e un elevato assorbimento azotato. Il maggiore sviluppo radicale del materiale ad altezza standard, già in fasi precoci di post-emergenza, oltre a permettere un buon affrancamento della coltura, è sfruttabile favorevolmente in un'ottica di tutela ambientale per mitigare i fenomeni di lisciviazione nitrica (effetto *catch crop*).

Considerando tuttavia gli stadi di sviluppo interessati dall'indagine, sarebbe utile ripetere tale sperimentazione in fasi del ciclo più avanzate (fioritura) allo scopo di integrare le suddette differenze radicali. In particolare, implementando altre metodologie di studio dell'apparato radicale (e.g., metodo del carotaggio, metodo della finestra in vasche a lisimetro), sarebbe auspicabile valutare la distribuzione spaziale e la densità delle radici considerando volumi di suolo e profondità maggiori.

6.7 Bibliografia

- Amato M., (2000). I parametri che definiscono l'accrescimento radicale. In: Obiettivo radice, metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G. e Vamerali T. (Eds.). Pp. 73.
- Eissenstat D.M., (1991). On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using citrus rootstocks. *New Phytol.*, 118: 63-68.
- Horst W.J., Behrens T., Heuberger H., Kamh M., Reidenbach G., Wiesler F., (2003). Genotypic differences in nitrogen use-efficiency in crop plants. In: Lynch J.M., Schepers J.S., Unver I., (Eds.). *Innovative Soil-Plant Systems for Sust. Agr. Prod.* Pp. 75-92.
- Kamh M., Wiesler F., Ulas A., Horst W.J., (2005). Root growth and N-uptake activity of oilseed rape (*Brassica napus*) cultivars differing in nitrogen efficiency. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 168: 130-137.
- Liu C., Wang J., Huang T., Wang F., Yuan F., Cheng X., Zhang Y., Shi S., Wu J., Liu K., (2010). A missense mutation in the VHYNP motif of a DELLA protein causes a semi-dwarf mutant phenotype in *Brassica napus*. *Theor. App. Genet.*, 121: 249-258.
- Manske G.G.B., Ortiz-Monasterio J.I., Van Ginkel R.M., Rajaram S., Vlek P.L.G., (2002). Phosphorus use efficiency in tall, semi-dwarf and dwarf near-isogenic lines of spring wheat. *Euphytica*, 125: 113-119.
- Rathke G.W., Behrens T., Diepenbrock W., (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agr. Ecosyst. Env.*, 117: 80-108.
- Ryser P., Lambers H., (1995). Root and leaf attributes accounting for the performance of fast and slow growing grasses at different nutrient supply. *Plant Soil*, 170: 251-265.
- Sieling K., Kage H., (2008). The potential of semi-dwarf oilseed rape genotypes to reduce the risk of N leaching. *J. Agric. Sci.*, 146: 77-84.
- Vamerali T., (2000). Superficie, diametro e volume radicale. In: Obiettivo radice, metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G. e Vamerali T., (Eds.). Pp. 76-78.
- Vamerali T., Guarise M., Ganis A., Bona S., Mosca G., (2003 a). Analysis of root images from auger sampling with a fast procedure: a case of application to sugar beet. *Plant Soil*, 255: 387-397.
- Vamerali T., Ganis A., Bona S., Mosca G., (2003 b). Fibrous root turnover and growth in sugar beet (*Beta vulgaris* var. *saccharifera*) as affected by nitrogen shortage. *Plant Soil*, 255: 169-177.

- Wahl S., Ryser P., (2000). Root tissue structure is linked to ecological strategies of grasses. *New Phytol.*, 148: 459-471.
- Wiesler F., Behrens T., Horst W.J., (2001). Nitrogen efficiency of contrasting rape ideotypes. In: Horst W.J. et al. (Eds.), *Plant Nutrition: Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems through Basic and Applied Research*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pp. 60-61.
- Wiesler F., Horst W.J., (1994). Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. *Plant Soil*, 163: 267-277.
- Wojciechowski T., Gooding M.J., Ramsay L., Gregory P.J., (2009). The effects of dwarfing genes on seedling root growth of wheat. *J. Exp. Bot.*, 60: 1-9.
- Zanetti F., Rampin E., Vamerali T., Mosca G., (2011). Relevance of soil texture for root growth of oilseed rape and potential reduction of nitrate leaching. *Proc. 7th Int. Symp. on Structure and Function of Roots*, Novy Smokovec, Slovenia, 5-9 Sept. 2011. Pp. 214.

Capitolo 7

A phenological model of winter oilseed rape according to the BBCH scale⁸

⁸ Ulf Böttcher, Enrico Rampin, Karla Hartmann, Federica Zanetti, Francis Flenet, Muriel Morison and Henning Kage (2011). Submitted to *Field Crop Research*.

7.1 Riassunto

In collaborazione con l'istituto Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung dell'Università di Kiel (D) è stato sviluppato un modello (denominato 'modello BBCH') per simulare la fenologia del colza invernale da olio in accordo con la scala BBCH. Un'attendibile previsione fenologica è fondamentale ai fini di una corretta realizzazione di tutte quelle pratiche agronomiche di post-emergenza la cui esecuzione è strettamente legata allo sviluppo colturale. L'implementazione della scala BBCH nel 'modelling' fenologico permetterebbe una dettagliata descrizione dell'ontogenesi vegetale, assicurando nel contempo, una facile calibrazione e validazione.

Il 'modello BBCH' è strutturato analogamente al modulo 'BRASNAP-PH' (Habekotté, 1997), in cui il tasso di sviluppo è influenzato dagli effetti moltiplicativi della temperatura, vernalizzazione e fotoperiodo. Combinando equazioni differenziali e di conversione, sei macro-fasi sono simulate con intervallo temporale giornaliero: emergenza (BBCH 00-09), sviluppo fogliare (10-19), levata (30-39), produzione delle infiorescenze (50-59), fioritura (60-69), sviluppo di silique e semi (70-89). Gli stadi BBCH 10-19 e 30-39 sono riprodotti considerando rispettivamente i tassi di apparizione fogliare e di allungamento internodale. I processi di calibrazione e validazione sono stati condotti utilizzando un ampio database di osservazioni fenologiche collezionate in numerosi siti sperimentali di Francia (n= 144), Germania (n= 839) e Italia (n= 577). La stabilità della parametrizzazione e l'accuratezza di previsione sono state verificate attraverso la convalida incrociata dei datasets definiti inizialmente per la calibrazione e la validazione (i.e., 'cross-calibration' e 'cross-validation').

La validazione e la convalida-incrociata, condotte unendo le osservazioni di tutte e tre le nazioni, hanno messo in luce un'accuratezza di simulazione (RMSE: radice dell'errore quadratico medio) rispettivamente di 2,8 e 3,2 codici BBCH. Tra i siti sperimentali a confronto, la maggiore precisione è stata ottenuta per quello italiano (RMSE: 2,1 e 2,3 codici BBCH nella validazione e validazione-incrociata, rispettivamente). Considerando separatamente le fasi fenologiche, l'emergenza, lo sviluppo fogliare, la fioritura e lo sviluppo di silique e semi sono state riprodotte con RMSE rispettivamente di 1,0, 2,4, 2,9 e 3,2 codici BBCH (datasets di validazione). Maggiore imprecisione è

emersa nella simulazione degli stadi di levata e sviluppo delle infiorescenze (RMSE: 3,5 e 4,1 codici BBCH, rispettivamente; datasets di validazione).

Il ‘modello BBCH’ si è rivelato un efficace strumento di previsione dello sviluppo fenologico del colza in molteplici areali Europei caratterizzati da differenti pratiche agronomiche e scelte varietali. Il ‘modello BBCH’ potrebbe assumere quindi, ampia rilevanza pratica per il management colturale supportando quei processi decisionali alla base della programmazione della tecnica colturale.

7.2 Abstract

A dynamic model predicting winter oilseed rape (OSR) phenology according to the BBCH scale was developed. Implementation of the BBCH coding system within OSR phenology simulation can allow detailed descriptions of crop ontogeny while avoiding complicated model parameterisation and evaluation.

The BBCH model describes OSR development by a combination of differential and conversion equations, based on the structure of the BRASNAP-PH model (Habekotté, 1997). Six phenological macro-stages were reproduced daily according to the BBCH codes (00-89): emergence (00-09), leaf development (10-19), stem elongation (30-39), inflorescence emergence (50-59), flowering (60-69) and pod development-maturation period (70-89). The model takes into account temperature (including vernalisation) and photoperiod as the main environmental forces affecting crop phenology. The macro-stages of leaf development and shooting were reproduced considering the rates of leaf appearance and internode extension. Model calibration and validation were performed with an extensive database of phenological observations collected from several experimental sites across France (n= 144), Germany (n= 839) and Italy (n= 577). The stability of parameterisation and validation was checked by cross-calibration and validation procedures.

Applied to the independent datasets used for validation and cross-validation, the model was able to predict the whole crop cycle with a root mean square error (RMSE) of 2.8 and 3.2 BBCH stages, respectively. Particularly accurate predictions of OSR development were obtained with the Italian datasets (RMSE: 2.1 and 2.3 BBCH stages for

validation and cross-validation, respectively). Considering the phenological phases separately, emergence, leaf development, flowering and pod development-maturation period were simulated with RMSE of 1.0, 2.4, 2.9 and 3.2 BBCH stages, respectively (validation datasets). Slightly higher uncertainty emerged in the prediction of the phases of stem elongation and inflorescence emergence (RMSE: 3.5 and 4.1 BBCH stages, respectively, validation datasets).

The model reproduced OSR development with a sufficient degree of accuracy for a wide range of years, locations, sowing dates and genotypes, and turned out to be an efficient and widely applicable prediction tool with important practical aims in crop management scheduling.

