



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti

Risorse Naturali e Ambiente

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

**Effetti agronomici e ambientali della concimazione
azotata gestita esclusivamente per via fogliare
in frumento tenero**

Relatore: prof. *Teofilo Vamerali*
Correlatore: dott. *Manuel Ferrari*

Laureando: *Alessio Vezzano*
Matricola n. 1211054

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Sommario

Sommario	3
Riassunto	7
Abstract	9
1. Introduzione	11
1.1 Il frumento	11
1.1.1 Caratteristiche generali e diffusione	11
1.1.2 Classificazione botanica	12
1.1.3 Caratteristiche morfologiche	14
1.1.4 Ciclo fenologico	16
1.1.5 Esigenze ambientali	17
1.1.6 Tecnica colturale	18
1.1.7 Esigenze nutritive	19
1.1.8 Avversità	21
1.1.9 Raccolta e conservazione del prodotto	22
1.1.10 Composizione e qualità della cariosside	22
1.2 La nutrizione azotata in frumento	23
1.2.1 L'utilizzo dei concimi in Italia	23
1.2.2 L'azoto e l'importanza per il frumento	24
1.2.3 Aspetti ambientali relativi all'impiego di concimi azotati	26
1.2.4 La concimazione fogliare	29
1.2.5 L'assorbimento dei nutrienti per via fogliare	30
1.3 L'apparato radicale	31
1.3.1 Caratteristiche morfologiche e funzioni	31
1.3.2 Metodi di studio dell'apparato radicale	32
1.3.2 Analisi d'immagine	35
2. Scopo del lavoro	37
3. Materiali e Metodi	39
3.1 Descrizione della prova	39
3.2 Operazioni colturali	42

3.3 Rilievi sperimentali	43
3.3.1 Campionamento dell'acqua di percolazione e quantificazione di NO ₃ ⁻ lisciviato	43
3.3.2 Rilievi sulla parte epigea	44
3.3.3 Rilievi sulla parte radicale	47
3.3.4 Valutazione della ritenzione del concime fogliare	50
3.4 Analisi statistica	52
4. Risultati e Discussioni	53
4.1 Andamento meteorologico	53
4.2 Quantificazione del volume di percolazione e lisciviazione di NO ₃ ⁻	54
4.3 Quantità di concime azotato fogliare che ha raggiunto la coltura	56
4.4 Parametri epigei	57
4.4.1 SPAD	57
4.4.2 NDVI	58
4.4.3 Biomassa secca e numero di spighe	59
4.4.4 Resa e qualità della granella	60
4.5 Parametri radicali	62
4.5.1 Densità di lunghezza radicale (RLD)	62
4.5.2 Densità di superficie radicale (RAD)	64
4.5.3 Diametro radicale	66
4.5.4 Peso secco dell'apparato radicale	68
5. Conclusioni	69
6. Bibliografia	71

Riassunto

Il frumento (*Triticum aestivum* L.) rappresenta uno dei cereali più coltivati al mondo, grazie all'elevata capacità di adattamento che ne ha reso possibile la coltivazione in ambienti con diversi tipi di climi. Negli ultimi decenni, lo sviluppo delle tecniche colturali unito all'impiego di prodotti chimici di sintesi ha incrementato in maniera esponenziale le produzioni agricole. In particolare, l'utilizzo crescente di fertilizzanti azotati in cerealicoltura ha migliorato sensibilmente la resa e la qualità della granella.

Tuttavia, la distribuzione di dosi eccessive di azoto ha determinato una progressiva riduzione dell'efficienza d'uso di questo (*Nitrogen Use Efficiency*, NUE) da parte delle colture, con conseguenti problemi ambientali, come l'inquinamento delle falde acquifere da nitrati a seguito di lisciviazione. Per questo motivo, si stanno sperimentando varie pratiche agricole che permettano di incrementare la sostenibilità in agricoltura tramite il miglioramento dell'efficienza d'uso dei nutrienti, limitando gli sprechi e salvaguardando l'ambiente e gli ecosistemi naturali, senza compromettere la produttività delle colture e la qualità dei prodotti.

In tale ottica, questo lavoro di tesi ha riguardato l'analisi di due diverse strategie di concimazione azotata in frumento tenero, coltivato in lisimetri su due diverse tipologie di terreno, allo scopo di valutare l'impatto ambientale riguardante la quantità di nitrato lisciviato nelle tesi a confronto.

Nel dettaglio, è stata confrontata la gestione convenzionale con applicazione di concime granulare al suolo a dosi standard (160 kg N ha^{-1}) con l'applicazione di azoto tramite irrorazione fogliare a dose più bassa (-40% vs. controllo, 96 kg N ha^{-1}) e frazionando la dose di concime in vari stadi di sviluppo. Sono stati confrontati due diversi tipi di terreno (medio-impasto e torboso).

Oltre alla determinazione della quantità di azoto lisciviato da ciascuna tesi, sono stati valutati l'accrescimento epigeo e radicale della coltura e, alla raccolta, la resa e la qualità della granella.

Dai risultati ottenuti, non sono state riscontrate differenze evidenti sia sui parametri di accrescimento, che sulla produttività finale da parte delle due diverse gestioni dell'azoto.

Inaspettatamente, un leggero incremento nella lisciviazione dei nitrati da parte della tecnica di concimazione fogliare è stato misurato nel suolo medio-impasto, mentre valori simili tra le due gestioni sono stati rilevati nel terreno torboso, anche se la modesta piovosità registrata durante l'annata di sperimentazione ha sicuramente ridotto la quantità totale di azoto percolata da ciascuna tesi/lisimetro.

