



**Università  
degli Studi  
di Palermo**

AREA QUALITÀ, PROGRAMMAZIONE E SUPPORTO STRATEGICO  
SETTORE STRATEGIA PER LA RICERCA  
U. O. DOTTORATI

Dottorato di Ricerca in Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali  
Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali  
Settore Scientifico Disciplinare di Agronomia e Coltivazioni Erbacee

La consociazione di *Vicia lens* (lenticchia) e *Triticum turgidum* subsp.  
*durum* (frumento duro) in ambiente mediterraneo: potenzialità e valore  
agronomico al variare di alcuni fattori dell'agrotecnica

IL DOTTORE  
**Davide Borgia**

IL COORDINATORE  
**Prof. Vincenzo Bagarello**

IL TUTOR  
**Prof. Dario Giambalvo**

IL CO-TUTOR  
**Prof. Alfonso Salvatore Frenda**

CICLO XXXV  
A.A. 2022/2023

# Sommario

<b>1. Introduzione</b> .....	<b>2</b>
Premessa .....	2
Legumi da granella – colture.....	3
Consociazioni – generalità.....	6
Vantaggi potenziali delle consociazioni .....	7
Problematiche applicative .....	8
Lenticchia.....	9
Consociazioni frumento-lenticchia .....	10
Obiettivi e articolazione dell'attività di ricerca .....	12
<b>2. Prove sperimentali</b> .....	<b>13</b>
Sito sperimentale .....	13
<b>Prova 1: Influenza della diversità genotipica e dei rapporti consociativi nella consociazione agraria frumento duro - lenticchia</b> .....	<b>15</b>
Obiettivo.....	15
Materiali e metodi .....	15
Risultati .....	25
<b>Prova 2: Ruolo della precessione colturale nella consociazione frumento duro-lenticchia</b> .....	<b>39</b>
Obiettivo.....	39
Materiali e metodi .....	39
Risultati .....	45
<b>Prova 3: Effetto della disposizione spaziale nella consociazione agraria frumento duro-lenticchia</b> .	<b>60</b>
Obiettivo.....	60
Materiali e metodi .....	60
Risultati .....	64
<b>3. Discussione</b> .....	<b>77</b>
<b>4. Conclusioni</b> .....	<b>93</b>
<b>5. Bibliografia</b> .....	<b>94</b>
<b>6. Altri Contributi</b> .....	<b>98</b>

# 1. Introduzione

## *Premessa*

La richiesta di soluzioni tecnico-applicative in grado di rispondere alle attuali pressanti necessità in termini di sostenibilità ambientale, mantenimento della fertilità dei suoli, tutela dell'agro-biodiversità e necessità di assicurare adeguate produzioni di beni alimentari, in un contesto reso sempre più incerto e difficile dai cambiamenti climatici in atto, necessita un approccio che guardi quanto più possibile alla complessità dei sistemi agricoli ed alla necessità di affrontare in maniera quanto più possibile organica e unitaria le sfide che i problemi sopra accennati pongono.

Nel generale contesto in cui nel mondo occidentale si devono trovare soluzioni ai problemi creati dai modelli agricoli industriali ed intensivi, ad alto fabbisogno di input esterni e con numerose esternalità ambientali (ma anche socio-economiche) negative, i sistemi colturali erbacei rivestono un ruolo cruciale. Essi, infatti, si estendono sulle più grandi superfici di terreno agricolo e provvedono nella maggior parte dei casi alla produzione delle “*commodities*” di base per gli equilibri alimentari di tutte le società complesse; da tali tipologie di colture dovrebbe dunque passare in maniera preponderante il cambiamento di tecniche, tecnologie e più in generale di approccio alla gestione dell'agroecosistema.

Fra le fondamentali categorie di beni agricolo-alimentari prodotti nei sistemi erbacei sono da annoverare certo ai primi posti i cereali e i legumi, cui si può, in termini generali, attribuire nell'intero sistema di approvvigionamento alimentare la funzione preponderante di fonte, rispettivamente, di carboidrati e proteine, siano essi destinati al consumo umano per via diretta o indiretta, sotto forma di mangimi e foraggi per l'alimentazione zootecnica.

Le diete dei paesi occidentali hanno visto, a partire in particolare dalla seconda metà del secolo scorso, una progressiva sostituzione delle fonti proteiche di origine vegetale con quelle di origine animale, vale a dire in sostanza la sostituzione degli alimenti a base soprattutto di legumi con la carne e altri derivati animali.

Tale cambiamento, come ormai si riconosce, porta con sé una serie di conseguenze problematiche, tanto sul piano della sostenibilità agricola e ambientale, quanto su quello della salubrità delle diete (Reynolds et al. 2023).

A parità di contenuto calorico e proteico, gli alimenti di origine animale hanno un impatto ambientale notevolmente superiore rispetto a quelli di origine vegetale, in misura tanto maggiore quanto più processati siano quelli di derivazione animale.

L'impatto ambientale riguarda la superficie agricola necessaria, il consumo di acqua e altre risorse, gli inquinanti immessi nell'ambiente, fra cui in misura rilevante i gas ad effetto serra.

Nelle diete dei paesi occidentali (quelle europee ed italiane non escluse), le maggiori evidenze mostrano ormai chiaramente che un passaggio deciso a fonti proteiche diverse da quelle animali sarebbe quantomai auspicabile sia per conseguire diete più salubri, e quindi minori problemi sociosanitari a livello di popolazione generale, sia ridurre l'impatto ambientale delle diete medesime (Alandia et al. 2020; Willett et al. 2019).

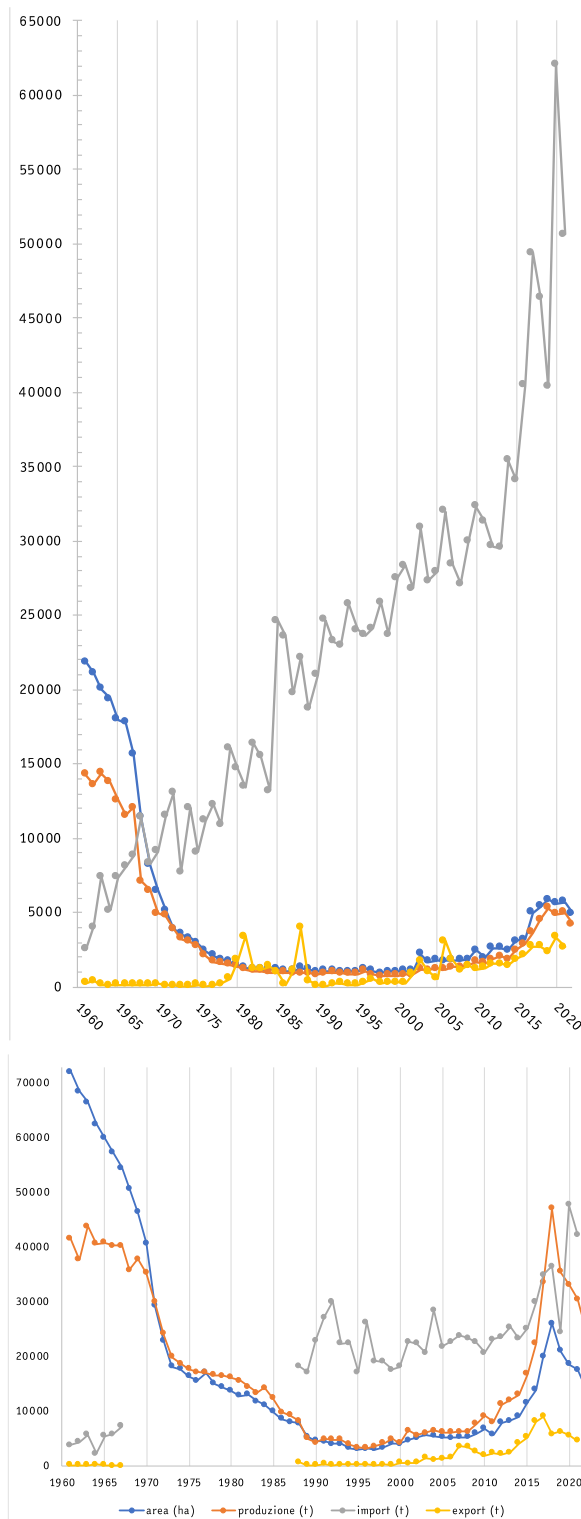
### ***Legumi da granella – colture***

In questo quadro, occorre notare che le produzioni italiane (e più in generale europee) di legumi da granella per consumo umano sono ampiamente al di sotto dei consumi interni, che vengono soddisfatti in larga parte tramite le importazioni estere (Ghelfi et Palmieri, 2017; Kezeya et al. 2019 e 2020; Fig. 1).

In Europa (dati Eurostat – UE a 27 Stati) nel 2021, su un totale di 98,57 milioni ettari a seminativi (terre arabili), 52,49 milioni (53%) risultano destinati ai cereali (nel loro complesso) per la produzione di granella, mentre alle leguminose per la produzione di granella sono destinati 2,12 milioni di ha (2,15%).

Vi sono del resto, com'è chiaro, delle rilevanti ragioni per cui tali colture sono state progressivamente abbandonate nei sistemi agricoli europei e per cui esse faticano non poco a reinserirvisi.

Storicamente, nel secondo dopoguerra il consumo, di lunga tradizione, dei legumi secchi (fava, cece, lenticchia, fagiolo, cicerchia, etc.) è andato progressivamente calando. Per alcuni di questi prodotti, il consumo si è sostanzialmente azzerato fino a pochissimi anni fa (ad es. per la cicerchia), o è rimasto limitato a ristrette località.



**Figura 1.1.** Superficie investita, produzione interna, importazioni ed esportazioni di lenticchia (pannello superiore) e cece (pannello inferiore) in Italia. Fonte: FAOSTAT-ISTAT

Mentre dunque da un lato la domanda interna calava, le produzioni di tali colture, tanto in termini di superfici investite quanto in termini di produzione assoluta, calavano in maniera più che proporzionale e la dipendenza dalle importazioni cresceva progressivamente (FAOSTAT – ISTAT; figura 1.1). Il quadro attuale mostra dunque da un lato un deciso decremento del consumo procapite “apparente” (determinato cioè dal semplice saldo fra produzione interna, importazioni ed esportazioni; comprende dunque i consumi dei non residenti e le utilizzazioni industriali) dei legumi secchi nel loro complesso. Tuttavia, è interessante notare che al contrario, per alcuni prodotti specifici, vi è stato un incremento del consumo procapite, rispetto ai primi dati disponibili (1961); ad es. per la lenticchia tale valore è cresciuto dai circa di 330 gr/anno procapite nel 1961 ai quasi 900 gr/anno procapite attuali-

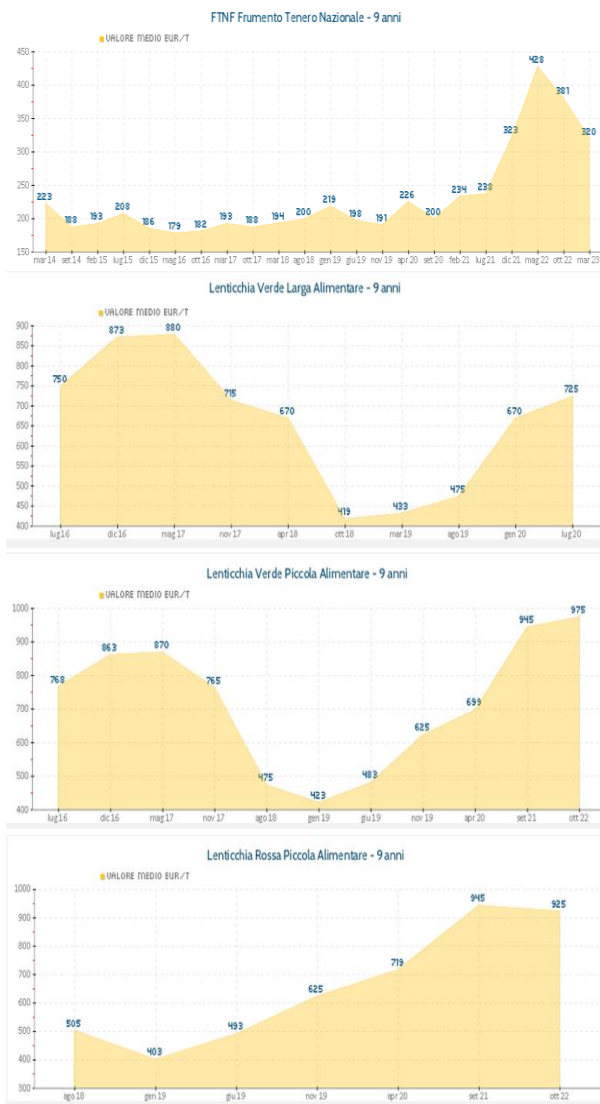
Le problematiche tecnico-economiche legate alle colture dei legumi da granella sono numerose, e in buona parte spiegano la ragione del loro declino e della parallela difficoltà di reintrodurle.

In una prospettiva generale, occorre notare che con l’avvento dei fertilizzanti azotati a basso costo e su larga scala, una delle fondamentali funzioni agronomiche di tali colture, ovvero il contributo al mantenimento della fertilità dei terreni per tramite della fissazione simbiotica dell’azoto atmosferico e il conseguente arricchimento in composti azotati dei terreni, veniva a perdere di importanza. Essa poteva infatti essere surrogata attraverso i fertilizzanti di sintesi, consentendo di semplificare drasticamente - se non abolire del tutto - le rotazioni agricole usate per secoli, a vantaggio della quasi mono-succezione delle colture di periodo in periodo più redditizie, in particolare dei cereali.

Tale cambiamento avviene com’è noto nel più ampio contesto di una completa rivoluzione dei sistemi agricoli, in particolare in Occidente, che vengono radicalmente semplificati a favore di modelli ad alta industrializzazione ed alta dipendenza dagli input esterni, fra i quali appunto, in primo luogo, i fertilizzanti azotati.

Come ormai si riconosce, peraltro, tali sistemi hanno portato ad una grave riduzione dell’agrobiodiversità, a cominciare da quella a livello dei micro-ambienti derivati dalla presenza di molte e diverse specie in coltura (impollinatori, microflora ecc.), e in particolare per quel che riguarda la ricchezza del patrimonio genetico delle specie coltivate, sempre più ristretto con l’uso prevalente delle varietà commerciali e la dismissione delle varietà ed ecotipi locali, gran parte dei quali-sono da considerarsi completamente o quasi completamente estinti (Khoury et al. 2022).

Negli ultimi decenni, alla luce anche di molte altre criticità, prima fra tutte il cambiamento climatico globale in atto, si è progressivamente affermata la consapevolezza della necessità di un cambiamento deciso di approccio, in grado, in particolare, di limitare l’impiego di input esterni nei sistemi agricoli e di aumentare le capacità di adattamento delle colture a condizioni di instabilità e stress climatici.



**Figura 1.2.** prezzo medio di 9 anni di frumento e lenticchia in Italia. Fonte: Bollettini AMC (Associazione Meridionale Cerealisti)

Se da un lato, la fonte prevalente di azoto (e dunque di proteine) nella dieta della popolazione si è andata spostando sui derivati animali, la fonte di azoto dei sistemi agricoli si è spostata sui fertilizzanti di sintesi chimica, facilmente disponibili e a buon mercato.

Attualmente, si riconosce ormai in maniera generale che è urgente la necessità di ridurre l'impiego di fertilizzanti azotati, per mitigare al tempo il rilascio di nitrati nell'ambiente, le emissioni in atmosfera di gas a effetto serra (N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>) derivati dai processi di denitrificazione nel suolo e dai processi industriali altamente energivori necessari per la loro produzione.

Nell'ottica della sempre maggior sostenibilità ambientale complessiva cui dovrebbero orientarsi i sistemi agricoli, la (re)introduzione delle leguminose negli ordinamenti colturali è tanto fondamentale – per il ruolo cruciale di azotofissatrici, oltre che più in generale per contribuire alla diversificazione degli agroecosistemi – quanto assai spesso problematica: gli agricoltori sono sovente riluttanti ad inserire i

legumi da granella fra le proprie colture, dato che i vantaggi agronomici finiscono in molti casi con l'essere di modesta entità rispetto alle problematiche tecniche ed economiche che esse pongono.

Le ragioni principali del declino delle colture dei legumi da granella (in particolare di quelle a ciclo autunno-vernino da granella secca) in Europa sono legate alle criticità tecnico-economiche ad esse connesse, quali la resa spesso bassa, le difficoltà in alcuni aspetti della tecnica agronomica, come la gestione delle infestanti, i problemi di allettamento e la scarsa altezza delle piante (ad es. per la lenticchia) con i conseguenti problemi di meccanizzazione della raccolta (Mahmood et al. 2018).

Oltre a ciò, è da notare anche il complessivo contesto economico sfavorevole, nel quale tali colture spesso a stento sono remunerative. Le rese delle leguminose per unità di superficie sono infatti in linea di massima molto inferiori rispetto ai cereali più importanti (frumento, mais); facendo un confronto approssimativo, ad es., la resa media della lenticchia in Italia si aggira negli ultimi anni

intorno a 0,85 t/ha (dati FAOSTAT-ISTAT), mentre il suo prezzo sulle borse merci, come grande media fra le principali categorie commerciali, si aggira (dal 2015) intorno a 680 € per t; per il frumento (i dati FAO non distinguono fra tenero e duro) la resa si attesta intorno a 4 t/ha e il suo prezzo (come media fra tenero e duro degli ultimi anni delle categorie “nazionale fino”) sta intorno a 270 € per t (Fig. 1.2; dati dedotti dai bollettini pubblicati dalla Associazione Meridionale Cerealisti). Sulla base di questi dati (invero assai approssimati – ma che pure possono fornire un quadro realistico della situazione generale) si può stimare che da 1 ha di frumento si possano ricavare come grande media circa 1080 € di PLV, contro i circa 580 € da 1 ha di lenticchia.

Risulta dunque chiaro, anche al netto delle oscillazioni di prezzo, che per l’agricoltore risulta in genere un rischio maggiore la semina della lenticchia, soggetta peraltro a rischio molto più elevato di fallimento della coltura, e ciò anche a fronte del prezzo assai più favorevole che essa potrebbe scontare. Appare chiaro del resto che la situazione potrebbe cambiare in maniera anche drastica sulla scala locale e della singola azienda, in funzione ad es. soprattutto del canale effettivo di commercializzazione dei prodotti).

### ***Consociazioni – generalità***

L’impiego delle consociazioni potrebbe rappresentare potenzialmente uno dei mezzi per affrontare questi limiti e contraddizioni, e costituisce una prospettiva che gode di consenso crescente, per quanto la tecnica rimanga ancora scarsamente applicata.

Si intende per consociazione la coltivazione di due o più specie vegetali contemporaneamente sullo stesso appezzamento, in maniera che le due componenti siano entrambe presenti per una significativa frazione del ciclo colturale di entrambe.

Le potenzialità - quantomeno teoriche - delle consociazioni sono ben note (Wiley 1979; Lithourgidis et al. 2001; Hauggaard-Nielsen et al. 2008; Martin-Guay et al. 2018).

Il meccanismo fondamentale che giustifica l’impiego delle consociazioni - e in gran parte ne spiega i vantaggi - è quello che in ecologia prende il nome di “differenziazione della nicchia ecologica”.

Le comunità naturali (tanto al livello di fitocenosi che, nel loro complesso, di biocenosi) non sono praticamente mai costituite da una sola -né da pochissime- specie; al contrario, diverse specie (normalmente molte specie vegetali e innumerevoli altre) convivono, ciascuna di solito rappresentata da svariati genotipi diversi.

È questa una condizione radicalmente diversa rispetto a quanto si verifica – ad esempio – in un campo di frumento odierno in monocoltura, nel quale una singola varietà, di norma un singolo genotipo, sfrutta (o, nei desiderata dell’agricoltore, si vorrebbe che sfrutti) quanto più spazio e risorse disponibili, e qualsiasi altra specie vegetale presente è considerata un’infestante sgradita la

cui presenza può essere tutt'al più tollerata secondo che si giudichi il suo effetto più o meno gravemente negativo.

Che la produttività complessiva di un ecosistema sia, in linea generale, positivamente correlata alla sua complessità è un principio riconosciuto da tempo<sup>1</sup> (Tilman et al. 1997, 2001 e 2006): ciò si spiega in termini generali con il fatto che entità biologiche diverse hanno diverse esigenze in termini di quantità e natura degli elementi nutritivi richiesti, di acqua e di luce, loro modalità e tempi di utilizzazione, utilizzazione dello spazio ed esigenze climatiche. Ciò consente nel complesso un'utilizzazione più completa ed efficiente delle risorse disponibili ed una maggior produzione complessiva di biomassa.

D'altro canto, nei sistemi agricoli a maggior produzione di biomassa totale non corrisponde necessariamente una maggiore resa di prodotto utile.

Nello specifico delle consociazioni agrarie, il modello probabilmente più diffuso fra le consociazioni erbacee è quello che vede l'associazione di un cereale con una leguminosa (Książak et al 2023).

Le esigenze normalmente relativamente elevate di azoto da parte dei cereali e la capacità di fissare l'azoto atmosferico per via simbiotica da parte delle leguminose giustificano sostanzialmente la preminenza di tale modello, che comporta dunque – potenzialmente – un notevole livello di “differenziazione di nicchia” rispetto ad uno degli elementi più facilmente limitanti, nonché quello preponderante fra gli input esterni di sintesi. L'associazione fra specie delle famiglie Poacee e Fabacee è peraltro assai comune nelle fitocenosi naturali erbacee (Begon et Townsend 2021).

### ***Vantaggi potenziali delle consociazioni***

Il principale vantaggio agronomico delle consociazioni fra un cereale e un legume per la produzione di granella risiede nell'aumento della produzione a confronto con le medie delle rispettive colture pure. Tale vantaggio è sinteticamente rappresentato dal LER (Land Equivalent Ratio), uno dei più comuni indici impiegati per valutare l'efficienza delle consociazioni (che indica quanta superficie sarebbe necessaria per produrre lo stesso quantitativo dei due prodotti coltivati in coltura pura rispetto alla rispettiva consociazione; il valore 1 indica parità fra i due sistemi, maggiore di 1 indica un vantaggio della consociazione (Mead et Willey 1980).

La letteratura attesta che un LER totale maggiore di 1 è da considerarsi sostanzialmente la norma in questo tipo di consociazioni, dimostrando una maggiore efficienza nell'utilizzazione delle risorse (Bedoussac et al. 2015; Martin-Guay et al. 2018).

---

<sup>1</sup> “It has been experimentally proved, that if a plot of ground be sown with one species of grass, and a similar plot be sown with several distinct genera of grasses, a greater number of plants and a greater weight of dry herbage can be raised in the latter than in the former case. The same has been found to hold good when one variety and several mixed varieties of wheat have been sown on equal spaces of ground.” C. Darwin, *The origin of species*, 1859



I diversi meccanismi ecologici di complementarità (necessità differenziate delle diverse specie in termini di utilizzazione delle risorse; si può parlare di complementarità spaziale, temporale e chimica - Brooker et al. 2015) nell'utilizzazione delle risorse e di facilitazione (interazioni positive, non-competitive ed anche di carattere non trofico che si stabiliscono fra differenti specie vegetali limitrofe - Brooker et al. 2008, 2015) risultano quindi nella maggior parte dei casi compensare gli effetti di competizione di una specie nei confronti dell'altra.

La complementarità fra cereali e legumi è certamente ai suoi massimi livelli per quel che riguarda il fabbisogno in azoto, data la sola parziale sovrapposizione fra i serbatoi ambientali cui attingono le due componenti (esclusivamente il suolo per il cereale, suolo e atmosfera per il legume).

Tale effetto di complementarità risulta peraltro maggiore in condizioni di scarsità di azoto, nelle quali il legume è spinto ad incrementare il proprio tasso di fissazione dell'azoto atmosferico, mentre l'azoto minerale del suolo viene sfruttato in maniera quasi esclusiva dal cereale.

In generale gli effetti di complementarità sono accentuati in condizioni limitanti, il che comporta che le consociazioni risultano in molti casi più convenienti per i sistemi a bassi input, come ad esempio in agricoltura organica.

La riduzione delle infestanti nelle consociazioni è un altro dei principali vantaggi possibili. Anch'esso è ampiamente documentato in letteratura ed essenzialmente si esplica in una riduzione rispetto alla coltura pura del legume, ma non rispetto alla coltura pura del cereale; un vantaggio reale si ha dunque in presenza di una riduzione fino ad un livello inferiore alla media fra le due rispettive colture pure (Liebman et Dick 1993; Szumigalsky et van Acker, 2006; Bilalis et al. 2010; Carr et al. 1995).

Nel complesso, tali vantaggi appaiono in grado anche di ridurre in maniera importante la differenza di resa fra sistemi organici e convenzionali, se si confrontano le consociazioni in organico con le rispettive colture pure in convenzionale (Ponisio et al. 2015).

### ***Problematiche applicative***

A fronte di tali potenzialmente numerosi vantaggi, tale tecnica è allo stato attuale raramente applicata nei sistemi colturali europei e in più in generale nei sistemi agricoli intensivi (se si eccettuano le colture foraggere).

Le consociazioni sono state largamente usate nell'agricoltura tradizionale, e continuano ad essere diffuse soprattutto nei sistemi agricoli non industriali; in particolare, le consociazioni per doppia produzione sono ampiamente diffuse nei sistemi agricoli di sussistenza nelle zone tropicali e subtropicali (Masvaya et al. 2017; Kermah et al. 2017).

Se sussistano le condizioni per l'adozione della tecnica su larga scala nei sistemi agricoli occidentali è interrogativo di non immediata risposta.

Le principali ragioni per cui la tecnica rimane scarsamente applicata, oltre che al caso di non essere presa in considerazione per non conoscenza, hanno a che vedere soprattutto con le problematiche legate alla meccanizzazione delle operazioni colturali che essa pone, in particolare per la semina meccanica, la raccolta e ancor più la separazione dei due prodotti.

Il più comune e il più studiato modello di consociazione cereali/legumi, almeno in ambienti temperato-mediterranei e in Italia, è quello di consociazioni temporanee con il solo cereale come produzione principale (Tosti et Guiducci, 2010), volte quindi solo a conseguire i vantaggi dell'aumentata disponibilità di azoto per quest'ultimo (ad es. le consociazioni con trifoglio, favino o vecce), piuttosto che quello di consociazioni per doppia produzione di granella.

In tali casi, spesso l'effetto più significativo è l'eventuale incremento del tenore proteico della granella del cereale piuttosto che un significativo aumento delle rese, anche perché in genere l'azoto derivante dalla fissazione simbiotica della leguminosa consociata non si rende disponibile al tempo giusto per esercitare una significativa influenza sui parametri della resa nel cereale. Tali risultati in termini di qualità non vanno certo sottovalutati; tuttavia, questo modello appare da diversi punti di vista non sfruttare appieno le potenzialità delle consociazioni.

Il vantaggio potenziale forse più importante di queste ultime risiede infatti nelle maggiori rese conseguibili con un LER superiore a 1, in conseguenza dell'uso più efficiente delle risorse disponibili; se solo una delle specie consociate è raccolta, è quasi inevitabile un decremento di resa rispetto alla coltura pura, considerando che LER parziali prossimi a 1 sono rari; al più si potrà avere un vantaggio non particolarmente rilevante dal punto di vista quantitativo. Anche nel caso in cui la leguminosa venga sovesciata, impiegata come foraggio o pascolata, il sistema non sembra sfruttare nella maniera più efficace i potenziali benefici della consociazione.

Tutto ciò considerato, lo studio delle possibilità offerte da consociazioni produttive fra cereali e leguminose da granella appare interessante, in specie se si prende in esame un modello di consociazione per doppia produzione, in cui entrambi i prodotti siano destinati al consumo umano. Ciò in particolar modo per i sistemi a bassi input e/o biologici, nei quali il vantaggio derivante dalla maggior efficienza nell'uso delle risorse possa essere massimizzato.

### ***Lenticchia***

La lenticchia (*Vicia lens* (L.) Coss. & Germ, syn. *Lens culinaris* Medik) è una delle specie di più antica coltura, e la sua domesticazione si fa risalire ad un periodo compreso fra 12000 e 8000 anni fa, probabilmente nella Mezzaluna Fertile. Fra i legumi da granella secca è uno fra quelli con il più

alto contenuto di proteine (~25%), con un bilanciamento amminoacidico particolarmente equilibrato, un contenuto significativo di altri micronutrienti quali ceneri, ferro e zinco, vitamine (fra i cui i folati) e un basso contenuto degli elementi antinutrizionali tipici dei legumi, il tutto associato ad un tempo di cottura relativamente breve (Yadav et al. 2007).

Dal punto di vista agronomico, la lenticchia è coltura miglioratrice da rinnovo, a semina autunnale in ambiente mediterraneo, e si caratterizza per una serie di problematiche particolarmente gravose, anche rispetto alle altre leguminose da granella.

Le dimensioni contenute della pianta e la relativa lentezza nel chiudere le file fanno della lenticchia una scarsa competitorice nei confronti delle infestanti, da parte delle quali può dunque subire una competizione particolarmente intensa, fino alla perdita dell'intera produzione.

L'allettamento, cui è molto soggetta nelle fasi finali del ciclo, può rendere la raccolta meccanica molto difficile se non impossibile, portando a perdite fino al 100%. La coltura è inoltre spesso soggetta a severi attacchi di bruchidi (*Bruchus* spp., Coleoptera), che causano perdite significative sul raccolto e, inoltre, danneggiando i singoli semi e provocandone fratture e rottura, possono rendere non commerciabile il prodotto.

Oltre a ciò, si tenga conto delle rese spesso basse (specie in ambienti mediterranei), che la rendono particolarmente negletta anche rispetto alle altre leguminose da granella.

Il consumo interno di lenticchie in Italia è del resto coperto per più del 90% dalle importazioni estere (Ghelfi et Palmieri, 2017), mentre le produzioni interne, seppure abbiano visto un certo incremento negli ultimi venti anni, restano molto ridotte (nell'ordine di 4000-5000 t per anno; Fig. 1.1).

### ***Consociazioni frumento-lenticchia***

La consociazione fra frumento, tenero o duro, (*Triticum aestivum* L. subsp. *aestivum* e *Triticum turgidum* L. subsp. *durum* (Desf.) Husn.) e lenticchia si potrebbe porre dunque come uno strumento per superare almeno in parte i problemi che, come detto, caratterizzano la coltura di quest'ultima, andandosi ad inserire al contempo in contesti produttivi fortemente sbilanciati verso la produzione del frumento, senza stravolgerli, e garantendo una produzione significativa anche di quest'ultimo, come "assicurazione" sull'eventuale fallimento della lenticchia.

Se numerosi sono gli studi riferiti alla consociazione del frumento (o l'orzo) con la fava (Agegnehu et al. 2008), il pisello (Ghaley et al. 2005), il cece (Banik et al. 2006), assai limitati sono invece per quanto riguarda la lenticchia.

Fra questi, se ne possono riportare inerenti la consociazione della lenticchia con il tabacco (Islam et al. 1997), il lino (Mishra et al. 2002; Sarkar et al. 2004), la senape indiana (*Brassica juncea*) (Singh

et al. 2000; Mandal et al. 1997), la toria (*Brassica campestris*) (Tuti et al. 2012), la barbabietola da zucchero (Usmanikhail et al. 2012), la canna da zucchero (Nadeem et al. 2020), l'avena (Singh et al. 2011), l'orzo (Schmidtke et al. 2004; Ikram ul Haq et al. 2018; Mandal et Mahapatra 1990), prevalentemente riferiti ad ambienti del sud est asiatico, ciò che si spiega con l'importanza della lenticchia in tali aree.

Esiste poi un certo numero di studi inerenti la consociazione della lenticchia con il frumento tenero; anche fra questi, molti si riferiscono ad areali del sud-est asiatico (Ahlawat et al. 1985; Akter et al. 2004; Khaliq et al. 2001; Khan et al. 2005; Das et al. 2011; Suryapani et al. 2013; Ghosh et Puste 1997), ma anche africani (Meseret et al. 2021) e canadesi (Carr et al. 1995).

Tali studi mostrano normalmente un vantaggio più o meno pronunciato della consociazione in termini produttivi rispetto alla coltura pura. Akter et al. (2004) riportano LER variabili fra 1,06 e 1,52; Khaliq et al. (2001) fra 1,1 e 1,33; Meseret et al. (2021) LER compresi fra 1,54 e 1,75; Carr et al. (1995) compresi fra 0,97 e 1,12.

Esistono solo pochissimi lavori riferiti ad areali europei, di questi, Viguier (2018) e Viguier et al. (2018) si riferiscono ad una consociazione con frumento tenero nel sud della Francia; Wang et al. (2012) ad una consociazione sempre con frumento tenero in Germania, con semina primaverile; gli unici lavori in Italia riguardano una consociazione con orzo e triticale in semina primaverile in Italia centrale interna (Guiducci et al, 2023, in stampa). e infine (unico lavoro relativo alla consociazione con frumento duro) Koskey et al. (2022) riguarda una consociazione temporanea a file alterne con frumento duro, in ambiente toscano, con la lenticchia in semina primaverile.

Per quanto è stato possibile appurare, non esiste alcun lavoro relativo alla consociazione permanente frumento duro – lenticchia in ambiente mediterraneo.

Tali ambienti, del resto, sono tipicamente adatti tanto alla coltura del frumento duro quanto a quella della lenticchia (la relativa resistenza di quest'ultima allo stress idrico è del resto una delle sue caratteristiche agronomiche più interessanti (Yadav et al. 2007)); non vi sono dunque apparentemente ragioni climatiche che possano portare in linea di principio ad escludere la fattibilità di tale tipo di consociazione in contesti mediterranei.

La grandissima diffusione della coltura del frumento (si pensi solo al ruolo del frumento duro nell'Italia meridionale) nell'Europa mediterranea, con i connessi problemi che ai sistemi culturali da quest'ultimo dipendenti sono associati, e dall'altro lato, come visto, la scarsissima diffusione in proporzione delle colture di legumi da granella in generale e di lenticchia in particolare sono dunque elementi che possono giustificare la ricerca di soluzioni agronomiche in grado di inserirsi in tali contesti produttivi incrementando per quanto possibile la convenienza tecnico-agronomica ed economica della coltivazione della lenticchia.

### ***Obiettivi e articolazione dell'attività di ricerca***

Alla luce di quanto finora considerato, gli obiettivi della ricerca, incentrata sulla consociazione frumento duro-lenticchia, si sono così delineati:

- Indagare la consociazione frumento duro - lenticchia con riguardo a diverse opzioni applicative, in particolare rispetto ai rapporti di consociazione fra le due componenti:

*→ la consociazione in questione si dimostra maggiormente efficiente dal punto di vista produttivo rispetto alle rispettive colture pure, e nel caso, esiste un rapporto di consociazione in grado di massimizzare la resa complessiva, del frumento e della lenticchia?*

A tal fine, sono stati adottati quattro diversi rapporti di consociazione, nei quali comunque la dose relativa di semina del frumento fosse decisamente ridotta rispetto a quella della lenticchia, in quanto, considerata la scarsa capacità competitiva di quest'ultima e dal confronto con la letteratura fin qui citata rispetto alla consociazione fra un cereale e la lenticchia, si presumeva che la lenticchia potesse essere severamente limitata nello sviluppo dal frumento, se presente quest'ultimo ad elevata densità di semina.

- Indagare le eventuali differenze rispetto alla risposta alla consociazione di diversi “assortimenti varietali”:

*→ l'efficienza della consociazione varia se oltre alla diversità interspecifica è presente un certo livello di diversità intraspecifica nelle due specie consociate?*

Partendo dall'ipotesi che, così come le dinamiche agroecologiche peculiari delle consociazioni agrarie si devono appunto alla diversità *interspecifica* presente, vi possano essere degli effetti anche quando tale diversità sia contemporaneamente presente a livello *intraspecifico*, vale a dire all'interno di ciascuna specie componente la consociazione, in una delle prove per ogni rapporto di consociazione sono stati messi in prova due differenti “assortimenti varietali”: una linea pura di frumento consociata con una linea pura di lenticchia (minima diversità intraspecifica), ed un miscuglio di varietà/popolazioni locali /ecotipi per ogni specie (elevata diversità intraspecifica).

- Indagare la differente capacità competitiva di diverse consociazioni nei confronti delle infestanti:

*→ qual è il livello di capacità competitiva nei confronti delle infestanti della consociazione rispetto alle colture pure, e come varia l'efficienza della consociazione in presenza o in assenza di flora infestante?*

A tal fine, si è deciso di mettere in prova trattamenti diserbati e trattamenti non diserbati.

- Indagare le eventuali differenze dovute alla diversa disposizione delle piante nello spazio

→ *la disposizione delle piante nello spazio influenza l'efficienza della consociazione?*

A tale scopo, è stata approntata una prova in cui le due specie sono state seminate sulla stessa fila o a file alterne.

- Approfondire alcuni aspetti legati alle dinamiche di utilizzazione dell'azoto:

→ *la fissazione biologica dell'azoto da parte della lenticchia è influenzata dalla consociazione? Si può registrare trasferimento di azoto da quest'ultima al frumento? I parametri di utilizzazione dell'azoto variano in consociazione rispetto alle colture pure?*

- Indagare ulteriori aspetti relativi agli aspetti agronomici della consociazione:

→ *La precessione colturale può influenzare l'efficienza della consociazione?*

Le due specie in purezza e in consociazione sono state seminate in successione ad un cereale e ad una leguminosa.