7.3 Introduction

In all crops, phenology plays a crucial role by controlling important plant processes like senescence, grain filling, photosynthesis, nutrient uptake, and others. Phenological models are therefore one of the main parts of mechanistic crop growth models, and are helpful tools by means of which decision-making processes in agricultural systems occur (Gayler et al., 2002; Mirschel et al., 2005).

The crop cycle in winter oilseed rape (OSR) is associated with sequences of phenological events controlled primarily by temperature (including vernalisation) and photoperiod. These environmental factors regulate the duration of developmental phases which are generally shorter when temperature and/or daylength increase (Hodgson, 1978; Nanda et al., 1996; Robertson et al., 2002). The combined effects of photoperiod and temperature affect the OSR cycle mainly during pre-anthesis phases. As reported by Gomez and Miralles (2010), OSR shows a long-day response to photoperiod between the stages of emergence and flower bud appearance. In controlled environments, Thurling and Kaveeta (1992) and Thurling and Vijendra Das (1979) also observed important effects of daylength during the stem elongation phase. Developmental responses to the 'photoperiod \times temperature' interaction regard several plant attributes, such as the number of leaf primordia and the rate of leaf appearance, which determine the time to flowering (Miralles et al., 2001). After the onset of flowering, temperature is considered the main environmental factor influencing OSR phenology. Therefore, much of the variation detectable in the length of the flowering-maturation period can be explained by the direct effect of temperature (Habekotté, 1997).

In field conditions, photoperiod and temperature vary continuously and simultaneously, leading to the concurrent development of vegetative, generative and reproductive organs on OSR plants (Diepenbrock, 2000; Rathke et al., 2006). This overlap makes OSR phenological surveys complicated and imprecise. For better identification and comparison of crop development, a numerical division of the phenological process between sowing and harvest is therefore advisable. In addition, not only crop growth models but also operative computerised decision-support systems within plant production require numerical coding of phenological events (Mirschel et al., 2005).

The system now applied worldwide for coding crop phenology is the BBCH scale (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry). The BBCH system allows uniform classification of phenologically similar growth stages for the majority of cultivated species. It is organised according to a decimal scheme and, for OSR, subdivides the entire plant cycle into nine principal phases which, in turn, are further divided into secondary phases (from 00 to 99), (Lancashire et al., 1991; Weber and Bleiholder, 1990).

The BBCH codes refer to precise plant morphological traits and permit to codify the whole ontogenetic development of crops, not only macro-events such as emergence or flowering (Meier et al., 2009). Use of the BBCH coding system within phenology simulations can then provide detailed descriptions of the developmental events occurring during the crop cycle with substantial advantages in crop management scheduling.

In addition, as BBCH codes can easily be identified by evaluating plant morphology, a phenological model conceived according to that scale can be simply parameterised and evaluated.

In the literature, implementation of the BBCH coding system to model winter OSR phenology is still lacking. The existing models (Gabrielle et al., 1998; Habekotté, 1997; Husson et al., 1998) were developed to predict only the key phases of crop phenology (i.e., emergence, flowering and maturation times) and were validated mainly for cultivation zones in north and central Europe. For the Mediterranean areas of winter OSR cultivation (i.e., north Italy), a comprehensive simulation of crop phenology is still not available.

By extending the basic algorithms of the BRASNAP-PH model (Habekotté, 1997), a dynamic model describing winter OSR phenology according to the BBCH scale is presented here. The model accounts for photoperiod and temperature as well as the influence of vernalisation. An extensive database of phenological observations collected from several field trials across Germany, Italy and France was used to parameterise the model. To test the general applicability and functionality of the model and its parameterisation, it was cross-validated with independent datasets.

7.4 Materials and methods

Database

According to the BBCH coding system defined for OSR (Weber and Bleiholder, 1990; Lancashire et al., 1991), detailed observations of phenological growth stages of various winter OSR crop stands were carried out in several experimental locations across Germany, Italy and France. Tab. 1 lists the datasets used for model parameterisation and validation.

The German datasets were provided by ZEPP (Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz, Bad Kreuznach, Germany), and contain 839 BBCH observations (n) collected during 1995 – 2006 in variety field trials in eight federal states. The phenological surveys covered nearly the entire OSR cycle and are reported as mean values of 3, 4 or 8 plots. OSR was sown during the optimal period for each location, and fertilisation, pest and disease controls were managed according to farmers' practices. The daily minimum and maximum temperatures were recorded at weather stations near the experimental sites.

The Italian datasets (n= 577) were obtained from two-year field trials at the experimental farm of the University of Padova at Legnaro, in the Veneto Region (NE Italy). The phenological growth stages of more than fifty cultivars were assessed in response to differing sowing periods (from September 05 to October 15), sowing densities (22-63 seeds m⁻²), soil tillage (with and without ploughing and direct sowing) and nitrogen fertilisation doses (0-150 kg N ha⁻¹). Other management practices (plant protection, phosphorus and potassium fertilisation) were carried out to ensure optimal growth conditions. Climatic data (minimum and maximum temperatures) were recorded daily from the weather station located at the experimental farm. The observed BBCH stages are reported as the mean of three plots.

The French datasets (n= 144) were collected from 1993 to 2007 by monitoring the phenological development of 91 cultivars sown in many regions of France. Most of the observations regard the onset of flowering (BBCH 60) and are accounted as the mean of three plots.

Tab. 1. Overview of database used for model parameterisation and validation.

Nation	Region/Federal State	Year	Location (n°)	Variety (n°)	Observation (n°)	BBCH stages recorded	Sowing period	10-yr daily mean temperature (°C) ^a	Range of latitude and longitude ^b
Germany	Baden-Württemberg	'02	1	U/A ^c	5	9, 15, 30, 60-69	20/08	8.8	49°28' N 9°12' E
	Bayern	'04	1	U/A ^c	4	9-19, 55-65	20/08	7.9	48°27' N 12°44' E
	Brandenburg	'95, '98, '01, '04, '05	41	25	538	9-89	16/08 - 31/08	8.7	51°7' - 53°3' N 11°9' - 14°6'E
	Mecklenburg- Vorpommern	'97, '99	5	2	22	9-15, 60-70, 80-89	17/08 – 30/08	8.1	53°9' - 54°4' N 10°2' - 12°7'E
	Rheinland-Pfalz	'03-'06	10	9	137	9-80	12/08 – 08/09	8.5	49°5' - 50°5' N 6°5' - 10°1'E
	Sachsen	'98 -'02, '04, '05	14	13	99	9-19, 50-89	20/08 – 31/08	8.3	50°6' - 51°3' N 12°2' - 15°0' E
	Sachsen-Anhalt	'05	1	U/A ^c	6	9-19, 60-89	15/08	8.6	51°31' N 11°51' E
	Schleswig-Holstein	'04 -'06	1	U/A ^c	28	9-60	22/08 – 04/09	8.3	54°19' N 9°58' E
Italy	Veneto	'09, '10	1	52	577	9-89	05/09 – 15/10	13.3	45°21' N 11°58' E
France	Auvergne	'97	1	6	1	60	27/08	U/A ^c	46°11' N 3°16' E
	Bourgogne	'93 -'97, '99, '00, '02, '05, '07	7	16	31	60, 89	21/08 – 16/09	11.7	46°19' - 48°18' N 2°58' - 5°18' E
	Centre	'94 -'97, '01, '03-'06, '07	9	8	17	60	25/08 - 04/09	11.9	46°24' - 48°40' N 0°7' - 2°58' E
	Champagne-Ardenne	'93, '95 - '97, '04	4	4	7	60	24/08 – 05/09	11.0	48°06' - 49°24' N 4°04' - 5°09' E
	Île De France	'96, '97	1	2	27	9, 50-75	15/07 – 04/09	U/A ^c	48°51' N - 1°55' E

Languedoc-Roussillon	'93 -'98	4	7	8	60	31/08 – 24/09	U/A ^c	43°19' - 43°50' N 1°57' - 4°22' E
Lorraine	'93, '95 -'98, '03	4	6	9	60	22/08 - 04/09	U/A ^c	48°40' - 48°53' N 5°53' - 6°22' E
Midi-Pyrénées	'93, '96, '97, '99 -'01, '03, '04	3	8	11	60	31/08 – 16/09	U/A ^c	43°25' - 44°20' N 0°37' - 1°39' E
Pays de la Loire	'94, '04	2	7	3	60	25/08 – 09/09	U/A ^c	46°28' - 47°26' N 0°59' - 1°13' E
Picardie	'93-'97	3	6	8	60	24/08 – 03/09	10.9	49°15' - 49°53' N 2°17' - 3°19' W
Poitou-Charentes	'93 -'97, '04, '05	6	9	12	60	24/08 – 07/09	12.4	46°0' - 46°35' N 0°12' - 0°59' E
Provence-Alpes-Côte d'Azur	'94, '96, '97, '00, '03	2	5	5	60	26/08 – 17/09	U/A ^c	43°31' - 43°57' N 5°14' - 5°23' E
Rhône-Alpes	'96 -'98, '00, '02	1	7	5	60	24/08 – 02/09	U/A ^c	45°39' - 45°43' N 5°5' - 6°22' E

^a For each region/federal state, long-term mean temperature is expressed as annual mean of daily average temperature (mean of daily minimum and maximum temperatures).

^b For each region/federal state, ranges of latitude (N) - longitude (E-W) refer to distance between most northerly and southerly locations and most easterly and westerly locations, respectively.

^c U/A: unavailable.

Sowing periods varied from July 15 in Thiverval-Grignon (Ile de France) to September 24 in Béziers (Languedoc-Roussillon) and nitrogen fertilisation doses from 0 to 300 kg N ha⁻¹. Daily minimum and maximum temperatures were recorded from the weather stations nearest to the experimental sites.

Model description

In our study, we used two phenological models for OSR, the BRASNAP-PH model developed by Habekotté (1997) and the ‘BBCH-model’, a slightly modified and extended version of the former, capable of predicting development according to the BBCH scale.