## **2. Prove sperimentali**

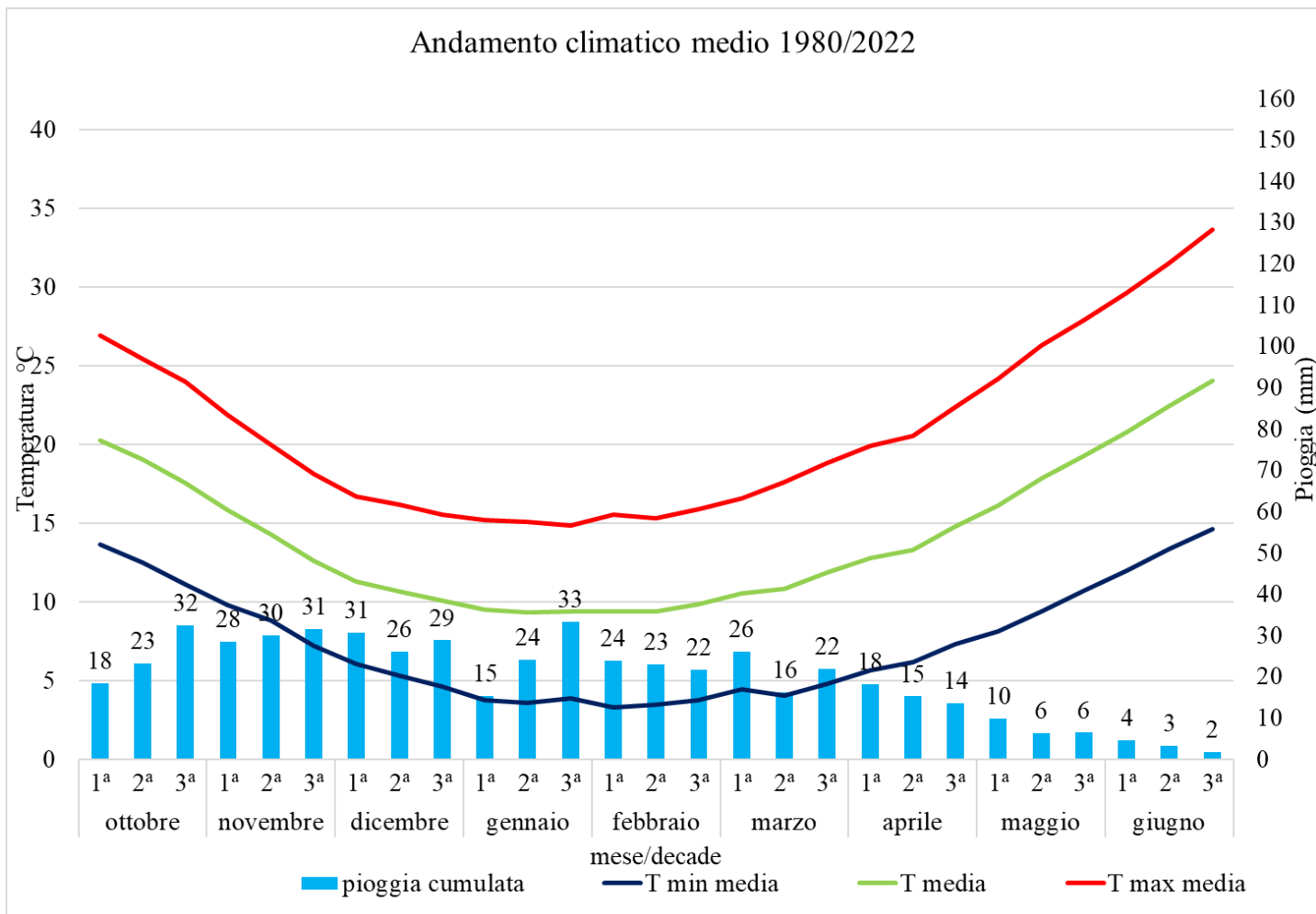
### ***Sito sperimentale***

Tutte le tre prove di seguito descritte sono state realizzate presso l'azienda sperimentale Pietranera, dell'Università degli Studi di Palermo-Fondazione Lima Mancuso. L'azienda si trova nell'entroterra siciliano, circa 30 km a nord di Agrigento (37°30'N, 13°31'E; 178 m.s.l.m.).

La località è caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo (Fig. 2.a), con precipitazioni annuali (media quarantennale) di circa 580 mm, principalmente concentrate in autunno e inverno (circa il 75%) e in primavera (circa il 18%), con un periodo caldo e siccitoso in estate, spesso esteso alla tarda primavera.

Il suolo si classifica dal punto di vista pedologico come Vertic Haploxerept, con le seguenti caratteristiche (strato 0-40 cm): argilla 52,5%, limo 22,7%, sabbia 24,8%; pH 8.2 (1:2.5 H<sub>2</sub>O).

Le colture, coltivate in asciutto, svolgono il loro ciclo normalmente da novembre a giugno (precipitazioni medie dal 1° novembre al 31 maggio di circa 440 mm). Le temperature medie minime e massime sono rispettivamente (°C): 9,9-21,9 (autunno), 4,0-15,8 (inverno), 8,6-24,6 (primavera).



**Figura 2.a.** Andamento climatico medio nel sito sperimentale. Dati relativi al periodo 1980 – 2022. Le linee descrivono l'andamento della temperatura massima (in rosso), media (in verde) e minima (in nero) decadica; le barre la piovosità media decadica nel periodo di crescita delle colture.

## ***Prova 1: Influenza della diversità genotipica e dei rapporti consociativi nella consociazione agraria frumento duro - lenticchia***

### **Obiettivo**

Obiettivi principali della prova sono stati lo studio dell'effetto, sull'efficienza della consociazione e sui principali parametri produttivi delle due componenti, a confronto con le rispettive colture pure:

- dell'influenza di diversi rapporti di consociazione (additivi e sostitutivi);
- dell'influenza della flora infestante in relazione ai diversi rapporti di consociazione;
- dell'effetto dell'impiego di differenti assortimenti varietali con diverso grado di diversificazione genotipica

### **Materiali e metodi**

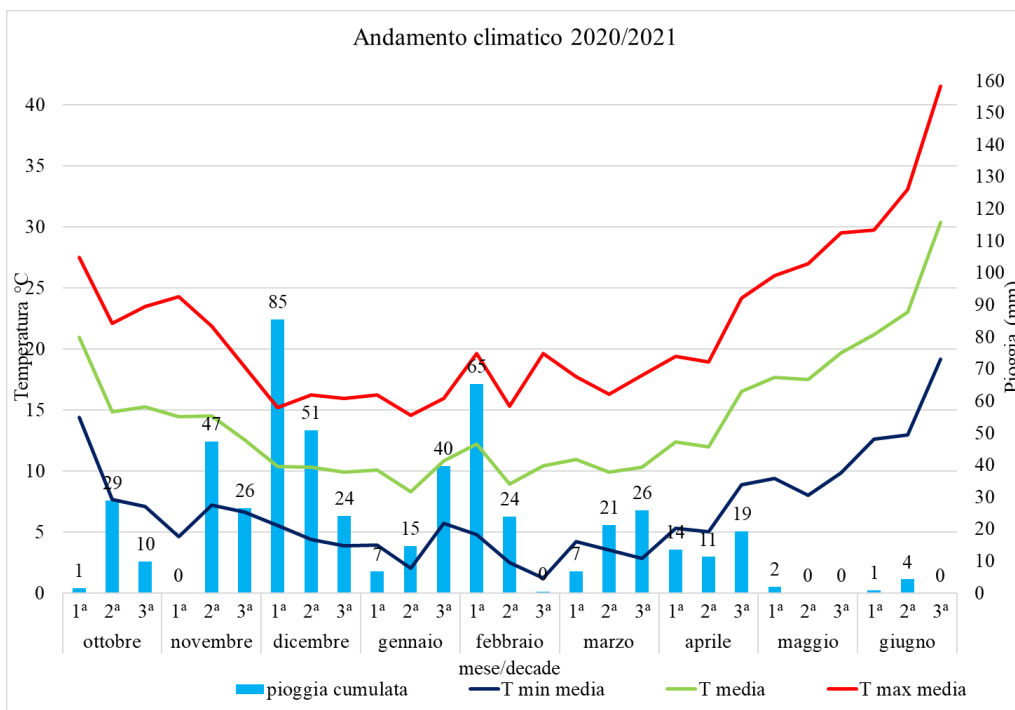
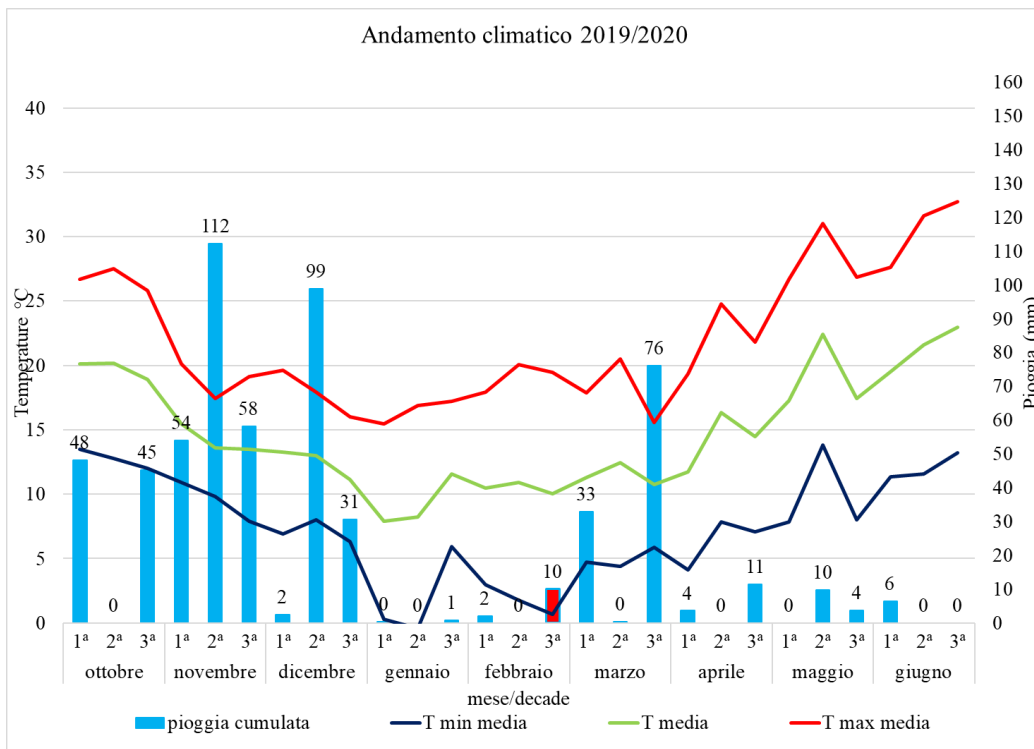
#### ***Descrizione della prova***

La prova è stata ripetuta in due annate consecutive, 2019/20 e 2020/21. Le precipitazioni totali del periodo colturale del primo anno di prova sono risultate complessivamente pari a 273 mm (contro una media pluriennale di 347 mm); nell'annata 2020/2021 sono risultate pari a 245 mm (media 270 mm) (cfr. fig. 2b). Nella terza decade del febbraio 2020, a causa della perdurante mancanza di precipitazioni, è stato effettuato un intervento irriguo di soccorso pari a 10 mm.

È stato adottato uno schema a blocchi randomizzati e parcella suddivisa con 8 repliche in cui nelle parcelle principali sono stati posti a confronto 4 diversi rapporti di consociazione tra frumento e lenticchia e le due specie in purezza, utilizzando sia una singola varietà di ciascuna delle due specie sia un miscuglio di varietà per ciascuna specie, e nelle parcelle secondarie è stata valutata la presenza o assenza di diserbo, per un totale di 12 trattamenti ((4 rapporti di consociazione + 2 colture pure) x 2 assortimenti varietali; tabelle 2.1 e 2.2), secondo il seguente schema:

- Frumento duro in purezza (codice 100F), seminato alla densità standard di 350 semi germinabili al m<sup>2</sup>;
- Lenticchia in purezza (100L), seminata alla densità standard di 200 semi germinabili al m<sup>2</sup>;
- Consociazione sostitutiva con rapporto di semina frumento lenticchia 15:85 (15% densità standard frumento :85% densità standard lenticchia: 15F85L);
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 30:70 (30F70L);
- Consociazione additiva con rapporto frumento lenticchia 15:100 (15F100L);
- Consociazione additiva con rapporto frumento lenticchia 30-100 (30F100L)





**Figura 2.b.** andamento climatico nel sito sperimentale nelle annate agrarie in cui sono state condotte le prove; pannello superiore annata agraria 2019/20; pannello inferiore annata agraria 2020/21. Le linee descrivono l'andamento della temperatura massima (in rosso), media (in verde) e minima (in nero); le barre la piovosità media decadale per ogni singolo mese nel periodo di crescita delle colture. Nel grafico 2019/20, la barra in rosso si riferisce all'intervento irriguo.

Per ognuno dei predetti tipi colturali sono stati impiegate linee pure (“mono”) e miscugli di varietà/popolazioni (“mix”).

Ciascun trattamento principale è definito dunque dalla combinazione fattoriale fra rapporto di consociazione e composizione varietale (mix o mono); (tabella 2.1).

Per le colture pure e le consociazioni monovarietalì sono state impiegate la varietà “Antalis” di frumento duro (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* (Desf.) Husn) e la linea “Pietranera” di lenticchia. “Antalis” è una cultivar moderna, registrata nel 2014 e ampiamente diffusa in tutto il territorio nazionale per le sue buone produzioni granellari. La linea “Pietranera” è stata selezionata alcuni decenni fa dal Dipartimento SAAF dell’Università di Palermo a partire da materiale proveniente dall’ICARDA ed ha dimostrato buone caratteristiche produttive nell’area. Le due varietà sono state scelte fra quelle da cui ci si potesse attendere un elevato potenziale produttivo nelle condizioni specifiche.

I miscugli varietali (mix) sono stati realizzati con le 19 varietà e popolazioni di frumento duro e con le 9 varietà e popolazioni di lenticchia riportate nella tabella 2.2.

Nel complesso, ogni dispositivo sperimentale è stato dunque costituito da 96 parcelle principali (12 trattamenti principali  $\times$  8 repliche) e 192 parcelle secondarie (96  $\times$  2 trattamenti di diserbo/assenza di diserbo).

Infine, nel dispositivo sperimentale è stata inclusa una parcella non seminata per ciascun blocco, al fine di rilevare lo sviluppo massimo delle infestanti in assenza di coltura ed osservarne la composizione floristica. È stata adottata una dimensione delle parcelle principali di 9 m<sup>2</sup> (1.5 x 6.0 m). La semina è stata effettuata a macchina con seminatrice parcellare, su file distanti 18 cm, e nel caso delle consociazioni, con le due componenti seminate sulla stessa fila.

I miscugli varietali sono stati preparati poco prima della semina del primo anno, mescolando un numero eguale di semi (stimato sulla base del peso di 1000 semi e della percentuale di germinazione) per ciascuna accessione. Metà delle sementi dei miscugli così ottenuti è stata conservata a 4°C, al fine di assicurare anche per il secondo anno di prova la stessa composizione. La germinabilità della semente è stata verificata prima della semina sia al primo che al secondo anno, senza che si registrassero variazioni di rilievo.

In entrambi gli anni di prova la precessione colturale è stata a leguminose: cece nel 2019/2020 e trifoglio alessandrino da seme nel 2020/2021. Al primo anno di prova, la semina è stata effettuata il 5 dicembre 2019, mentre al secondo anno, in seguito all’allagamento, a causa delle perduranti piogge successive alla semina, del campo seminato inizialmente a novembre in precessione a cece, la semina è stata effettuata l’8 gennaio 2021. Il controllo della flora spontanea nelle sub-parcelle diserbate (metà di ciascuna parcella principale; dimensioni 1,5  $\times$  3 m), è stata realizzata mediante ripetute scerbature effettuate quando necessario durante l’intero ciclo colturale.

In entrambi gli anni di prova non sono stati distribuiti né fertilizzanti né agrofarmaci.

**Tabella 2.1.** Tabella riassuntiva dei trattamenti applicati nella prova

Trattamento principale			Trattamento secondario
Allevamento	Genotipo/i	Rapporto di consociazione	Diserbo
Purezza	Frumento mono	-	Presenza Assenza
	Lenticchia mono	-	Presenza Assenza
	Frumento mix	-	Presenza Assenza
	Lenticchia mix	-	Presenza Assenza
Consociazione	Frumento - Lenticchia mono	15F 85L	Presenza Assenza
		30F 70L	Presenza Assenza
		15F 100L	Presenza Assenza
		30F 100L	Presenza Assenza
	Frumento - Lenticchia mix	15F 85L	Presenza Assenza
		30F 70L	Presenza Assenza
		15F 100L	Presenza Assenza
		30F 100L	Presenza Assenza

**Tabella 2.2.** Varietà e popolazioni utilizzate nella prova

Specie	Genotipo	Genealogia	Anno di costituzione	1000 semi (g)
Frumento duro	Appio	Cappelli//Gaviota/Yuma	1982	42,0
	Capeiti	Cappelli/ Eiti	1950	43,8
	Creso	Yt 54-N10-B/2*// 3*TC 60/3/Cp B 14	1974	44,2
	Orizzonte	Rusticano x Simeto	2011	46,8
	Antalis	Sconosciuta	2014	49,4
	Svevo	Selez CIMMYT/Zenit	1996	41,4
	Simeto	Capeiti 8/Valnova	1988	48,2
	Trinakria	B14/Capeiti8	1972	48,8
	Cappelli	Selez. da popolaz. palestinese	1915	50,4
	Russello	Popolaz. siciliana	<1915	56,8
	Scorzonera	Popolaz. siciliana	<1915	55,6
	Timilia	Popolaz. siciliana	<1915	45,8
	Bidi	Popolaz. siciliana	<1915	60,4
	Perciasacchi	Popolaz. siciliana	<1915	69,8
	Bufala nera	Popolaz. siciliana	<1915	56,4
	Manto di Maria	Popolaz. siciliana	<1915	50,0
	Girgentana	Popolaz. siciliana	<1915	63,6
	Biancuccia	Popolaz. siciliana	<1915	44,0
	Giustalisa	Popolaz. siciliana	<1915	59,6
	Lenticchia	Pantelleria	Popolaz. siciliana	<1900
Eston		Varietà canadese	1981	27
Beluga		Varietà canadese		22
Crimson		Varietà canadese		42
Linosa		Popolaz. siciliana	<1900	29
Nera di Enna		Popolaz. siciliana	<1900	43
Ustica		Popolaz. siciliana	<1900	19
Castelluccio		Popolaz. umbra	<1900	33
Pietranera		Selez. da materiale ICARDA	1996	30

In entrambe le annate è stato applicato su un'area di saggio di 1 m<sup>2</sup> al centro delle sole sub-parcelle diserbate (su 4 repliche di tutti i trattamenti nel 2019/20, su 5 repliche nei soli trattamenti monovarietali nel 2020/21), l'isotopo stabile dell'<sup>15</sup>N al fine di monitorare il processo di azotofissazione biologica, secondo il metodo della diluizione isotopica (Unkovich et al. 2008). L'isotopo è stato applicato sotto forma di solfato di ammonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) con arricchimento in <sup>15</sup>N del 10%. Il prodotto è stato somministrato in due interventi di 4 kg/ha equivalenti per un totale complessivo di 8 kg/ha di N equivalente. Nella prima annata il fertilizzante è stato applicato il 09/01 e il 26/02, mentre nella seconda il 18/02 e il 31/03.

Le operazioni di raccolta sono state avviate il 5/06 per la prima annata e il 10/06 la seconda, e si sono svolte nell'arco di 3-4 giorni.

La mietitura è stata eseguita a mano, mediante sfalcio delle piante a livello del suolo. È stata raccolta l'intera sub-parcella, e le diverse componenti vegetali (frumento, lenticchia e infestanti) sono state accuratamente separate a mano e pesate.

Frumento e lenticchia sono quindi stati trebbiati separatamente mediante una trebbia meccanica.

### ***Rilievi***

Prima della raccolta sono stati rilevati: l'altezza delle piante, il grado di copertura (espresso in %) per ogni componente tramite stima visiva, e per il frumento-è stato conteggiato il numero di spighe per unità di superficie (dati non presentati nella presente tesi); inoltre è stato rilevato il grado (in %) e il tipo (su una scala da 0 a 5) di allettamento.

Subito dopo lo sfalcio è stato rilevato il peso della biomassa totale di ogni componente vegetale (frumento, lenticchia e infestanti). Dopo la trebbiatura sono stati quantificati la produzione areica in granella e il peso di 1000 semi di frumento e lenticchia e, per il frumento, il peso ettolitrico e il contenuto in N della granella; quest'ultimo mediante metodo Dumas (*flash combustion with automatic N analyzer*; DuMaster D-480, Büchi Labortechnik AG, Flawil, Switzerland).

Per ciascuna specie, alcuni giorni prima della mietitura è stato prelevato un campione di piante dall'area di saggio su cui era stato applicato <sup>15</sup>N, sul quale è stato quantificato il contenuto in azoto (metodo Dumas) e il contenuto dell'isotopo stabile <sup>15</sup>N mediante il metodo MIP 134 Rev. 00 2017 (Delta V Isodat Acquisition Flash EA).

È stato inoltre eseguito il rilievo della composizione della flora infestante. Per ogni sub parcella non diserbata al momento della fioritura delle principali specie infestanti presenti è stata valutata la composizione della flora attribuendo a ciascuna specie individuata un valore corrispondente alla stima della sua copertura, secondo la scala di Braun-Blanquet (dati non presentati nel presente elaborato).

### ***Indici di efficienza e di competizione - analisi statistica***

I dati ottenuti sono stati elaborati al fine di calcolare gli indici di efficienza della consociazione in termini di produzione di granella per unità di superficie mediante il calcolo del *Land Equivalent Ratio* (*LER*; Willey, 1979) parziale, per le due componenti della consociazione, e totale (eq.3) come segue:

$$LER_a = \frac{Y_{a(b)}}{Y_a} \quad \text{eq.1}$$

$$LER_b = \frac{Y_{b(a)}}{Y_b} \quad \text{eq.2}$$

$$LER_{tot} = LER_a + LER_b \quad \text{eq.3}$$

Dove  $LER_a$  e  $LER_b$  rappresentano i valori parziali per le due componenti della consociazione;  $LER_{tot}$  è il valore totale dell'indice,  $Y_{a(b)}$  e  $Y_{b(a)}$  rappresentano rispettivamente le rese della componente  $a$  in consociazione con  $b$  e viceversa,  $Y_a$  e  $Y_b$  sono le rese delle due colture in purezza. Valori di  $LER_{tot} > 1$  indicano un vantaggio della consociazione rispetto agli omologhi sistemi di colture pure.

La capacità competitiva di ciascuna componente nei confronti dell'altra è stata calcolata utilizzando il *Competitive Ratio* ( $CR$ ) in accordo a quanto proposto da Willey e Rao, (1980):

$$CR_a = \frac{BiomLER_a}{BiomLER_b} \times \frac{Z_{b(a)}}{Z_{a(b)}} \quad \text{eq.4}$$

$$CR_b = \frac{BiomLER_b}{BiomLER_a} \times \frac{Z_{a(b)}}{Z_{b(a)}} \quad \text{eq.5}$$

Dove  $CR_a$  e  $CR_b$  rappresentano i  $CR$  per le due componenti della consociazione;  $BiomLER_a$  e  $BiomLER_b$  sono analoghi a  $LER_a$  e  $LER_b$  delle eq. 1 e 2 ma riferiti alla produzione di biomassa totale;  $Z_{b(a)}$  e  $Z_{a(b)}$  rappresentano rispettivamente le densità di semina delle componenti,  $a$  in consociazione con  $b$  e viceversa.

Valori di  $CR$  prossimi a 1 indicano un perfetto equilibrio tra due componenti in termini di abilità competitiva, mentre valori di  $CR$  superiori o inferiori a 1 indicano che la componente per cui è stato calcolato l'indice compete con maggiore o minore efficacia rispettivamente rispetto alla specie compagna.

La produzione granellare delle due colture in consociazione e in purezza è stata poi utilizzata per il calcolo della *Riduzione Granellare dovuta alla Presenza di Infestanti* ( $RGPI$ ; eq.6, 7, 8 e 9) come segue:

$$RGPI_{a(b)} = 100 - \frac{Y_{a(b)no-dis}}{Y_{a(b)dis}} \times 100 \quad \text{eq.6}$$

$$RGPI_{b(a)} = 100 - \frac{Y_{b(a)no-dis}}{Y_{b(a)dis}} \times 100 \quad \text{eq.7}$$

$$RGPI_a = 100 - \frac{Y_{a no-dis}}{Y_{a dis}} \times 100 \quad \text{eq.8}$$

$$RGPI_b = 100 - \frac{Y_{b no-dis}}{Y_{b dis}} \times 100 \quad \text{eq.9}$$

Dove  $RGPI_{a(b)}$  e  $RGPI_{b(a)}$  rappresentano le riduzioni granellari dovute alla presenza di infestanti nelle due colture in consociazione e  $RGPI_a$  e  $RGPI_b$  quelle delle colture in purezza;  $Y_{a(b)no-dis}$  e  $Y_{b(a)no-dis}$  rappresentano rispettivamente le rese della componente  $a$  in consociazione con  $b$  e viceversa mentre  $Y_{a no-dis}$  e  $Y_{b no-dis}$  quelle delle colture pure in condizioni di assenza di diserbo;  $Y_{a(b)dis}$  e  $Y_{b(a)dis}$  rappresentano rispettivamente le rese delle componenti  $a$  in consociazione con  $b$  e viceversa e  $Y_{a dis}$  e  $Y_{b dis}$  quelle delle colture pure in condizioni di presenza di diserbo.

Le concentrazioni in azoto nella biomassa totale sono state utilizzate per il calcolo delle asportazioni dell'elemento ( $N\ upt$ ), mentre quelli relativi alle analisi dell'isotopo  $^{15}\text{N}$  per la quantificazione della frazione di azoto derivante dalla fissazione biologica nella leguminosa ( $\%Ndfa$ ; Fried and Middelboe, 1977) e dell'azoto trasferito dalla leguminosa alla graminacea ( $\%N\ transfer$ ; Høgh-Jensen and Schjoerring, 1997) come segue:

$$Nupt_{a(b)} = N_{a(b)} \times biom_{a(b)} \quad \text{eq.10}$$

$$Nupt_{b(a)} = N_{b(a)} \times biom_{b(a)} \quad \text{eq.11}$$

$$Nupt_a = N_a \times biom_a \quad \text{eq.12}$$

$$Nupt_b = N_b \times biom_b \quad \text{eq.13}$$

$$\%Ndfa_{b(a)} = \left(1 - \frac{atom\%^{15}N_{b(a)}}{atom\%^{15}N_a}\right) \times 100 \quad \text{eq.14}$$

$$\%Ndfa_b = \left(1 - \frac{atom\%^{15}N_b}{atom\%^{15}N_a}\right) \times 100 \quad \text{eq.15}$$

$$\%Ntrans_{a(b)} = \left(1 - \frac{atom\%^{15}N_{a(b)}}{atom\%^{15}N_a}\right) \times 100 \quad \text{eq.16}$$

Dove  $Nupt_{a(b)}$ ,  $Nupt_{b(a)}$ ,  $Nupt_a$  e  $Nupt_b$  rappresentano rispettivamente le asportazioni in N delle due colture consociate e pure;  $N_{a(b)}$ ,  $N_{b(a)}$ ,  $N_a$  e  $N_b$  rappresentano le concentrazioni di N delle due colture consociate e pure rispettivamente;  $biom_{a(b)}$ ,  $biom_{b(a)}$ ,  $biom_a$  e  $biom_b$  rappresentano rispettivamente le produzioni di biomassa delle due colture in consociazione e in purezza.  $\%Ndf_{ab(a)}$  e  $\%Ndf_{ab}$  rappresentano la percentuale di N presente nella leguminosa derivante da azotofissazione biologica in consociazione e in purezza rispettivamente;  $atom\%^{15}N_{b(a)}$ ,  $atom\%^{15}N_{a(b)}$ ,  $atom\%^{15}N_b$  e  $atom\%^{15}N_a$  indicano l'arricchimento isotopico della leguminosa e della graminacea in consociazione, della leguminosa in coltura pura e della graminacea in coltura pura rispettivamente. Per il calcolo dell'arricchimento isotopico è stata utilizzata la percentuale isotopica naturale dell'atmosfera pari a 0.3663  $^{15}N$  (Unkovich et al. 2008).

Infine  $\%Ntrans_{a(b)}$  rappresenta la stima dell'N trasferito dalla leguminosa alla graminacea nelle consociazioni.

I dati relativi alla presenza di infestanti nelle parcelle non diserbate e nelle parcelle non seminate sono stati utilizzati per il calcolo di indici relativi all'efficienza della consociazione nel controllo della flora spontanea presente. Il quantitativo di biomassa relativo alle infestanti presenti nella consociazione e nelle colture pure è stato utilizzato per il calcolo del *Relative Weed Biomass (RWB)*; Szumigalski et Van Acker, 2005).

Valori di *RWB* <1 indicano un effetto sinergico delle componenti associate nel controllo delle infestanti e quindi un vantaggio della consociazione rispetto agli omologhi sistemi di colture pure. Inoltre, è stata calcolata l'*Abilità Competitiva (AC)*; Szumigalski et Van Acker, 2005), l'*Abilità di Resistenza alla Competizione (AWC)*; Szumigalski et Van Acker, 2005) e la *Capacità di Contenimento delle Infestanti della consociazione (CCI)*; come segue:

$$RWB = \frac{biom_{inf(ab)}}{biom_{inf_{\mu(a+b)}}} \quad \text{eq.17}$$

$$AC = 100 - \frac{Biom_{inf(ab)}}{Biom_{tot(ab)}} \times 100 \quad \text{eq.18}$$

$$AWC = \frac{biom_{(ab)no-dis}}{biom_{(ab)dis}} \quad \text{eq.19}$$

$$CCI = 1 - \frac{biom_{inf(ab)}}{Biom_{inf(vuote)}} \quad \text{eq.20}$$

Dove  $biom_{inf(ab)}$  indica la biomassa delle infestanti presenti nelle parcelle delle tesi consociate;  $biom_{inf_{\mu(a+b)}}$  indica la media della biomassa delle infestanti presenti nelle parcelle delle due colture allevate in purezza;  $biom_{tot(ab)}$  indica la produzione di biomassa complessiva nelle parcelle



consociate non diserbate (biomassa delle due colture + biomassa delle infestanti);  $biom_{(ab)no-dis}$  indica la biomassa delle due colture nelle parcelle consociate non diserbate;  $biom_{(ab)dis}$  indica la biomassa delle due colture nelle parcelle consociate diserbate;  $biom_{inf(vuote)}$  indica la biomassa media prodotta nelle parcelle non seminate.

I dati ottenuti sono stati poi elaborati utilizzando il software R (R Core Team, 2022) con procedura split-plot con le diverse consociazioni e le colture pure come parcella principale e il diserbo come sub-parcella e con le annate come fattore random.

Per quanto riguarda l'allevamento, l'analisi, a differenza che per le altre variabili, è stata condotta separatamente per le due annate, mancando per la prima annata i dati relativi ai trattamenti non diserbati.

I dati sono stati elaborati utilizzando il pacchetto “nlme” (Pinnheiro et Bates 2023) e limitatamente ai dati relativi all'allevamento, con il pacchetto “agricolae”(de Mendiburu F. 2021). Quando necessario, la differenza tra le medie dei trattamenti all'interno di ogni singola specie e trattamento di diserbo è stata calcolata utilizzando il *Tukey* test presente nel pacchetto “emmeans” (Lenth, 2023).

La presentazione grafica dei dati è stata ottenuta utilizzando il meta-pacchetto “tidyverse” (Wickham et al., 2019) in cui sono inclusi il pacchetto “ggplot2” (Wickham 2016) e il pacchetto “cowplot” (Wilke, 2020).

## Risultati

La tabella 2.3 riporta i risultati dell'analisi della varianza per i parametri rilevati nell'esperimento 1. Come si può notare, i trattamenti principali (rapporti di consociazione e l'utilizzo dei diversi assortimenti varietali) hanno quasi sempre influenzato significativamente i parametri osservati sia nel cereale che nella leguminosa. Apparentemente, statisticamente meno rilevante risulterebbe l'effetto del trattamento secondario (diserbo) e dell'interazione con i trattamenti principali (Tabella 2.3).

In particolare, stranamente, l'assenza di diserbo all'analisi statistica risulterebbe non produrre effetti statisticamente significativi sulla produzione di granella in nessuna delle due specie. Ciò nonostante le produzioni medie appaiono sostanzialmente diverse: come media generale di tutti i trattamenti,  $3.23 \pm 0.1$  t/ha in frumento diserbato vs  $2.30 \pm 0.08$  in frumento non diserbato (vale a dire circa il 70% del diserbato) e  $0.87 \pm 0.03$  vs  $0.55 \pm 0.03$  t/ha in lenticchia diserbata e non diserbata rispettivamente (vale a dire con la produzione in non diserbato pari a circa il 63% di quella in diserbato).

Tuttavia, per quanto riguarda la lenticchia, l'interazione fra il trattamento principale e il diserbo risulta altamente significativa; in particolare, in assenza di diserbo, non vi sono praticamente differenze statisticamente significative fra i trattamenti (neppure fra le colture pure e le consociazioni), al contrario di quanto si verifica in presenza di diserbo (vedi fig. 2.1).

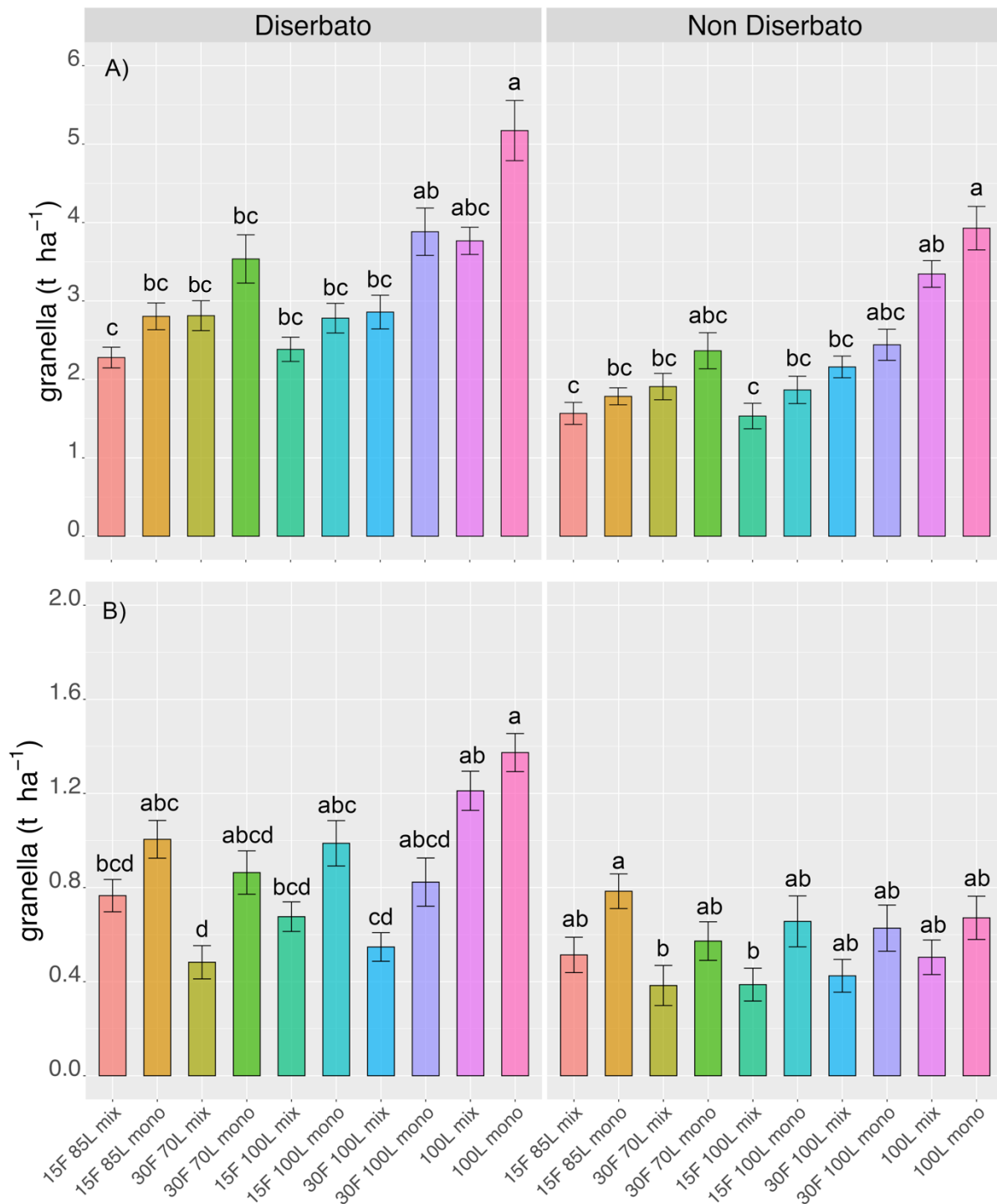
Come già detto in precedenza, i diversi rapporti di consociazione e assortimenti varietali hanno avuto un forte impatto su tutti i parametri rilevati. In termini produttivi, la consociazione 30F100Lmono è risultata quella più favorevole per il frumento sia in presenza che in assenza di diserbo ( $3.88 \pm 0.30$  e  $2.44 \pm 0.20$  t/ha rispettivamente), mentre le produzioni minori sono risultate quelle del trattamento 15F85Lmix dove la produttività in presenza e assenza di diserbo è risultata pari a  $2.28 \pm 0.13$  e  $1.57 \pm 0.14$  t/ha rispettivamente. Come si nota dalla figura 2.1A, la coltura di frumento mono-varietale in purezza ha sempre mostrato i valori più alti ( $5.17 \pm 0.38$  e  $3.93 \pm 0.28$  t/ha per diserbato e non diserbato rispettivamente; *cf* fig. 2.1A).