BRASNAP-PH model

In this model (Habekotté, 1997) development is characterised by the state variable *DVS*, which takes values of 0 at sowing (S), 1 at emergence (E), 2 at the onset of flowering (OF), 3 at the end of flowering (EF) and 4 at maturity (M), (Tab. 2). *DVS* is calculated by integrating the development rate over time ($dDVS/dt$) numerically, with time steps of one day. The development rate is expressed by the parameter $a_{T,i}$, with *i* the relevant development phase (E, OF, EF, M), and it is assumed to be linearly related to the daily effective temperature (T_{eff}):

$$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,i} \quad 0 \leq DVS \leq 1 \text{ or } 2 \leq DVS \leq 4 \quad (1)$$

T_{eff} is the difference of daily average temperature (T_{day}) minus base temperature ($T_{b,i}$). T_{day} is defined as the mean of daily minimum and maximum temperatures; $T_{b,i}$ differs for each development stage (Tab. 3).

Tab. 2. Differential and conversion equations with corresponding *DVS* and *BBCH* values of BRASNAP-PH and *BBCH* models^a.

Growth period (<i>BBCH</i> range) ^b	BRASNAP-PH model		BBCH model			
	Equation	<i>DVS</i> value	Equation	<i>DVS</i> value	Equation	<i>BBCH</i> value
S (00)		0		0		00
	$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,1}$		$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,1}$	$0 \leq DVS \leq 1$	$BBCH = DVS \times 9$	00 – 09
E (09)		1		1		09
					$\frac{dBBCH}{dt} = \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{sum, cotyledons}}}$	09 – 10
LFD (10-19)				$1 \leq DVS \leq DVS_{50}$	$BBCH = 10 + LFN$	
			$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,2} \times F_p \times F_v$		$\frac{dLFN}{dt} = \frac{T_{\text{eff}}}{Phy}$	10 – 19
	$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,2} \times F_p \times F_v$				$BBCH = 30 + NExtInt$	
STME (30-39)				$DVS_{50} \leq DVS \leq DVS_{50}$	$\frac{dNExtInt}{dt} = \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{sum, internode}}}$	30 – 39
INFE (50-59)			$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,2a}$	$DVS_{50} \leq DVS \leq 2$	$BBCH = 50 + \frac{(DVS - DVS_{50})}{2 - DVS_{50}} \times 10$	50 – 60
OF (60)		2		2		60
FL (60-69)	$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,3}$		$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,3}$	$2 \leq DVS \leq 3$	$BBCH = 60 + (DVS - 2) \times 9$	60 – 69
EF (69)		3		3		69
PDV-M (70-89)	$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,4}$		$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,4}$	$3 \leq DVS \leq 4$	$BBCH = 70 + (DVS - 3) \times 19$	70 – 89
M (89)		4		4		89

^a See Tabs. 3 and 4 for BRASNAP-PH and *BBCH* model parameters, respectively.

^b S: sowing, E: emergence, LFD: leaf development, STME: stem elongation, INFE: inflorescence emergence, OF: onset of flowering, FL: flowering, EF: end of flowering, PDV-M: pod development-maturation, M: maturity.

Tab. 3. Description of parameters included in the BRASNAP-PH model.

Growth period ^a	Parameter	Description (unit)
S-E	$a_{T,1}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	$T_{b,1}$	Base temperature ($^{\circ}\text{C}$)
E-OF	$a_{T,2}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	$T_{b,2}$	Base temperature ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{v,min}$	Minimum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{v,opt1}$	Lowest optimum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{v,opt2}$	Highest optimum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{v,max}$	Maximum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)
	$R_{v,max}$	Maximum rate for vernalisation ($10^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	P_b	Basic photoperiod (h)
	P_{sat}	Saturating photoperiod (h)
OF-EF	$a_{T,3}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	$T_{b,3}$	Base temperature ($^{\circ}\text{C}$)
EF-M	$a_{T,4}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	$T_{b,4}$	Base temperature ($^{\circ}\text{C}$)

^a S: sowing, E: emergence, OF: onset of flowering, EF: end of flowering, M: maturity.

In the period from E to OF, the development rate is also influenced by degree of vernalisation (F_v) and photoperiod (F_p):

$$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,i} \times F_p \times F_v \quad 1 \leq DVS \leq 2 \quad (2)$$

F_v is a state variable with values ranging from 0 (not vernalised) to 1 (fully vernalised), calculated by integrating the vernalisation rate (dF_v/dt) from E until OF or full vernalisation. The relation between dF_v/dt and T_{day} is defined by four cardinal temperatures ($T_{v,min}$, $T_{v,opt1}$, $T_{v,opt2}$, $T_{v,max}$) and the maximum vernalisation rate ($R_{v,max}$). F_p varies between 0 and 1 and is calculated each day from the actual daylength by a linear-plateau function described by the basic photoperiod (P_b) and the saturating photoperiod (P_{sat}).

BBCH model

The phenology of winter OSR was simulated by applying a dynamic semi-empirical approach, following the algorithms developed in the BRASNAP-PH model, modified and extended to simulate OSR phenology according to the BBCH coding system.

As in the basic model, the development stage is characterised by the state variable DVS , calculated as in Eqs. 1 and 2. DVS considers not only the development rate ($a_{T,i}$) influenced by the daily effective temperature (T_{eff}) and the length of the photoperiod (F_p), but also the degree of vernalisation (F_v). F_p and F_v were calculated as in the BRASNAP-PH model. The DVS values are transformed in BBCH codes by conversion equations (Tab. 2). The description and values of parameters included in the BBCH model are shown in Tab. 4.

The model distinguishes six BBCH macro-stages: 0, sowing-emergence (S-E: BBCH 00-09), 1, leaf development (LFD: BBCH 10-19), 3, stem elongation (STME: BBCH 30-39), 5, inflorescence emergence (INFE: BBCH 50-59), 6, flowering (FL: BBCH 60-69) and 7 to 8, pod development-maturation (PDV-M: BBCH 70-89).

Macro-stage 2 (BBCH 20-29) was excluded from the simulation process, because it covers side shoot development and is assumed to be simultaneous with phases STME and INFE. During the winter OSR cycle, the number of side shoots of the main stem is pre-determined early in autumn, but their development occurs later in spring. Following the emergence of leaves, the internodes of the main stem start elongating, while side shoot development from lateral buds is delayed (Jullien et al., 2011). This means that a side shoot does not start elongating at the same time as its bearing internode and, therefore, BBCH 20-29 cannot occur earlier than BBCH 30-39.

According to the above six BBCH macro-stages, the equivalent DVS stages are:

$$DVS = \begin{cases} 0 \leq DVS \leq 1 & \text{S - E (BBCH 00 - 09)} \\ 1 \leq DVS \leq DVS_{30} & \text{LFD (BBCH 10 - 19)} \\ DVS_{30} \leq DVS \leq DVS_{50} & \text{STME (BBCH 30 - 39)} \\ DVS_{50} \leq DVS \leq 2 & \text{INFE (BBCH 50 - 59)} \\ 2 \leq DVS \leq 3 & \text{FL (BBCH 60 - 69)} \\ 3 \leq DVS \leq 4 & \text{PDV - M (BBCH 70 - 89)} \end{cases} \quad (3)$$

Tab. 4. Description of calibrated and cross-calibrated parameters included in BBCH model.

Growth period (BBCH range) ^a	Parameter	Description (unit)	Calibrated value (± s.e.)	Cross-calibrated value (± s.e.)
S-E (00-09)	$a_{T,1}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	6.31 (±1.26)	6.08 (±1.17)
COT (09-10)	$T_{\text{sum, cotyledons}}$	T. sum necessary for cotyledon unfolding ($^{\circ}\text{Cd}$)		19.97 ^b
LFD-STME (10-39)	$a_{T,2}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.07 (±2.23)	2.92 (±2.18)
	$T_{v,\text{min}}$	Minimum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)		-3.72 ^c
	$T_{v,\text{opt1}}$	Lowest optimum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)		0.73 ^c
	$T_{v,\text{opt2}}$	Highest optimum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)		5.38 ^c
	$T_{v,\text{max}}$	Maximum temperature for vernalisation ($^{\circ}\text{C}$)		17.20 ^c
	$R_{v,\text{max}}$	Maximum rate for vernalisation ($10^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1.41 (±1.35)	1.21 (±2.45)
	P_b	Basic photoperiod (h)		5.74 ^c
	P_{sat}	Saturating photoperiod (h)	14.59 (±9.45)	14.70 (±9.78)
	Phy	T. sum for successive unfolded leaves appearance ($^{\circ}\text{Cd}$)	64.05 (±26.02)	69.32 (±27.83)
	DVS_{30}	DVS value at BBCH 30	1.34 (±0.45)	1.36 (±0.52)
	$T_{\text{sum,internode}}$	T. sum for successive extended internodes appearance ($^{\circ}\text{Cd}$)		17.06 ^b
	DVS_{50}	DVS value at BBCH 50		1.5 ^d
INFE (50-59)	$a_{T,2a}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	2.99 (±1.08)	3.64(±1.22)
FL (60-69)	$a_{T,3}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.66 (±2.71)	3.74 (±1.33)
PDV-M (70-89)	$a_{T,4}$	Development rate ($10^{-3} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1.65 (±0.55)	1.60 (±0.48)
S-PDV-M (00-89)	$T_{b,0-89}$	Base temperature ($^{\circ}\text{C}$)		3 ^e

^a S: sowing, E: emergence, COT: cotyledon unfolding, LFD: leaf development, STME: stem elongation, INFE: inflorescence emergence, FL: flowering, PDV-M: pod development-maturation.

^b Parameters estimated from calibration and validation datasets.

^c Original values of BRASNAP-PH model.

^d Constant.

^e Common base temperature was considered during crop cycle.