La lenticchia, in presenza di diserbo, ha mostrato lo stesso comportamento del frumento facendo registrare la produzione granellare massima per la coltura mono varietale in purezza (in media  $1.37 \pm 0.08$  t/ha; Lenticchia Pietranera in purezza diserbata), mentre in assenza di diserbo i valori più alti sono stati osservati nel trattamento di consociazione 15F85Lmono ( $1.00 \pm 0.08$  t/ha). Le minori produzioni della lenticchia, sia in presenza che in assenza di diserbo, sono state osservate nel trattamento 30F70Lmix, dove i valori medi sono risultati pari a  $0.48 \pm 0.07$  e  $0.38 \pm 0.08$  t/ha in presenza e in assenza di diserbo rispettivamente (Fig. 2.1B). Per quanto riguarda l'utilizzo delle specie allevate in condizioni mono-varietali o in mix, in ogni caso, la condizione mono-varietale ha

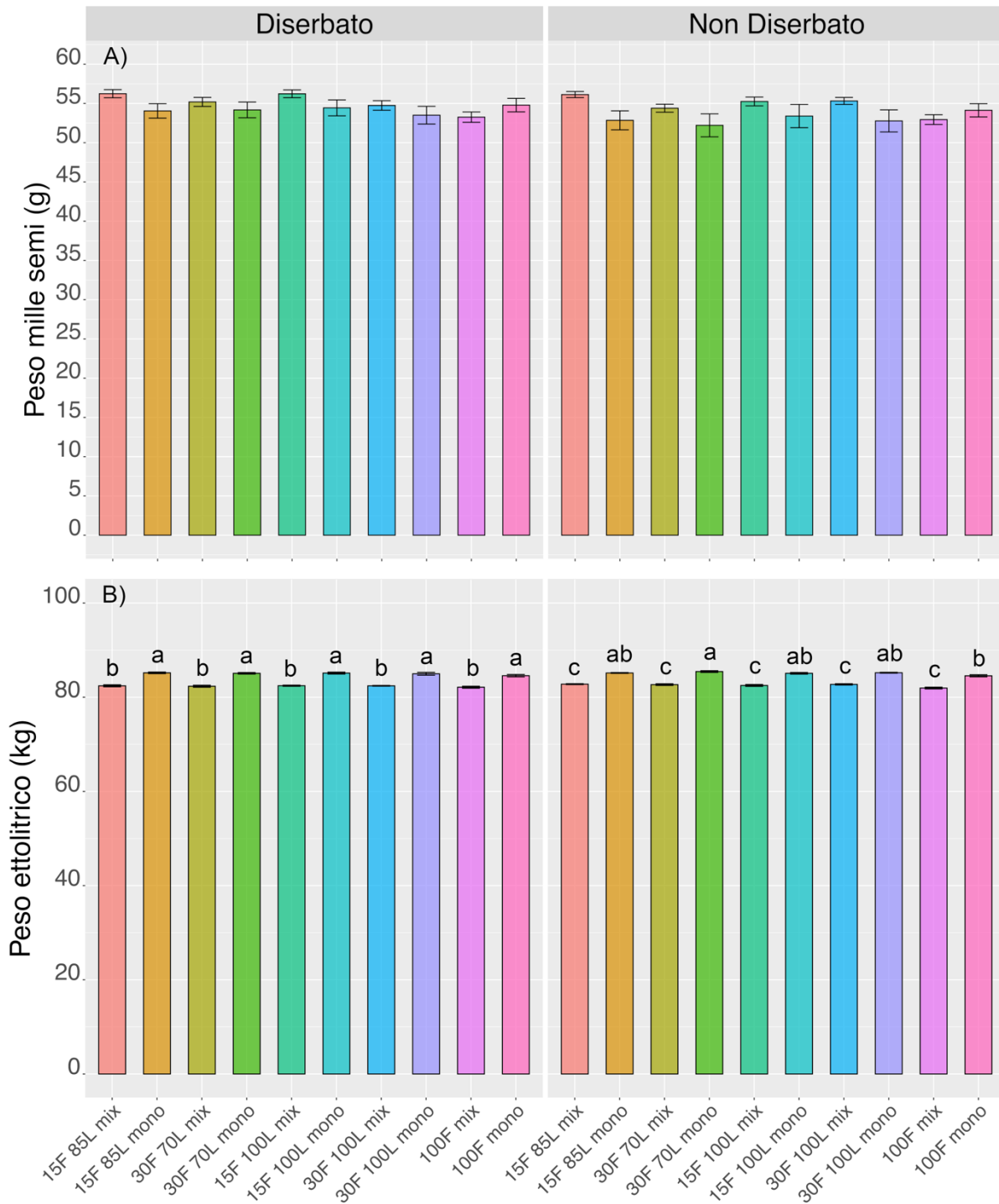
mostrato la sua superiorità rispetto all'utilizzo del mix ( $3.63 \pm 0.16$  vs  $2.82 \pm 0.10$  t/ha in frumento diserbato;  $2.48 \pm 0.12$  vs  $2.10 \pm 0.90$  in frumento non diserbato;  $1.01 \pm 0.04$  vs  $0.74 \pm 0.04$  e  $0.66 \pm 0.04$  vs  $0.44 \pm 0.03$  t/ha in lenticchia diserbata e non diserbata rispettivamente).

**Tabella 2.3.** Risultati ANOVA per le variabili di risposta osservate; *p-value*.

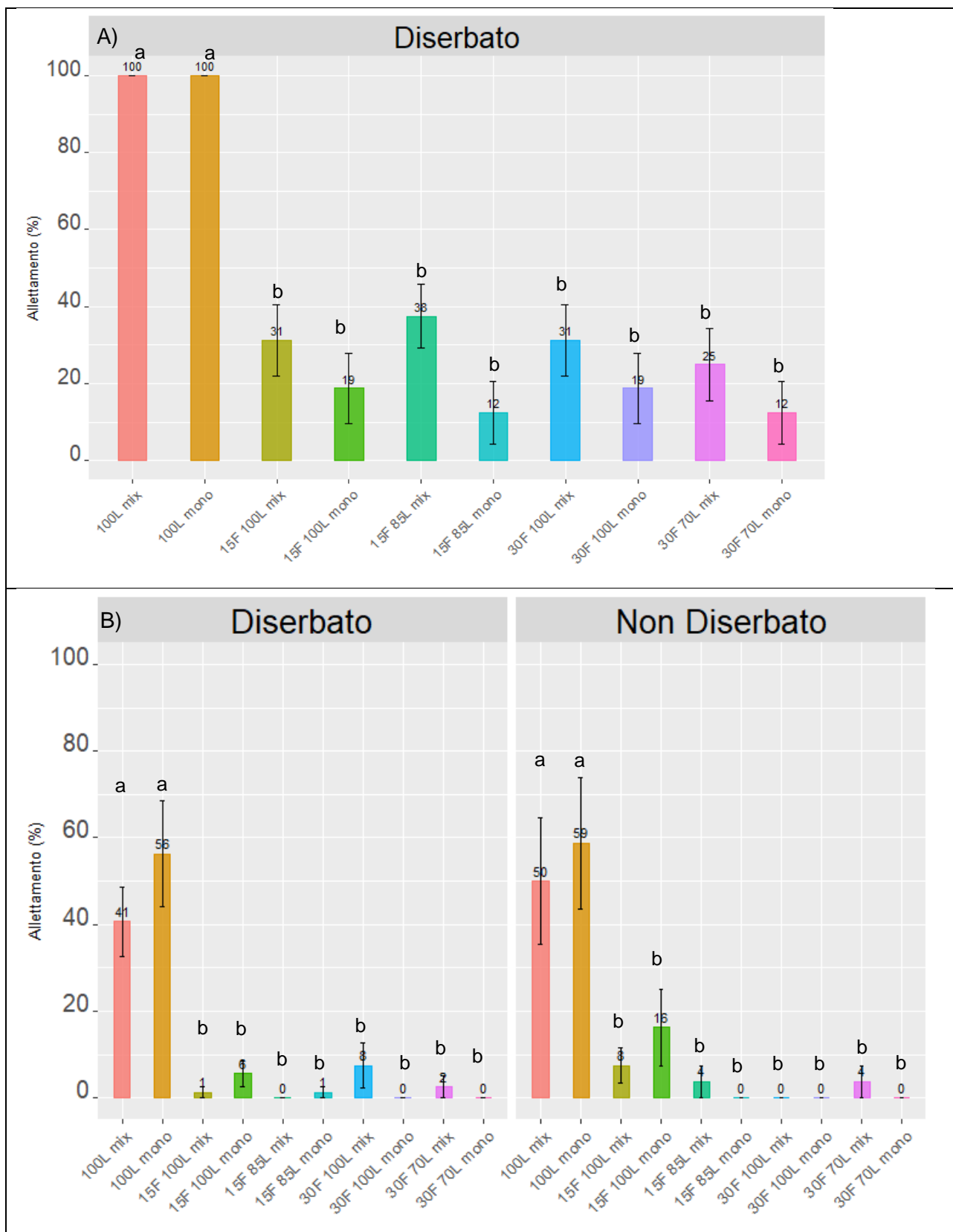
	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	TxD	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	TxD
Granella (t/ha)	< 0.0001	0,1710	0,4103	< 0.0001	0,1709	< 0.0001
Peso mille semi (g)	0,8115	0,2476	0,8987	-	-	-
Peso ettolitrico (kg/hl)	< 0.0001	0,0542	0,5862	-	-	-
N granella (g/kg)	< 0.0001	0,4733	0,6903	-	-	-
N uptake granella (kg/ha)	< 0.0001	0,2595	0,6044	-	-	-
N biom epigea	< 0.0001	-	-	0,3492	-	-
Ndfa (%)	-	-	-	< 0.0001	-	-
N transfer (%)	< 0.0001	-	-	-	-	-
LER parziali	< 0.0001	0,0386	0,7486	< 0.0001	< 0.0001	0,6863
Competitive Ratio	0,0043	< 0.0001	0,9846	0,1817	< 0.0001	0,4613
Riduzione produzione granella per infestanti (%)	0,0483	-	-	< 0.0001	-	-
<b>Consociazione</b>						
	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	TxD			
LER totali	0,0327	0,0965	0,3002			
Relative weed Biomass	0,3144	-	-			
Abilità Competitiva	< 0.0001	-	-			
Abilità di Resistenza alla Competizione	< 0.0001	-	-			
Capacità di riduzione infestanti (%)	< 0.0001	-	-			
<b>Allettamento %</b>						
<b>Lenticchia</b>						
	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	TxD			
2019-2020 - diserbato	< 0.0001	-	-			
2020-2021	< 0.0001	0,2209	0,7093			



**Figura 2.1.** Produzione di granella in frumento A) e in lenticchia B) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$  Tukey test.



**Figura 2.2.** Peso di mille semi A) e Peso ettolitrico B) in frumento al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza significativa tra le tesi entro specie e modalità di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.3.** Allettamento percentuale della lenticchia nella prova 1 al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero). A): annata 2019-2020; B): annata 2021-2022. Prima annata: n= 8 per Diserbato; seconda annata: n= 8 per Diserbato e Non- Diserbato. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia.

Per quanto riguarda l'allettamento (Fig. 2.3), il primo anno di prova (dati relativi ai soli trattamenti diserbati), il trattamento principale ha avuto un effetto altamente significativo; in particolare la coltura di lenticchia in purezza, tanto mix che mono, ha mostrato livelli di allettamento molto alti (100%) differenziandosi notevolmente e in maniera altamente significativa da tutti i trattamenti di consociazione. Al secondo anno di prova non è stato registrato un effetto statisticamente significativo del diserbo né dell'interazione fra questo e il trattamento principale, il quale invece anche in questo caso ha avuto un effetto altamente significativo. Anche qui i trattamenti di lenticchia in purezza si distinguono nettamente da tutte le consociazioni, per quanto con valori di allettamento notevolmente inferiori a quelli registrati il primo anno (valori fra il 40 e il 60%)

La granella di frumento derivante dalle diverse condizioni di allevamento ha mostrato leggere variazioni nel peso dei mille semi ed ettolitrico. Nel primo caso tali differenze non sono risultate rilevanti dal punto di vista statistico e la media del parametro è risultata pari a  $54.30 \text{ g} \pm 0.20$  (media di tutti i trattamenti applicati; Fig. 2.2A; Tabella 2.3). Le differenze osservate nel peso ettolitrico sono invece risultate apprezzabili dall'analisi statistica, che ha evidenziato anche in questo caso una superiorità dei trattamenti mono rispetto ai mix ( $84.98 \text{ kg/hl} \pm 0.10$  vs  $82.35 \pm 0.08$  e  $85.08 \pm 0.08$  vs  $82.52 \pm 0.08$  in frumento allevato in presenza e assenza di diserbo rispettivamente; Fig. 2.2B; Tabella 2.3).

Contrario è risultato l'andamento nella concentrazione in azoto rilevata nella granella del cereale. In questo caso, i miscugli varietali hanno sempre mostrato valori più alti rispetto alla mono-varietà ( $21.44 \pm 0.29$  vs  $19.29 \pm 0.20 \text{ g/kg}$  in presenza di diserbo e  $20.63 \pm 0.19$  vs  $19.13 \pm 0.20 \text{ g/kg}$  in assenza di diserbo in mix e mono rispettivamente; Fig. 2.3A). Il valore più alto è stato registrato per la tesi 15F100Lmix ( $22.05 \pm 0.64 \text{ g/kg}$ ) nei trattamenti diserbati mentre in assenza di diserbo il valore medio più alto è stato osservato nella tesi 15F85Lmix ( $21.03 \pm 0.31 \text{ g/kg}$ ). I valori più bassi, sia in presenza che in assenza di diserbo, sono stati osservati nelle purezze mono ( $18.50 \pm 0.38$  in diserbato e  $18.32 \pm 0.24 \text{ g/kg}$  in non diserbato; Fig. 2.3A).

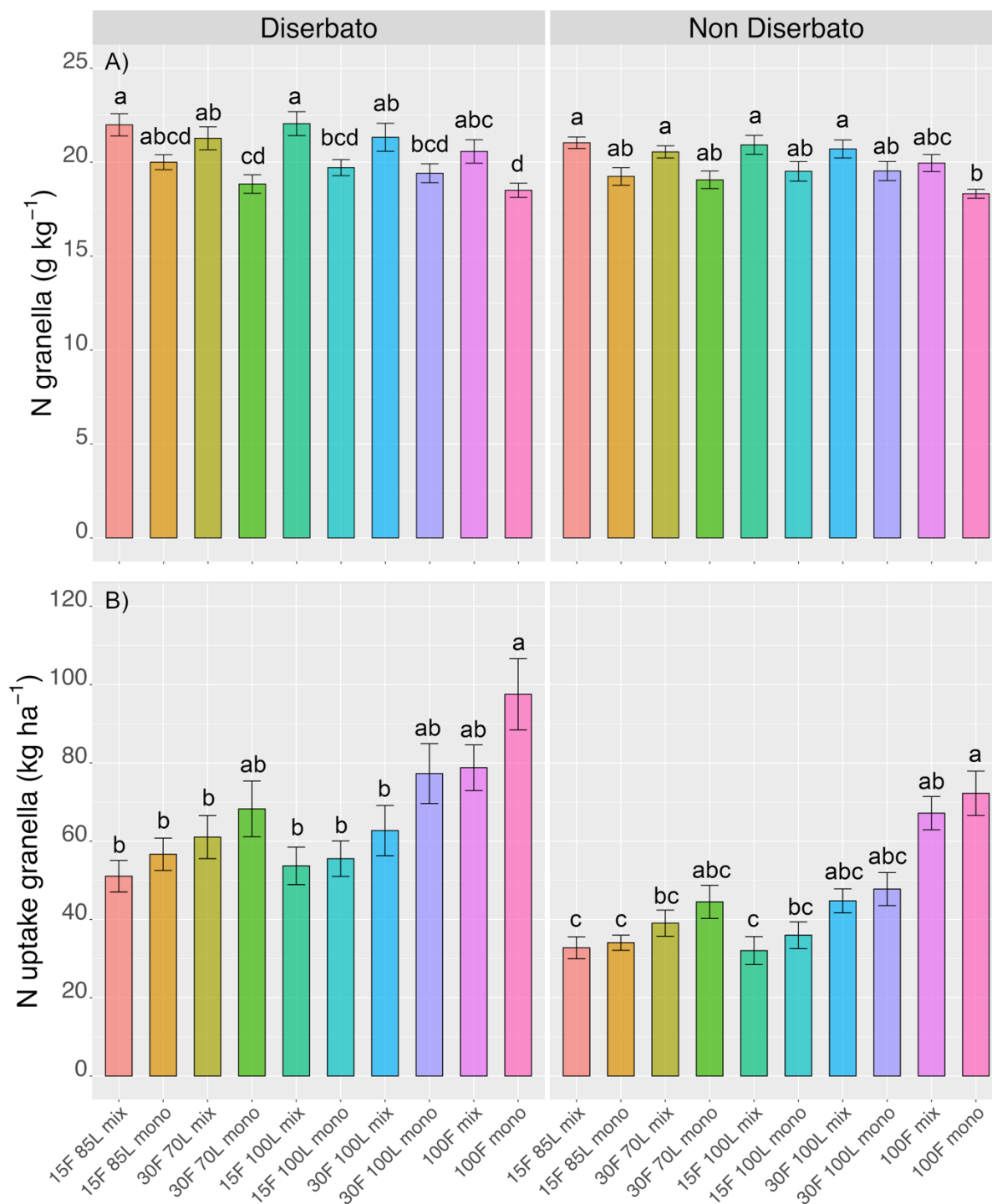
L'assorbimento complessivo dell'elemento nella granella di frumento ha comunque mostrato i valori più alti nella coltura mono-varietale allevata in purezza ( $97.52 \pm 9.09$  e  $72.23 \pm 5.66 \text{ kg/ha}$  in presenza e assenza di diserbo rispettivamente). Sia in presenza che in assenza di diserbo, il valore minimo è stato osservato nel trattamento 15F 85L mix ( $51.04 \pm 4.02$  e  $32.76 \pm 2.81 \text{ kg/ha}$  rispettivamente; Fig. 2.3B).

In consociazione, l'N transfer, ovvero l'azoto assorbito dal frumento derivante dalla leguminosa associata (tracciato mediante l'utilizzo dell'isotopo  $^{15}\text{N}$ ), ha fatto registrare i valori più elevati con il rapporto di consociazione 15F85L, arrivando fino ad una percentuale del  $57.88 \pm 4.21$  in mix e del

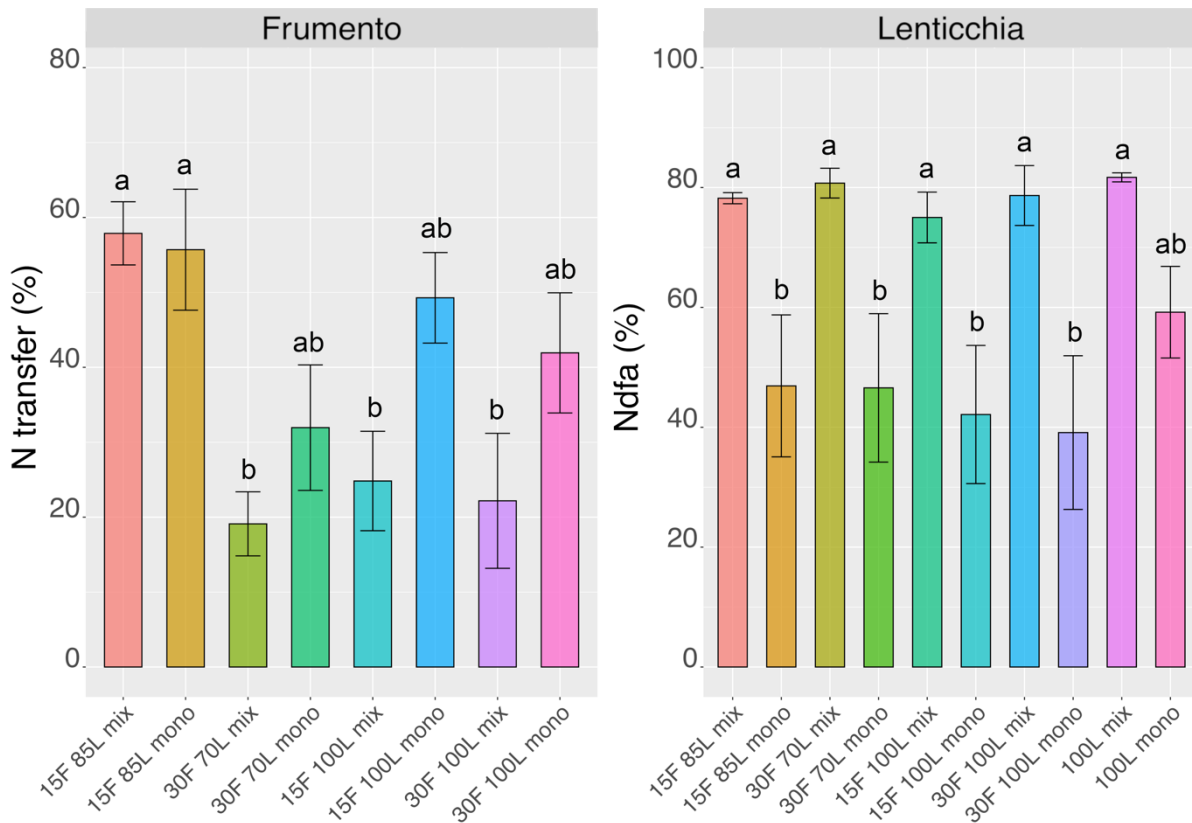
55.70 ± 8.07 in mono. I valori più bassi sono stati invece osservati nel trattamento 30F 70L dove la percentuale si è attestata sul 19.11 ± 4.28 in mix e sul 31.95 ± 8.38 in mono.

Per quanto riguarda l'azoto fissato dalla leguminosa (Ndfa), i miscugli varietali si sono sempre mostrati superiori rispetto ai trattamenti monovarietal (78.86% ± 1.37 vs 46.78% ± 4.97 % in mix e mono rispettivamente come media di tutti i trattamenti). Sebbene per questo parametro la leguminosa in purezza abbia mostrato i valori più alti (81.69 ± 0.75 e 59.20 ± 7.64 %), nessuna differenza statisticamente apprezzabile è stata riscontrata tra i vari rapporti di consociazione entro mix ed entro mono (Fig. 2.5).

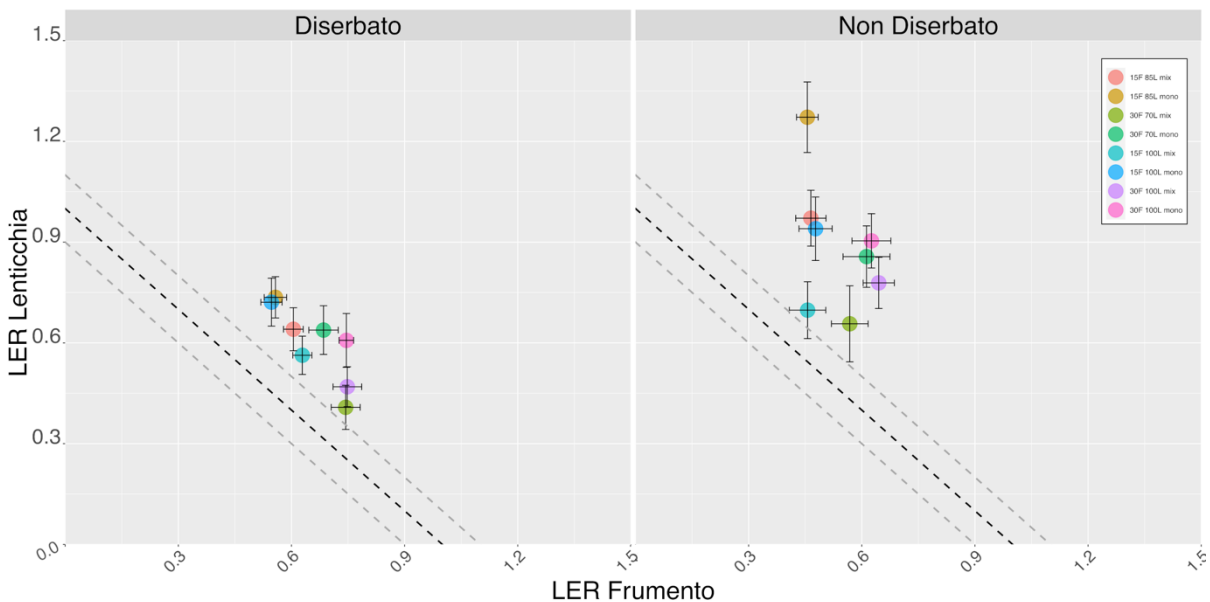




**Figura 2.4.** Concentrazione di azoto nella granella A) e azoto asportato con la granella B) in frumento al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.5.** N transfer A), Ndffa B) al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 9$  nei trattamenti mono e  $n = 4$  nei trattamenti mix. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



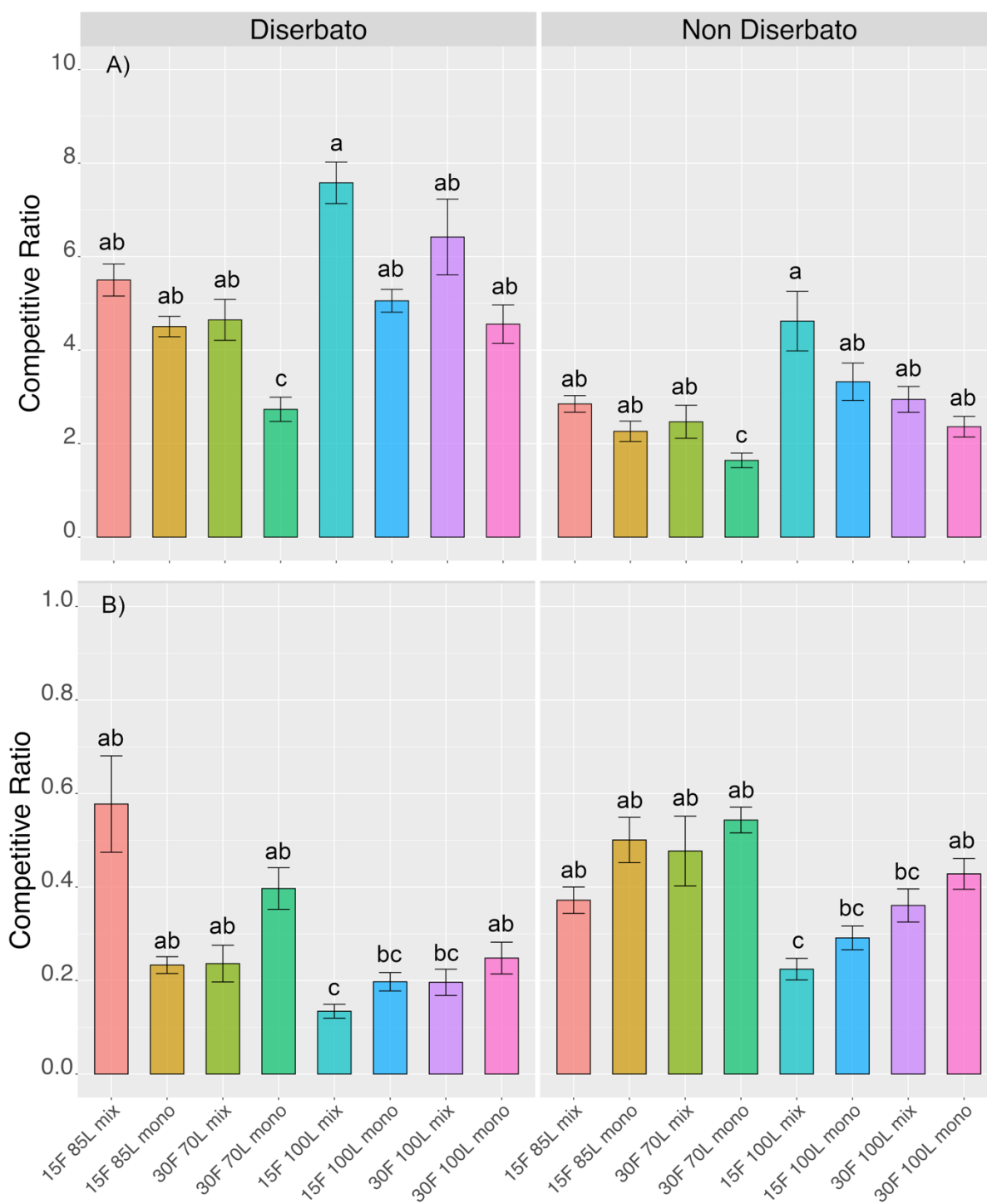
**Figura 2.6.** Land Equivalent Ratio (LER) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Descrizione dei rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. La retta in nero delimita l'unità dei LER totali nei rapporti di consociazione usati. In grigio le rette relative a LER totali pari a 0.9 e 1.1.

Riguardo al LER, la consociazione si è sempre rivelata superiore alle colture pure, con valori di LER totale sempre superiori all'unità. In generale, le consociazioni mono-varietali sono risultate più efficienti rispetto ai mix ( $1.42 \pm 0.03$  vs  $1.26 \pm 0.03$  mono vs mix rispettivamente); in assenza di diserbo l'efficienza della consociazione è stata addirittura superiore ( $1.42 \pm 0.04$  vs  $1.25 \pm 0.02$  media dei trattamenti non diserbati e diserbati rispettivamente). Il rapporto di consociazione più efficiente tra i diserbati è risultato il 30F100Lmono che ha mostrato valori di LER totale medi pari a  $1.35 \pm 0.34$ ; tra i non diserbati il più efficiente è risultato il trattamento 15F85Lmono che ha raggiunto i valori medi più alti ( $1.72 \pm 0.43$ ).

Il frumento, sia in presenza che in assenza di diserbo, ha mostrato la maggiore efficienza nel rapporto di consociazione 30F100Lmix (valori medi di LER parziali pari a  $0.75 \pm 0.04$  e  $0.64 \pm 0.04$  in diserbo e non diserbo rispettivamente; Fig. 2.6). La lenticchia ha invece mostrato la sua maggiore efficienza nel trattamento 15F85Lmono (valori medi di LER parziali per la lenticchia pari a  $0.74 \pm 0.06$  nei trattamenti diserbati e  $1.27 \pm 0.10$  in quelli non diserbati; Fig. 2.6).

L'indice di capacità competitiva (Competitive Ratio, CR) conferma che la consociazione 15F100Lmix è la più favorevole per il frumento (valori di CR medi pari a  $8.44 \pm 0.91$  in diserbo e pari a  $5.11 \pm 0.69$  non diserbo; Fig. 2.7A). Per la lenticchia, invece, i valori migliori si riscontrano in 15F85Lmix in presenza di diserbo (valori medi di CR pari a  $0.58 \pm 0.10$ ) mentre nei trattamenti non diserbati il trattamento che ha subito di meno la competizione del frumento è risultato il 30F70L mono (valori medi pari a  $0.54 \pm 0.03$ ; Fig. 2.7B). In generale, il diserbo sembra aver esacerbato l'abilità competitiva del frumento nei confronti della leguminosa consociata facendo passare i valori medi di CR da  $2.81 \pm 0.14$  nei trattamenti non diserbati a  $5.13 \pm 0.19$  nei trattamenti diserbati (media di tutti i rapporti di consociazione), mentre sembra aver parallelamente ridotto drasticamente l'abilità competitiva della lenticchia (CR  $0.27 \pm 0.02$  in diserbo vs  $0.40 \pm 0.02$  in non diserbo rispettivamente, come media di tutti i rapporti di consociazione).

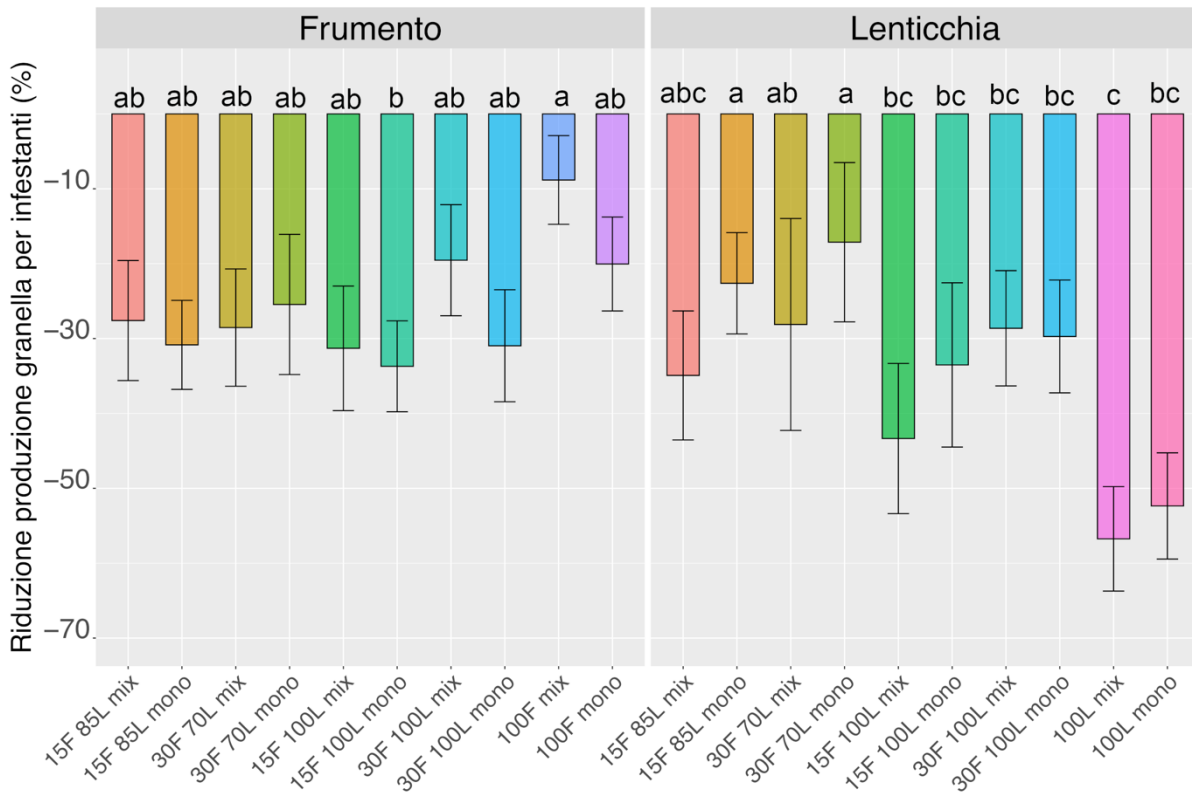
L'utilizzo del miscuglio varietale/popolazioni ha incrementato l'aggressività competitiva del frumento nei confronti della lenticchia (CR  $6.03 \pm 0.30$  vs  $4.21 \pm 0.18$  per mix vs mono in diserbo e  $3.23 \pm 0.22$  vs  $2.40 \pm 0.15$  per mix vs mono in non diserbo). Al contrario, in assenza di diserbo la lenticchia mono varietale è risultata più abile a competere con il cereale rispetto al miscuglio ( $0.36 \pm 0.02$  mix vs  $0.44 \pm 0.02$  mono), mentre nei trattamenti diserbati le differenze sono risultate trascurabili ( $0.29 \pm 0.03$  mix vs  $0.27 \pm 0.02$  mono; Fig. 2.7).



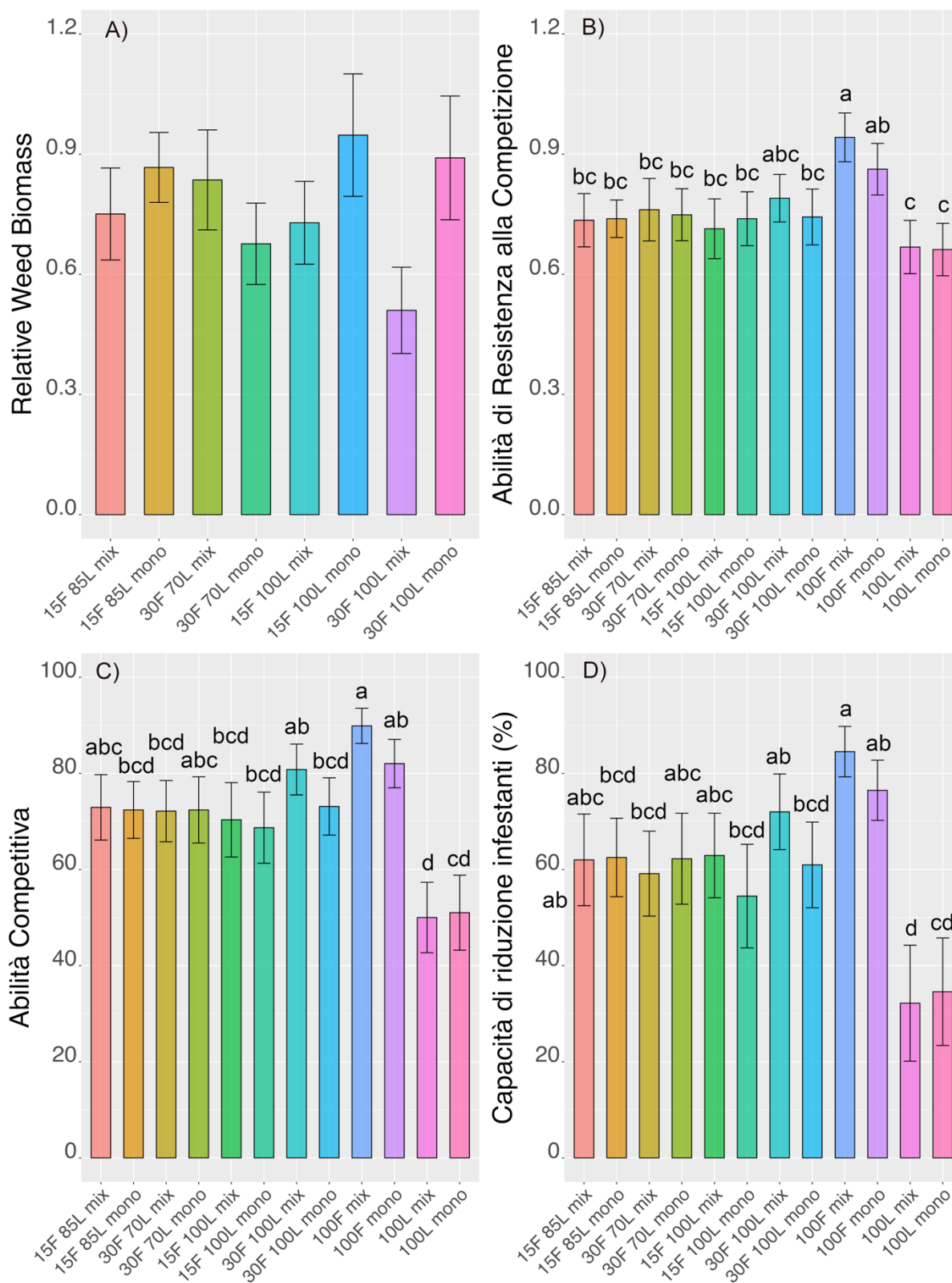
**Figura 2.7.** Competitive Ratio in frumento A) e in lenticchia B) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n=16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; nono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .

Il frumento ha subito una importante e significativa (tab 2.3) riduzione produttiva in presenza delle infestanti rispetto al diserbato, pur dimostrando una elevata abilità competitiva anche verso le infestanti (fig. 2.8). Tuttavia, la riduzione nella produzione di granella del cereale dovuta alle infestanti è quasi sempre stata minore nel mix varietale rispetto al mono-varietale. Nel dettaglio, la condizione che ha favorito la maggiore abilità competitiva del cereale è risultata l'adozione del mix varietale in purezza (riduzione della resa pari a  $-8.82 \pm 5.92$  %; 100Fmix), mentre quella che ha determinato la più alta riduzione di resa è risultata la condizione 15F100Lmono ( $-33.71 \pm 6.07$  %). La grande abilità competitiva del mix di varietà/popolazioni di frumento emerge anche dagli altri indici calcolati relativi al comportamento delle diverse tesi nei confronti della flora spontanea dove il trattamento 100Fmix si è sempre distinto dagli altri trattamenti in valutazione (Fig. 2.9B, C e D).

L'effetto competitivo delle infestanti è risultato decisamente più marcato nei confronti della lenticchia. Anche per quest'ultima, la riduzione della resa dovuta alle infestanti è stata influenzata dai trattamenti. La lenticchia in purezza ha mostrato la maggiore riduzione di resa dovuta alla presenza delle infestanti, con riduzioni nel mix varietale leggermente maggiori rispetto alla varietà Pietranera in purezza ( $-56.75 \pm 6.97$  e  $-52.35 \pm 7.09$  % in 100Lmix e 100Lmono rispettivamente). Il trattamento 30F70Lmix sembra essere stato quello che ha meglio sopportato la pressione competitiva della flora infestante rispetto alla produzione di granella (riduzione di resa dovuta alle infestanti pari a  $-28.62 \pm 7.70$ %; Fig. 2.8). Negli altri indici relativi alle infestanti calcolati, la lenticchia in purezza, sia in mix che in mono, è sempre risultata quella meno abile a competere con le infestanti. Per questi indici non sono state osservate grandi differenze tra i vari rapporti di consociazione; l'unica condizione che si è leggermente distinta rispetto alle altre è risultata la 30F100Lmix che ha mostrato una leggera riduzione della biomassa relativa della flora infestante (Relative Weed Biomass; Fig. 2.9A; anche se non statisticamente rilevante) e un leggero incremento dell'abilità di resistenza alla competizione, dell'abilità competitiva e della capacità di riduzione delle infestanti (Fig. 2.9B, C e D).



**Figura 2.8.** Riduzione della produzione di granella dovuta alla presenza di infestanti al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n=16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.9.** Relative weed biomass A), abilità di resistenza alla competizione B), abilità competitiva C), e capacità di riduzione della presenza di infestanti D) al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; mono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Lettere diverse indicano differenze tra le tesi in valutazione per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi per  $p \leq 0.05$ .

## Prova 2: Ruolo della precessione colturale nella consociazione frumento duro-lenticchia

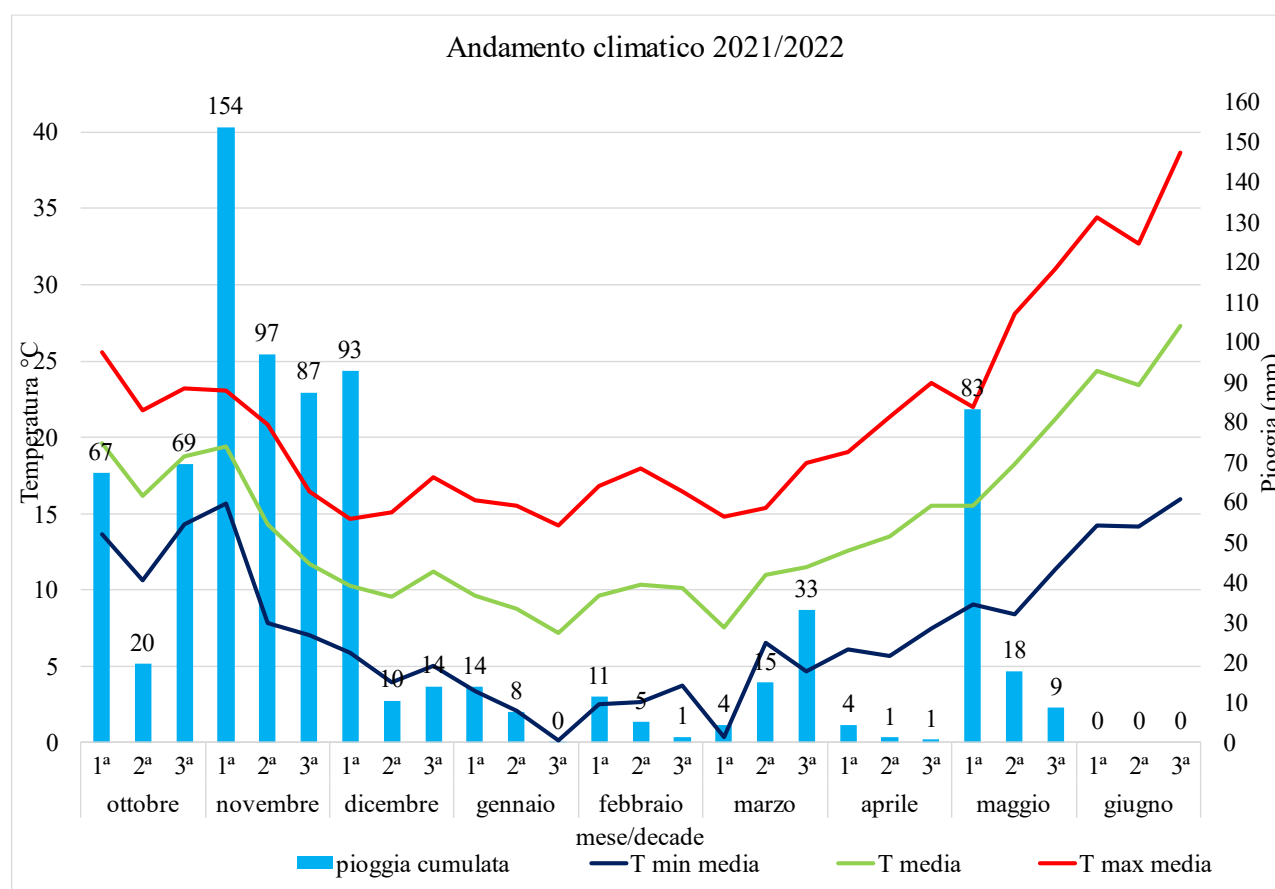
### Obiettivo

La presente prova ha avuto l'obiettivo di valutare l'effetto della precessione (graminacea o leguminosa) in consociazioni frumento duro - lenticchia a diversi rapporti di consociazione (additivi e sostitutivi) sulla capacità di competizione con la flora infestante.

### Materiali e metodi

#### Descrizione della prova

I dati relativi alla presente prova derivano dalle tre annate agrarie 2019/20, 2020/21 e 2021/22. Le precipitazioni totali del periodo colturale (dalla data di semina alla raccolta) 2019/20, sono risultate complessivamente pari a 273 mm (media pluriennale del corrispondente periodo: 347 mm); nell'annata 2020/2021 sono risultate pari a 245 mm (media 270 mm); mentre nell'annata 2021/2022 sono state pari a 221 mm (media 314 mm) (cfr. fig. 2b, riportata nella prova 1, e Fig. 2c).



**Figura 2.c.** andamento climatico nel sito sperimentale nell'annata agraria 2021/22. Le linee descrivono l'andamento della temperatura massima (in rosso), media (in verde) e minima (in nero); le barre la piovosità media decadale per ogni singolo mese nel periodo di crescita delle colture.



È stato adottato uno schema a blocchi randomizzati e parcella suddivisa con 8 repliche in cui sono stati posti a confronto 4 diversi rapporti di consociazione tra frumento e lenticchia come parcelle principali e la presenza o assenza di diserbo come sub-parcelle. Con funzione di colture di controllo sono state inserite le due colture in purezza, per un totale di 6 trattamenti (4 rapporti di consociazione + 2 colture pure), secondo il seguente schema:

- Frumento duro in purezza (100 F), seminato alla densità standard di 350 semi germinabili al m<sup>2</sup>;
- Lenticchia in purezza (100 L), seminata alla densità standard di 200 semi germinabili al m<sup>2</sup>;
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 15:85 (15F-85L);
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 30:70 (30F-70L);
- Consociazione additiva con rapporto frumento lenticchia 15:100 (15F-100L);
- Consociazione additiva con rapporto frumento lenticchia 30-100 (30F-100L)

Per il frumento duro (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* (Desf.) Husn) è stata utilizzata la varietà “Antalis”, mentre per la lenticchia (*Vicia lens* (L.) Coss. & Germ, syn. *Lens culinaris* Medik) la linea “Pietranera”.

Nel complesso, ogni dispositivo sperimentale è stato dunque costituito da 48 parcelle principali (6 trattamenti principali × 8 repliche) e 96 parcelle secondarie (48 × 2 trattamenti di diserbo/assenza di diserbo). Infine, nel dispositivo sperimentale è stata inclusa una parcella non seminata per ciascun blocco, al fine di rilevare lo sviluppo massimo delle infestanti in assenza di coltura ed osservarne la composizione floristica. È stata adottata una dimensione delle parcelle principali di 9 m<sup>2</sup> (1,5 × 6,0 m).

Al fine di valutare l’effetto del precedente colturale, i trattamenti sono stati allevati in successione a leguminosa (nelle annate agrarie 2019/20 e 2020/21) e in successione a graminacea (nelle annate agrarie 2020/21 e 2021/22). Nel caso della successione a leguminosa, nell’annata agraria 2019/20 il precedente è stato cece, mentre trifoglio alessandrino nell’annata agraria 2020/21. Per la successione a graminacea, il precedente è sempre stato frumento duro.

La semina è stata effettuata a macchina con seminatrice parcellare, su file distanti 18 cm, e nel caso delle consociazioni, con le due componenti mescolate sulla fila.

In tabella 2.4 è riportato un quadro riassuntivo dei trattamenti in valutazione.

**Tabella 2.4.** Tabella riassuntiva dei trattamenti applicati nella prova

Trattamento Principale	Trattamento secondario			Trattamento terziario	
	Allevamento	Specie	Rapporto di consociazione		
Graminacea	Purezza	Frumento	-	Presenza Assenza	
		Lenticchia	-	Presenza Assenza	
	Consociazione	Frumento - Lenticchia	15F 85L	Presenza Assenza	
			30F 70L	Presenza Assenza	
			15F 100L	Presenza Assenza	
			30F 100L	Presenza Assenza	
	Leguminosa	Purezza	Frumento	-	Presenza Assenza
			Lenticchia	-	Presenza Assenza
Consociazione		Frumento - Lenticchia	15F 85L	Presenza Assenza	
			30F 70L	Presenza Assenza	
			15F 100L	Presenza Assenza	
			30F 100L	Presenza Assenza	

Per i trattamenti in cui il precedente è stato la graminacea, la semina è stata effettuata il 27 novembre 2020 e il 20 dicembre 2021. Per i trattamenti con precessione a leguminosa la semina è stata effettuata il 5 dicembre 2019 e l'8 gennaio 2021 (nel secondo anno, lo sfasamento rispetto ai trattamenti con precessione graminacea è dovuto all'allagamento del campo seminato inizialmente contestualmente, a causa delle perduranti piogge successive alla semina). Nelle sub-parcelle diserbate (metà di ciascuna parcella principale; dimensioni 1,5 × 3 m), la scerbatura è stata effettuata manualmente durante l'intero ciclo colturale. In tutti gli anni di prova non sono stati distribuiti né fertilizzanti né agrofarmaci.

Sulle sole sub-parcelle diserbate , su 4 ripetizioni la prima annata, la seconda nelle tesi a precessione cereale e la terza, e su 5 ripetizioni la seconda annata in precessione a legume, su un'area di saggio di 1 m<sup>2</sup> al centro della sub-parcella, è stato applicato l'isotopo stabile dell'<sup>15</sup>N, al fine di monitorare il processo di azotofissazione biologica, secondo il metodo della diluizione isotopica (Unkovich et al. 2008). L'isotopo è stato applicato sotto forma di solfato di ammonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) con arricchimento in <sup>15</sup>N del 10%. Il fertilizzante arricchito è stato somministrato in due interventi di 4 kg/ha equivalenti per un totale complessivo di 8 kg/ha di N equivalente. Nelle tesi con precedente a leguminosa il fertilizzante è stato applicato il 09/01 e il 26/02 e il 18/02 e il 31/03 nelle annate agrarie 2019/20 e 2020/21 rispettivamente. Nei trattamenti in cui il precedente è stato la graminacea il fertilizzante è stato applicato il 18/02 e il 01/04 2021 e il 10/03 e l'11/04 2022.

In tutti gli esperimenti le operazioni di raccolta sono state effettuate nella prima metà del mese di giugno e si sono svolte nell'arco di 2-3 giorni.

La mietitura è stata eseguita a mano, mediante sfalcio delle piante a livello del suolo. È stata raccolta l'intera sub-parcella, e in seguito le componenti (frumento, lenticchia e infestanti nel caso delle sub-parcelle non diserbate) sono state accuratamente separate a mano e pesate.

Frumento e lenticchia sono quindi stati trebbiati separatamente mediante una trebbia meccanica.

### ***Rilievi***

Prima della raccolta sono stati rilevati: l'altezza delle piante, il grado di copertura (espresso in %) per ogni componente, tramite stima visiva (dati non presentati), il grado (in %) e il tipo (su una scala da 0 a 5) di allettamento. Per il frumento, al momento della raccolta è stato inoltre misurato il numero di spighe per unità di superficie.

Dopo lo sfalcio è stato rilevato il peso della biomassa totale di ogni componente (frumento, lenticchia e infestanti). Dopo la trebbiatura è stata quantificata la produzione di granella e il peso di 1000 semi del frumento e della lenticchia e, per il solo frumento il peso ettolitrico e il contenuto proteico della granella.

Per ciascuna specie, alcuni giorni prima della mietitura è stato prelevato un campione dall'area di saggio su cui era stato applicato <sup>15</sup>N, sul quale è stato quantificato il contenuto in azoto mediante metodo Dumas e il contenuto dell'isotopo stabile <sup>15</sup>N mediante il metodo MIP 134 Rev. 00 2017 (così come descritto nella prova 1).

È stato inoltre eseguito il rilievo della composizione della flora infestante, con una metodica che ricalca il metodo di rilievo della vegetazione di Braun-Blanquet. Per ogni sub parcella non diserbata è stata valutata la composizione della flora attribuendo a ciascuna specie individuata un valore

corrispondente alla stima della sua copertura, secondo la scala di Braun-Blanquet (dati non presentati).

### ***Elaborazione dati e analisi statistica***

I dati ottenuti sono stati elaborati al fine di calcolare gli indici di efficienza della consociazione in termini di produzione per unità di superficie mediante il calcolo del LER (Willey, 1979) parziale per le due componenti e quello totale della consociazione, come già descritto nella prova 1 (equazioni 1, 2 e 3).

La capacità competitiva di ciascuna componente nei confronti dell'altra è stata calcolata utilizzando il *Competitive Ratio* (CR; eq.4 e 5 descritte in prova 1), mentre la *Riduzione della produzione Granellare dovuta alla Presenza di Infestanti* (RGPI) è stata calcolata utilizzando le eq.6, 7, 8 e 9 riportate in prova 1.

I dati ottenuti dalla quantificazione della concentrazione in azoto sono stati utilizzati per il calcolo delle asportazioni dell'elemento (*N uptake*; eq.10, 11, 12 e 13 descritte in prova 1), mentre quelli relativi all'isotopo  $^{15}\text{N}$  per la quantificazione dell'azoto derivante dalla fissazione biologica nella leguminosa (*Ndfa*) e dell'azoto trasferito dalla leguminosa alla graminacea (*N transfer*) utilizzando le eq.14, 15 e 16 (cfr prova 1).

I dati relativi alla presenza di infestanti nelle parcelle non diserbate e nelle parcelle non seminate sono stati utilizzati per il calcolo di indici relativi all'efficienza della consociazione nel controllo della flora spontanea presente. Gli indici calcolati sono stati: il *Relative Weed Biomass* (RWB), l'*Abilità Competitiva* (AC), l'*Abilità di Resistenza alla Competizione* (AWC) e la *Capacità di Contenimento delle Infestanti della consociazione* (CCI) utilizzando rispettivamente le eq.17, 18, 19 e 20 descritte in prova 1.

I dati ottenuti sono stati poi elaborati utilizzando il software R (R Core Team, 2022) con procedura di tipo split-split-plot in cui il precedente colturale è stato utilizzato come fattore split primario, la tesi come fattore split secondario e il diserbo come sub-parcella. L'anno è stato utilizzato come fattore random. I dati sono stati elaborati utilizzando il pacchetto "*nlme*" (Pinnheiro et Bates 2023). Quando necessario, la differenza tra le medie del diverso precedente colturale all'interno di ogni singola specie, rapporto consociativo e trattamento di diserbo è stata calcolata utilizzando il *Tukey test* presente nel pacchetto "*emmeans*" (Lenth, 2023).

Per quanto riguarda i soli dati relativi all'allettamento, l'analisi, a differenza che per le altre variabili, è stata condotta come segue:

- per l'annata 2019/2020-precessione a leguminosa, soli trattamenti diserbati (non essendo stato rilevato il dato per i trattamenti non diserbati);
- per l'annata 2020/2021, split-split-plot: congiuntamente fra le due precessioni (con la precessione considerata come fattore split primario), per trattamenti diserbati e non (diserbo come fattore split secondario);
- per l'annata 2021/2022-precessione a cereale: split-plot per trattamenti diserbati e non (diserbo come fattore split).

La presentazione grafica dei dati è stata ottenuta utilizzando il meta-pacchetto “*tidyverse*” (Wickham et al., 2019) in cui sono inclusi il pacchetto “*ggplot2*” (Wickham 2016) e il pacchetto “*cowplot*” (Wilke, 2020).

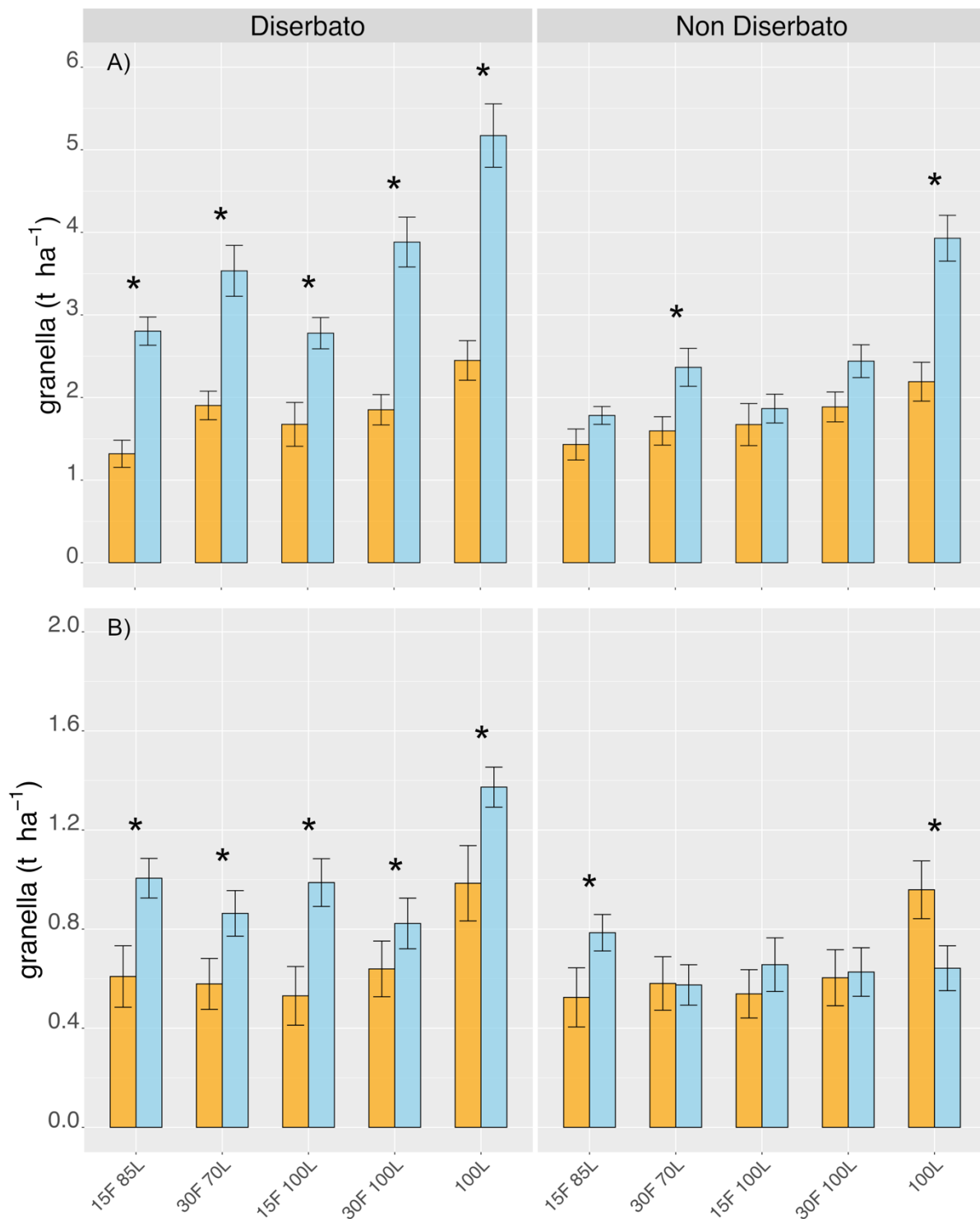
## Risultati

La produzione di granella in frumento ha subito un forte effetto del precedente colturale ( $1.80 \pm 0.07$  vs  $3.05 \pm 0.11$  in successione a graminacea e a leguminosa rispettivamente), tuttavia tali effetti hanno avuto spesso effetti significativamente influenzati dal rapporto consociativo applicato e alla presenza/assenza del diserbo (interazioni significative, Tabella 2.5). Infatti, come si può notare dalla figura 2.10A, in presenza di diserbo la produzione granellare del frumento in successione a leguminosa risulta sempre più elevata rispetto a quando la coltura succede a una graminacea. In assenza di diserbo, benché il precedente a leguminosa mantenga la sua generale superiorità media, l'analisi statistica evidenzia delle differenze significative solo nella coltura in purezza ( $2.20 \pm 0.23$  vs  $3.93 \pm 0.28$  t/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente) e nel rapporto consociativo 30F 70L ( $1.59 \pm 0.17$  vs  $2.37 \pm 0.23$  t/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente; Fig. 2.10A). Il beneficio del precedente a leguminosa si è manifestato anche in alcuni aspetti qualitativi della granella di frumento quali peso dei mille semi e peso ettolitrico, sebbene per il primo carattere le differenze tra precessioni entro trattamento non siano mai risultate significative se si pone come valore soglia per valutare la significatività  $p \leq 0.05$  ("metodo dicotomico" del  $p\text{-value} \leq 0.05$ ; Tabella 2.5). Entrambi i parametri hanno mostrato in media valori più elevati nella granella di frumento derivante dalla coltura in successione a leguminosa ( $47.12 \pm 0.42$  vs  $53.60 \pm 0.36$  g per il peso di mille semi e  $83.61 \pm 0.11$  vs  $85.03 \pm 0.06$  kg per il peso ettolitrico in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente; Fig. 2.11). Per entrambi i parametri, il precedente colturale ha mostrato interazione con gli altri trattamenti in valutazione (con rapporto di consociazione e con il trattamento di diserbo per il peso dei mille semi e solamente con il trattamento diserbante per quanto riguarda il peso ettolitrico; Tabella 2.5).

Nel complesso, anche la lenticchia si è avvantaggiata del precedente a leguminosa, che ha determinato un incremento della produzione granellare media di 0.18 t/ha ( $0.65 \pm 0.04$  vs  $0.83 \pm 0.03$  t/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente); ma anche in questo caso il parametro è risultato fortemente influenzato dal rapporto di consociazione e dal trattamento di diserbo (interazioni significative, Tabella 2.5). Analogamente a quanto osservato per il frumento, il precedente colturale a leguminosa ha sempre determinato un incremento significativo della produzione granellare in presenza di diserbo, mentre effetti variabili sono stati riscontrati in assenza di diserbo. In quest'ultimo caso, infatti, il precedente a leguminosa sembra aver fortemente favorito la produzione della lenticchia nel trattamento 15F85L ( $0.52 \pm 0.12$  vs  $0.78 \pm 0.07$  t/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente) mentre ha determinato un effetto inverso nella lenticchia allevata in purezza ( $0.96 \pm 0.12$  vs  $0.64 \pm 0.09$  t/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente),

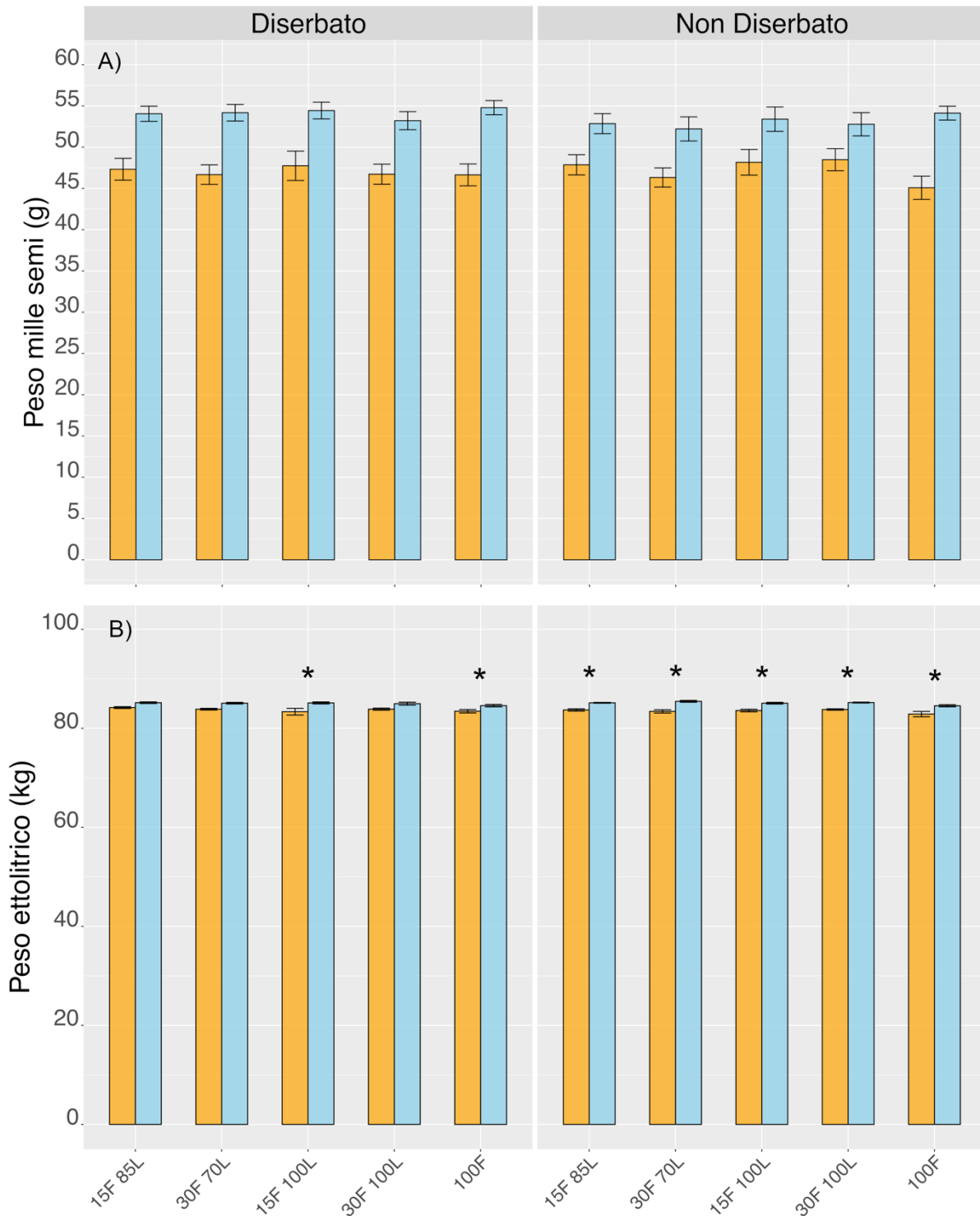
**Tabella 2.5.** Risultati ANOVA per le variabili di risposta osservate; *p-value*.

	Frumento							Lenticchia						
	Precessione (P)	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	PxT	PxD	TxD	PxTxD	Precessione (P)	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	PxT	PxD	TxD	PxTxD
<b>Granella (t/ha)</b>	< 0.0001	0,0056	0,4071	< 0.0001	< 0.0001	0,8943	0,4215	0,0039	< 0.0001	0,2549	0,0022	< 0.0001	0,0150	0,0068
<b>Peso mille semi (g)</b>	0,2806	0,9526	0,8792	0,0098	< 0.0001	0,2661	0,5734	-	-	-	-	-	-	-
<b>Peso ettolitrico (kg/hl)</b>	0,0015	0,6469	0,7939	0,1619	0,0252	0,9026	0,3817	-	-	-	-	-	-	-
<b>N granella (g/kg)</b>	0,5015	0,0875	0,1662	0,0005	0,7250	0,0134	0,9715	-	-	-	-	-	-	-
<b>N uptake granella (kg/ha)</b>	< 0.0001	0,0107	0,4506	< 0.0001	< 0.0001	0,9774	0,2192	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ndfa (%)</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,8213	0,5548	-	0,2385	-	-	-
<b>N transfer (%)</b>	0,9564	0,7274	-	0,0580	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>LER parziali</b>	0,7447	0,0516	0,7497	0,0145	< 0.0001	0,4607	0,1976	0,0030	0,5067	< 0.0001	0,0286	< 0.0001	0,8501	0,0825
<b>Competitive Ratio</b>	0,4136	0,0506	0,1476	< 0.0001	< 0.0001	0,9716	0,0040	0,2617	< 0.0001	0,0281	0,0822	< 0.0001	0,9782	0,0188
<b>Riduzione produzione granella per infestanti (%)</b>	0,1280	0,9649	-	0,0126	-	-	-	0,0282	0,8815	-	0,0023	-	-	-
<b>Consociazione</b>														
	Precessione (P)	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	PxT	PxD	TxD	PxTxD							
<b>LER totali</b>	0,6381	0,1313	< 0.0001	0,0282	0,0337	0,4199	0,2575							
<b>Relative weed Biomass</b>	0,9246	0,7664	-	0,6031	-	-	-							
<b>Abilità Competitiva</b>	< 0.0001	0,0698	-	0,0790	-	-	-							
<b>Abilità di Resistenza alla Competizione</b>	< 0.0001	< 0.0001	-	0,2025	-	-	-							
<b>Capacità di riduzione infestanti (%)</b>	< 0.0001	< 0.0001	-	0,0086	-	-	-							
<b>Allettamento (%)</b>														
<b>Lenticchia</b>														
	Precessione (P)	Trattamento principale (T)	Diserbo (D)	PxT	PxD	TxD	PxTxD							
<b>2019-2020 prec. leguminosa - diserbato</b>	-	< 0.0001	-	-	-	-	-							
<b>2020-2021 confronto precessioni</b>	0,2467	< 0.0001	0,2073	0,4344	0,0205	0,2077	0,1385							
<b>2021-2022 prec. cereale</b>	-	0,4954	0,2334	-	-	0,4845	-							

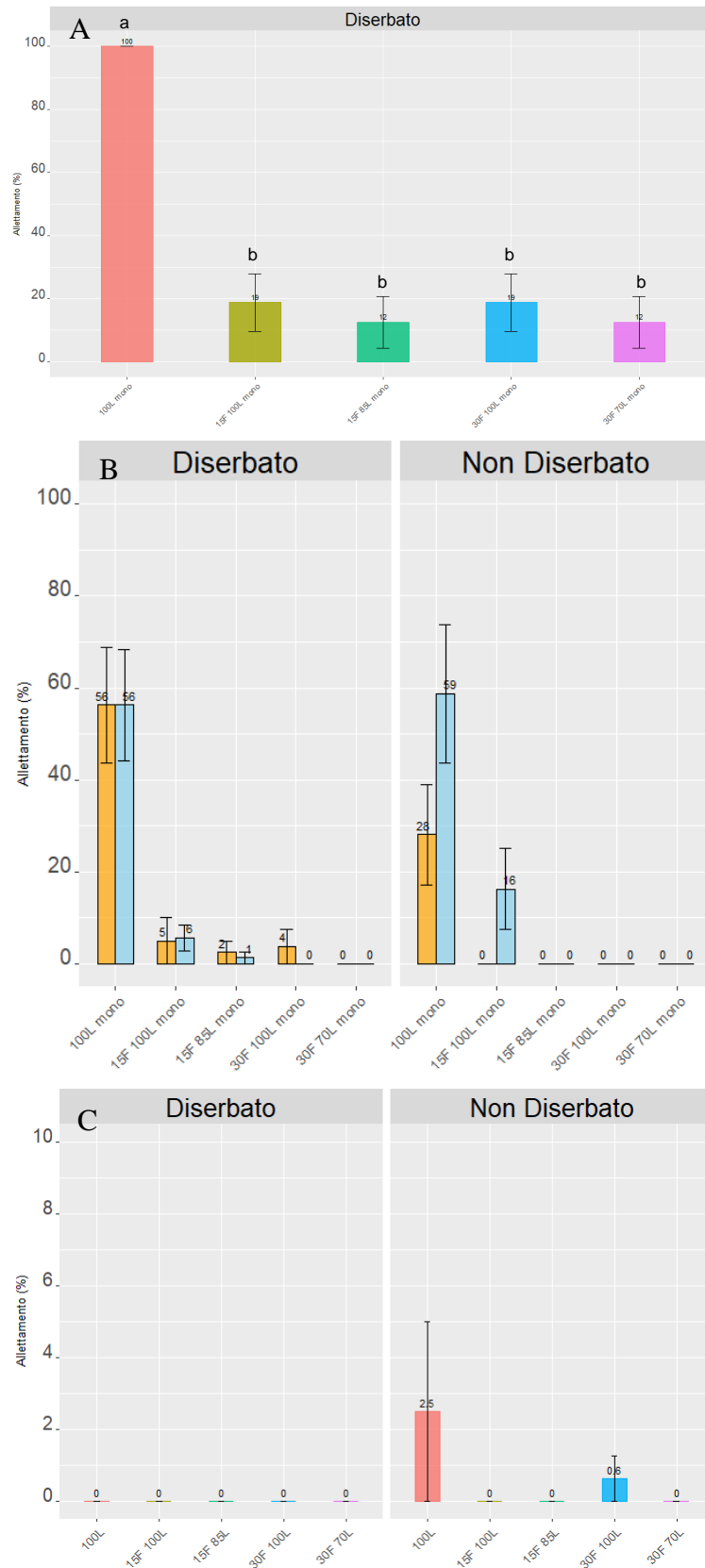


**Figura 2.10.** Produzione di granella in frumento A) e in lenticchia B) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale. Asterischi sulle barre indicano differenze al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .





**Figura 2.11.** Pese mille semi A) e Peso ettolitrico B) in frumento al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente culturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente culturale. \* sulle barre indicano differenze al variare del precedente culturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente culturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.12.** Allettamento percentuale della lenticchia nella prova 2 al variare delle condizioni di allevamento applicate. A) 2019-2020: precessione leguminosa, soli trattamenti diserbati; B) 2020-21, in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale; C) 2021-2022, precessione cereale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero); n= 8. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia. \* sulle barre indicano differenze al variare del precedente

colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi entro specie e modalità di diserbo per  $p \leq 0.05$

mentre nessuna differenza apprezzabile dovuta al precedente colturale è stata rilevata negli altri rapporti di consociazione (Fig. 2.10B).

Per quanto riguarda l'allettamento (Fig. 2.12), per il primo anno di prova (precessione a leguminosa) si registra la differenza altamente significativa fra la lenticchia in purezza (che raggiunge il valore di 100% di allettamento) e tutti i trattamenti di consociazione, nessuno dei quali supera il 20% di allettamento.

Il secondo anno di prova, non si registrano differenze statisticamente significative fra le due precessioni per nessuno dei trattamenti messi in prova; la lenticchia in coltura pura fa registrare comunque sempre valori estremamente più alti di tutte le consociazioni, che si attestano su valori quasi sempre inferiori al 10%.

Nel 21/22 (precessione cereale), l'allettamento è praticamente assente ad eccezione della lenticchia in purezza non diserbata e della consociazione 30-100 diserbata, e non si registrano differenze significative fra i trattamenti.

La concentrazione in azoto nella granella di frumento ha subito un leggero ma statisticamente non significativo incremento con il precedente colturale a leguminosa (media di tutti i trattamenti con precedente a graminacea  $17.84 \pm 0.14$  vs  $19.21 \pm 0.14$  g/kg media di tutti i trattamenti con precedente a leguminosa; Fig. 2.13A; Tabella 2.5).

L'analisi statistica ha invece evidenziato un forte effetto della precessione e del rapporto consociativo sul quantitativo di azoto assorbito dalla granella di frumento duro, sia come media sia in interazione tra loro e con il trattamento di diserbo (Tabella 2.5). Le differenze più marcate sono state rilevate per il trattamento 30F100L dove la concentrazione azotata media della granella è aumentata di 1.8 g/kg grazie al precedente colturale a leguminosa ( $17.66 \pm 0.34$  vs  $19.47 \pm 0.35$  g/kg in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente, media di tutti i trattamenti diserbati e non; Fig. 2.11A).