Assuming optimal seedbed, sowing depth and germination water supply, temperature is the main factor determining the time needed for seedling germination and emergence. The phenological development (*DVS*) during S-E is therefore described as in Eq. (1), considering the development rate ($a_{T,1}$) linearly related to T_{eff} . The corresponding BBCH codes are estimated as:

$$BBCH = DVS \times 9 \qquad 00 \leq BBCH \leq 09 \qquad (4)$$

After seedling emergence, cotyledon unfolding (BBCH 09-10) is taken into account before simulation of the LFD stage. It is described by the ratio between T_{eff} and the temperature sum ($^{\circ}\text{Cd}$) necessary to cover the period from BBCH 09 to 10 ($T_{\text{sum,cotyledons}}$). The corresponding BBCH codes are derived as:

$$\frac{dBBCH}{dt} = \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{sum,cotyledons}}} \qquad 09 \leq BBCH \leq 10 \qquad (5)$$

During LFD and STME, the development rate ($a_{T,2}$) is influenced by the combined effect of temperature, vernalisation and photoperiod, as described in Eq. (2). The end of the LFD period is fixed by parameter DVS_{30} , which defines the value of *DVS* at BBCH 30 (beginning of shooting). The BBCH values for the LFD stage are calculated by considering the number of unfolded leaves:

$$BBCH = 10 + \min(LFN, 9) \qquad 10 \leq BBCH \leq 19 \qquad (6)$$

where *LFN* is the number of unfolded leaves (0-9). Only the first nine leaves are considered, as BBCH 19 means nine or more unfolded leaves. The rate of change of *LFN* is calculated as the ratio between T_{eff} and the phyllochron (*Phy*):

$$\frac{dLFN}{dt} = \frac{T_{\text{eff}}}{Phy} \qquad (7)$$

where Phy is the thermal time interval between the appearance of successive leaves ($^{\circ}\text{Cd}$) and is assumed to be constant during the LFD phase, according to the findings of Miralles et al. (2001) for the first nine leaves.

The length of the STME stage is defined by parameters DVS_{30} and DVS_{50} , which define the DVS values at BBCH 30 (beginning of shooting) and BBCH 50 (beginning of inflorescence emergence), respectively. According to the BBCH coding system, crop development during STME is scheduled by the number of extended internodes $NExtInt$ (0-9), defined by the ratio between T_{eff} and $T_{\text{sum,internode}}$:

$$BBCH = 30 + \min (NExtInt, 9) \quad 30 \leq BBCH \leq 39 \quad (8)$$

$$\frac{dNExtInt}{dt} = \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{sum,internode}}} \quad (9)$$

where $T_{\text{sum,internode}}$ is the thermal time interval between the appearance of successive extended internodes ($^{\circ}\text{Cd}$).

From the onset of INFE until the end of PDV-M, phenology (DVS) is influenced only by temperature, as described in Eq. 1. According to Miralles et al. (2001), Robertson et al. (2002), Thurling and Kaveeta (1992) and Thurling and Vijendra Das (1979), we assumed that daylength affects OSR phenology from emergence until the end of shooting/beginning of inflorescence emergence. However, this assumption diverges from the structure of the BRASNAP-PH model, in which the ‘photoperiod \times temperature’ interaction influences crop phenology until the onset of flowering (Tab. 2). Therefore, in order to define phenological development during INFE phase, a new differential equation defining DVS in relation to T_{eff} was added:

$$\frac{dDVS}{dt} = T_{\text{eff}} \times a_{T,2a} \quad DVS_{50} \leq DVS \leq 2 \quad (10)$$

where $a_{T,2a}$ is the development rate during INFE. The resulting DVS values, applied to Eq. 11, provide the BBCH codes for the period 50-60:

$$BBCH = 50 + \frac{(DVS - DVS_{50})}{2 - DVS_{50}} \times 10 \quad 50 \leq BBCH \leq 60 \quad (11)$$

As assumed above, during FL and PDV-M the developmental rates ($a_{T,3}$ and $a_{T,4}$ for FL and PDV-M, respectively) are affected only by T_{eff} . DVS is then calculated as in Eq. 1. The BBCH codes for FL and PDV-M are estimated by Eqs. 12 and 13, respectively:

$$BBCH = 60 + (DVS - 2) \times 9 \quad 60 \leq BBCH \leq 69 \quad (12)$$

$$BBCH = 70 + (DVS - 3) \times 19 \quad 70 \leq BBCH \leq 89 \quad (13)$$

To simplify the calculation of thermal time and to avoid over-parameterisation of the model, a common base temperature (T_b) was applied for all phenological phases. The high standard errors of the interim calibrated $T_{b,1-4}$ parameters (from ± 2 to 36) indicated a marginal impact of $T_{b,i}$ values on the accuracy of the model output and a high correlation with the $a_{T,i}$ parameters. T_b was therefore kept fixed and set at 3°C, which is the optimal base temperature for winter OSR emergence (Marshall and Squire, 1996).

Other external inputs to the model are daily temperature, latitude from which daylength is derived, and sowing date.

Parameterisation and validation

Both BRASNAP-PH and BBCH models were implemented as submodels within the HUME modelling environment (Kage and Stützel, 1999), which allowed for the use of a non-linear least-squares data-fitting algorithm (Marquardt, 1963) in the stepwise parameterisation approaches described below. Both models were calibrated and validated on two independent datasets. To test the stability and transferability of parameterisation, cross-calibration and validation was applied to the BBCH model. For this purpose the parts of the total datasets used for calibration and validation were exchanged.

BRASNAP-PH model

BRASNAP-PH calibration ($n= 279$; $n=$ number of observations) and validation ($n= 281$) were performed to test the accuracy of the model prediction with respect to our database. Only those datasets containing at least one BBCH code equivalent to the four DVS stages (E, OF, EF, M) were considered in the optimisation procedure. During BRASNAP-PH model parameterisation on the combined datasets of Germany, Italy and France, four periods were distinguished: (1) sowing - emergence, (2) emergence - onset of flowering, (3) onset of flowering - end of flowering and (4) end of flowering - maturity.

In the first parameterisation step, the development rates ($a_{T,i}$) were calibrated together with the base temperatures ($T_{b,i}$). Optimised values for $T_{b,i}$ showed high standard errors, indicating a marginal influence on development rate. Therefore, $a_{T,i}$ were optimised again for the four periods separately, whereas $T_{b,i}$ values were kept, as suggested by Habekotté (1997).

For the second period (emergence - onset of flowering), $a_{T,2}$ was estimated together with the maximum vernalisation rate ($R_{v,max}$) and saturating photoperiod (P_{sat}). The four cardinal temperatures of vernalisation ($T_{v,min}$, $T_{v,opt1}$, $T_{v,opt2}$ and $T_{v,max}$) and the basic photoperiod (P_b) were kept equal to the original values of the BRASNAP-PH model to avoid over-parameterisation. Validation was run with both original and recalibrated parameters.

BBCH model

The parameterisation of the BBCH model was performed including only datasets with at least one BBCH observation, corresponding to the boundary values of the BBCH macro-stages listed in Tab. 2. All French and Italian datasets ($n= 144$ and 577 , respectively) satisfied this requirement; for the German datasets, 596 out of 839 observations were considered. The appropriate datasets for parameterisation were halved, providing the datasets for calibration ($n= 659$) and cross-calibration ($n= 658$). German datasets not suitable for optimisation, i.e., those containing only intermediate BBCH observations between BBCH values for the macro-stages ($n= 243$), were included in the validation ($n= 901$ ($243+658$)) and cross-validation datasets ($n= 902$ ($243+659$)).

In the first optimisation step, $a_{T,1}$ was calibrated considering only BBCH observations from 0 to 9.

In the second step, the length of LFD and STME was considered, with observations of BBCH 50 to estimate $a_{T,2}$ together with P_{sat} and $R_{v,max}$. Subsequently, this phase was divided into LFD and STME by estimating DVS_{30} with only the observations of BBCH 30.

The development rates relating to inflorescence emergence ($a_{T,2a}$), flowering ($a_{T,3}$) and pod development-maturation period ($a_{T,4}$) were optimised separately, considering BBCH observations within the ranges 00-60, 00-69 and 00-89, respectively. To obtain a robust estimation of $a_{T,2}$ and $a_{T,2a}$, it was found necessary to keep DVS_{50} fixed. DVS_{50} was then considered as a constant and set at 1.5.

Lastly, the parameters determining the subdivisions of LFD and STME were optimised. These parameters are independent of DVS . The phyllochron (Phy) was optimised with the BBCH range 10-18. Notifications of BBCH 19 were not taken into account for Phy estimation, because BBCH coding does not distinguish more than nine as the number of unfolded leaves.

For parameters relating to cotyledon unfolding ($T_{sum,cotyledons}$) and stem elongation ($T_{sum,internode}$), the number of relevant observations was insufficient to run their calibration according to the Marquardt algorithm. They were estimated directly from all available data in the calibration and validation datasets. $T_{sum,cotyledons}$ was calculated as the difference between the temperature sum accumulated from BBCH 00 to 10 and from 00 to 09, expressed as average values of all datasets containing the respective observation. $T_{sum,internode}$ was estimated from the slope of the linear regression ($y=bx$) between the number of internodes (BBCH 30-38) vs. the temperature sum ($^{\circ}Cd$) accumulated from the onset of the shooting phase (BBCH 30). The intercept was set at zero, leaving the slope the only functional parameter to calculate $T_{sum,internode}$. Notifications of BBCH 39 were not considered for $T_{sum,internode}$ estimation, because the BBCH scale does not discriminate more than nine as the number of extended internodes.

The four cardinal temperatures of the vernalisation factor and the basic photoperiod were kept, as suggested by Habekotté (1997).

For cross-calibration, the same stepwise approach was applied to the second independent half of the datasets. Calibrated and cross-calibrated parameters were respectively validated and cross-validated on independent datasets.

Statistical evaluation and graphic representations

Model performances were tested estimating the intercept (a), slope (b) and coefficient of determination (R^2) of the linear regressions ($y = a + bx$) of model observations vs. predictions. Analysis of residual errors (observed minus estimated values) was also performed with the statistical measures modelling efficiency (EF) and root mean square error (RMSE) of the 1:1 line ($y = x$). EF (Nash and Sutcliffe, 1970) was calculated as:

$$EF = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

where x_i is the value of the i -th observation and y_i is the value of the i -th model prediction. EF reflects the quality of the prediction curve compared with the data points. Its maximum value is 1 and indicates complete agreement between simulated and measured data, but negative values are also possible, if the model describes the data less well than the mean of observations.

The other statistical parameter used in this study was RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (15)$$

where x_i and y_i are as above and n is the number of observations.

RMSE indicates the average deviations between model prediction and measured data. RMSE values were calculated in terms of both BBCH stages ($RMSE_{BBCH}$) and days ($RMSE_{days}$) at which an observed BBCH stage was reached. Low RMSE values indicate the best agreement of the model parameterisation with observed data.

According to model outputs and the BBCH coding system, the graphic representations of BBCH model performances and the calculation of RMSE values exclude BBCH ranges 20-29 and 40-49.

7.5 Results

BRASNAP-PH model

Parameterisation and validation

The statistical evaluation of the BRASNAP-PH model after re-parameterisation did not reveal any substantial improvements of prediction accuracy (Tab. 5). Considering the validation datasets with all three nations pooled, the optimised model reproduced the whole crop cycle with an $RMSE_{\text{days}}$ of 4.4 days (d) and an EF of 0.96, whilst the BRASNAP-PH model with the original parameter values provided an $RMSE_{\text{days}}$ of 5.5 d and an EF of 0.97. The functional parameters of the regression lines (observed vs. simulated) were comparable between the re-parameterised and original BRASNAP-PH versions. The slopes and intercepts showed values near 1 and 0 respectively, and the coefficients of determination (R^2) were 0.97 for both, confirming good correspondence between simulated and observed stages.

Although the BRASNAP-PH model was developed and tested in north-central European zones (Kiel, Wageningen, Dijon, Lelystad), crop phenology was also predicted quite well in a Mediterranean location such as Legnaro (Veneto, NE Italy). French validation datasets were modelled with the lowest precision with both original and optimised parameters (Tab. 5).

BBCH model

Parameterisation

In the regions/federal states included in the calibration datasets, OSR was sown between July 15 and October 15. Average sowing dates were earlier in Germany (August 23), followed by France (August 30) and Italy (September 25). Crop emergence (S-E) was recorded 101 °Cd ($T_b = 3^\circ\text{C}$) after sowing in France (range: 91-117 °Cd; 6-13 days), 122 °Cd in Germany (range: 67-234 °Cd; 5-16 days) and 171 °Cd in Italy (range: 132-223 °Cd; 9-19 days, data not shown).

After seedling emergence, cotyledons required ~ 20 °Cd ($T_{\text{sum, cotyledons}}$) to unfold completely before the start of the LFD phase (Tab. 4). From the onset of LFD to the end of STME, phenological development is identified as a function of development rate ($a_{T,2}$), T_{eff} , vernalisation and photoperiod (Eq. 2). The vernalisation requirement was fulfilled with a maximum rate ($R_{v,\text{max}}$) of $1.41 \cdot 10^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ °C}^{-1}$, and photoperiod sensitivity was saturated with a daylength of 14.6 h (P_{sat}).

The LFD macro-stage covers $\sim 68\%$ of the simulated vegetative phase (E - onset of INFE), until state variable DVS reaches the value of 1.34 (DVS_{30}). The rate of leaf appearance was assumed to be constant and resulted in a phyllochron (Phy) of 64.1 °Cd.

STME takes place from DVS_{30} to DVS_{50} (1.5) and lasts for the remaining $\sim 32\%$ of the vegetative phase. According to the BBCH scale, this phase is characterised by elongation of the first nine internodes, which each required 17.1 °Cd ($T_{\text{sum,internode}}$) to appear completely extended (Tab. 4). $T_{\text{sum,internode}}$ was estimated by the slope of the linear regression ($y= bx$) between the number of internodes (derived from BBCH 30-38) and the corresponding temperature sum accumulated from the beginning of STME. The resulting linear fit ($n=12$) had a coefficient of determination (R^2) of 0.77 and a slope of 0.058 (data not shown).

The cross-calibration process gave parameter values which were similar to those of the calibration, and the differences between the respective parameter values were always well below the ranges of their standard errors (Tab. 4).

Tab. 5. Statistical evaluation and functional parameters of linear regressions (observed vs. simulated) for BRASNAP-PH model parameterisation and validation conducted with original and optimised parameters.

Dataset	Parameters	Nation	<i>n</i>	Slope	Intercept	R ²	EF	RMSE _{BBCH}	RMSE _{days}
Parameterisation	Originals	All	279	0.98*	0.09***	0.97	0.97	0.14	5.63
	Optimized	All	279	0.95***	0.17***	0.97	0.96	0.17	4.39
Validation	Originals	Germany	50	1.01 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.98	0.98	0.15	3.91
		Italy	167	1.01 ^{ns}	0.04*	0.99	0.98	0.12	5.68
		France	64	0.71***	0.56***	0.89	0.73	0.18	5.81
		All	281	0.98 ^{ns}	0.08***	0.97	0.97	0.14	5.49
	Optimized	Germany	50	0.94*	0.28***	0.97	0.93	0.25	5.31
		Italy	167	0.99 ^{ns}	0.05***	0.99	0.99	0.06	3.23
		France	64	0.65***	0.69***	0.85	0.60	0.22	6.44
		All	281	0.95***	0.15***	0.97	0.96	0.16	4.44

***, **, * and ns: $P \leq 0.001$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$ and $P > 0.05$, respectively for slope $\neq 1$ and intercept $\neq 0$.

Validation

The goodness of the BBCH model calibration and cross-calibration was tested on the independent validation and cross-validation datasets, respectively.

Fig. 1 shows overall model performance for arbitrarily chosen validation datasets of France, Germany and Italy. Before winter, OSR development shifted according to sowing period and was mainly influenced by the temperature sum (T_{sum}). The interaction between T_{sum} , and the photoperiod factor (F_p) later became the main determinant for the crop phenology pattern. The lower temperatures and F_p values which characterised winter at the German and French sites hindered crop development and delayed the continuation of the development in spring. In Italy, crop ontogeny continued even in winter, due to milder temperatures and longer daylengths. Later, the rapid rise of T_{sum} and F_p in spring hastened the shooting phase. The vernalisation factor (F_v) seems to have a marginal influence on OSR development and it was fulfilled earlier in Germany than in France and Italy. By F_p saturation, T_{sum} remained the main environmental factor affecting crop phenology. The greatest T_{sum} , which occurred in Italy during the reproductive phases of the crop cycle, promoted earlier flowering and maturation phases compared with France and Germany.

Statistical evaluation of the prediction accuracy of BBCH model is shown in Tab. 6. Considering the datasets of all three nations, $\text{RMSE}_{\text{BBCH}}$ varied from 2.8 BBCH stages in the validation datasets to 3.2 BBCH stages of the cross-validation datasets. In terms of days (d), mean deviations between model predictions and measured data ($\text{RMSE}_{\text{days}}$) ranged between 21.2 and 26.4 d. Model efficiency (EF) was always close to 1 (~ 0.97), indicating a good match between simulated and measured stages. The slopes and intercepts of the regression fits (observed vs. simulated) significantly differed from 1 and 0 respectively, although the linear regressions did not deviate substantially from the 1:1 lines (Fig. 2) and the coefficient of determination (R^2) never showed values lower than 0.97.