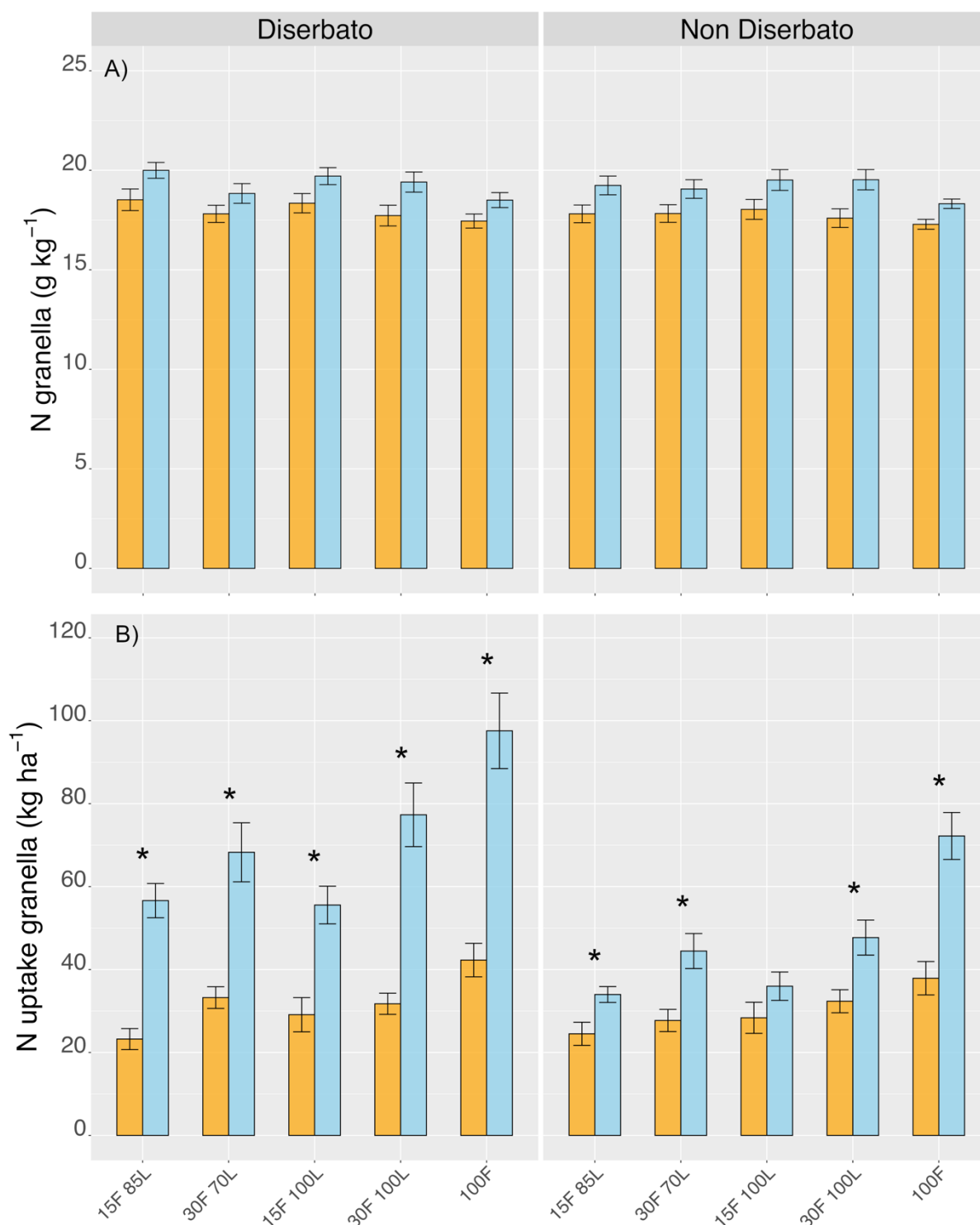
In media, il precedente a leguminosa ha fatto aumentare il quantitativo di N assorbito di 27.92 kg/ha. Le differenze più marcate sono state osservate nel trattamento 100F diserbato dove il precedente a leguminosa ha incrementato il quantitativo di N assorbito di 55.28 kg/ha ( $42.28 \pm 4.04$  vs  $97.56 \pm 9.11$  kg/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente), mentre le minori sono state rilevate nel trattamento 15F100L non diserbato, dove il parametro è aumentato solamente

di 7.62 kg/ha ( $28.36 \pm 3.75$  vs  $35.98 \pm 3.42$  kg/ha in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente; Fig. 2.13B).

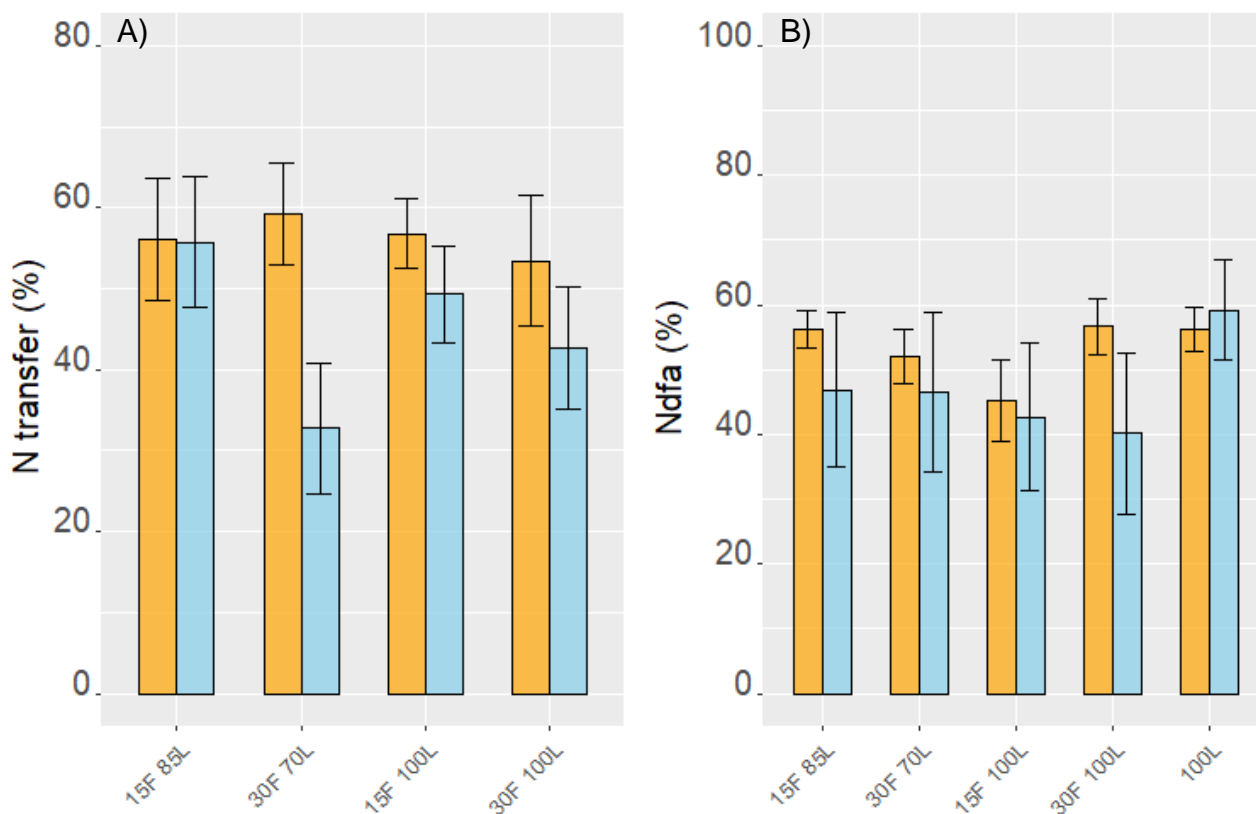
Per quanto riguarda l'origine dell'azoto presente nella graminacea, sembra che il trasferimento dalla leguminosa associata non abbia subito variazioni dovute al precedente colturale utilizzato né agli altri trattamenti applicati. Analogamente, la percentuale di N fissato dalla leguminosa sembra non essere stato influenzato da nessuno dei fattori applicati (Fig. 2.14; Tabella 2.5).

Al contrario invece, un chiaro effetto del precedente colturale in interazione con la modalità consociativa e il diserbo è stato evidenziato per gli indici di efficienza d'uso della superficie investita (LER; Tabella 2.5).

I LER totali (figura 2.15) sembrano non essere stati complessivamente influenzati nei trattamenti di consociazione allevati in presenza di diserbo ( $1.25 \pm 0.05$  vs  $1.31 \pm 0.03$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente nel diserbo come media di tutti i rapporti di consociazione applicati), mentre un marcato incremento dovuto al precedente colturale a leguminosa è stato osservato



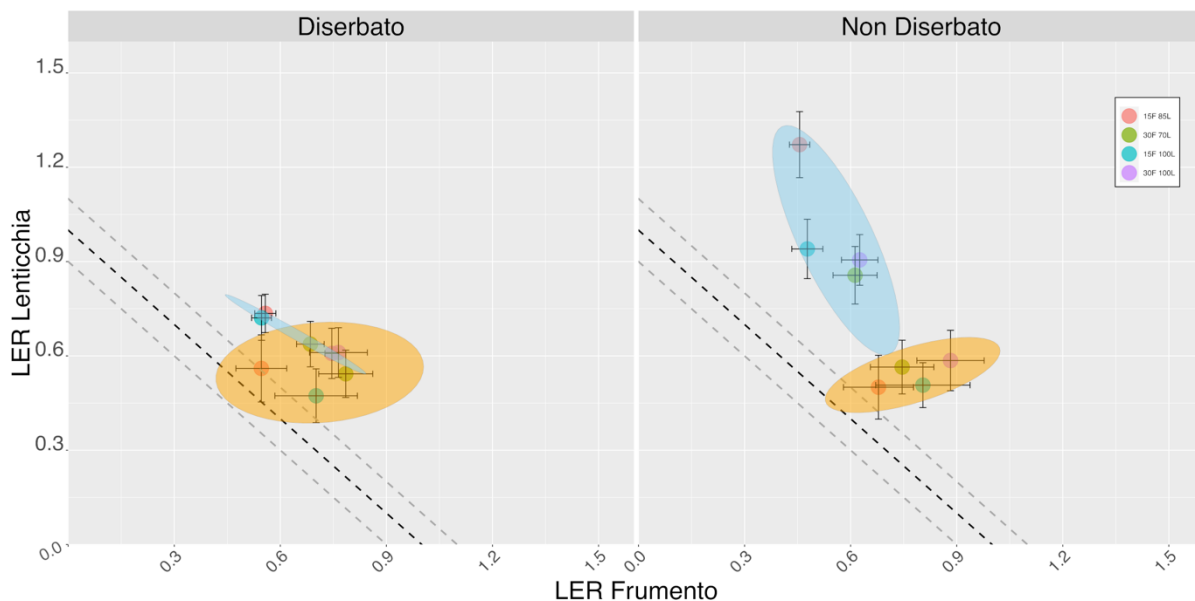
**Figura 2.13.** Concentrazione di azoto nella granella A) e azoto asportato con la granella B) in frumento al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale. \* sulle barre indicano differenze al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.14.** N transfer per il frumento - A), Ndfa per la lenticchia - B) al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 9$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale. Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .

in assenza di diserbo ( $1.32 \pm 0.11$  vs  $1.54 \pm 0.06$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in assenza di diserbo, media di tutti i rapporti di consociazione applicati; Fig. 2.14). Dall'analisi dei LER parziali emerge ulteriormente che il beneficio principale del precedente colturale a leguminosa è stato dovuto all'incremento del LER parziale della lenticchia ( $0.55 \pm 0.04$  vs  $0.67 \pm 0.03$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in presenza di diserbo e  $0.54 \pm 0.04$  vs  $0.99 \pm 0.05$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in assenza di diserbo, media di tutti i rapporti di consociazione applicati), mentre il frumento ha in generale mostrato una leggera riduzione dei LER parziali ( $0.70 \pm 0.04$  vs  $0.63 \pm 0.02$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in presenza di diserbo e  $0.78 \pm 0.05$  vs  $0.54 \pm 0.02$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in assenza di diserbo, media di tutti i rapporti di consociazione applicati; Fig. 2.14).

Il beneficio offerto dalla precessione a leguminosa sui risultati della lenticchia si manifesta anche nell'abilità competitiva che la leguminosa ha manifestato nei confronti della graminacea associata. Anche in questo caso, l'effetto del precedente sugli indici di competizione ha interagito con gli altri due fattori in prova (interazione  $P \times T \times D = 0.0188$ ; Tabella 2.5).



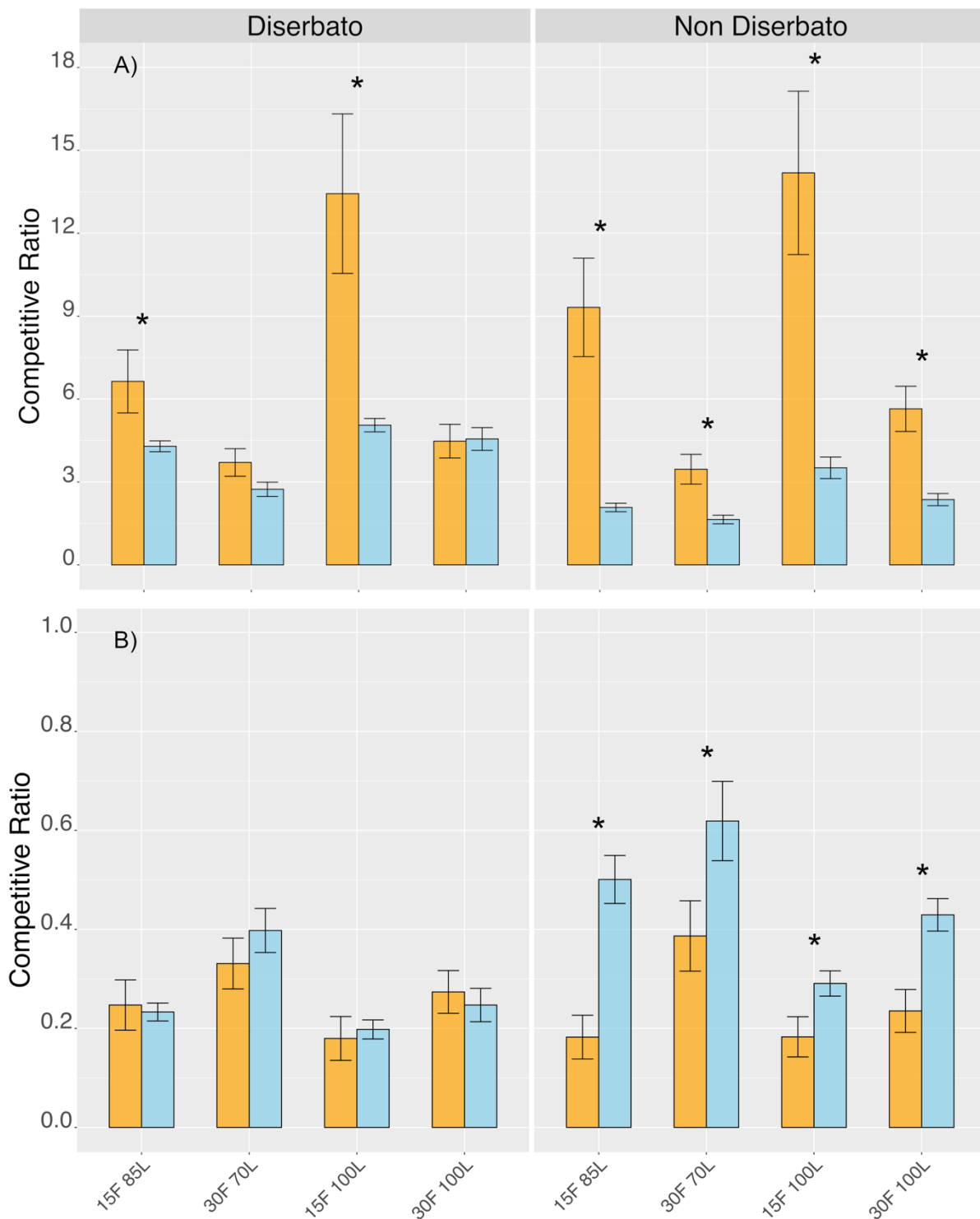
**Figura 2.15.** Land Equivalent Ratio (LER) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 16$ . Descrizione dei rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; ellisse in arancione racchiude i trattamenti in cui il precedente colturale è stato graminacea; ellisse in azzurro racchiude i trattamenti in cui il precedente colturale è stato leguminosa. La retta in nero delimita l'unità dei LER totali nei rapporti di consociazione usati. In grigio le rette relative a LER totali pari a 0.9 e 1.1.

In presenza di diserbo, i Competitive Ratio (CR) della lenticchia in precessione a leguminosa non si sono granché discostati da quelli in precessione a graminacea ( $0.26 \pm 0.02$  vs  $0.27 \pm 0.02$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in presenza di diserbo, media di tutti i rapporti di consociazione applicati), mentre in assenza di diserbo il precedente a leguminosa ha notevolmente migliorato l'abilità competitiva della lenticchia nei confronti del frumento ( $0.25 \pm 0.03$  vs  $0.46 \pm 0.03$  in successione a graminacea e leguminosa rispettivamente in non diserbato, media di tutti i rapporti di consociazione applicati; Fig. 2.16B). Anche per il CR del frumento è stata evidenziata una forte interazione tra i tre fattori applicati (interazione  $P \times T \times D = 0.0040$ ; Tabella 2.5) ma in questo caso la condizione favorevole è risultata il precedente a graminacea che ha notevolmente aumentato l'aggressività del frumento nei confronti della lenticchia associata ( $7.06 \pm 0.92$  vs  $4.16 \pm 0.18$  e  $8.15 \pm 1.01$  vs  $2.40 \pm 0.15$  in successione a graminacea e leguminosa in Diserbato e Non Diserbato rispettivamente, media di tutti i rapporti di consociazione applicati; Fig. 2.16A).

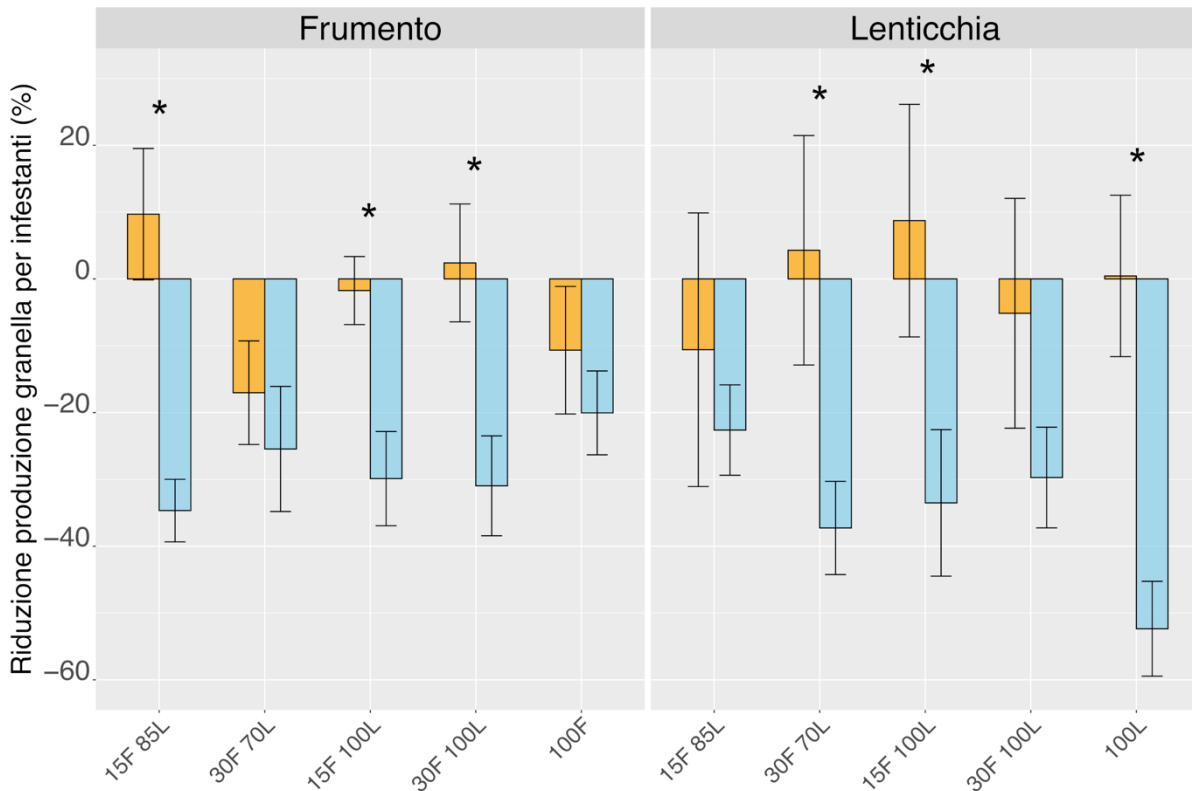
Il trattamento in cui il frumento ha mostrato in misura maggiore la sua aggressività è risultato il 15F100L, sia in presenza che in assenza di diserbo, dove i valori di CR sono passati rispettivamente da  $5.05 \pm 0.24$  e  $3.51 \pm 0.39$  in successione a leguminosa a  $13.43 \pm 2.89$  e  $14.18 \pm 2.95$  in successione a graminacea (Fig. 2.16A). Gli effetti del precedente colturale sull'abilità competitiva del frumento si sono manifestati anche nei confronti della flora spontanea presente. Infatti, come si può notare dalla figura 2.17, in generale, la riduzione nella produzione di granella dovuta alla

presenza di infestanti nella coltura di frumento seguente la graminacea è stata piuttosto modesta ( $-3.47 \pm 3.80$  vs  $-28.20 \pm 3.16$  % in successione a graminacea e





**Figura 2.16.** Competitive Ratio in frumento A) e in lenticchia B) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n=16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale. \* sulle barre indicano differenze al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.17.** Riduzione della produzione di granella dovuta alla presenza di infestanti al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n=16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale. \* sulle barre indicano differenze al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .

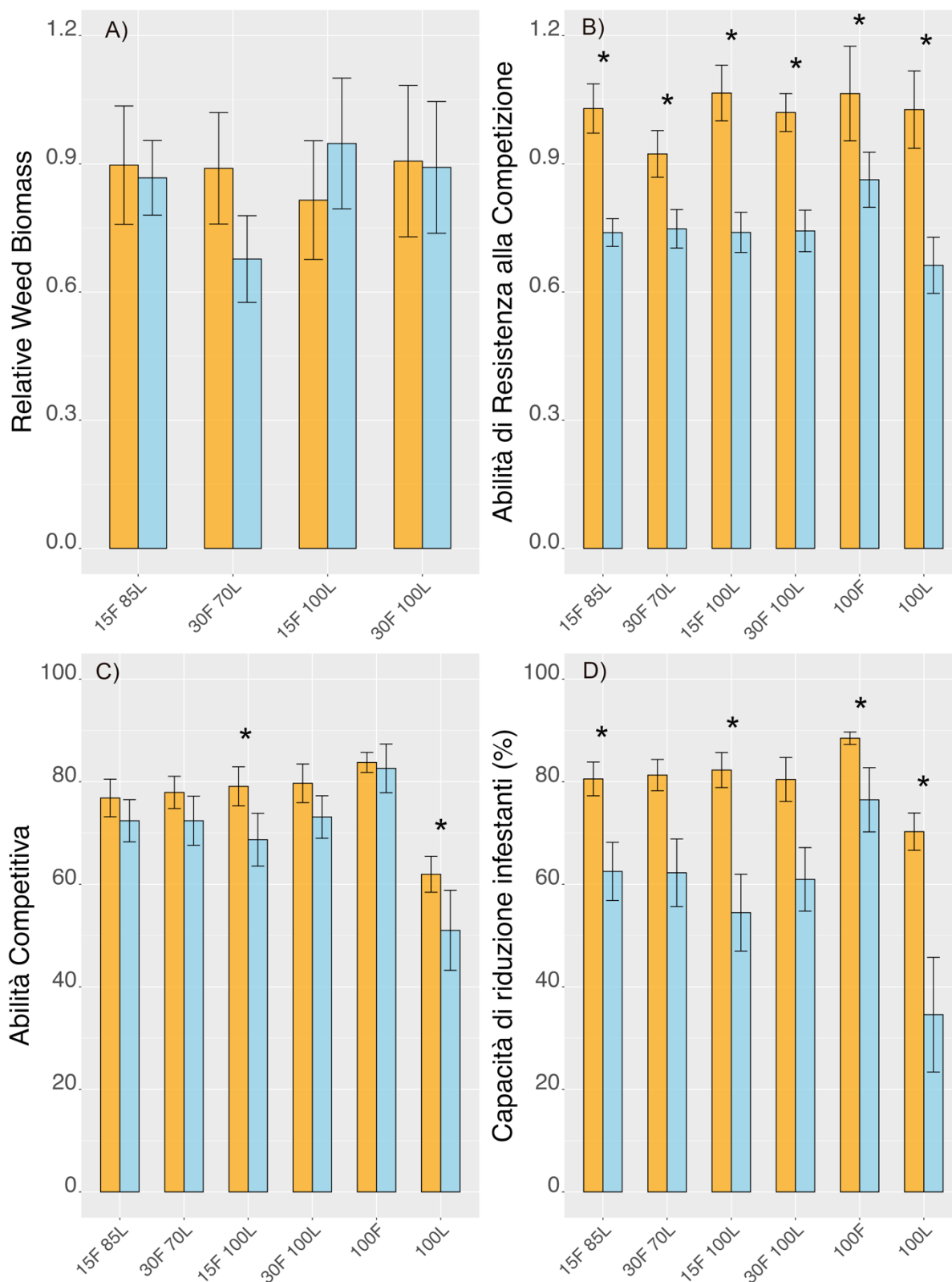
leguminosa rispettivamente, media di tutti i rapporti di consociazione applicati). L'analisi statistica ha messo in evidenza l'interazione tra precedente colturale e tesi di consociazione applicata (Tabella 2.5) mostrando, in alcuni casi, addirittura un incremento medio nella produzione granellare (tesi 15F 85L e 30F 100L). Ciò, come si può notare dalla figura 2.17B, C, D, è stato anche evidenziato dagli altri indici di abilità competitiva delle due colture nei confronti delle infestanti.

Nella lenticchia, la precessione a graminacea, sebbene abbia mostrato una forte riduzione dell'abilità competitiva nei confronti della componente associata, ha mostrato di migliorare l'abilità di far fronte alle infestanti sia in termini di riduzione di resa granellare (dove in alcuni casi, analogamente a quanto osservato per il frumento, è stato rilevato addirittura un incremento; Fig. 2.17) sia nella abilità di resistenza, nell'abilità competitiva e nella capacità di riduzione delle infestanti (Fig. 2.17B, C, D).

Nel suo complesso, i vari rapporti di consociazione hanno risentito positivamente del precedente colturale a graminacea nel far fronte alla pressione della flora spontanea. Infatti, come riportato in figura 2.17B, C, e D, gli indici di abilità a competere, di abilità competitiva e di capacità di riduzione delle infestanti hanno sempre mostrato valori maggiori nelle tesi in successione a

graminacea rispetto alle stesse in successione a leguminosa. Solo nel caso del Relative Weed Biomass non è stata riscontrata alcuna differenza dovuta al precedente colturale (Fig. 2.17A).

Tuttavia, rispetto a tali risultati, ai fini interpretativi è bene notare che, *in conseguenza* della diversa precessione, la pressione iniziale della flora infestante (banca semi) era in precessione a frumento certamente ridottissima rispetto a quanto verificatosi in precessione a leguminosa; dunque sarebbe forse più corretto interpretare i risultati migliori in termini di soppressione della flora spontanea più che altro come conseguenza di una presenza intrinseca di infestanti nettamente inferiore.



**Figura 2.18.** Relative weed biomass A), abilità di resistenza alla competizione B), abilità competitiva C), e capacità di riduzione della presenza di infestanti D) al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n=16$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; in arancione (barre a sinistra) graminacea come precedente colturale; in azzurro (barre a destra) leguminosa come precedente colturale. \* sulle barre indicano differenze al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di \* sulle barre all'interno dei plot indica nessuna differenza al variare del precedente colturale entro stessa condizione di consociazione, stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .

### ***Prova 3: Effetto della disposizione spaziale nella consociazione agraria frumento duro-lenticchia***

#### **Obiettivo**

La prova ha avuto l'obiettivo di valutare l'effetto della diversa disposizione delle piante nello spazio in due rapporti di consociazione sostitutiva frumento-lenticchia. In particolare, le due componenti sono state allevate sulla stessa fila o a file alterne.

#### **Materiali e metodi**

##### ***Descrizione della prova***

La prova è stata seminata per tre annate agrarie consecutive (19/20, 20/21, 21/22), ma durante il secondo anno il campo ha subito gravi danni dovuti a piogge intense cadute subito dopo la semina, che hanno provocato notevoli mancanze nell'emergenza della lenticchia e causato difficoltà nel controllo della flora infestante; conseguentemente il campo è stato escluso dall'analisi dei dati per impossibilità di gestione secondo il protocollo sperimentale.

Le precipitazioni totali, nel corso del ciclo colturale nelle due annate considerate, sono state pari a 273 mm nell'annata 2019/2020 (media pluriennale del periodo corrispondente: 347 mm), mentre nell'annata 2021/2022 sono state pari a 221 mm (media 314 mm; Fig. 2b e 2c riportate in precedenza).

La semina è stata effettuata a mano su file distanti 25 cm adottando un disegno sperimentale a blocchi randomizzati a parcelle suddivise con 5 ripetizioni, con rapporto di consociazione e disposizione spaziale come trattamento principale e presenza/assenza di diserbo come sub-trattamento. Ciascuna parcella principale ha avuto dimensione di 9 m<sup>2</sup> (2,25x4m).

Per ognuna delle due specie è stata utilizzata una sola varietà: per il frumento la varietà Antalis, per la lenticchia la linea Pietranera (Tabella 2.2).

Nella prova sono stati messi a confronto i seguenti trattamenti (parcelle principali):

- Frumento duro in purezza (100F), seminata alla densità standard di 350 semi germinabili al m<sup>2</sup>;
- Lenticchia in purezza (100L), seminata alla densità standard di 200 semi germinabili al m<sup>2</sup>;
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 1:2 a file alterne con una fila di frumento alternata a due file di lenticchia (33 66L1F-2L)
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 1:2 a file alterne con una fila di frumento alternata a una fila di lenticchia (33F66LFA)
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 1:2 con le due specie seminate sulla stessa fila (33F66LSF)

- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 1:1 e semina a file alterne con una fila di frumento alternata a una fila di lenticchia (50F 50L FA)
- Consociazione sostitutiva con rapporto frumento lenticchia 1:1 e semina sulla stessa fila (50F 50L SF)

Oltre ai predetti trattamenti, nella sola annata 2021/2022 è stata inoltre inclusa in ogni blocco una parcella non seminata, al fine di osservare lo sviluppo massimo delle infestanti in assenza di coltura. Nel 2019/2020 la precessione è stata cece mentre nel 2021/2022 è stata trifoglio alessandrino.

Il primo anno, la prova è stata seminata il 5 dicembre 2019, mentre nel 21/22 il 20 dicembre 2021.

In entrambe le annate e su quattro ripetizioni, per i soli rapporti di consociazione 33F66L e per le colture pure, è stato applicato l'isotopo stabile dell' $^{15}\text{N}$  al fine di monitorare il processo di azotofissazione biologica, secondo il metodo della diluizione isotopica (Unkovich et al 2008). L'isotopo è stato applicato sotto forma di solfato di ammonio  $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$  con arricchimento in  $^{15}\text{N}$  del 10%. Il fertilizzante è stato applicato in due interventi di 4 kg/ha equivalenti per un totale complessivo di 8 kg/ha di N equivalente. Nella prima annata il fertilizzante è stato applicato il 09/01 e il 26/02, mentre nella seconda il 09/03 e il 08/04.

Durante tutto il ciclo delle colture, nei trattamenti diserbati, è stata effettuata la scerbatura manuale.

Le operazioni di raccolta si sono svolte nell'arco di 3-4 giorni; le parcelle di ciascun blocco sono state comunque raccolte nello stesso giorno.

La mietitura è stata eseguita a mano, mediante sfalcio delle piante a livello del suolo. È stata raccolta l'intera sub-parcella, e in seguito le componenti (frumento, lenticchia e infestanti nel caso delle sub-parcelle non diserbate) sono state accuratamente separate a mano e pesate.

Frumento e lenticchia sono quindi stati trebbiati separatamente mediante una trebbia meccanica.

### ***Rilievi***

Prima della raccolta sono stati rilevati: l'altezza delle piante, il grado di copertura (espresso in %) per ogni componente, tramite stima visiva (dati non presentati), il grado (in %) e il tipo (su una scala da 0 a 5) di allettamento. Per il frumento, al momento della raccolta è stato inoltre misurato il numero di spighe per unità di superficie.

Dopo la raccolta, è stato rilevato il peso della biomassa totale per ogni componente (frumento, lenticchia e infestanti). Dopo la trebbiatura è stata quantificata la produzione di granella e il peso di 1000 semi delle due specie e, per il solo frumento, il peso ettolitrico e il contenuto proteico della granella.

Alcuni giorni prima della mietitura è stato prelevato un campione di biomassa epigea totale dall'area di saggio su cui era stato applicato  $^{15}\text{N}$ , sul quale è stato quantificato il contenuto in azoto

mediante metodo Dumas e il contenuto dell'isotopo stabile  $^{15}\text{N}$  mediante il metodo MIP 134 Rev. 00 2017 (come descritto nella sezione materiali e metodi della prova 1).

È stato inoltre eseguito il rilievo della composizione della flora infestante, con una metodica che ricalca il metodo di rilievo della vegetazione di Braun-Blanquet. Per ogni sub parcella non diserbata è stata valutata la composizione della flora attribuendo a ciascuna specie individuata un valore corrispondente alla stima della sua copertura, secondo la scala di Braun-Blanquet (dati non presentati).

### ***Elaborazione dati e analisi statistica***

I dati ottenuti sono stati elaborati al fine di calcolare gli indici di efficienza della consociazione in termini di produzione per unità di superficie mediante il calcolo del Land Equivalent Ratio (LER; Willey, 1979) parziale (eq.1 e 2), per le due componenti della consociazione, e totale (eq.3) come già descritto nella prova 1.

La capacità competitiva di ciascuna componente nei confronti dell'altra è stata calcolata utilizzando il Competitive Ratio (CR; eq.4 e 5 descritte in prova 1), mentre la Riduzione Granellare dovuta alla Presenza di Infestanti (RGPI) è stata calcolata utilizzando le eq.6, 7, 8 e 9 riportate in prova 1.

I dati ottenuti dalla quantificazione della concentrazione in azoto sono stati utilizzati per il calcolo delle asportazioni dell'elemento (*N uptake*; eq.10, 11, 12 e 13 descritte in prova 1), mentre quelli relativi all'isotopo  $^{15}\text{N}$  per la quantificazione dell'azoto derivante dalla fissazione biologica nella leguminosa (*Ndfa*) e dell'azoto trasferito dalla leguminosa alla graminacea (*N transfer*) utilizzando le eq.14, 15 e 16 descritte nella sezione materiali e metodi della prova 1.

I dati relativi alla presenza di infestanti nelle parcelle non diserbate e nelle parcelle non seminate sono stati utilizzati per il calcolo di indici relativi all'efficienza della consociazione nel controllo della flora spontanea presente. Gli indici calcolati sono stati: il *Relative Weed Biomass (RWB)*, l'*Abilità Competitiva (AC)*, l'*Abilità di Resistenza alla Competizione (AWC)* e la *Capacità di Contenimento delle Infestanti della consociazione (CCI)* utilizzando rispettivamente le eq.17, 18, 19 e 20 descritte in prova 1.

I dati ottenuti sono stati poi elaborati utilizzando il software R (R Core Team, 2022) con procedura di tipo split-plot in cui la tesi è stata utilizzata come parcella principale e il diserbo come sub-parcella. L'anno è stato utilizzato come fattore random.

Per quanto riguarda l'allettamento, l'analisi, a differenza che per le altre variabili, è stata condotta separatamente per le due annate, mancando per la prima annata i dati relativi ai trattamenti non diserbati.

I dati sono stati elaborati utilizzando il pacchetto “*nlme*” (Pinnheiro et Bates 2023). Quando opportuno, la significatività delle differenze tra le medie dei trattamenti all’interno di ogni singola specie e trattamento di diserbo è stata calcolata utilizzando il *Tukey* test per  $p \leq 0.05$  con il pacchetto “*emmeans*” (Lenth, 2023).

La presentazione grafica dei dati è stata ottenuta utilizzando il meta-pacchetto “*tidyverse*” (Wickham et al., 2019) in cui sono inclusi il pacchetto “*ggplot2*” (Wickham 2016) e il pacchetto “*cowplot*” (Wilke, 2020).



## Risultati

La produzione di granella ha mostrato significative differenze tra i trattamenti applicati; per il frumento, l'effetto del diserbo sembra non aver avuto effetti significativi, mentre un importante effetto è stato osservato per la lenticchia ( $p$ -value < 0.0001; Tabella 2.6). Sempre nella lenticchia, è stata osservata una significativa interazione tra disposizione delle piante nello spazio e presenza o assenza di diserbo ( $p$ -value < 0.0001; Tabella 2.6). La produzione di granella del frumento in coltura pura è stata pari a  $5.04 \pm 0.39$  e  $5.02 \pm 0.40$  t/ha per le tesi diserbate e non diserbate rispettivamente (Fig. 2.18A). In consociazione la produzione granellare nelle tesi diserbate è andata da un minimo di  $2.97 \pm 0.26$  a un massimo di  $4.23 \pm 0.36$  t/ha in 33F66L1F-2L e 50F50LSF rispettivamente, con differenze statisticamente significative (Fig. 2.18A). In assenza di diserbo la produzione granellare del frumento in consociazione è andata da  $2.37 \pm 0.28$  a  $3.29 \pm 0.20$  t/ha in 33F66L1F-2L e 50F50LSF rispettivamente (Fig. 2.18A). In ogni caso, in termini assoluti, la produzione del frumento in consociazione è stata decisamente più bassa rispetto a quando allevato in coltura pura. Nessuna differenza statisticamente apprezzabile è stata riscontrata fra le differenti distribuzioni spaziali in consociazione (Fig. 2.18A).