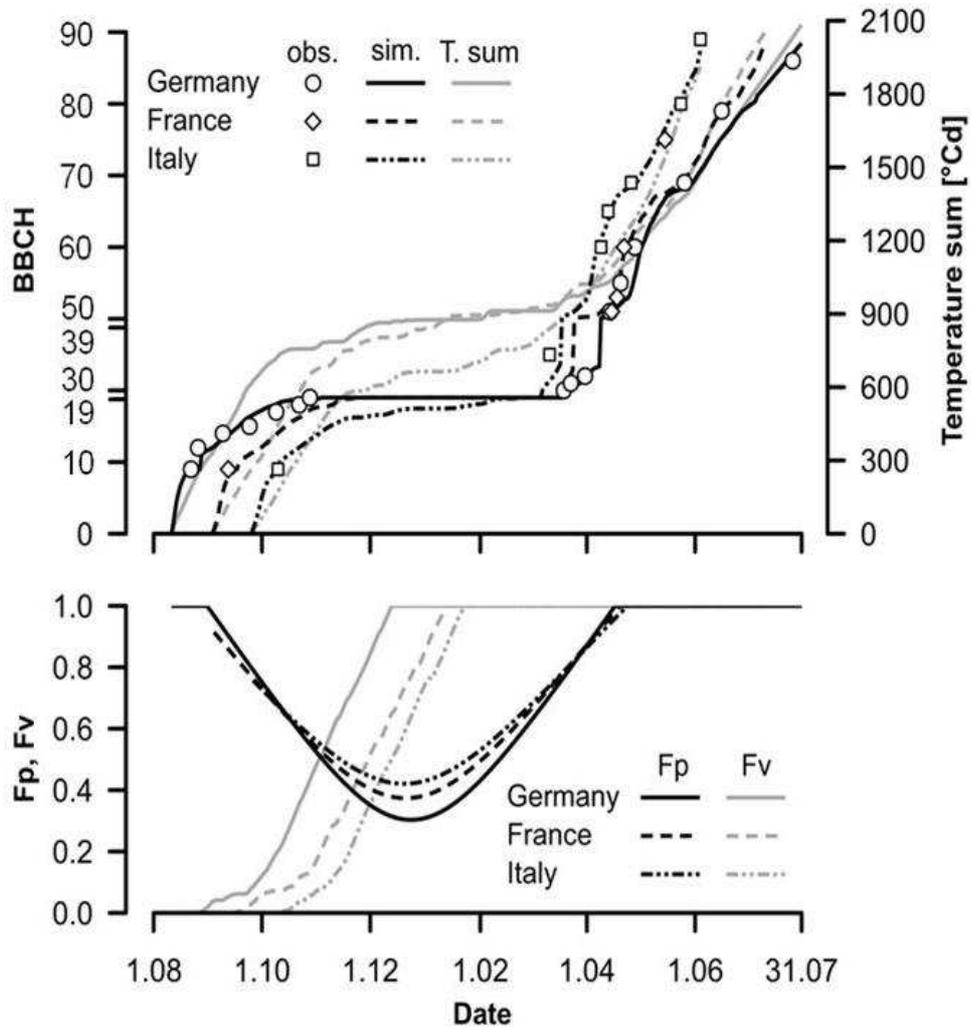


Fig. 1. Overall model performance for arbitrarily chosen validation datasets of Germany (Gerswalde, 2002, 53°17' N - 13°77' E), France (Thiverval-Grignon, 1996, 48°51' N - 1°55' E) and Italy (Legnaro, 2009, 45°21' N - 11°58' E). Top: simulated (black lines) vs. observed BBCH stages (symbols) and temperature sum (grey lines). Bottom: simulated photoperiod factor (F_p), (black lines) and vernalisation factor (F_v), (grey lines).

Particularly accurate results were obtained for crop development prediction with the Italian datasets (Tab. 6). The whole OSR cycle was simulated with $RMSE_{BBCH}$ between 2.1 and 2.3 BBCH stages and $RMSE_{days}$ between 6.8 and 8.5 d. EF was close to 1, with values between 0.98 and 0.99. The German datasets exhibited slightly lower EF values (0.95-0.96), whereas $RMSE_{BBCH}$ (from 3.1 to 3.6 BBCH stages) and $RMSE_{days}$ (from 27.0 to 36.8 d) were higher. For the French datasets, the BBCH model yielded the

lowest EF, and $RMSE_{\text{days}}$ ranged from 7.6 d in the cross-calibration datasets to 29.3 d in the cross-validation ones. $RMSE_{\text{BBCH}}$ was similar to those found for the German datasets (Tab. 6).

The BBCH model was also evaluated for its prediction accuracy in relation to the single BBCH macro-stages. S-E, FL and PDV-M were simulated quite well, although greater imprecision was found for LFD, STME and INFE (Tab. 7). LFD was reproduced with $RMSE_{\text{days}}$ of 23.3 d, despite a low $RMSE_{\text{BBCH}}$ of 2.4 BBCH stages. STME was predicted with moderate values of $RMSE_{\text{BBCH}}$ (3.5 BBCH stages) and $RMSE_{\text{days}}$ (9.5 d), although the model described the data less well than the mean of observations (EF: -0.28). In particular, the model underestimated the BBCH codes at the STME stage, leading to scatter of points from the 1:1 line between BBCH 30 and 39 (Fig. 2). INFE was the phase simulated with the lowest accuracy in terms of BBCH ($RMSE_{\text{BBCH}}$: 4.1 BBCH stages), but a modest error in terms of days was found ($RMSE_{\text{days}}$: 8 d).

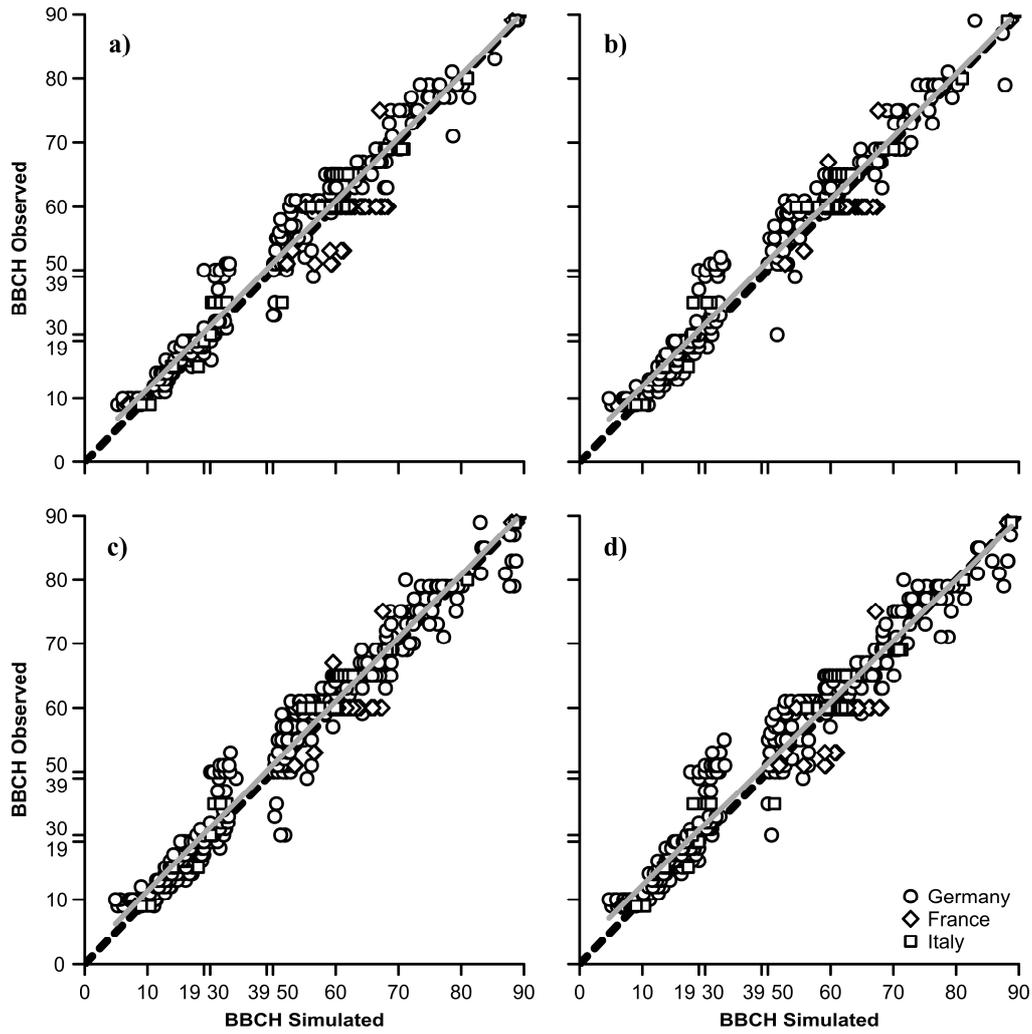


Fig. 2. Observed vs. simulated BBCH stages for calibration (a), cross-calibration (b), validation (c) and cross-validation (d). Full line: linear regression; dashed line: 1/1 line.

Tab. 6. Statistical evaluation and functional parameters of linear regressions (observed vs. simulated) for BBCH model.

Dataset	Nation	<i>n</i>	Slope	Intercept	R ²	EF	RMSE _{BBCH}	RMSE _{days}
Calibration	Germany	299	1.01 ^{ns}	1.58***	0.97	0.95	3.29	32.96
	Italy	287	0.99 ^{ns}	1.33***	0.99	0.99	2.10	8.09
	France	73	0.86***	3.65*	0.86	0.83	4.02	28.29
	All	659	0.98**	1.67***	0.97	0.97	2.92	25.55
Cross-calibration	Germany	297	0.99 ^{ns}	2.32***	0.97	0.95	3.45	29.37
	Italy	290	0.98*	1.74***	0.99	0.98	2.23	6.89
	France	71	0.94 ^{ns}	1.76 ^{ns}	0.86	0.85	3.08	7.64
	All	658	0.98***	2.17***	0.98	0.97	2.93	22.99
Validation	Germany	540	0.99 ^{ns}	1.41***	0.97	0.96	3.11	26.99
	Italy	290	0.99 ^{ns}	1.22***	0.99	0.99	2.11	6.80
	France	71	0.93 ^{ns}	1.71 ^{ns}	0.84	0.82	3.31	9.03
	All	901	0.99 ^{ns}	1.41***	0.97	0.97	2.84	21.19
Cross-validation	Germany	542	0.97***	2.77***	0.96	0.95	3.57	36.76
	Italy	287	0.98***	1.99***	0.99	0.98	2.25	8.45
	France	73	0.88**	3.39*	0.87	0.85	3.68	29.29
	All	902	0.96***	2.65***	0.97	0.96	3.21	26.42

***, **, * and ns indicate $P \leq 0.001$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$ and $P > 0.05$, respectively, for slope $\neq 1$ and intercept $\neq 0$.

Tab. 7. Statistical evaluation of BBCH model, separately by phenological phase^a.

Phenological phase (BBCH range)^b	<i>n</i>	EF	RMSE_{BBCH}	RMSE_{days}
S-E (00-09)	86	0.65	0.98	2.55
LFD (10-19)	179	0.61	2.40	23.33
STME (30-39)	73	-0.28	3.54	9.47
INFE (50-59)	110	0.23	4.14	8.00
FL (60-69)	350	0.47	2.87	6.38
PDV-M (70-89)	103	0.76	3.17	6.59
S-PDV-M (00-89)	901	0.97	2.84	21.19

^a Statistical measures refer to the validation datasets with all three nations pooled.

^b S: sowing, E: emergence, LFD: leaf development, STME: stem elongation, INFE: inflorescence emergence, FL: flowering, PDV-M: pod development-maturation.

7.6 Discussion

This paper presents the widely applicable ‘BBCH model’, which can predict the phenological development of winter oilseed rape (OSR) according to the BBCH coding system. An extensive database of phenological observations collected from experimental sites across Germany, Italy and France was used to calibrate and validate the BBCH model. OSR phenology was simulated by applying a dynamic semi-empirical approach based on the BRASNAP-PH model of Habekotté (1997). According to this approach, the development stage is associated with a single state variable (*DVS*) defined by the development rate and the multiplicative effects of temperature (including vernalisation) and/or photoperiod (Eqs. 1 and 2). The multiplicative concept has been extensively applied to phenological predictions in several crops such as winter wheat (McMaster et al., 2008; Wang and Engel, 1998), soybean (Grimm et al., 1993), sorghum (Ravi Kumar et al., 2009) and potato (Streck et al., 2007). It is considered more biologically realistic to reproduce the interactions between plant development and environmental factors than other approaches, such as the additive or limiting factor methods (Streck et al., 2003).

The high accuracy of Habekotté’s approach in predicting OSR phenology was confirmed in this study. The original BRASNAP-PH model simulated the key phases of crop development (E, OF, EF, M) quite well, even in a Mediterranean location such as Legnaro (NE Italy), (Tab. 5).

In addition, in order to reproduce OSR phenology in more detail and in conformity with the BBCH scale, some modifications were applied to the BRASNAP-PH model (Tab. 2). The main adaptations regarded the period between crop emergence and the onset of flowering, for which the BBCH scale distinguishes three macro-stages: leaf development (LFD), stem elongation (STME) and inflorescence emergence (INFE). Simulation of these phases was implemented in the BBCH model by adding both new boundary values for the state variable (DVS_{30} and DVS_{50}) and a new development rate ($a_{T,2a}$). According to several authors (Miralles et al., 2001; Nanda et al., 1996; Robertson et al., 2002; Thurling and Kaveeta, 1992; Thurling and Vijendra Das, 1979), the period of the crop cycle sensitive to the combined effects of temperature, vernalisation and photoperiod was shortened with respect to Habekotté’s model and extended only from crop emergence until the onset of INFE.

The above adaptations to the BRASNAP-PH model seemed justified, in view of the prediction accuracy shown by the BBCH model (Fig. 1). The model developed in this study was able to reproduce the whole OSR cycle across many years, locations, sowing dates, and genotypes, with $RMSE_{BBCH}$ of ~ 3 BBCH stages, and $RMSE_{days}$ of ~ 21 days (validation datasets with all three nations), (Tab. 6). Comparisons of these RMSE values with those from other phenological models appear quite difficult and of little value, in view of the BBCH model structure and the phenological stages predicted. Implementation of the BBCH scale within OSR phenology simulation allowed us to reproduce developmental phases such as LFD, STME and INFE, for which comprehensive simulations are still missing in the literature, so that constructive confrontations are not possible.

The whole crop cycle in the three nations examined here was reproduced particularly well in Italy, with greater imprecision in France and Germany (Tab. 6). Most of the French notifications regarded the onset of flowering and only a few observations were collected for the other phenological phases (Tab. 1). The lack of sufficient data to characterise the whole crop cycle fully, hindered model parameterisation and validation, producing variable RMSE values, especially in terms of days (Tab. 6). However, the onset of flowering was simulated with a sufficient degree of accuracy. As shown in Fig. 1, notifications of BBCH 60 are equally distributed around the 1:1 lines.

In the German datasets, it should be noted that phenological stages were derived from surveys carried out routinely in national variety trials by many different operators. Therefore, uncertainties in the notification of BBCH stages cannot be excluded.

The BBCH model reproduced S-E, FL and the PDV-M macro-stages quite well (Tab.7), confirming temperature as the main environmental factor affecting the phenological development of these phases. Greater deviation between simulated and observed data was highlighted for LFD, STME and INFE. The highest $RMSE_{days}$ was estimated for LFD, despite a moderate $RMSE_{BBCH}$ (Tab. 7). During LFD (from September - October to re-growth in spring), development rate is depressed by low temperatures and daylengths (Fig. 1), so that simulation errors in terms of BBCH stages correspond to higher variations in terms of days. The BBCH codes related to the LFD phase (10-19) were determined considering the temperature sum required for cotyledon unfolding ($T_{sum,cotyledons}$) and the number of unfolded leaves (LFN). LFN was derived from the ratio between the daily effective temperature ($T_{eff}: T_{med}-T_b$) and the rate of leaf appearance

(i.e., the phyllochron). The application of a constant phyllochron for the first nine leaves distinguished by the BBCH scale matches the evidence of Miralles et al. (2001), who reported two-phase dynamics of leaf appearance throughout plant ontogeny, with a transition point around 10-15 leaves. In particular, with a base temperature (T_b) of 0°C, they calculated higher phyllochron values for the early-emerging leaves (62-84 Cd, n° of leaves ≤ 15), compared with those estimated for the late-emerging ones (25-50 Cd, n° of leaves 10-29). Our calibrated and cross-calibrated leaf appearance rates, obtained with a T_b of 3°C, match the phyllochron range estimated for early-emerging leaves (Tab. 4).

In the STME macro-stage, the underestimation highlighted for the corresponding BBCH codes (30-39) may be due to the value of the parameter $T_{\text{sum,internode}}$. As it was not possible to estimate this parameter in the model by the Marquardt algorithm, $T_{\text{sum,internode}}$ was estimated from the slope of the linear regression between the number of internodes (0-8) vs. the temperature sum (°Cd) recorded from the onset of the shooting phase (BBCH 30). Only a few phenological notifications were appropriate for its derivation (n= 12), most referring to the BBCH range 30-35. The majority of datasets contained only one or no data points in this range, and the accuracy of $T_{\text{sum,internode}}$ could therefore not be assessed. In addition, comprehensive studies on stem elongation are not available in the literature to compare the parameter.

Considering the complex pattern of OSR development during pre-anthesis phases, the definition of both STME and INFE phases is quite difficult with the BBCH criteria. Identification of the moment when internode extension is completed is complex in dicotyledonous species like OSR, characterised by indeterminate growth. In addition, inflorescence expansion occurs simultaneously with the STME phase (Tittone, 1990). This overlap leads to problematic classification of these stages and to arbitrary interpretations of the BBCH scale.

Despite the above sources of uncertainty, the BBCH model did predict STME and INFE phases with acceptable RMSE values, and this is important for its practical application in crop management scheduling. In fact, spring fertilisation and some plant protection treatments, for example against the pollen beetle (*Meligethes aeneus*), take place at the onset of shooting and during the emergence of inflorescences (Sieling and Kage, 2010; Williams, 2004).

7.7 Conclusions

The model presented here is an efficient tool for predicting winter OSR phenology according to the BBCH coding system. It can predict crop development with a sufficient degree of accuracy for a large range of years, sowing dates and locations across France, Germany and Italy. Phenological simulation was particularly precise for NE Italy (Veneto Region), making the BBCH model successfully applicable also to cultivation sites in southern Europe.

Implementation of the BBCH coding system within OSR phenology simulation has led to a detailed description of the whole crop ontogeny, predicting phenological events like leaf development, internode elongation and inflorescence emergence.

The use of an extensive dataset resulted in robust parameterisation of the model which should be valid for most of the European winter OSR growing regions, assuming relevant practical purposes in crop management scheduling.

7.8 References

- Diepenbrock W., (2000). Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Field Crops Res.*, 67: 35-49.
- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Andersen M.N., (1998). Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Res.*, 57: 95-111.
- Gayler S., Wang E., Priesack E., Schaaf T., Maidl F.X., (2002). Modelling biomass growth, N-uptake and phenological development of potato crop. *Geoderma*, 105: 367-383.
- Gomez N.V., Miralles D.J., (2010). Factors that modify early and late reproductive phases in oilseed rape (*Brassica napus* L.): Its impact on seed yield and oil content. *Ind. Crop Prod.*, 34: 1277-1285.
- Grimm S.S., Jones J.W., Boote K.J., Heskeh J.D., (1993). Parameter estimation for predicting flowering date of soybean cultivars. *Crop Sci.*, 33: 137-144.
- Habekotté B., (1997). A model of the phenological development of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res.*, 54: 127-136.
- Hodgson A.S., (1978). Rapeseed adaptation in northern New South Wales. I. Phenological responses to vernalization, temperature and photoperiod by annual and biennial cultivars of *Brassica campestris* L. *Brassica napus* L. and wheat cv. Timgalen. *Aust. J. Agr. Res.*, 29: 693-710.
- Husson F., Wallach D., Vandeputte B., (1997). Evaluation of CECOL, a model of winter rape (*Brassica napus* L.). *Eur. J. Agron.*, 8: 205-214.
- Jullien A., Mathieu A., Allirand J.M., Pinet A., De Reffye P., Cournède P.H., Ney B., (2011). Characterization of interactions between architecture and source-sink relationships in winter oilseed rape (*Brassica napus*) using the GreenLab model. *Ann. Bot.*, 107: 765-779.
- Kage H., Stützel H., (1999). HUME: An object oriented component library for generic modular modelling of dynamic systems. In: Donatelli M., Stockle C., Villalobos F., Villar Mir M., (Eds.). *Modelling Cropping Systems*. European Society of Agronomy, Lleida, pp. 299-300.
- Lancashire P.D., Bleiholder H., Langelüddecke P., Stauss R., Van den Boom T., Weber E., Witzemberger A., (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.*, 119: 561-601.
- Marquardt D.W., (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11: 431-441.
- Marshall B., Squire G.R., (1996). Non-linearity in rate-temperature relations of germination in oilseed rape. *J. Exp. Bot.*, 47: 1369-1375.