La lenticchia in coltura pura ha mostrato valori decisamente diversi in funzione della presenza o assenza del diserbo. La produzione nelle tesi diserbate è stata pari a  $1.5 \pm 0.13$  t/ha, mentre di  $0.76 \pm 0.01$  in assenza di diserbo (Fig. 2.18B). Differenze statisticamente apprezzabili sono state riscontrate tra la lenticchia allevata in purezza e consociata nelle tesi diserbate, mentre nessuna differenza è stata osservata nelle tesi allevate in assenza di diserbo. Anche in questo caso, nessuna differenza è stata osservata nella produttività della lenticchia al variare della distribuzione delle piante nello spazio sia per quanto riguarda i trattamenti diserbati (intervallo di variazione da  $0.58 \pm 0.08$  a  $0.78 \pm 0.10$  t/ha in 33F 66L FA e 33F 66L 1F-2L rispettivamente) sia per quelli non diserbati (intervallo di variazione da  $0.45 \pm 0.07$  a  $0.61 \pm 0.12$  t/ha in 50F 50L FA e 33F 66L 1F-2L rispettivamente; Fig. 2.18B).

Nessuna differenza è stata osservata sul peso dei 1000 semi e peso ettolitrico tra il frumento allevato in purezza e in consociazione o per effetto del diserbo né in media né in interazione con i rapporti di consociazione (fig. 2.20B, Tabella 2.6).

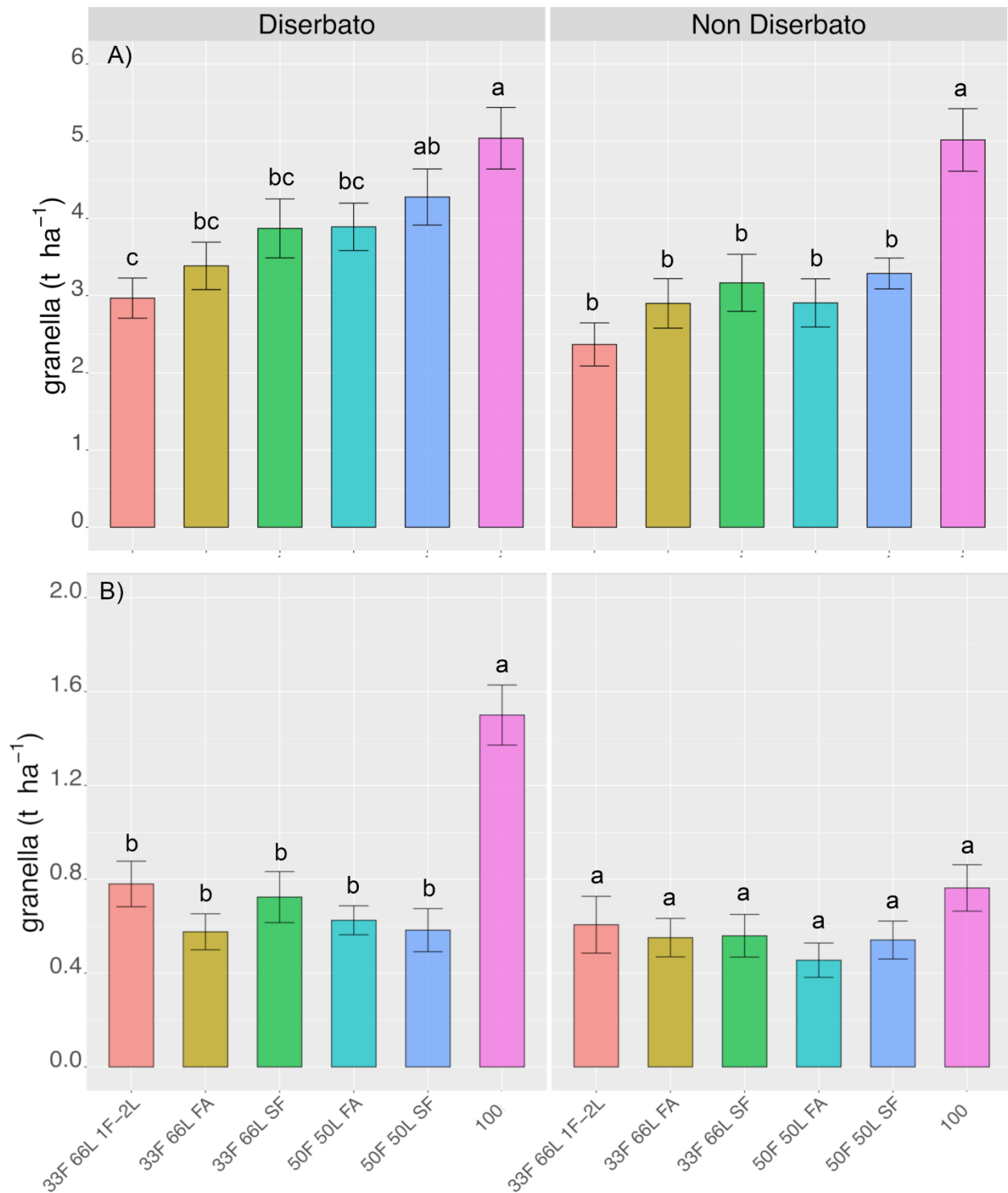
Per quanto riguarda l'allettamento, per il primo anno di prova (risultati relativi ai soli trattamenti diserbati), si registra una differenza altamente significativa fra, da un lato, i gruppi di trattamento di lenticchia in purezza e le due consociazioni seminate a file alterne e, dall'altro, le due consociazioni seminate sulla stessa fila (per il trattamento 33-66 FA, non risultano differenze statisticamente significative da nessuno dei due gruppi).

Per il secondo anno di prova, risulta un'interazione significativa fra il trattamento principale e il diserbo. Fra i trattamenti non diserbati, ancora una volta le due consociazioni seminate sulla stessa fila si discostano in maniera statisticamente significativa da tutte le altre; per i trattamenti non diserbati, invece, non risultano differenze significative fra i trattamenti, per quanto, inaspettatamente, oltre al trattamento 33-66SF anche la lenticchia in purezza assume valori piuttosto bassi di allettamento rispetto agli altri trattamenti.

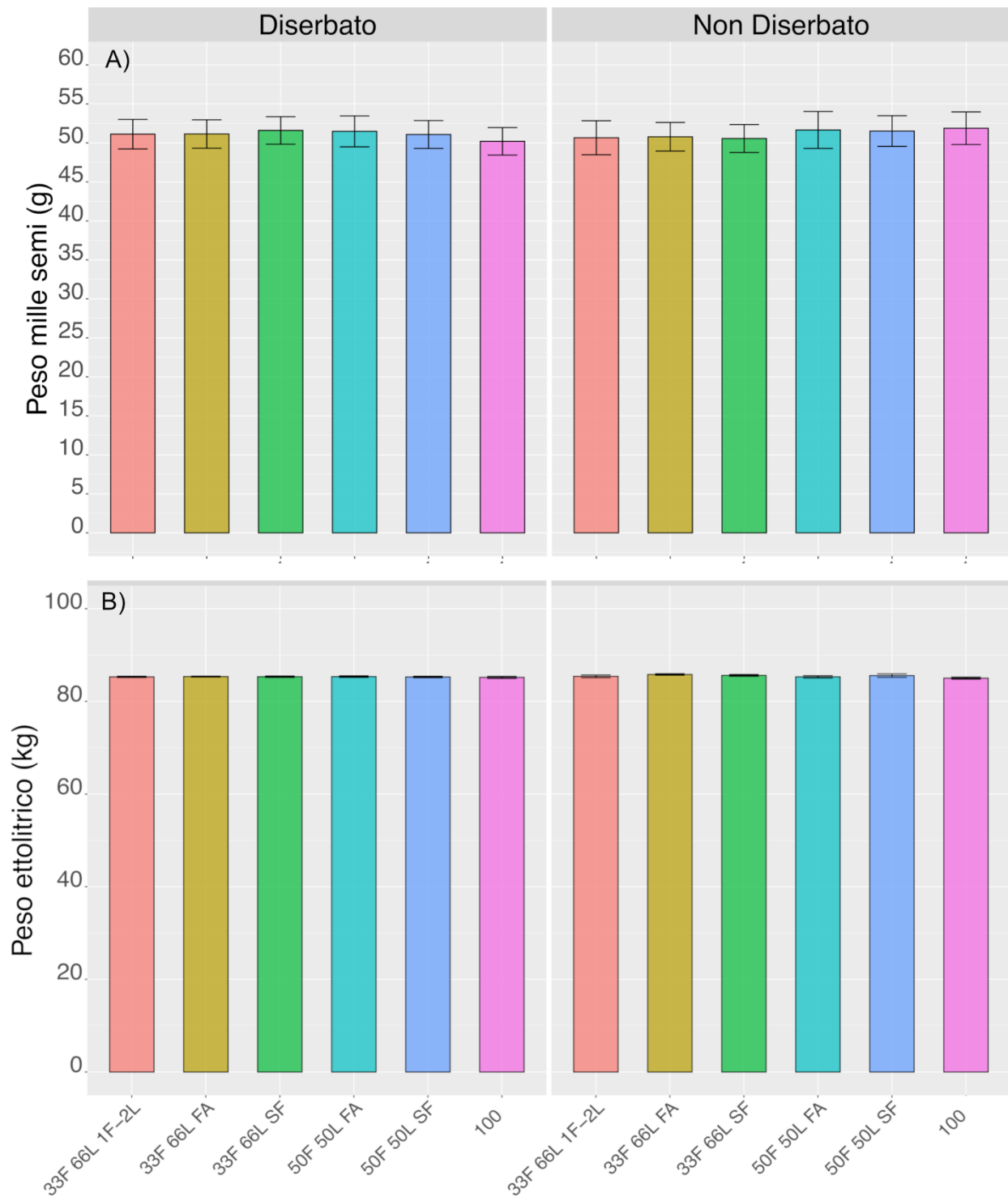
La figura 2.22 mostra le concentrazioni e le asportazioni di azoto riscontrate nella coltura di frumento nei diversi trattamenti applicati (Fig. 2.22A e B rispettivamente). In ogni caso, la coltura ha mostrato concentrazioni medie di azoto nella granella prossime a 18 g/kg. Il valore medio minimo è stato pari a  $18.15 \pm 0.77$  riscontrato nella coltura diserbata allevata in purezza, mentre quello massimo è stato pari a  $18.91 \pm 0.78$  riscontrato nel trattamento 33F 66L 1F-2L non-diserbato (Fig. 2.22A). Come si evince dalla Tabella 2.6, per questi parametri non è stata riscontrata nessuna differenza statisticamente significativa tra i trattamenti in valutazione. Al contrario, differenze sostanziali sono state osservate sulle asportazioni in azoto della coltura. Questo parametro è funzione della concentrazione in azoto e della granella prodotta, pertanto, data l'assenza di differenze riscontrata nella concentrazione in azoto, le asportazioni hanno ricalcato l'andamento riscontrato per la produzione granella di frumento, con i valori più alti osservati nelle due colture in purezza, le quali hanno fatto registrare asportazioni medie pari a  $93.79 \pm 10.74$  e  $94.94 \pm 10.41$  kg/ha in presenza e assenza di diserbo rispettivamente. In consociazione l'asportazione di N del frumento nelle tesi diserbate è andata da un minimo di  $57.32 \pm 7.09$  a un massimo di  $82.93 \pm 10.15$  kg/ha in 33F 66L 1F-2L e 50F 50L SF rispettivamente con differenze statisticamente apprezzabili (Fig. 2.22B). Il frumento consociato e non diserbato ha mostrato valori medi minimi di  $45.16 \pm 6.30$  e massimi di  $60.71 \pm 5.56$  kg/ha in 33F 66L 1F-2L e 50F 50L SF rispettivamente (Fig. 2.22B).

**Tabella 2.6.** Risultati ANOVA per le variabili di risposta osservate; *p-value*.

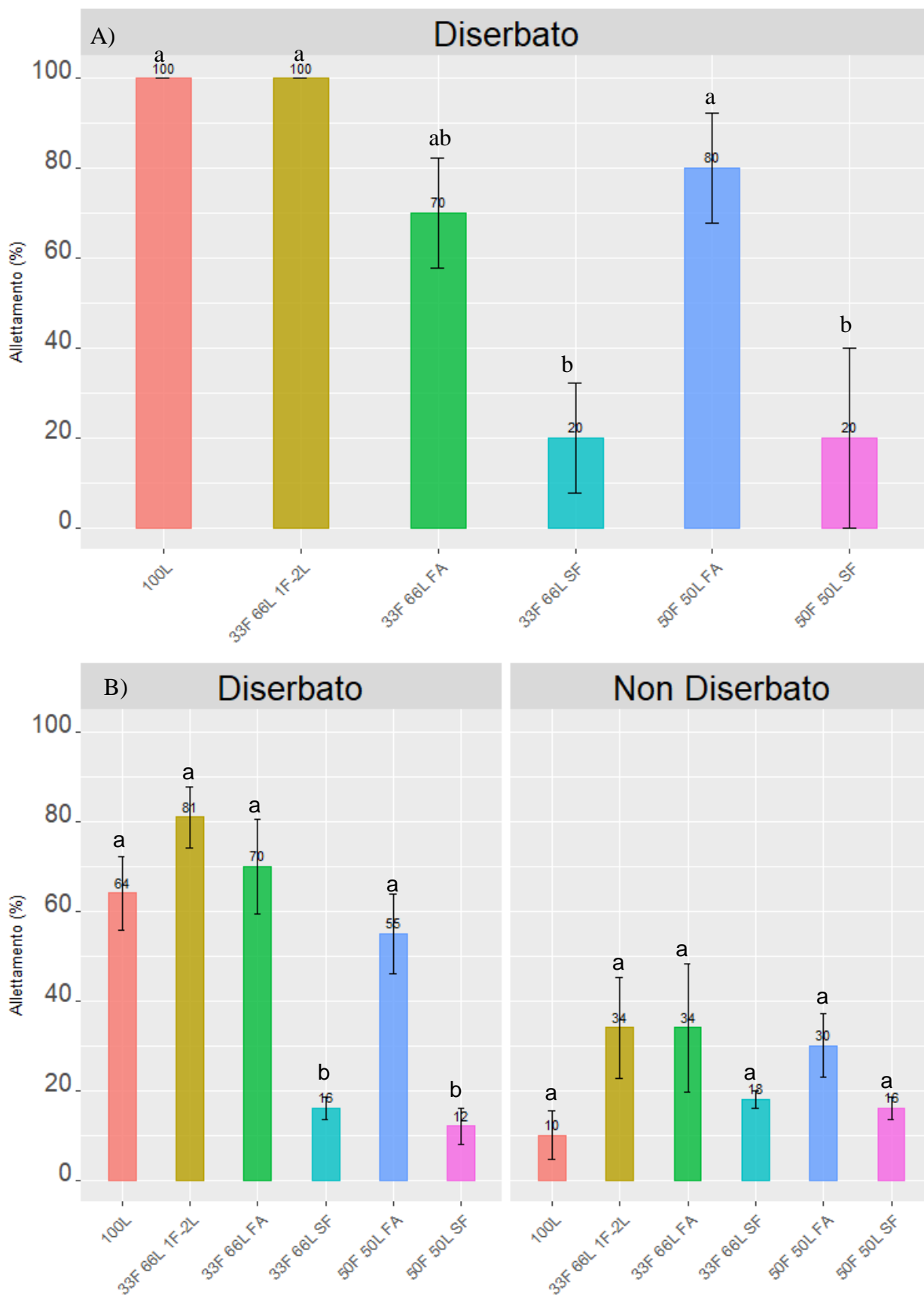
	Frumento			Lenticchia		
	Tesi (T)	Diserbo (D)	TxD	Tesi (T)	Diserbo (D)	TxD
Granella (kg/ha)	< 0.0001	0,1414	0,1468	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Peso mille semi (g)	0,9415	0,8917	0,3271	-	-	-
Peso ettolitrico (kg/hl)	0,9608	0,7301	0,4291	-	-	-
N granella (g/kg)	0,7763	0,8662	0,2905	-	-	-
N uptake granella (kg/ha)	< 0.0001	0,2920	0,0711	-	-	-
N biom epigea (g/kg)	0,1651	-	-	0,8884	-	-
Ndfa (%)	-	-	-	< 0.0001	-	-
N transfer (%)	0,0065	-	-	-	-	-
Spighe ( $n/m^2$ )	< 0.0001	0,2590	0,0586	-	-	-
LER parziali	< 0.0001	0,0524	0,7011	0,5652	0,0106	0,5642
Competitive Ratio	0,0010	0,0167	0,4599	0,0064	0,0072	0,5327
Riduzione produzione granella per infestanti (%)	0,0572	-	-	0,0106	-	-
<b>Consociazione</b>						
	Tesi (T)	Diserbo (D)	TxD			
LER totali	0,1226	0,0055	0,5103			
Relative weed Biomass	0,7048	-	-			
Abilità Competitiva	< 0.0001	-	-			
Abilità di Resistenza alla Competizione	< 0.0001	-	-			
Capacità di riduzione infestanti (%)	0,0036	-	-			
<b>Lenticchia</b>						
<b>Allettamento (%)</b>						
	Tesi (T)	Diserbo (D)	TxD			
2019-2020 (diserbato)	< 0.0001	-	-			
2020-2021	0,0002	< 0.0001	< 0.0001			



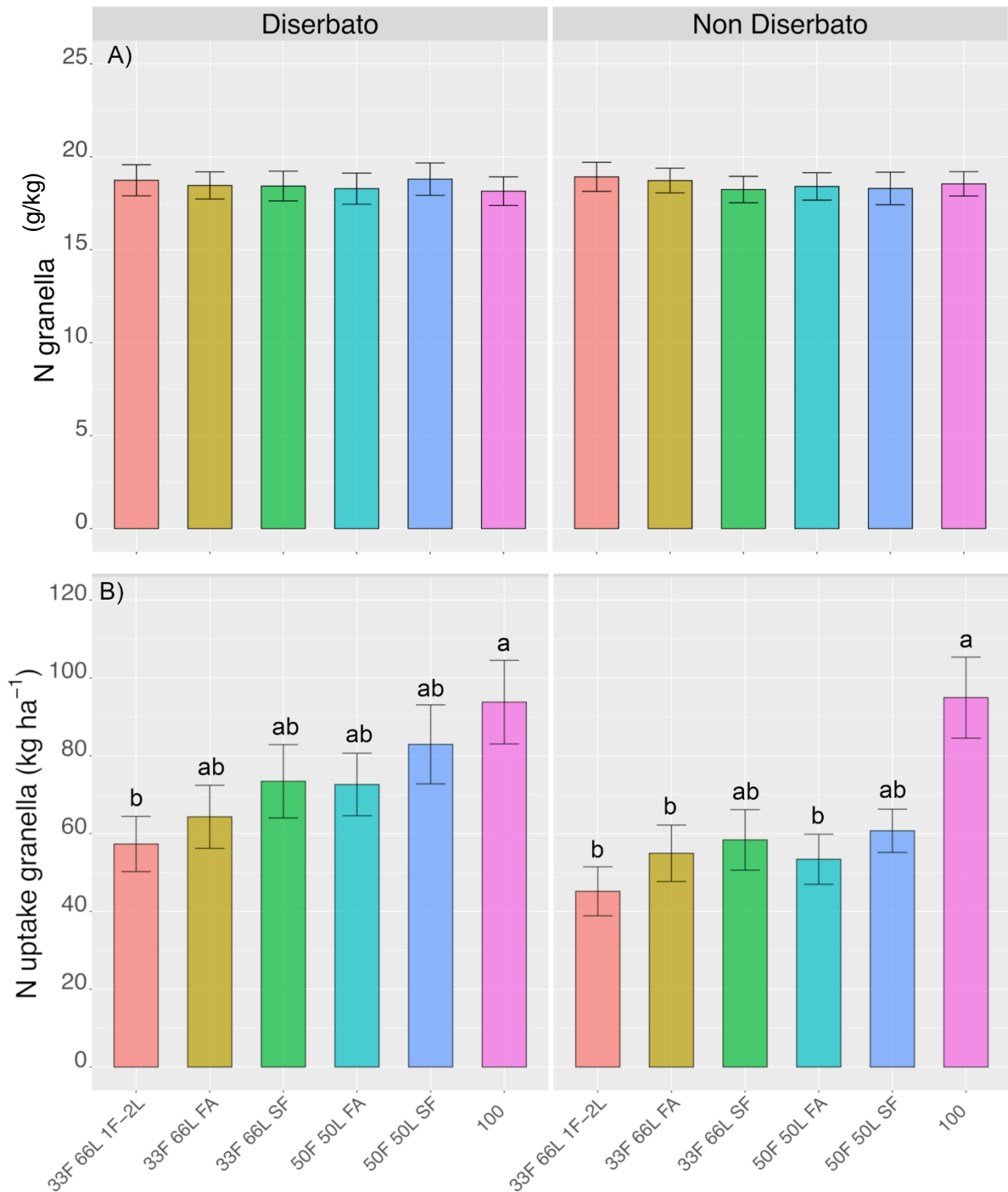
**Figura 2.19.** Produzione di granella in frumento A) e in lenticchia B) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 10$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.20.** Pese mille semi A) e Peso ettolitrico B) in frumento al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 10$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi entro specie e modalità di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



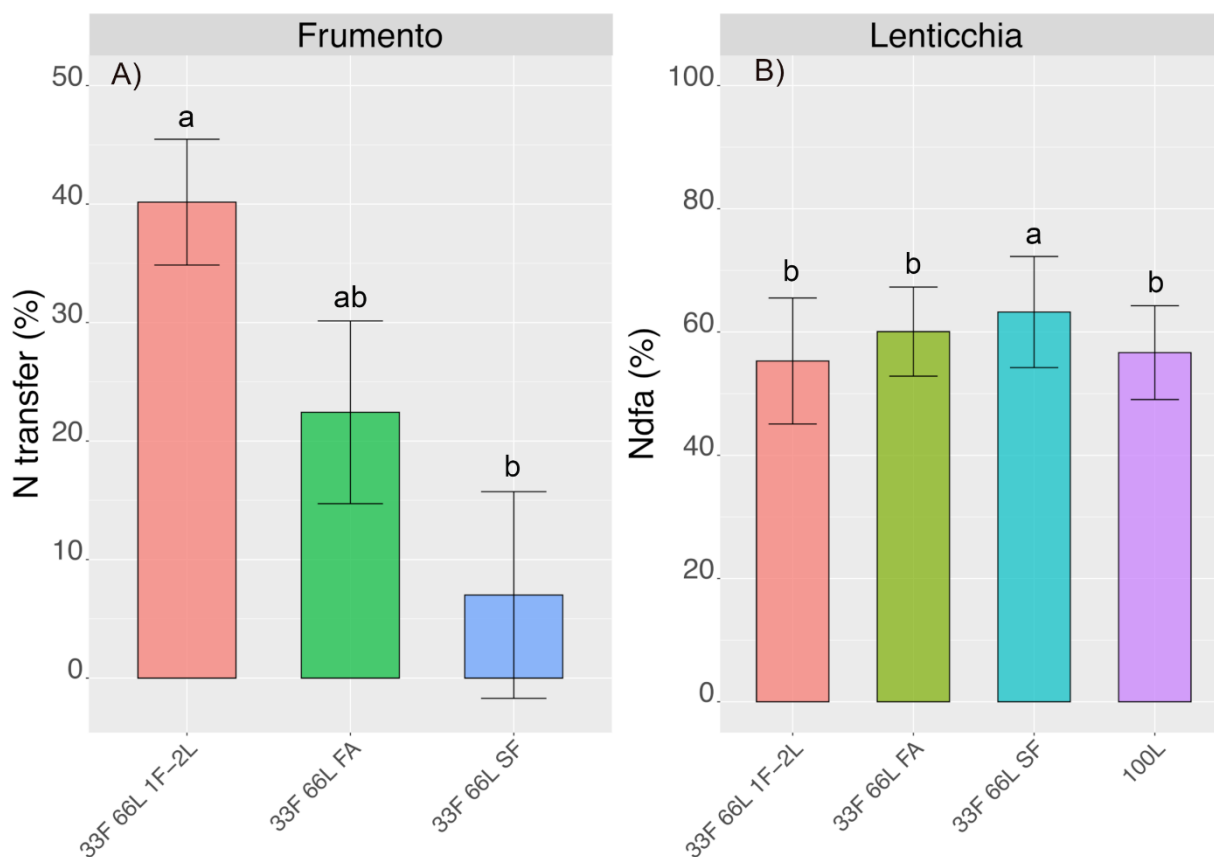
**Figura 2.21.** Allettamento percentuale della lenticchia nella prova 3 al variare delle condizioni di allevamento applicate. A): annata 2019-2020; B): annata 2021-2022. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero); n= 5. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. 3



**Figura 2.22.** Concentrazione di azoto nella granella A) e azoto asportato con la granella B) in frumento al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 10$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi entro specie e modalità di diserbo per  $p \leq 0.05$ .

Anche in questo caso, nessuna differenza statisticamente apprezzabile è stata riscontrata fra le differenti distribuzioni spaziali della coltura consociata (Fig. 2.22B).

Nonostante la sostanziale ininfluenza dei trattamenti sulle asportazioni di N, l'analisi della concentrazione isotopica dell'azoto nelle biomasse della graminacea e della leguminosa (per i trattamenti in cui tale analisi è stata condotta), suggerisce che l'azoto assorbito dal frumento nelle diverse tesi consociate possa provenire da comparti ecologici diversi. Infatti, in consociazione l'azoto della graminacea sembra essere derivato dalla leguminosa consociata (N-transfer) in percentuali diverse in funzione della disposizione spaziale delle due colture (Tabella 2.6). I valori medi di N transfer sono risultati pari a nel trattamento 33F66L1F-2L, 22.43%  $\pm$  7.71 nel trattamento 33F66LFA e 7.01%  $\pm$  8.72 nel trattamento 33F66LSF (Fig. 2.23A). La disposizione spaziale delle due colture appare avere influenzato significativamente anche il processo di azotofissazione biologica nella lenticchia (Tabella 2.6). Le differenze tra i trattamenti in valutazione sono state decisamente meno marcate rispetto all'N transfer; tuttavia, il trattamento 33F66LSF si è statisticamente distinto dagli altri trattamenti in valutazione (Fig. 2.23B). Le percentuali di Ndfa sono variate da un massimo di 63.24  $\pm$  9.01 nel trattamento 33F 66L SF a un minimo di 55.30  $\pm$  10.22 nel trattamento 33F 66L 1F-2L (Fig. 2.23B).



**Figura 2.23.** N transfer A), Ndfa B) al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero); n = 10. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L,

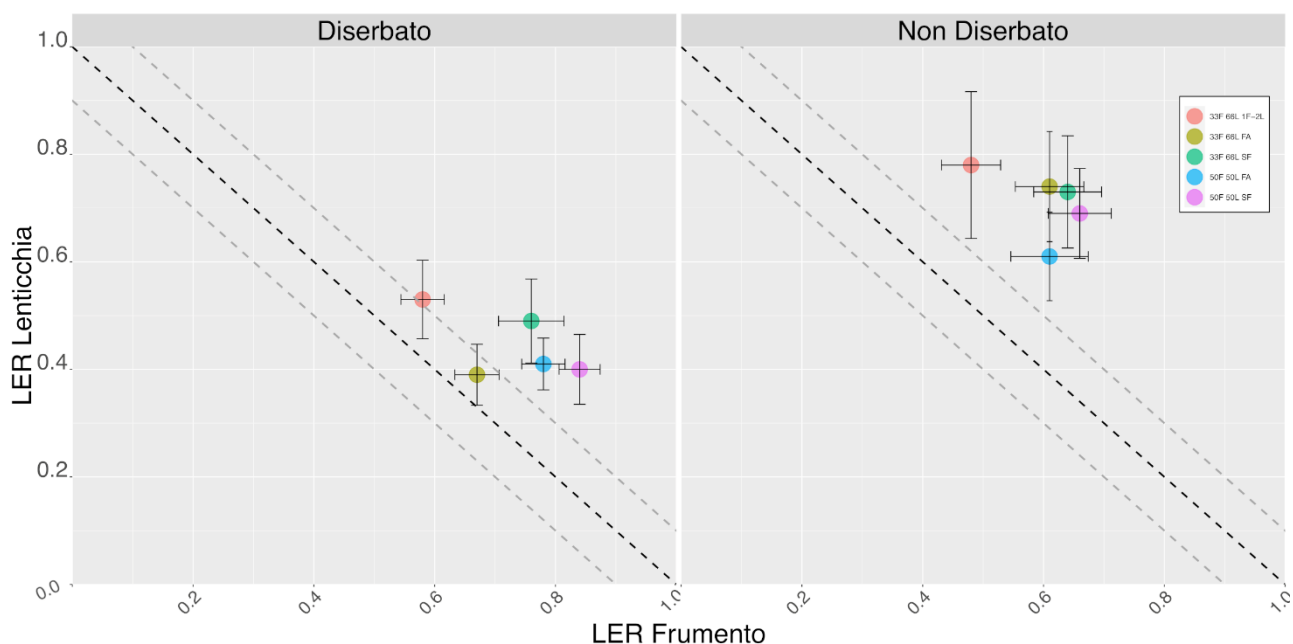


lenticchia; 100, purezza; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ .

Dalla figura 2.24 emerge con chiarezza la superiore efficienza produttiva del sistema consociato rispetto alle colture pure. Infatti, i LER totali sono sempre risultati superiori all'unità, con un significativo effetto del diserbo (tabella 2.6). Nei trattamenti diserbati i LER totali hanno mostrato valori che vanno da  $1.05 \pm 04$  a  $1.25 \pm 0.39$  rispettivamente nei trattamenti 33F 66L 1F-2L e 33F 66L SF. In assenza di diserbo i valori di LER totale sono risultati ancora più alti, collocandosi in un intervallo compreso tra  $1.19 \pm 0.38$  e  $1.37 \pm 0.43$  per i trattamenti 50F 50L FA e 50F 50L SF rispettivamente (Fig. 2.24).

La distribuzione delle piante nello spazio sembra non aver statisticamente influenzato i valori di LER totali, mentre sembra aver avuto una forte influenza sui LER parziali nella specie graminacea (Tabella 2.6). In particolare, in presenza di diserbo il LER parziale della graminacea nel trattamento 50F 50L SF è risultato statisticamente superiore a tutti gli altri trattamenti con valori pari a  $0.84 \pm 0.06$ , mentre il trattamento 33F 66L 1F-2L ha mostrato i valori più bassi, pari a  $0.59 \pm 0.06$  (Fig. 2.24). L'assenza di diserbo ha omogeneamente ridotto i LER parziali, che sono scesi a  $0.68 \pm 0.07$  per il trattamento 50F 50L SF e a  $0.48 \pm 0.07$  per il trattamento 33F 66L 1F-2L.

Nella leguminosa il diserbo ha avuto un effetto opposto rispetto al frumento, facendo aumentare i LER parziali rispetto alle parcelle non diserbate da  $0.67 \pm 0.08$  a  $0.83 \pm 0.10$  in 33F 66L 1F-2L e da  $0.55 \pm 0.08$  a  $0.78 \pm 0.10$  in 50F 50L SF (Tabella 2.6; Fig. 2.24).



**Figura 2.24.** Land Equivalent Ratio (LER) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 10$ . Descrizione dei rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 1F-2L, una fila di frumento e due

di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. La retta in nero delimita l'unità dei LER totali nei rapporti di consociazione usati. In grigio le rette relative a LER totali pari a 0.9 e 1.1.

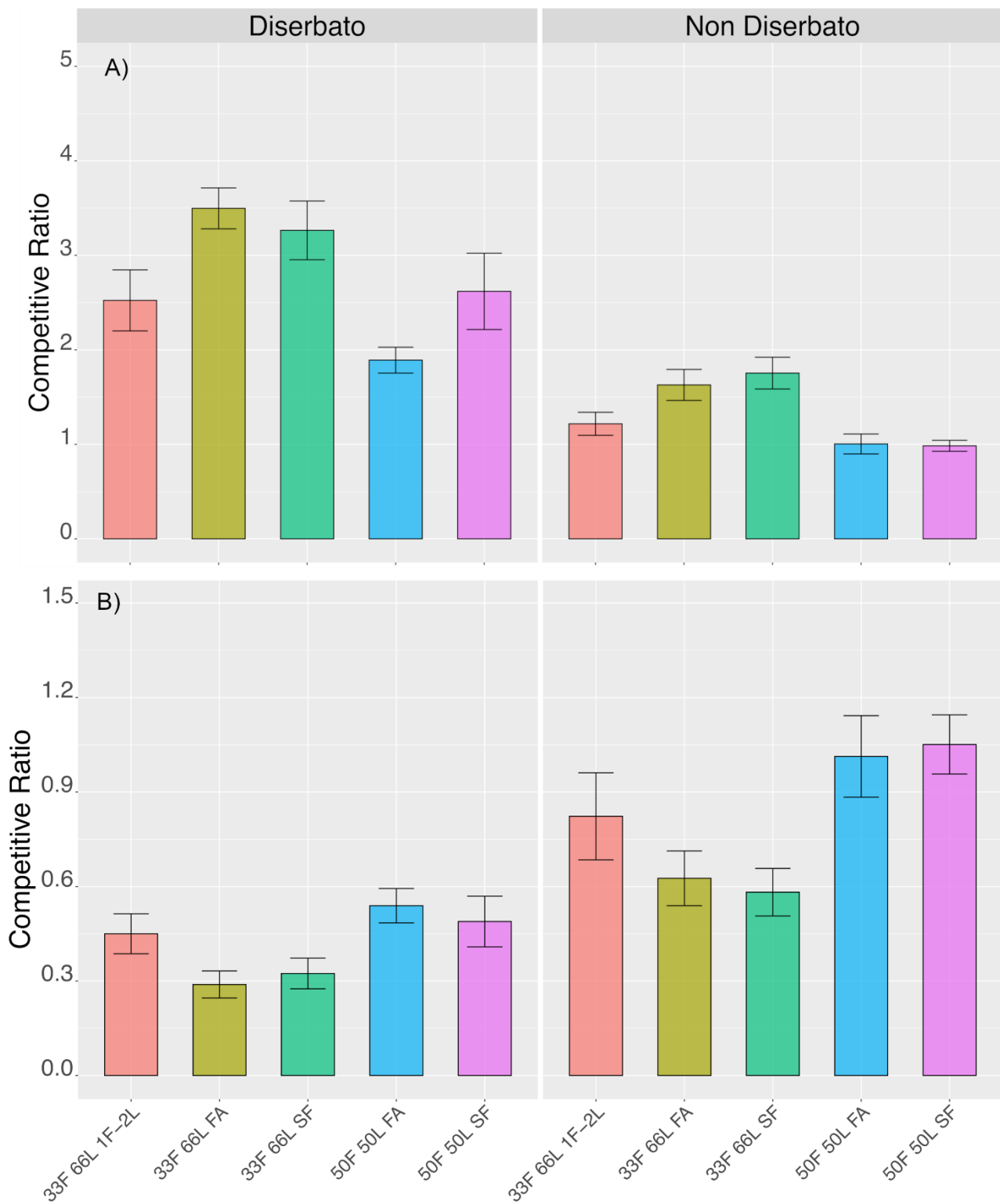
Nessun effetto della distribuzione spaziale e del rapporto delle due componenti nelle consociazioni è stato registrato per questo parametro (tabella 2.6).

L'effetto del diserbo si palesa anche nel Competitive Ratio (CR; Tabella 2.6; Fig. 2.25). Infatti, la superiorità del frumento, che nelle tesi diserbate raggiunge valori medi di CR pari a  $3.50 \pm 0.22$  nel trattamento 33F66LFA (valore massimo registrato in non diserbato) si riduce a  $1.63 \pm 0.16$  in presenza di diserbo. Nessuna differenza nel CR del frumento dovuta ai rapporti di consociazione e alla distribuzione delle componenti nello spazio è stata invece osservata.

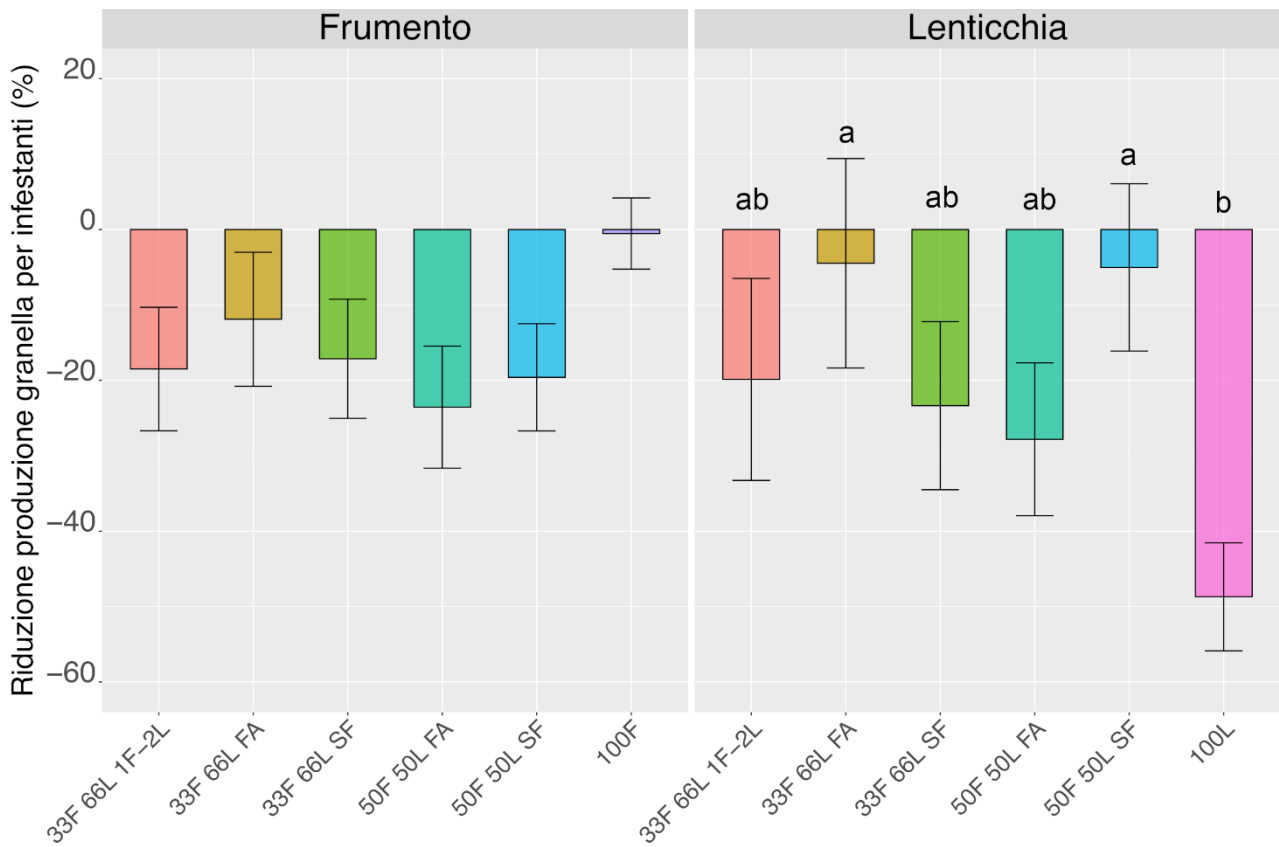
Allo stesso modo, per la lenticchia vi è stato un forte effetto della presenza o assenza del diserbo (Tabella 2.6; Fig. 2.25). Anche nella leguminosa, l'assenza di diserbo ha aumentato i CR della specie, passati da  $1.05 \pm 0.09$  (valore massimo registrato nei trattamenti non diserbati) a  $0.49 \pm 0.08$  in 50F50LSF e da  $0.58 \pm 0.07$  in 33F66LSF (valore minimo registrato nei non diserbati) a  $0.32 \pm 0.05$  (Fig. 2.25). Anche per la lenticchia non è stato osservato alcun effetto della distribuzione spaziale e del rapporto delle due componenti nelle consociazioni.