- McMaster G.S., White J.W., Hunt L.A., Jamieson P.D., Dhillon S.S., Ortiz-Monasterio J.I., (2008). Simulating the Influence of Vernalization, Photoperiod and Optimum Temperature on Wheat Developmental Rates. *Ann. Bot.*, 102: 561-569.
- Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hack H., Hess M., Lancashire P.D., Schnock U., Stauss R., Van den Boom T., Weber E., Zwerger P., (2009). The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants - history and publications. *J. Für Kulturpflanzen*, 61: 41-52.
- Miralles D.J., Ferro B.C., Slafer G.A., (2001). Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *Field Crops Res.*, 71: 211-223.
- Mirschel W., Wenkel K.O., Schultz A., Pommerening J., Verch G., (2005). Dynamic phenological model for winter rye and winter barley. *Eur. J. Agron.*, 23: 123-135.
- Nanda R., Bhargava S.C., Tomar D.P.S., Rawson H.M., (1996). Phenological development of *B. campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata* grown in controlled environments and from 14 sowing dates in the field. *Field Crop Res.*, 46: 93-103.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10: 282-290.
- Rathke G.W., Behrens T., Diepenbrock W., (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 117: 80-108.
- Ravi Kumar S., Hammer G.L., Broad I., Harland P., McLean G., (2009). Modelling environmental effects on phenology and canopy development of diverse sorghum genotypes. *Field Crops Res.*, 111: 157-165.
- Robertson M.J., Asseng S., Kirkegaard J.A., Watkinson A.R., Holland J.F., Wratten N., Potter T.D., Burton W., Walton G.H., Moot D.J., Farre I., (2002). Environmental and genotypic control of time to flowering in canola and Indian mustard. *Aust. J. Agr. Res.*, 53:793-809.
- Sieling K., Kage H., (2010). Efficient N management using winter oilseed rape. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 30: 271-279.
- Streck N.A., Matielo de Paula F.L., Bisognin D.A., Heldwein A.B., Dellai J., (2007). Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agr. Forest Meteorol.*, 142: 1-11.
- Streck N.A., Weiss A., Xue Q., Baenziger P.S., (2003). Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. *Agric. Forest Meteorol.*, 115: 139-150.
- Thurling N., Kaveeta R., (1992). Yield improvement of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in low rainfall environments. I. Utilization of genes for early flowering in primary and secondary gene pools. *Aust. J. Agr. Res.*, 43: 609-622.

- Thurling N., Vijendra Das D., (1979). The relationship between pre-anthesis development and seed yield of spring rape (*Brassica napus* L.). Aust. J. Agric. Res., 31: 25-36.
- Tittonel E.D., (1990). Evènements liés à l'évolution florale chez le colza (*Brassica napus* L. var *Oleifera* Metzg.). Thèse de doctorat thesis. Université Paris 6, Paris.
- Wang E., Engel T., (1998). Simulation of phenological development of wheat crops. Agr. Syst., 58: 1-24.
- Weber E., Bleiholder H., (1990). Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse - mit Abbildungen. Gesunde Pflanzen, 42: 308-321.
- Williams I.H., (2004). Advances in insect pest management of oilseed rape in Europe, in: Horowitz, A.R., Ishaaya, I. (Eds.) Insect pest management: field and protected crops. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, pp. 181-208.

Capitolo 8

Conclusioni generali

La definizione di un idoneo itinerario agronomico in grado di sostenere la resa rappresenta il principale limite al consolidamento del colza invernale da olio negli avviamenti nazionali e nella filiera bioenergetica di riferimento. Le strategie perseguibili per mitigare tale criticità devono uniformarsi alle attuali esigenze in materia di sostenibilità ambientale ed economica. In tal senso risulta imprescindibile la definizione di una tecnica agronomica coerente con la sito-specificità dell'areale di possibile diffusione e con la più idonea scelta varietale.

Per l'areale Padano-Veneto, l'ottimizzazione dell'itinerario tecnico deve avvenire attraverso un impiego diversificato degli input agronomici tra materiali a taglia convenzionale (ibridi CHH e varietà a impollinazione libera) e le cultivar ad *habitus* vegetativo ridotto di recente costituzione (ibridi CHH semi-nani). Di fatto, i risultati raggiunti in questa tesi di dottorato sottolineano l'impossibilità di definire una tecnica colturale univoca per i genotipi disponibili nel panorama varietale dell'oleifera.

Gli ibridi tradizionali sembrano contraddistinti da un potenziale produttivo elevato, avvicinabile anche con tecniche colturali *low-input* improntate sull'adozione di basse densità di semina (<40 semi m^{-2}) e apporti azotati moderati (~ 120 kg N ha^{-1}). La coltivazione di tali genotipi è raccomandabile altresì in un'ottica di salvaguardia ambientale, poiché contraddistinti da una migliore efficienza d'uso dell'azoto (NUE). Questa caratteristica è riconducibile a un efficace assorbimento dell'N disponibile nel sistema colturale (NUpE), in funzione di un maggiore accrescimento radicale (biomassa e lunghezza). Il sistema radicale espanso degli ibridi convenzionali permette una rapida colonizzazione della rizosfera e un ampio accesso alle risorse minerali e idriche fruibili nel suolo.

Gli ibridi semi-nani necessitano, invece, di una maggiore intensificazione del management colturale per massimizzare il proprio potenziale produttivo, risultato comunque modesto e soggetto a variabilità interannuale. Il ridotto vigore vegetativo che caratterizza tali tipologie genetiche deve essere compensato attraverso l'applicazione di elevati investimenti (>60 semi m^{-2}) e considerevoli apporti azotati (~ 200 kg N ha^{-1}). La bassa attitudine di questi genotipi alla realizzazione di itinerari agronomici *low-input* è dovuta anche a una scarsa NUE, la quale esporrebbe il sistema colturale a tutti quei rischi ambientali legati alla lisciviazione azotata. La modesta efficienza d'uso di N espressa dal materiale ad *habitus* contenuto è risultata legata a una NUpE limitata e a un minore sviluppo radicale. Considerando invece l'altra componente della NUE, ovvero

l'efficienza d'utilizzo di N (NUtE), l'ibrido semi-nano ha palesato i valori migliori in funzione di un elevato Harvest Index. E' auspicabile quindi, che il miglioramento dell'indice di raccolta sia perseguito maggiormente dai processi di selezione, anche degli ibridi convenzionali, allo scopo di potenziarne ulteriormente le performance sia produttive che ambientali.

Dalle suddette evidenze sperimentali è deducibile quindi, che gli attuali ibridi semi-nani non costituiscono ancora una valida alternativa ai genotipi più tradizionali. Ciò nonostante, in condizioni ambientali particolari –e.g., areali contraddistinti da suoli con abbondante dotazione di sostanza organica– l'adozione di materiali a taglia ridotta potrebbe rappresentare una scelta varietale conveniente. In tali circostanze, i genotipi ad *habitus* contenuto compenserebbero le loro limitate performance produttive e le elevate necessità tecniche, garantendo importanti vantaggi agronomici legati a una bassa incidenza dell'allettamento.

Le varietà a impollinazione libera hanno palesato rese in seme generalmente inferiori a quelle dei genotipi ibridi. Tuttavia, la produttività delle cultivar tradizionali è massimizzabile con un utilizzo razionale di input agronomici (~40 semi m⁻² e 150 kg N ha⁻¹). Tale caratteristica, associata al modico prezzo della semente, rende l'impiego di questi genotipi particolarmente interessante per le coltivazioni nazionali, molto spesso relegate a suoli poco fertili e dalle scarse potenzialità produttive.

Considerando il fattore 'epoca di semina', l'anticipo delle operazioni nella prima decade di settembre è una strategia agronomica perseguibile con successo indipendentemente dalla scelta varietale. Nel caso in cui l'organizzazione aziendale o le condizioni meteo rendessero difficile l'applicazione di questa pratica, è consigliabile basare il sistema colturale su genotipi a taglia convenzionale.

I risultati descritti in questo lavoro di tesi, oltre a contribuire in maniera significativa alla definizione di adeguati management colturali e idonee scelte varietali, rappresentano una solida base su cui sviluppare una carta della coltivabilità dell'oleifera. La stesura di quest'ultima, già redatta per altre specie diffusamente coltivate (e.g., soia), è auspicabile per promuovere uno stabile e proficuo inserimento del colza nei sistemi colturali nazionali. In tal senso, risulterebbe utile estendere l'indagine sulle risposte morfo-fisiologiche e produttive delle principali tipologie genetiche della specie, ad altre pratiche agronomiche, quali le lavorazioni preparatorie del terreno e la gestione delle popolazioni patogene (e.g., *Leptosphaeria maculans* e *Sclerotinia sclerotiorum*).

A supporto dei processi decisionali coinvolti nell'ottimizzazione e programmazione (i.e., scelta del momento di intervento) dell'itinerario agronomico assumerebbe particolare rilevanza l'impiego del '*BBCH model*'. Tale modello si è rivelato un efficace strumento previsionale della fenologia del colza invernale in molteplici areali Europei caratterizzati da diverse tecniche colturali e scelte varietali.

Ringraziamenti

Sono molte le persone che sento di ringraziare in questa occasione.

La loro presenza e i loro consigli sono stati essenziali per farmi raggiungere questo importante traguardo.

Il mio primo ringraziamento va al Prof. Giuliano Mosca per avermi permesso di cominciare e terminare questa esperienza, dimostrandosi sempre disponibile a sostenermi e istruirmi.

Alla Dott.ssa Federica Zanetti va la mia riconoscenza per aver creduto in me, per avermi incoraggiato, per l'amicizia che è nata in questi anni di collaborazione.

Una dedica particolare ai miei genitori e a mie sorelle per non aver mai smesso di spronarmi.

A Stefano, Giuseppe e a tutti gli altri colleghi del gruppo di 'coltivazione erba-
cee' per aver condiviso con me tanti momenti di lavoro e di riflessione.

Un grazie a tutte le persone dell'Azienda Agraria 'L. Toniolo' che hanno contribuito alla realizzazione delle prove, in particolare Adriano, Graziella e Mirco.

Ringrazio infine i miei amici, su tutti, Enrico e Valentina per la loro compagnia.