L'incremento del CR nella leguminosa in presenza di infestanti si è manifestato anche in una mitigazione del decremento produttivo dovuto alla presenza di quest'ultime. Come si può notare nella figura 2.24, la riduzione di resa dovuta alla presenza della flora spontanea risulta mediamente minore nella lenticchia consociata; in particolare in 33F66LFA e 50F50LSF dove la riduzione di resa è stata mediamente pari a  $-4.48 \pm 13.88\%$  e  $-5.03 \pm 11.09$ , rispettivamente (Fig. 2.26). Decisamente più marcate sono state le riduzioni di resa dovute alle infestanti osservate nella leguminosa in purezza, con riduzioni medie del  $-48.70 \pm 7.16\%$ .

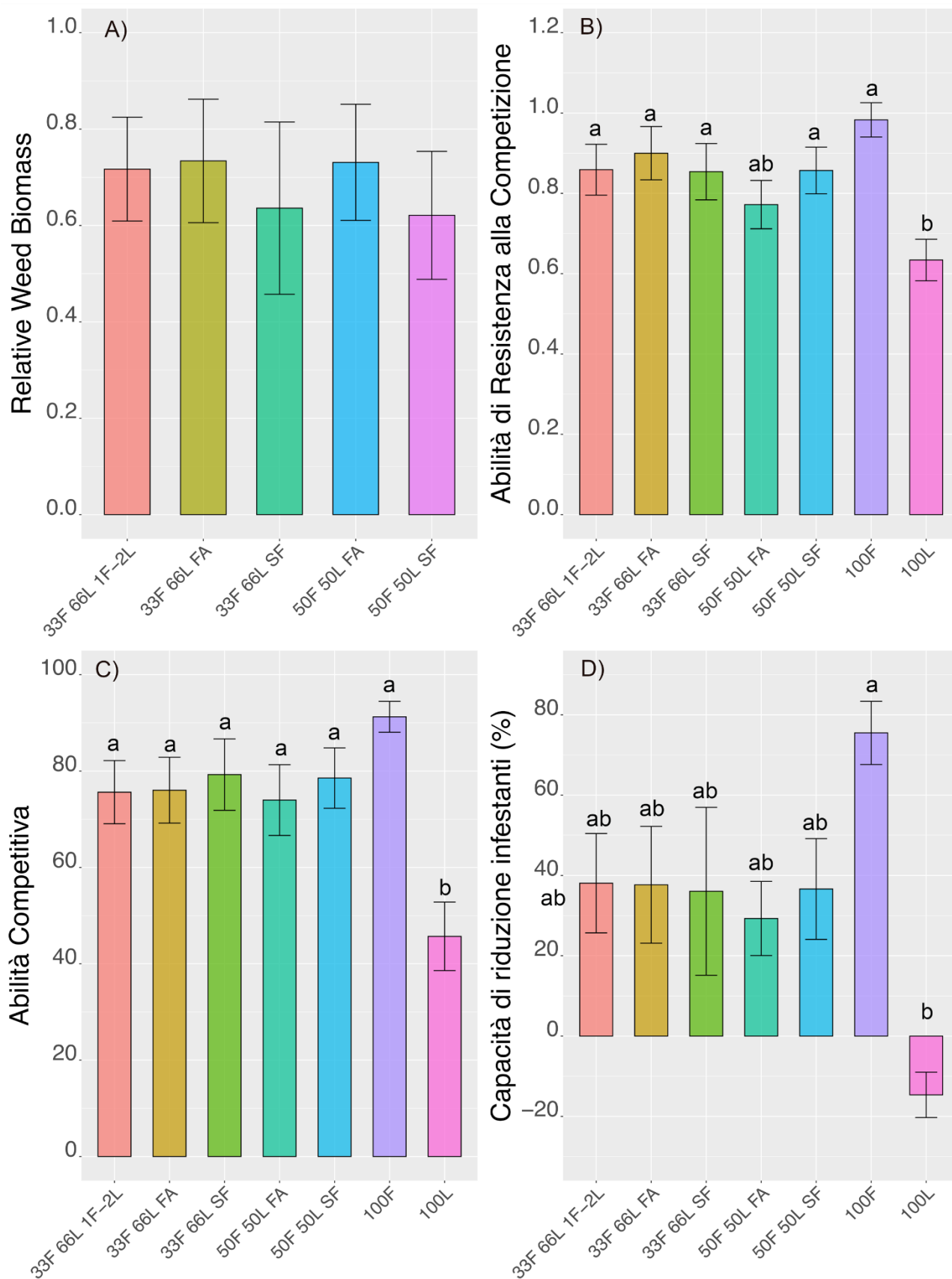
Al contrario, il frumento allevato in purezza ha mostrato flessioni medie della resa dovute alle infestanti decisamente più contenute ( $-0.54 \pm 4.71\%$ ); senza differenze statisticamente significative negli altri trattamenti consociativi; Tabella 2.6; Fig. 2.26). Come mostrato nella figura 2.27A, in entrambe le specie, la consociazione si è sempre rivelata capace di ridurre il quantitativo di flora spontanea presente rispetto alle colture in purezza (valori di RWB sempre inferiori all'unità; Fig. 2.27A). Tale risultato sembrerebbe essere imputabile all'elevata presenza di infestanti nella lenticchia in purezza. Come si nota dagli altri indici riportati in figura 2.27B, C e D, la leguminosa allevata in purezza si distingue dagli altri trattamenti per la sua scarsa capacità di competere con le infestanti, soprattutto con i livelli di infestazione consistenti presenti negli esperimenti di campo (dati non mostrati). In particolare, per l'indice relativo alla capacità di riduzione delle infestanti, la lenticchia allevata in purezza ha mostrato valori negativi ( $-14.64 \pm 5.65$ ) evidenziando di favorire l'incremento delle infestanti rispetto alle parcelle controllo non seminate.



**Figura 2.25.** Competitive Ratio in frumento A) e in lenticchia B) al variare delle condizioni di allevamento applicate; a sinistra in presenza di diserbo manuale; a destra in assenza di diserbo manuale. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n=10$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi entro specie e modalità di diserbo per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.26.** Riduzione della produzione di granella dovuta alla presenza di infestanti al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 10$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 100, purezza; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Lettere diverse indicano differenze entro la stessa specie e stessa condizione di diserbo per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi per  $p \leq 0.05$ .



**Figura 2.27.** Relative weed biomass A), abilità di resistenza alla competizione B), abilità competitiva C), e capacità di riduzione della presenza di infestanti D) al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero);  $n = 10$ . Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Lettere diverse indicano differenze tra le tesi in valutazione per  $p \leq 0.05$ . Assenza di lettere all'interno dei plot indica nessuna differenza tra le tesi per  $p \leq 0.05$ .

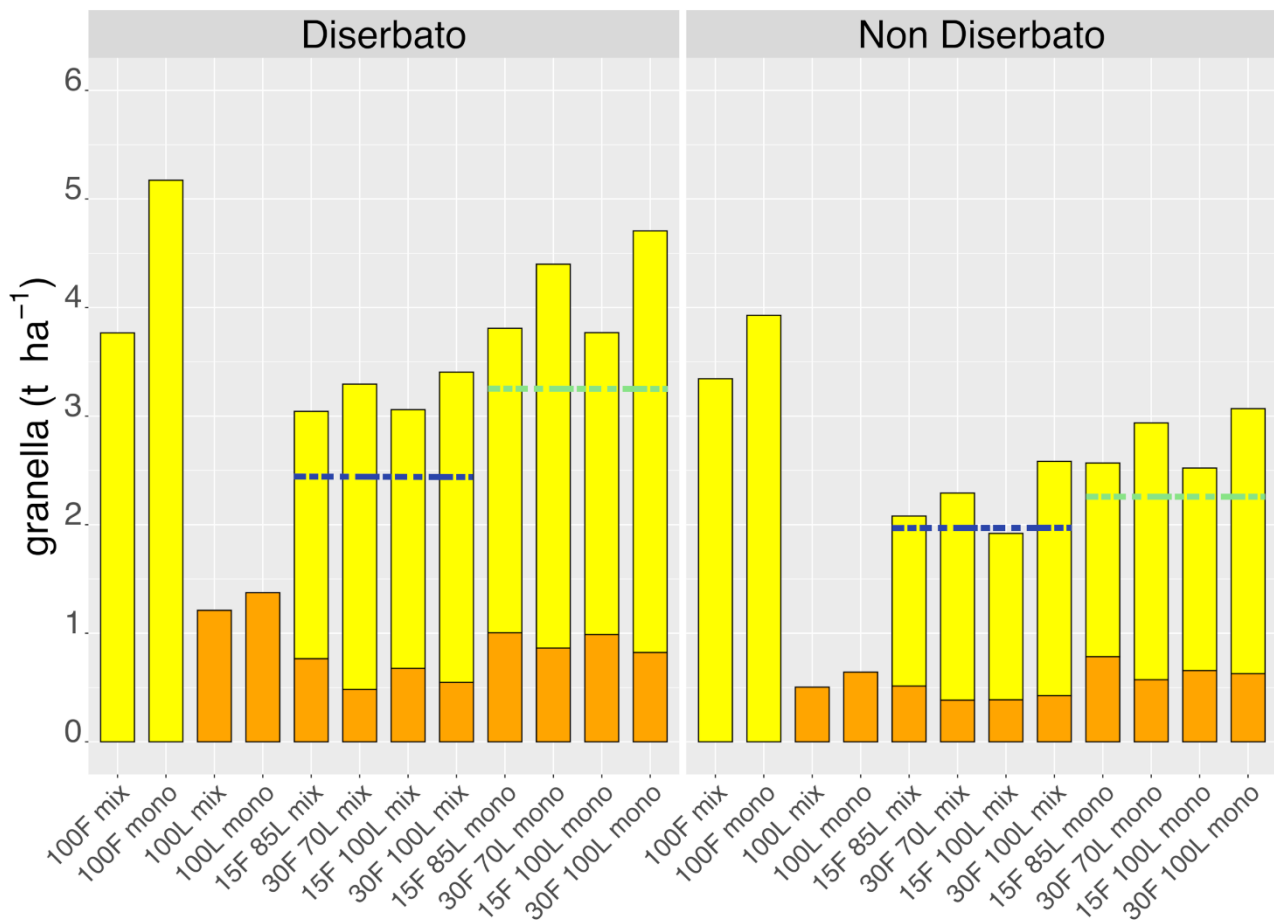
### 3. Discussione

Sulla base dei risultati complessivi della sperimentazione, è possibile formulare alcune considerazioni generali riguardo alle caratteristiche della consociazione frumento duro - lenticchia in ambiente mediterraneo, rispetto ai quesiti di ricerca sui quali ci si è concentrati.

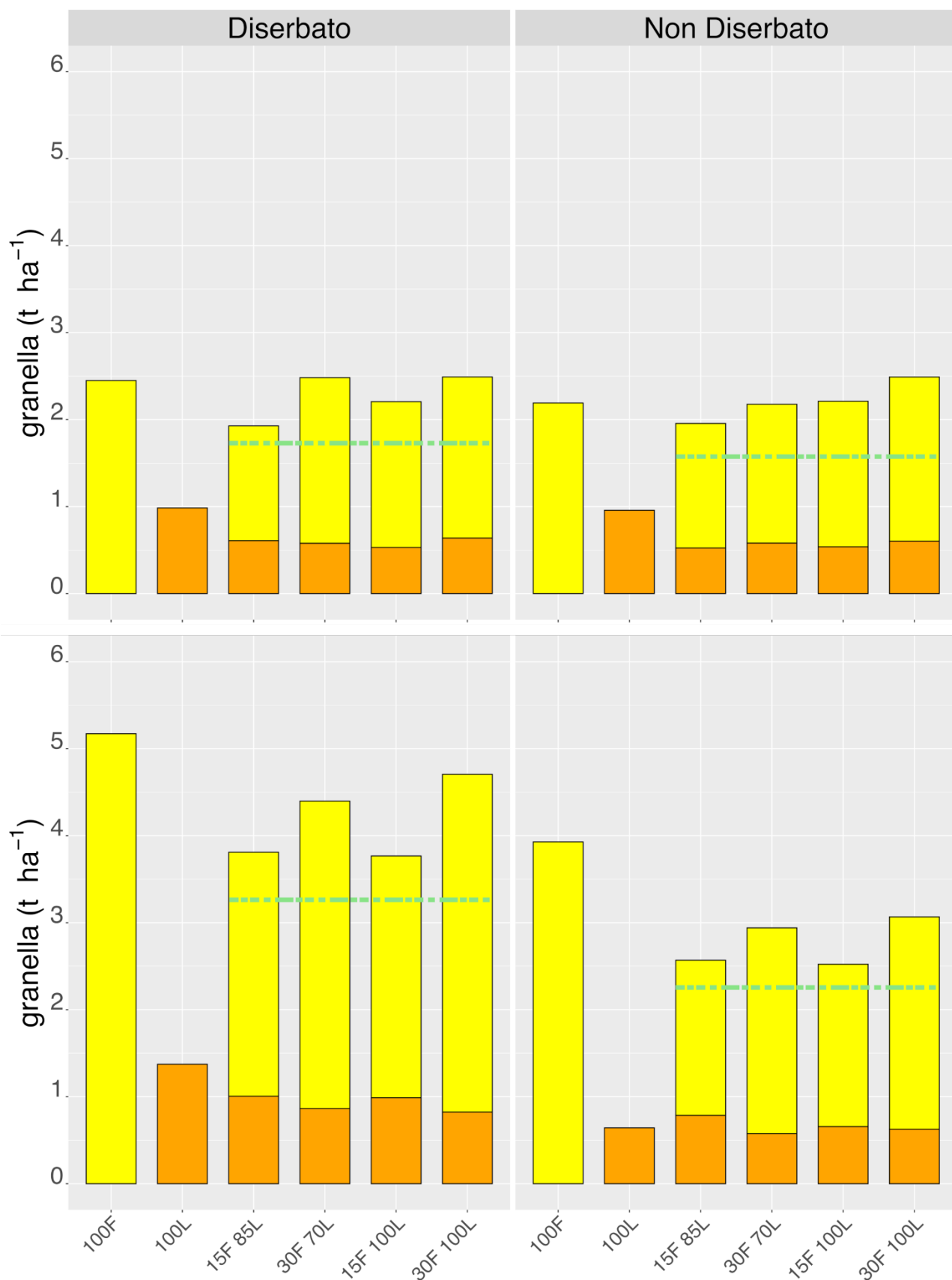
• *La consociazione si dimostra maggiormente efficiente dal punto di vista produttivo rispetto alle rispettive colture pure, e nel caso, esiste un rapporto di consociazione in grado di massimizzare la resa complessiva, del frumento e della lenticchia?*

In tutti gli esperimenti e per tutti i rapporti di consociazione messi in prova, l'efficienza biologica della consociazione appare superiore a quella media delle due rispettive colture pure, tanto in termini di resa granellare complessiva assoluta (salvo poche eccezioni – vedi figure 3.1, 3.2, 3.3), quanto in termini di efficienza d'uso del terreno a parità di input e di produzione. Il LER è infatti sistematicamente superiore ad 1 in tutte le prove, giungendo anzi a toccare picchi particolarmente alti (superiori a 1,5) in alcuni rapporti di consociazione e in alcune prove (vedi figura 3.4, *cf.* figure 2.6, 2.15, 2.24). Tale risultato, in termini generali, era del resto atteso sulla base della letteratura scientifica, secondo cui le consociazioni fra un cereale e una leguminosa risultano vantaggiose dal punto di vista della produzione grezza nella stragrande maggioranza dei casi (Viguiet 2018, Jensen et al. 2020, Bedoussac et al. 2015, Akter et al. 2004, Koskey et al. 2022, Mahmoud et al. 2022, Tosti et al. 2023). Nelle nostre prove, la produzione granellare maggiore in termini assoluti resta quasi sempre quella del frumento in purezza, tuttavia la produzione granellare delle consociazioni è nel complesso sempre superiore alla media fra frumento e lenticchia in coltura pura, e addirittura maggiore di quella del frumento in purezza per alcuni trattamenti (*cf.* prova 2-precessione a cereale). Tale comportamento indica un vantaggio della consociazione anche rispetto alla sola produzione “grezza” complessiva di granella delle due specie (nell'ipotetico caso in cui non ci fosse un interesse particolare nei confronti della produzione di una delle specie ma si puntasse esclusivamente alla massimizzazione della produzione granellare complessiva di entrambe. I valori di LER rendono meglio l'idea della maggiore efficienza produttiva dimostrata dalle consociazioni, in quanto mostrano che la superficie necessaria a produrre, in coltura pura, un certo quantitativo di frumento e lenticchia, è sempre superiore a quella necessaria per produrre il medesimo quantitativo in consociazione. Sulla base del LER totale, il vantaggio produttivo percentuale, equivalente a  $(1 - \text{LER}) \times 100$ , nella prova 1, è arrivato ad essere compreso fra il 20 e il 35% circa nei trattamenti diserbati e fra il 15 e il 70% circa nei trattamenti non diserbati; nella prova 2-precessione a cereale, fra il 10 e il 38% circa nei trattamenti diserbati e fra il 18 e il 45% circa in quelli non diserbati; e per la prova 3, fra il 5 e il 25% nei trattamenti diserbati e fra il 18 e il 36% nei trattamenti non diserbati.

Rispetto alla possibilità di individuare uno specifico rapporto di consociazione in grado di massimizzare la resa complessiva, l'eterogeneità dei risultati dei diversi rapporti di consociazione, fra le prove e fra le annate, non sembra consentire di trarre considerazioni generali univoche. Il rapporto di consociazione 15F-85L ottiene i LER maggiori (ma non le maggiori produzioni granellari totali) nella prova 1, seguito dal 30F-100L che invece primeggia nella prova 2- precessione a cereale, nella quale invece il primo si piazza ultimo.

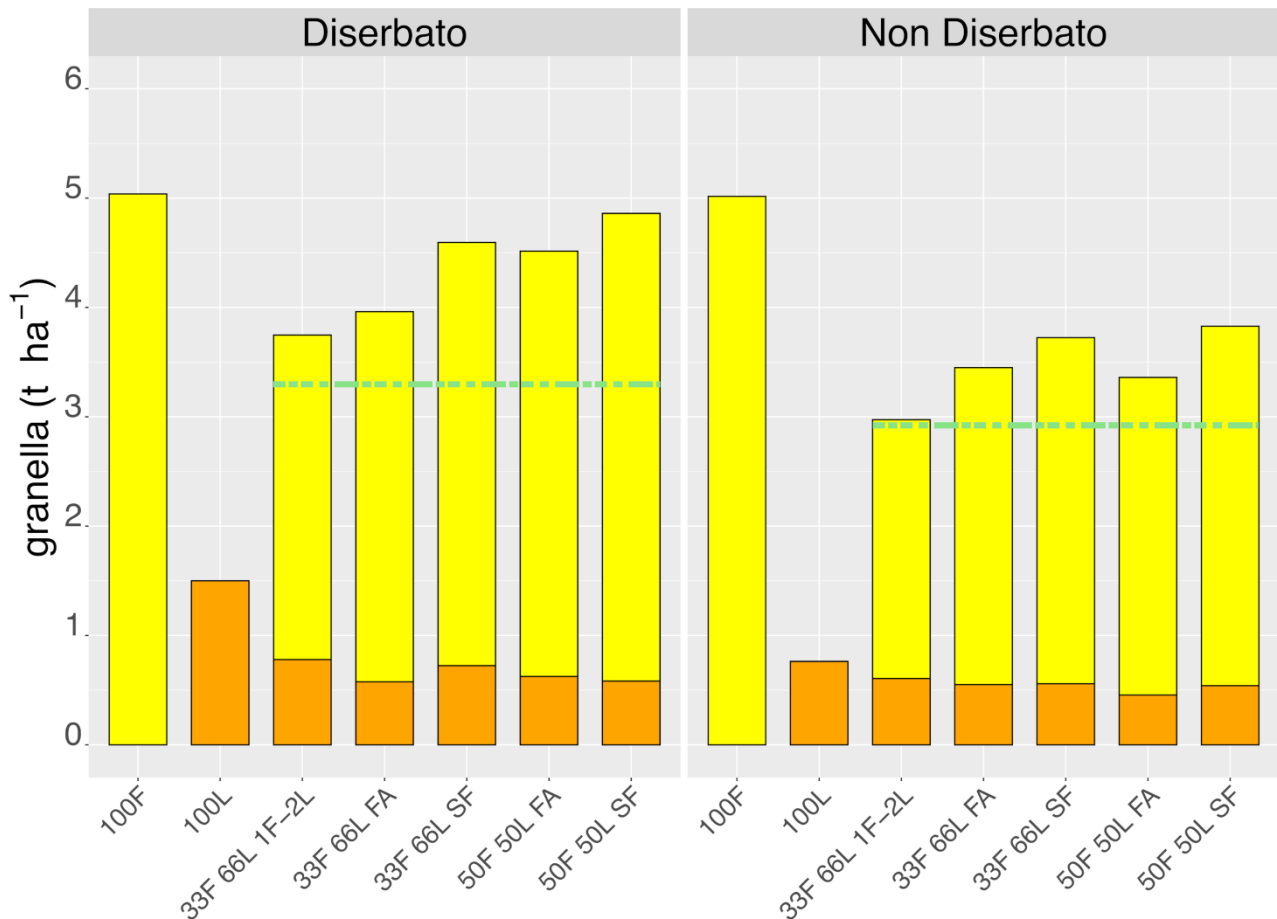


**Figura 3.1.** Visione sinottica delle rese granellari complessive nella prova 1 al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie, in arancione della lenticchia (parte inferiore degli istogrammi) e in giallo del frumento (parte superiore degli istogrammi); n= 16. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; nono, unica varietà (Antalis e Pietranera per frumento e lenticchia rispettivamente); mix, miscuglio di 19 varietà/popolazioni in frumento e di 9 in lenticchia. Le linee orizzontali colorate sono poste in corrispondenza del valore medio fra le produzioni di frumento e lenticchia in coltura pura; in blu scuro mix, in verde mono.



**Figura 3.2.** Visione sinottica delle rese granellari complessive nella prova 2 al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie, in arancione della Lenticchia (parte inferiore degli istogrammi) e in giallo del frumento (parte superiore degli istogrammi); n= 16. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia. Pannello superiore in successione a graminacea; pannello inferiore in successione a leguminosa. Le linee orizzontali colorate sono poste in corrispondenza del valore medio fra le produzioni di frumento e lenticchia in coltura pura.



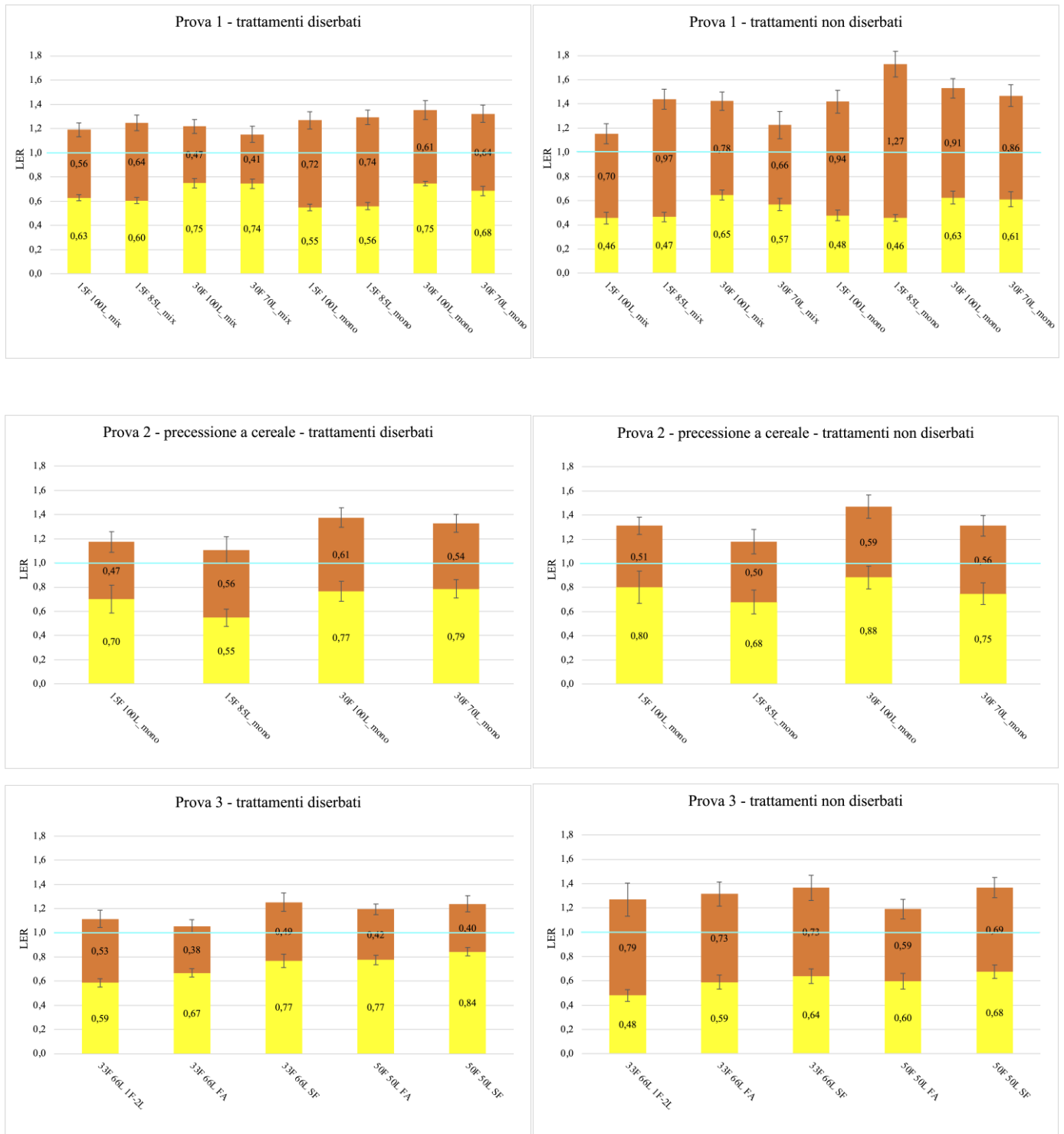


**Figura 3.3.** Visione sinottica delle rese granellari complessive nella prova 3 al variare delle condizioni di allevamento applicate. Nel grafico sono riportate le medie, in arancione della Lenticchia (parte inferiore degli istogrammi) e in giallo del frumento (parte superiore degli istogrammi); n= 10 in Diserbato e 5 in Non Diserbato. Nell'asse delle ascisse i rapporti di consociazione: F, frumento; L, lenticchia; 1F-2L, una fila di frumento e due di lenticchia; FA, file alterne; SF, stessa fila. Le linee orizzontali colorate sono poste in corrispondenza del valore medio fra le produzioni di frumento e lenticchia in coltura pura.

La resa granellare assoluta complessiva più elevata si ottiene invece sempre con il rapporto di consociazione 30F-100L. La variabilità interna alle prove e fra le annate, in particolare nei trattamenti non diserbati (a causa della grande variazione della pressione della flora infestante fra un anno e l'altro) sembra suggerire che considerazioni più solide possano essere formulate più che altro rispetto al diverso peso dei LER parziali delle due componenti e rispetto alla densità del frumento (15% o 30%), la quale quest'ultima appare condizionare il risultato di un certo rapporto di consociazione in maniera assai più rilevante di quanto non faccia la variazione nella densità di semina della lenticchia (70, 85 o 100%).

Come facilmente ci si può attendere, come linea generale il frumento consegue produzioni superiori quando è seminato a densità superiore, mentre la lenticchia quando il frumento medesimo è presente a densità minori. La valutazione del risultato dei diversi rapporti di consociazione non può prescindere dunque dalla prospettiva con la quale ci si pone, se cioè l'obiettivo principale della

consociazione sia da ritenersi la massimizzazione della produzione complessiva o piuttosto quella di una sola delle



**Figura 3.4.** LER totali come somma dei LER parziali nelle tre prove – visione sinottica. In giallo, Ler parziale del frumento; in marrone, Ler parziale della lenticchia. Le linee orizzontali colorate sono poste in corrispondenza del valore 1. Nei grafici si riportano le medie  $\pm$  l'errore standard (barre in nero); n= 16 per le prove 1 e 2, n=10 per la prova 3 (cfr. figure 2.5, 2.15, 2.24)

due componenti, o ancora quella della semplice maggior convenienza economica complessiva; si può infatti intravedere una tendenza - seppure piuttosto sfumata sul piano statistico, a causa dell'elevata variabilità - per cui alla migliore produzione di frumento in consociazione corrisponde la peggiore produzione di lenticchia, e viceversa.

Si può dire invece che il vantaggio (produttivo) della consociazione sulle colture pure cresce decisamente quando la pressione della flora infestante è elevata (nelle prove 1 e 3); in tali casi, infatti, il decremento di resa rispetto ai trattamenti diserbati della lenticchia in coltura pura è estremamente più marcato di quello della lenticchia consociata, a prescindere dai rapporti di consociazione; così che i LER totali nei trattamenti non diserbati sono assai più sbilanciati verso elevati LER parziali della lenticchia, mentre l'opposto avviene in linea di massima per i LER parziali del frumento (figura 3.4).

La convenienza di optare per un rapporto di consociazione che favorisca l'una o l'altra delle componenti appare dunque sostanzialmente dettata dall'interesse relativo alla produzione delle due componenti e dal prezzo rispettivo di ciascuna. Occorre poi tenere in considerazione anche la produzione assoluta delle due componenti, poiché, nel caso in cui questa fosse sostanzialmente equilibrata fra le due specie (es. Viguiet 2018), la convenienza economica ricadrebbe evidentemente sulla soluzione in grado di massimizzare la produzione della componente che sconta i prezzi migliori; ma tale considerazione cessa di essere ovvia qualora la componente con il prezzo minore - quale il frumento - sia in grado però di ottenere rese assolute molto superiori di quella della componente con il prezzo migliore - la lenticchia (quale è la nostra situazione).

In tal caso, il minor prezzo può venire compensato da una produzione maggiore e dunque la convenienza complessiva può ricadere invece sulla soluzione che massimizzi il LER totale o finanche solo la resa del cereale. Tutto ciò dipende evidentemente dalla combinazione di questi due fattori, ovvero dalla capacità produttiva assoluta delle due componenti e dal prezzo relativo di esse; secondo quali sono le attese rispetto alle produzioni dell'una e dell'altra e al prezzo che ciascuna potrà scontare, cambieranno le considerazioni sulla convenienza di una soluzione piuttosto che un'altra.

Come si può notare dalla tabella 3.1 che riporta il valore della produzione lorda totale (PLT; al lordo, quindi, degli ipotetici reimpieghi aziendali, dei costi supplementari per la separazione della granella nelle consociazioni, ma anche degli eventuali ulteriori guadagni produttivi delle consociazioni a causa della riduzione dell'allettamento - vedi oltre), calcolata sulla base dei prezzi di vendita di frumento e lenticchia già ipotizzati in introduzione, nelle nostre prove la convenienza economica delle consociazioni rispetto alle colture pure dipende sempre dal riferimento assunto.

Difatti, le consociazioni in tutte le prove e per tutte le tipologie (mono e mix, diserbato e non) si dimostrano economicamente più convenienti rispetto alla media delle colture pure; in altri termini, coltivare un ettaro di consociazioni è più conveniente che coltivare un ettaro complessivo con le due colture in purezza (mezzo ettaro di frumento e mezzo di lenticchia in purezza). Tuttavia, nelle prove 1 e 3, nelle tesi non diserbate, si deve constatare un apparente paradosso: per quanto siano questi i trattamenti che registrano i LER totali più elevati, e segnatamente anche i LER parziali di lenticchia più elevati, a causa del fatto che la produzione assoluta rimane estremamente sbilanciata verso il frumento, e che la resa di quest'ultimo in coltura pura in assenza di diserbo subisce un decremento a causa delle infestanti assai minore di quanto non accada con gli altri trattamenti – al contrario della lenticchia – il trattamento economicamente più conveniente viene ad essere il frumento in coltura pura, superiore a tutti i rapporti di consociazione (salvo un caso in mono non diserbato).

<b>Prova 1</b>		
<b>Trattamenti</b>	<b>Produzione lorda totale (€ ha<sup>-1</sup>)</b>	
	<b>Diserbato</b>	<b>Non diserbato</b>
100F_mix	1017	903
100L_mix	824	343
<b>Media 100F - 100 L_mix</b>	<b>921</b>	<b>623</b>
100F_mono	1396	1061
100L_mono	934	437
<b>Media 100F - 100L_mono</b>	<b>1165</b>	<b>749</b>
15F 100L_mix	1102	677
15F 85L_mix	1136	772
30F 100L_mix	1144	872
30F 70L_mix	1087	777
15F 100L_mono	1422	950
15F 85L_mono	1441	1015
30F 100L_mono	1608	1085
30F 70L_mono	1541	1030
<b>Prova 2</b>		
<b>Trattamenti</b>	<b>Diserbato</b>	<b>Non diserbato</b>
100F	661	592
100L	670	652
<b>Media 100F - 100L</b>	<b>666</b>	<b>622</b>
15F 100L	813	818
15F 85L	771	743
30F 100L	935	919
30F 70L	908	825
<b>Prova 3</b>		
<b>Trattamenti</b>	<b>Diserbato</b>	<b>Non diserbato</b>
100F	1360	1354
100L	1020	519
<b>Media 100F - 100L</b>	<b>1190</b>	<b>937</b>
33F 66L 1F-2L	1330	1050
33F 66L FA	1305	1157
33F 66L SF	1536	1235
50F 50L FA	1475	1093
50F 50L SF	1551	1255

**Tabella 3.1.** Produzione Lorda Totale dei diversi trattamenti nelle tre prove presentate in questa tesi, assumendo il prezzo di vendita del frumento a 270 €/t e quello della lenticchia a 680 €/t. **Figura 1.1.** Superficie investita,

Ciò non si verifica invece nella prova 2-precessione a cereale, nella quale il frumento in purezza si trova più svantaggiato.

Nelle prove 1 e 2, in ogni caso, il trattamento di consociazione che ottiene i migliori risultati sul piano economico è il 30F-100L, che è quello che consegue peraltro le maggiori rese granellari complessive e quasi sempre le maggiori rese del frumento; analoga situazione nella prova 3 con il trattamento 50F 50L SF.

Ciò che nel complesso si può affermare è che la consociazione non si può considerare sempre conveniente rispetto alla coltura pura di frumento, qualora da questa ci si possa aspettare elevate rese in proporzione alla lenticchia; la consociazione è dunque interessante nel caso in cui ci sia *comunque* un interesse alla coltivazione della lenticchia; l'agricoltore che destini una superficie  $x$  ed una  $y$  al frumento ed alla lenticchia rispettivamente (con  $x > y$ ), otterrebbe con grande probabilità maggior vantaggio nel destinare una superficie pari a  $(x-y)$  al frumento (o, se  $x < y$ ,  $(y-x)$  alla lenticchia) e a  $2y$  (o  $2x$ , se  $x < y$ ) alla consociazione frumento - lenticchia.

Un altro aspetto di grande importanza per quel che riguarda le capacità reali di produzione della consociazione rispetto alle colture pure è il livello di allettamento, della lenticchia in particolare. I risultati mostrano che l'allettamento della lenticchia, molto elevato in coltura pura, come atteso, si abbatte drasticamente e inequivocabilmente quando questa si trova consociata con il frumento (figure 2.3, 2.12, 2.21); simili risultati sono del resto presenti in letteratura (es., Viguier 2018; Viguier et al. 2018; Cowell et al. 1989; Wang et al. 2012).

Nel frumento, per il monovarietale Antalis, varietà moderna a taglia bassa, l'allettamento è assente anche nelle colture pure; il miscuglio varietale, invece, nel quale sono presenti anche varietà a taglia alta molto soggette all'allettamento, ne presenta occasionalmente una certa quota (per quanto di molto inferiore a quella della lenticchia) in coltura pura. Anche in questo caso in consociazione tale valore si abbatte drasticamente fino ad annullarsi completamente.

Tale aspetto è molto importante in quanto mostra che il vantaggio della consociazione, in condizioni reali nelle quali la raccolta venga effettuata a macchina, potrebbe potenzialmente essere ancora superiore a quello mostrato dai valori di produzione e di LER da noi rilevati. Difatti, in presenza di allettamento molto severo quale quello che si verifica nella lenticchia in coltura pura, perdite alla raccolta di entità più o meno grave sono la norma; tali perdite potrebbero potenzialmente annullarsi invece in consociazione, dove il livello di allettamento è assai più modesto o quasi nullo. Nelle nostre condizioni sperimentali, venendo la mietitura effettuata a mano, in presenza di elevato allettamento i valori di produzione raccolta rilevati sono da considerarsi, in particolare nel caso della lenticchia, sovrastimati rispetto a quanto si potrebbe verificare in caso di raccolta a macchina.

•*L'efficienza della consociazione varia se oltre alla diversità interspecifica è presente un certo livello di diversità intraspecifica nelle due specie consociate?*

A tale quesito di ricerca – fra gli altri - si proponeva di rispondere la prova 1.

L'impiego di misture varietali è stato da tempo visto come una tecnica potenzialmente efficace per conseguire diversi vantaggi rispetto alle colture geneticamente omogenee: fra questi, in particolare, maggiore stabilità delle rese e miglior resistenza ai patogeni, oltre che, spesso, migliori rese rispetto alla media dei componenti (Allard 1961; Finckh et al. 2000; Fabre et al. 2015; Döring et al. 2015; Qin et al. 2019; Wuest et al. 2021; Lorenzetti et al. 2022).

Sulla base dei risultati ottenuti nella prova 1, si può affermare che l'uso delle misture varietali ha influenzato i parametri di resa, ma in senso negativo; i miscugli varietali hanno infatti portato sistematicamente a risultati produttivi minori, tanto per il frumento quanto per la lenticchia; così come minori sono stati i LER conseguiti.

Migliore è stata invece la capacità competitiva dei miscugli nei confronti della flora infestante – specie per quanto riguarda il mix di frumento; tuttavia, tale effetto potrebbe potersi attribuire più alla ben nota elevata capacità competitiva delle accessioni locali – a taglia alta – incluse nel miscuglio, che ad un effetto della diversità.

Partendo da tale constatazione – che cioè la presenza di maggiore diversità intraspecifica *per sé* non è stata condizione sufficiente a migliorare l'efficienza del sistema rispetto a quanto conseguibile con una singola varietà migliorata, occorre fare alcune considerazioni. Bisogna infatti in primo luogo ammettere che, rispetto al quesito cui si proponeva di rispondere, la prova 1 presenta diversi limiti intrinseci alla formulazione di una risposta solida.

In primo luogo, la scelta di impiegare miscugli varietali implica infatti un'arbitrarietà pressoché illimitata nella scelta dei componenti del miscuglio medesimo, tanto per quanto riguarda il *numero* di componenti quanto per quel che riguarda *quali* accessioni inserire. In particolar modo, rispetto alle varietà/ecotipi che infine vengono scelti, è evidente come le caratteristiche agronomico/produttive intrinseche di questi vadano *a prescindere* ad influenzare in maniera drastica il possibile risultato del miscuglio medesimo (Wuest et al. 2021). In riferimento alle scelte fatte per la prova 1, la presenza – ad es. – nel miscuglio di frumenti di una quota maggioritaria di ecotipi locali (“antichi”) non poteva che determinare, presumibilmente, una riduzione media della resa a confronto di una singola varietà altamente produttiva quale Antalis, quantomeno *nei contesti in cui quest'ultima è in grado di esprimere al meglio le sue potenzialità produttive*. Inoltre, le accessioni “antiche” hanno caratteristiche agronomiche, in primo luogo per quanto riguarda la taglia, che senza dubbio avrebbero determinato condizioni di competizione del tutto diverse con la componente associata e con la flora infestante.

Il limite principale della prova 1 appare dunque quello di aver messo a confronto consociazioni monovarietaliali versus *una singola arbitraria* combinazione varietale per ogni specie. Senza la presenza di un *gradiente* di diversità intraspecifica che consenta di distinguere gli effetti della *diversità in quanto tale* da quelli della semplice *media delle potenzialità* dei singoli genotipi, appaiono fragili le considerazioni inerenti l'effetto più o meno marcato della diversità *in sé*.

Un ulteriore fattore che limita notevolmente le possibilità interpretative è il fatto che sia stata messa in prova esclusivamente la combinazione *miscuglio varietale di lenticchia/miscuglio varietale di frumento*, senza le combinazioni monovarietaliali di una specie con miscuglio dell'altra.

Ciò comporta che con gli esperimenti effettuati non sia possibile chiarire se il diverso comportamento dei miscugli sia da attribuire a caratteristiche intrinseche di ciascun mix o piuttosto all'influenza esercitata dal miscuglio dell'altra specie. si prenda in esame ad esempio la produzione del mix di lenticchia il protocollo sperimentale non consente di comprendere se e in che misura il minor risultato produttivo rispetto alla varietà Pietranera sia dovuto a caratteristiche proprie del miscuglio oppure alla maggiore competizione subita da parte del miscuglio di frumento (rivelatosi molto più aggressivo, ciò che del resto era prevedibile considerate le caratteristiche – in particolar modo l'altezza – degli ecotipi locali inclusi nella miscela), mancando la combinazione alternativa miscuglio lenticchia/frumento Antalis.

Oltre a ciò, bisogna ammettere che aver escluso i miscugli varietali dalla prova 2 ha precluso una possibilità potenzialmente preziosa di osservarne il comportamento in un contesto (la precessione a cereale) certo meno vantaggioso – in quanto potenzialmente più limitante - per la varietà Antalis.

Tuttavia, i risultati differenti - ma non discordanti rispetto agli andamenti generali - conseguiti nelle due condizioni (mono – mix) possono in ogni caso essere utili per consolidare le considerazioni – ad es. quelle produttive prima trattate – di carattere generale sulla consociazione studiata, che si dimostra funzionare, seppure in maniera diversificata, anche con combinazioni varietali alquanto differenti per caratteristiche agronomiche e potenzialità produttive – specie per quel che riguarda il frumento.

Di sicuro interesse sarebbe lo studio di consociazioni basate su miscugli varietali in prove che consentano di evidenziare un effetto della diversità *per sé*; come pure lo studio di misture evolutive, nelle quali nel tempo possa esserci una certa quota di *coevoluzione* fra le due specie associate (Suneson 1956, Döring et al. 2012, 2015, Wuest et al. 2015).

• *Qual è il livello di capacità competitiva nei confronti delle infestanti della consociazione rispetto alle colture pure, e come varia l'efficienza della consociazione in presenza o in assenza di competizione con la flora infestante?*



Rispetto alla soppressione della flora infestante, nelle nostre prove le consociazioni si dimostrano sempre più efficaci rispetto alla lenticchia in coltura pura, ma meno rispetto al frumento in coltura pura. I valori di RWB sempre inferiori a 1 dimostrano comunque una maggior efficienza anche rispetto alla media delle due componenti in coltura pura. Tale risultato è sostanzialmente in linea con le attese e con quanto si riporta in generale in letteratura (es., Carr et al. 1995, Koskey et al. 2018).

Il vantaggio prevalente derivante dalla consociazione spetta certamente alla lenticchia, come chiaramente mostrato dai valori di LER parziale che in presenza di forte infestazione raggiungono valori molto elevati (in alcuni casi finanche superiori ad 1). La lenticchia in coltura pura soffre infatti in maniera sproporzionata della competizione con la flora infestante, riducendo la sua produttività rispetto ai trattamenti diserbati in misura assai più marcata di quanto non avvenga in consociazione. Ciò sembrerebbe mostrare che la competizione esercitata dal frumento sulla lenticchia, per quanto severa, venga compensata dalla capacità di contenimento della flora infestante di quest'ultimo, nonché dai benefici accessori da questo apportati alla lenticchia (tale risultato è in accordo con quanto osservato in alcuni degli studi condotti in condizioni più vicine alle nostre – es. Koskey et al. (2018) – per quanto non con i livelli eccezionalmente alti del LER parziale della lenticchia in esso riportati - o Tosti et al. 2023). Fra questi il principale appare essere probabilmente la limitazione dell'allettamento della lenticchia, che oltre ai già citati vantaggi in termini di raccolta meccanica, apporta certo dei benefici di carattere anche biologico alla leguminosa; questa difatti, mantenendo un habitus eretto e non collassando su sé stessa - come avviene quasi inevitabilmente oltre un certo punto del ciclo colturale in coltura pura – può contare su una migliore distribuzione della luce e un migliore arieggiamento all'interno della vegetazione. La consociazione sembra essere dunque una tecnica in grado di migliorare in maniera significativa le potenzialità produttive della lenticchia in particolare, in presenza di elevata competizione con la flora infestante e limitate possibilità di intervento su di essa.

Tali considerazioni non devono però mettere in ombra il fatto che in diversi dei nostri esperimenti, quando il livello di infestazione era molto elevato (nella seconda annata delle prove 1 e 3, in particolare) la resa in termini assoluti della lenticchia, anche consociata, crollava ad un livello estremamente basso (diversamente da quanto osservato, ad es., da Koskey et al. (2018,)), tanto che in contesti reali in molti casi la coltura non sarebbe neppure stata raccolta, se non altro per il grave intralcio costituito dalla biomassa delle infestanti per le operazioni meccaniche di mietitrebbiatura, e data anche in certi casi la possibile opportunità di eliminare precocemente queste ultime nel quadro della gestione pluriennale della flora infestante e di una valutazione costi-benefici (mantenimento di una elevata banca semi per l'annata successiva vs raccolto dell'annata). Se

dunque il vantaggio della consociazione sulla coltura pura di lenticchia resta un dato reale, non è di per sé sufficiente per affermare che tale pratica possa costituire un metodo risolutivo per la gestione delle infestanti a prescindere dal contesto agronomico.

Del resto, una condizione di totale assenza di interventi di controllo diretto delle infestanti (quale quella applicata nelle nostre prove) è da considerarsi poco realistica nel contesto agronomico siciliano, allo stesso modo del diserbo manuale ripetuto, applicabile evidentemente solo ai fini di studio sperimentale.

Nel caso invece di una più realistica strategia di gestione di tipo meccanico, bisogna notare che una pratica quale, ad es., lo sfalcio delle infestanti di altezza superiore a quella della coltura di lenticchia, non sarebbe possibile in consociazione a causa della presenza del frumento, né tantomeno sarebbero possibili pratiche quali la strigliatura che andrebbero a distruggere le piante di lenticchia. Mancano infine esperienze di campo sull'applicazione del diserbo meccanico di precisione sulla lenticchia, anche se alcune esperienze su altre colture leguminose da granella (Pannacci et al 2018) sembrano indicare una possibile loro applicabilità anche su lenticchia in purezza o consociata.

Sarebbe di interesse approfondire la tematica mettendo a confronto trattamenti di diserbo realistici.

• *La disposizione delle piante (semina sulla stessa fila o su file diverse) influenza l'efficienza della consociazione?*

Sulla base dei risultati della prova 3, che aveva come obiettivo specifico la risposta a tale quesito, si possono formulare alcune considerazioni di carattere generale.

Una maggiore prossimità delle due componenti, ottenuta tramite la semina sulla stessa fila, consente di aumentare le interazioni fra le due, tanto quelle positive quanto quelle negative. Il frumento beneficia maggiormente di tale condizione (fors'anche solo in conseguenza di una disposizione delle piante più uniforme nello spazio), mentre la lenticchia si avvantaggia maggiormente quando seminata su file separate, tuttavia in tali casi alcuni vantaggi accessori non trascurabili, quale la riduzione dell'allettamento, vengono ad essere alquanto ridotti (figura 3.3).

A ogni modo, i valori più elevati di LER, di produzione granellare complessiva e di PLT si conseguono con i trattamenti seminati sulla stessa fila, indipendentemente dal rapporto di consociazione. Ciò consente collateralmente di notare come anche con un rapporto di consociazione piuttosto svantaggioso per la lenticchia (50F 50L) la consociazione possa ottenere buoni risultati anche per la componente leguminosa.

D'altro canto, per la necessità di effettuare la semina a mano, la distanza fra le file è stata particolarmente elevata (25 cm), andando ulteriormente ad esacerbare gli effetti della semina su file

diverse (non poco superiore, ad esempio, viene ad essere il tempo impiegato dalle piante per “chiudere” le file). Non si può pertanto escludere che la semina a file più ravvicinate, come quella realizzabile con le seminatrici, avrebbe potuto essere sufficiente a modificare almeno in parte i risultati.

*• La fissazione biologica dell'azoto da parte della lenticchia è influenzata dalla consociazione? Si può registrare trasferimento di azoto da quest'ultima al frumento? I parametri di utilizzazione dell'azoto (Nuptake, Ndfa, Ntrasf) variano in consociazione rispetto alle colture pure?*

Per quel che riguarda i parametri di utilizzazione dell'azoto, il quadro che emerge dalle prove appare sfaccettato e controverso.

La consociazione non sembra aver indotto variazioni di rilievo per quanto riguarda il contenuto di azoto (e, quindi, il tenore proteico) della granella di frumento, contrariamente a quanto ci si sarebbe potuti attendere. I valori di Nuptake della granella fra le varie tesi ricalcano quindi sostanzialmente quelli della produzione granellare.

L'incremento del contenuto proteico della granella del frumento in consociazione con una leguminosa è considerato uno dei possibili vantaggi di tale pratica; tuttavia, nelle nostre prove anche laddove in consociazione i valori medi sono risultati più alti, le differenze osservate non sono state mai statisticamente rilevanti e sempre di scarso interesse dal punto di vista commerciale.

Per quel che riguarda invece i valori di Ndfa ed Ntrasfer, i risultati appaiono di difficile interpretazione.

I valori assoluti di Ndfa appaiono essere nel complesso abbastanza credibili, per quanto alcune oscillazioni fra i valori nelle diverse tesi siano di difficile spiegazione (ad esempio la marcata differenza fra mix e mono nella prova 1), così come appare non confermato l'andamento riportato comunemente in letteratura (es., Cowell, 1989), per cui il valore di Ndfa% tenderebbe ad aumentare in consociazione come conseguenza di una minore disponibilità per la leguminosa dell'azoto minerale nel suolo, a causa dell'assorbimento da parte della graminacea.

I valori di Ntransfer stimati (che rappresenterebbero la quota di azoto prelevato dal frumento derivante da fissazione simbiotica, e dunque, per via diretta o indiretta, dalla lenticchia associata) appaiono invece essere tanto inattesi da far sorgere gravi dubbi sulla loro validità.

L'Ntrasfer risulta in primo luogo assumere proporzioni estremamente elevate, fino a quasi il 60% dell'azoto assorbito dal frumento; livelli che non trovano riscontro in letteratura, dove invece tali valori sono spesso considerati addirittura trascurabili o comunque limitati (Viguiet et al. 2018, Li et al. 2009). La variabilità fra le diverse tesi appare poi estrema e scarsamente comprensibile; per quanto si possa provare a intravedere una tendenza per valori più elevati associati a minor densità

del frumento, tuttavia, tale andamento non è per nulla uniforme e le oscillazioni fra una tesi e l'altra assumono proporzioni incomprensibilmente alte. Inoltre, per alcuni rapporti di consociazione si verifica che il valore di  $N_{dfa}$  della lenticchia sia prossimo o addirittura inferiore a quello dell' $N_{transfer}$  nel frumento, cosa che appare del tutto implausibile.

Ancora, a causa del fatto che il metodo di calcolo per diluizione isotopica assume che si tenga conto del  $\delta^{15}N$  medio della coltura non leguminosa in purezza, ovvero nel nostro caso della media dei trattamenti di frumento in purezza, ed essendoci una marcata variabilità fra tutte le repliche, si ha che i valori di  $N_{dfa}$  e  $N_{trasf}$  assumono, per alcune repliche, valori del tutto discordanti da quelli della media generale.

Il metodo di diluizione isotopica richiede che il contenuto di  $^{15}N$  nel suolo si mantenga sostanzialmente costante nel corso del ciclo colturale e su tutto il profilo esplorato dalle radici di entrambe le specie. Se tali assunzioni vengono meno, il metodo inevitabilmente perde di validità. Per cercare di ottenere tali condizioni, il fertilizzante marcato è stato applicato in due somministrazioni, con abbondante diluizione in acqua per permettere una penetrazione oltre gli strati più superficiali del suolo. Tuttavia, l'andamento delle precipitazioni dopo la somministrazione, il diverso stadio fenologico in corrispondenza del quale sono state effettuate le somministrazioni nelle varie annate (a causa dei vincoli di carattere meteorologico e delle sfasature determinate dalle differenti date di semina), potrebbe aver fatto sì che l'azoto derivante dal concime marcato non fosse egualmente facilmente disponibile per entrambe le specie e nelle varie annate.

Non ci sembra dunque prudente esprimere un giudizio che non sia alquanto approssimato rispetto ai risultati ottenuti. Se è comunque credibile che una certa quota di trasferimento di azoto derivante da fissazione biologica verso il frumento ci sia, sulla sua entità non è possibile formulare considerazioni. I nostri dati confermano piuttosto la difficoltà di effettuare tale tipo di analisi in condizioni di campo reali e la quota spesso soverchiante di "rumore" ambientale che ci si trova ad affrontare, suggerendo grande cautela nell'applicazione meccanica dei metodi e nella valutazione dei risultati.

• *La precessione colturale può influenzare l'efficienza della consociazione?*

I risultati ottenuti dalla prova 2 sembrano consentire di rispondere in maniera affermativa a tale quesito; tuttavia, occorre porre attenzione ad alcuni aspetti.

Le problematiche organizzative riscontrate non hanno consentito di mettere in prova gli esperimenti con le due precessioni in maniera sincrona, portando ad una sfasatura fra una delle due annate di prova e, anche nell'annata in cui entrambe erano presenti, ad una diversa data di semina. Per quanto l'analisi statistica abbia tenuto ovviamente conto di tali aspetti, non si può ignorare che essi

costituiscono delle non lievi limitazioni alla possibilità di confrontare i risultati ottenuti con le due precessioni.

Inoltre, una differenza particolarmente marcata fra le due prove è stato il diverso livello di infestazione da parte della flora spontanea, che è arrivato ad essere quasi assente e comunque molto più tardivo nella prova 2-precessione a cereale. In questo senso, ai fini interpretativi non è forse così immediato attribuire determinate differenze alla precessione *in sé*. Difatti, certamente implicazione della differente precessione è la diversa storia agronomica recente dei due appezzamenti, e dunque il livello di infestazione nelle colture precedenti; ma non appare del tutto lineare attribuire alla precessione in quanto tale l'effetto di aver migliorato il livello di soppressione della flora infestante *da parte della consociazione*; piuttosto si direbbe che *a causa* di un livello assai modesto di infestazione iniziale -determinata dal precedente colturale- i trattamenti in precessione a cereale si sono trovati in condizioni di assai minor competizione con le infestanti.

Appare poi chiaro che la precessione a frumento è svantaggiosa un po' per tutti i trattamenti, ma che a beneficiare maggiormente della consociazione è quello che ne avrebbe sofferto di più, ovvero il frumento medesimo, mentre nel caso della precessione a leguminosa beneficia maggiormente della consociazione la componente che meno se ne sarebbe avvantaggiata, ovvero la lenticchia.

## 4. Conclusioni

La consociazione frumento duro-lenticchia in ambiente mediterraneo appare essere una tecnica di interesse non trascurabile per aumentare l'efficienza agronomica delle due produzioni, laddove vi sia un interesse preesistente nella produzione di entrambi i prodotti. Oltre alla migliore efficienza biologica complessiva, uno dei principali vantaggi agronomici è la riduzione molto marcata dell'allettamento della lenticchia consociata rispetto alla coltura pura. L'eventuale vantaggio economico della consociazione dipende in ogni caso dal prezzo relativo di ciascun prodotto.

Il vantaggio produttivo della consociazione appare superiore in caso di necessità di far fronte ad elevati livelli di pressione da parte della flora infestante, soprattutto in relazione ai risultati della lenticchia consociata.

È probabile che vi sia un certo livello di trasferimento di azoto dalla lenticchia al frumento, ma l'entità di tale trasferimento è probabilmente molto variabile e non può essere realisticamente stimata sulla base dei nostri risultati.

In consociazione, per differenti precessioni ci si può attendere che la componente più favorita sia quella che avrebbe maggiormente sofferto in coltura pura, a parità di precessione. È bene mantenere bassa la densità di semina del frumento se l'obiettivo è la massimizzazione della produzione di lenticchia.

Il limite probabilmente più grave all'applicazione pratica della consociazione su scala aziendale è quello posto dai problemi di raccolta e separazione meccanica delle due componenti, che meriterebbero un approfondimento specifico; da questo punto di vista, tuttavia, occorre rilevare che le soluzioni non sono in realtà complesse quanto potrebbe apparire e che esistono già studi (es. Viguier et al. 2018) che dimostrano la possibilità di individuare soluzioni applicative efficaci, mentre si possono reperire casi studio inerenti l'applicazione anche su scala aziendale di consociazioni fra cereali e lenticchia (Reif et al. 2020), e in taluni casi è anche possibile trovare materiale tecnico-divulgativo volto a presentare diverse strategie di risoluzione pratica (Bedoussac et al. 2021).

## 5. Bibliografia

- Agegnehu G., Ghizaw A., Sinebo W. (2008). Yield potential and land-use efficiency of wheat and faba bean mixed intercropping. *Agronomy for sustainable development*, 28, 257-263.
- Ahlawat, I. P. S., Singh, A., & Sharma, R. P. (1985). Water and nitrogen management in wheat-lentil intercropping system under late-sown conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 105(3), 697-701
- Akter N., Alim Md. A., Islam M.M., Naher Z., Rahman M., Hossain ASM. I. (2004). Evaluation of Mixed and Intercropping of Lentil and Wheat. *Journal of Agronomy*, 3(1), 48-51.
- Alandia, G., Pulvento, C., Sellami, M. H., Hoidal, N., Anemone, T., Nigussie, E., ... & Jacobsen, S. E. (2020). Grain legumes may enhance high-quality food production in Europe. *Emerging research in alternative crops*, 25-53.
- Allard, R. W. (1961). Relationship Between Genetic Diversity and Consistency of Performance in Different Environments 1. *Crop Science*, 1(2), 127-133.
- Banik P., Midya A., Sarkar B.K., Ghose S.S. (2006). Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: advantages and weed smothering. *European Journal of agronomy*, 24(4), 325-332.
- Bedoussac L., Journet E.P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen, E.S., ... & Justes E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for sustainable development*, 35, 911-935.
- Bedoussac, L., Lisa, A., Elina, D., Salembier, C., & Jeuffroy, M. H. (2021). De la théorie à la mise en pratique des mélanges d'espèces.
- Bilalis D., Papastyliou P., Konstantas A., Patsiali S., Karkanis A., Efthimiadou A. (2010). Weed-suppressive effects of maize-legume intercropping in organic farming. *International Journal of Pest Management*, 56(2), 173-181.
- Brooker, R. W., Bennett, A. E., Cong, W. F., Daniell, T. J., George, T. S., Hallett, P. D., ... & White, P. J. (2015). Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107-117.
- Brooker, R. W., Maestre, F. T., Callaway, R. M., Lortie, C. L., Cavieres, L. A., Kunstler, G., ... & Michalet, R. (2008). Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *Journal of ecology*, 18-34.
- Carr P.M., Gardner J.J., Schatz B.G., Zwinger S.W., Guldan S.J. (1995). Grain yield and weed biomass of a wheat-lentil intercrop. *Agronomy Journal*. 87(3), 574-579.
- Cowell, L. E., Bremer, E., & Kessel, C. V. (1989). Yield and N<sub>2</sub> fixation of pea and lentil as affected by intercropping and N application. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(2), 243-251.
- Das A.K., Khaliq Q.A., Haider M.L. (2011). Effect of intercropping on growth and yield in wheat-lentil and wheat-chickpea intercropping system at different planting configurations. *Int. J. Innovat. Reg. strategy*, 5, 125-137.
- de Mendiburu F (2021). *agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research; R package version 1.3-5*, <<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>.
- Döring, T. F., Annicchiarico, P., Clarke, S., Haigh, Z., Jones, H. E., Pearce, H., ... & Wolfe, M. S. (2015). Comparative analysis of performance and stability among composite cross populations, variety mixtures and pure lines of winter wheat in organic and conventional cropping systems. *Field Crops Research*, 183, 235-245.
- Döring, Thomas F., Samuel Knapp, Geza Kovacs, Kevin Murphy, and Martin S. Wolfe. "Evolutionary plant breeding in cereals—into a new era." *Sustainability* 3, no. 10 (2011): 1944-1971.
- Fabre, F., Rousseau, E., Mailleret, L., & Moury, B. (2015). Epidemiological and evolutionary management of plant resistance: optimizing the deployment of cultivar mixtures in time and space in agricultural landscapes. *Evolutionary Applications*, 8(10), 919-932.
- Finckh, M., Gacek, E., Goyeau, H., Lannou, C., Merz, U., Mundt, C., ... & Wolfe, M. (2000). Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, 20(7), 813-837.
- Ghaley B.B., Hauggaard-Nielsen H., Høgh-Jensen H., Jensen E.S. (2005). Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73, 201-212.
- Ghelfi R., Palmieri A. (2017). Pulses production in Italy: Trade, marketing and policy issues. *Italian Journal of Agronomy*, 12(3).
- Ghosh A., Puste A.M. (1997). Effect of irrigation and inoculation on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) and lentil (*Lens culinaris*) grown pure and in intercropping systems. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 67(12).

- H. Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016.
- Hauggaard-Nielsen H., Jørnsgaard B., Kinane J., Jensen E.S. (2008). Grain legume–cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(1), 3-12.
- Ikram ul Haq M., Ahmad R., Jabbar A., Khalid M. 2018. The effect of different planting techniques on productivity and profitability of barley-lentil intercrops under semi-arid subtropical climate. *Int. J. Agric. Biol.* 00: 000-000.
- Islam M.N., Mian M.A.K., Paul R.K., Ali M.O. (1997). Suitability of intercropping flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum*) with lentil (*Lens culinaris*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 67 (6): 256-8.
- Jensen, E. S., Carlsson, G., & Hauggaard-Nielsen, H. (2020). Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1-9.
- Kermah M., Franke A.C., Adjei-Nsiah S., Ahiabor B.D., Abaidoo R.C., Giller K.E. (2017). Maize-grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in the Guinea savanna of northern Ghana. *Field crops research*, 213, 38-50.
- Kezeya B., Muel F., Galioto F., Pellegrini F., Antichi D., Mergenthaler M. (2019). Market of legumes in Italy. Results of the EU-project LegValue.
- Kezeya B., Muel F., Smadja T., Stauss W., Stute I., Simmen M., Mergenthaler M. (2020). Report on legume markets in the EU. Deliverable D3. 1 of the EU-project LegValue.
- Khaliq A., Khan M.B., Saleem M.F., Zamir S.I. (2001). Lentil yield as influenced by density of wheat inter-cropping. *Journal of Research (Science)*, Bahauddin Zakariya University, Multan, Pakistan. Vol.12, No.2.
- Khan M., Khan R.U., Wahab, A., Rashid A. (2005). Yield and yield components of wheat as influenced by intercropping of chickpea, lentil and rapeseed in different proportions. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 42(3-4), 1-3.
- Khoury, C. K., Brush, S., Costich, D. E., Curry, H. A., De Haan, S., Engels, J. M., ... & Thormann, I. (2022). Crop genetic erosion: understanding and responding to loss of crop diversity. *New Phytologist*, 233(1), 84-118.
- Koskey G., Leoni F., Carlesi S., Avio L., Bärberi P. (2022). Exploiting plant functional diversity in durum wheat–lentil relay intercropping to stabilize crop yields under contrasting climatic conditions. *Agronomy*, 12(1), 210.
- Książak, J., Staniak, M., & Stalenga, J. (2023). Restoring the importance of cereal-grain legume mixtures in low-input farming systems. *Agriculture*, 13(2), 341.
- Lenth R (2023). *\_emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means\_*. R package version 1.8.4-1, <<https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>>.
- Li, Y., Ran, W., Zhang, R., Sun, S., & Xu, G. (2009). Facilitated legume nodulation, phosphate uptake and nitrogen transfer by arbuscular inoculation in an upland rice and mung bean intercropping system. *Plant and Soil*, 315, 285-296
- Liebman M., Dick E. (1993). Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecol. Appl.* 3, 92–122.
- Lithourgidis A.S., Dordas C.A., Damalas C.A., Vlachostergios D. (2011). Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian journal of crop science*, 5(4), 396.
- Lorenzetti, E., Carlesi, S., & Bärberi, P. (2022). Mixtures of Commercial Lentil Cultivars Show Inconsistent Results on Agronomic Parameters but Positive Effects on Yield Stability. *Agronomy*, 12(9), 2107.
- Mahmood, F., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Azeem, M., & Wery, J. (2018). Grain legumes for the sustainability of European farming systems. *Sustainable Agriculture Reviews 32: Waste Recycling and Fertilisation*, 105-133.
- Mahmoud, R., Casadebaig, P., Hilgert, N., Alletto, L., Freschet, G. T., de Mazancourt, C., & Gaudio, N. (2022). Species choice and N fertilization influence yield gains through complementarity and selection effects in cereal-legume intercrops. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(2), 12.
- Mandal B.K., Barik A.K., Jana T.K., Saha S., Saha A. (1997). Comparative suitability of Indian mustard (*Brassica juncea*) in intercropping with lentil (*Lens culinaris*) and gram (*Cicer arietinum*) under rainfed condition. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 67(3).
- Mandal B.K., Mahapatra S.K. (1990). Barley, lentil, and flax yield under different intercropping systems. *Agronomy Journal*. 82(6), 1066-1068.



- Martin-Guay M.O., Paquette, A., Dupras, J., Rivest, D. (2018). The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Science of The Total Environment*, 615, 767-772.
- Masvaya E.N., Nyamangara J., Descheemaeker K., Giller K.E. (2017). Is maize-cowpea intercropping a viable option for smallholder farms in the risky environments of semi-arid southern Africa? *Field crops research*, 209, 73-87.
- Mead, R., & Willey, R. (1980). The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental agriculture*, 16(3), 217-228.
- Meseret A., Tafes B., Takele A., Eshetu S. (2021). Productivity and Land Use Efficiency of Wheat-Lentil Intercropping under Two Tillage Practices. *Ethiopian Journal of Agricultural Sciences*, 31(2), 45-59.
- Mishra J.P., Ali M. (2002). Effect of intercropping patterns on biological and economic sustainability of linseed (*Linum usitatissimum*) with lentil (*Lens culinaris*) genotypes. *Indian journal of agricultural science*, 72(10), 577-580.
- Nadeem M., Tanveer A., Sandhu H., Javed S., Safdar M.E., Ibrahim M., ... & Arshad U. (2020). Agronomic and economic evaluation of autumn planted sugarcane under different planting patterns with lentil intercropping. *Agronomy*, 10(5), 644.
- Pannacci, E., Tei, F., & Guiducci, M. (2018). Evaluation of mechanical weed control in legume crops. *Crop Protection*, 104, 52-59. doi:10.1016/j.cropro.2017.10.014
- Ponisio L.C., M'Gonigle L.K., Mace K.C., Palomino J., de Valpine P., Kremen C. (2015) Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proc. R. Soc. B* 282:20141396.
- Qin, X., Li, Y., Shi, C., Song, D., Wen, X., Liao, Y., & Siddique, K. H. (2019). The number of cultivars in varietal winter-wheat mixtures influence aboveground biomass and grain yield in North China. *Plant and Soil*, 439, 131-143.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reif, T. M., Zikeli, S., Rieps, A. M., Lang, C. P., Hartung, J., & Gruber, S. (2020). Reviving a neglected crop: A case study on lentil (*Lens culinaris* Medikus subsp. *culinaris*) cultivation in Germany. *Sustainability*, 13(1), 133.
- Reynolds A.N., Mhurchu C.N., Kok Z.Y., Cleghorn C. (2023). The neglected potential of red and processed meat replacement with alternative protein sources: Simulation modelling and systematic review. *Eclinicalmedicine*, 56, 101774.
- Sarkar R.K., Malik G.C., Pal P.K. (2004). Effect of intercropping lentil (*Lens culinaris*) and linseed (*Linum usitatissimum*) under varying plant density and row arrangement on productivity and advantages in system under rainfed upland. *Indian Journal of Agronomy*, 49(4), 241-243.
- Schmidtko K., Neumann A., Hof C., Rauber R. (2004). Soil and atmospheric nitrogen uptake by lentil (*Lens culinaris* Medik.) and barley (*Hordeum vulgare* ssp. *nudum* L.) as monocrops and intercrops. *Field Crops Research*, 87(2-3), 245-256.
- Singh M.K., Thakur R., Pal S.K., Verma U.N., Upasani R.R. (2000). Plant density and row arrangement of lentil (*Lens culinaris*) and mustard (*Brassica juncea*) intercropping for higher productivity under Bihar plateau. *Indian Journal of Agronomy*, 45(2), 284-287.
- Singh U., Singh S.R., Saad A.A., Khanday B.A., Singh J.K. (2011). Yield advantage, reciprocity functions and energy budgeting of lentil (*Lens culinaris*) + oat (*Avena sativa*) intercropping under varying row ratio and phosphorus management. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 81(3), 219.
- Suneson, C. A. (1956). An evolutionary plant breeding method 1. *Agronomy Journal*, 48(4), 188-191.
- Suryapani S., Umar S., Malik A.A., Ahmad A. (2013). Symbiotic nitrogen fixation by lentil improves biochemical characteristics and yield of intercropped wheat under low fertilizer input. *Journal of Crop improvement*, 27(1), 53-66.
- Szumigalski A.R., Van Acker R.C. (2006). Nitrogen yield and land use efficiency in annual sole crops and intercrops. *Agronomy Journal*. 98(4), 1030-1040.
- Tilman D., Lehman C.L., Thomson K.T. (1997). Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations. *Proceedings of the national academy of sciences*, 94(5), 1857-1861.
- Tilman D., Reich P.B., Knops J., Wedin D., Mielke T., Lehman C. (2001). Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 294(5543), 843-845.
- Tilman D., Reich P.B., Knops J.M. (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 441(7093), 629-632.

- Tosti G., Guiducci M. (2010). Durum wheat–faba bean temporary intercropping: Effects on nitrogen supply and wheat quality. *European Journal of Agronomy*, 33(3), 157-165.
- Tosti, G., Falcinelli, B., & Guiducci, M. (2023). Lentil–cereal intercropping in a mediterranean area: Yield, pests and weeds. *Agronomy Journal*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/agj2.21413>
- Tuti M.D., Mahanta D., Mina B.L., Bhattacharyya R., Bisht J.K., Bhatt J. C. (2012). Performance of lentil (*Lens culinaris*) and toria (*Brassica campestris*) intercropping with wheat (*Triticum aestivum*) under rainfed conditions of north-west Himalaya. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 82(10), 841.
- Unkovich, M., Herridge, D. A. V. I. D., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, B., Giller, K., ... & Chalk, P. (2008). Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR).
- Usmanikhail M.U., Tunio S.D., Jamro G.H., Oad F.C., Hassan S.W., Chachar Q.D., Ali Khanzada M., Gandahi A.W. (2012). Agronomic and economic effect of intercropping sugarbeet with oilseeds and lentil. *Pak. J. Bot* 44, no. 6: 1983-1988.
- Viguiet, L. A. (2018). Analysis of the agronomic and economic performances of lentil-spring wheat intercrops in organic farming (Doctoral dissertation)
- Viguiet, L., Bedoussac L., Journet E.P. , Justes E. (2018). Yield gap analysis extended to marketable grain reveals the profitability of organic lentil-spring wheat intercrops. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1-12.
- Wang, L., Gruber, S., & Claupein, W. (2012). Optimizing lentil-based mixed cropping with different companion crops and plant densities in terms of crop yield and weed control. *Organic Agriculture*, 2, 79-87.
- Wickham H, Averick M, Bryan J, Chang W, McGowan LD, François R, Grolemund G, Hayes A, Henry L, Hester J, Kuhn M, Pedersen TL, Miller E, Bache SM, Müller K, Ooms J, Robinson D, Seidel DP, Spinu V, Takahashi K, Vaughan D, Wilke C, Woo K, Yutani H (2019). “Welcome to the tidyverse.” *\_Journal of Open Source Software\_*, \*4\*(43), 1686. doi:10.21105/joss.01686 <<https://doi.org/10.21105/joss.01686>>.
- Wilke C (2020). *\_cowplot: Streamlined Plot Theme and Plot Annotations for 'ggplot2'\_*. R package version 1.1.1, <<https://CRAN.R-project.org/package=cowplot>>.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., ... & Murray, C. J. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The lancet*, 393(10170), 447-492.
- Willey R. (1979). Intercropping-its importance and research needs. Part 2. agronomy and research approaches (No. REP-2605. CIMMYT).
- Wuest, S. E., Peter, R., & Niklaus, P. A. (2021). Ecological and evolutionary approaches to improving crop variety mixtures. *Nature Ecology & Evolution*, 5(8), 1068-1077.
- Yadav S.S., McNeil D., Stevenson P.C. (Eds.). (2007). *Lentil: An ancient crop for modern times*. Springer Science & Business Media.
- Associazione Meridionale Cerealisti. Sito web: <https://www.associazioneamc.it/archivio>. Sito web visitato il 20 marzo 2023.

## 6. Altri Contributi

Nel triennio di dottorato, parallelamente all'attività sperimentale propria del dottorato di ricerca, si è attivamente contribuito alla pianificazione, realizzazione e conduzione di diverse attività sperimentali in vaso e in campo volte a valutare l'efficienza di microrganismi tellurici simbiotici nel processo di azotofissazione biologica e nella mitigazione di stress di natura abiotica quali stress idrico e salino; agli effetti di contaminanti di natura antropica quali la microplastica nello stato di salute di suoli agrari e di specie erbacee da pieno campo; alla caratterizzazione di diversi genotipi nazionali e internazionali di specie cerealicole e leguminose.

Da uno dei lavori svolti parallelamente al lavoro di tesi è stata prodotta la seguente pubblicazione:

Giambalvo, D., Amato, G., **Borgia, D.**, Ingraffia, R., Librici, C., Lo Porto, A., ... & Frenda, A. S. (2022). Nitrogen Availability Drives Mycorrhizal Effects on Wheat Growth, Nitrogen Uptake and Recovery under Salt Stress. *Agronomy*, 12(11), 2823.