Nonostante la concimazione fogliare non abbia sensibilmente ridotto la quantità di nitrati lisciviati, l'applicazione del fertilizzante attraverso irrorazione fogliare si è comunque rivelata una pratica sostenibile, con notevole risparmio di concime, e con risultati agronomici apprezzabili.

Abstract

Agronomic and environmental effects of nitrogen fertilisation managed exclusively by foliar application in soft wheat

Common wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most cultivated cereal crops in the world. Wheat can be cultivated in different weather conditions and environments, because of its high adaptability. During the last decades, advances in the cultivation techniques combined with the use of synthetic chemicals has increased agricultural production.

In the meantime, industries have taken advantage from the use of synthetic products, which improved grain yield and quality. However, the overuse of nitrogen decreased the fertiliser efficiency (*Nitrogen Use Efficiency*, NUE) causing environmental damage, such as groundwater pollution. Nowadays, agricultural techniques are evolving through the adoption of more sustainable practices aimed at improving nutrients efficiency, while maintaining high grain quality and productivity, reducing waste, protecting the environment, and preserving the natural ecosystems.

In this framework, the aim of this study was to evaluate the environmental impact of nitrogen fertilisation, considering two different strategies conducted in two different soil types.

In detail, the conventional fertilisation management (with soil granular application at standard dose; 160 kg N ha⁻¹) was compared with foliar spraying at reduced doses (-40% vs. control, 96 kg N ha⁻¹), by splitting the whole amount in micro-doses at different growth stages, cultivating wheat in two different soil types (silty-loamy and peaty).

The amount of nitrate leaching by each thesis was periodically revealed, along with shoot and root growth during crop growth, whereas, yield, and grain quality were determined at harvest.

No relevant variations were detected on growth parameters and on the final productivity between the two different fertilisation managements. Unexpectedly, a slight increase in nitrate leaching by the foliar application method was determined in the silty-loam soil, while similar values between the two managements were detected in the peaty soil, although the modest rainfall recorded during the experimentation year has more likely reduced the total amount of nitrogen percolated by each thesis/lysimeter.

In conclusion, despite foliar fertilisation has not significantly reduced the amount of nitrate leaching in this particular year with low rainfall, the application of nitrogen by leaf spraying at reduced dose

proved to be a sustainable practice, allowing to save money and with appreciable agronomic results in wheat cultivation.

1. Introduzione

1.1 Il frumento

1.1.1 Caratteristiche generali e diffusione

Nelle colture cerealicole, il frumento tenero (*Triticum aestivum* L.) è al primo posto tra le colture più coltivate al mondo, in quanto costituisce una quota importante della dieta di numerosi Paesi, rappresentando la maggior fonte di carboidrati. Negli ultimi decenni il miglioramento genetico e le moderne tecniche di coltivazione hanno consentito un aumento rilevante delle produzioni e delle rese mondiali (FAOSTAT, 2021) (Figura 1.1).

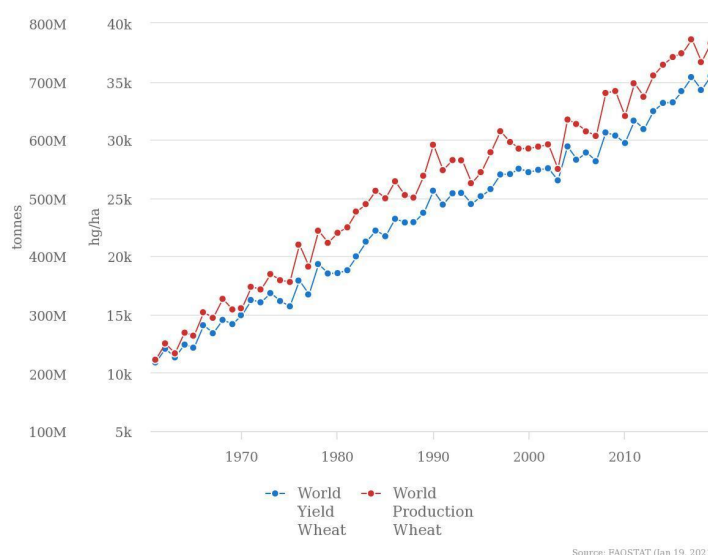


Figura 1.1. Andamento della resa (in kg ha^{-1}) e produzione mondiale (in tonnellate) di frumento negli ultimi decenni.

Il centro di origine della coltura è stato individuato nell'areale della mezzaluna fertile che corrisponde agli attuali paesi del Medio Oriente (Turchia, Siria, Iraq, Libano e Israele). Dal centro di origine il frumento ha avuto un'espansione in tutti i continenti per essere coltivato in tutte le zone con climi temperati e semiaridi.

Il miglioramento genetico e la produzione di nuove varietà hanno ulteriormente ampliato gli areali di coltivazione e oggi si coltiva in quasi tutto il mondo:

- Canada: leader nella produzione ed export di frumento duro. Nella campagna 2020-2021 si sono avuti raccolti pari a circa 6,1 milioni di tonnellate, in aumento del 23% rispetto alla precedente annata (ISMEA, 2020);
- USA: primo produttore ed esportatore di mais, in media con circa il 32% del totale in entrambi i casi. Per il 2020-2021 l'offerta è cresciuta (+8% a 374 mln t) e un aumento anche delle scorte (+11% a 56 mln t) (ISMEA, 2020);
- Russia: esprime più del 10% dell'offerta mondiale di frumento e il 20% dell'export totale. Nel 2020-2021 si è avuto un consistente aumento dei raccolti (+12% a 82,5 mln t) (ISMEA, 2020);
- Australia: tra i principali esportatori mondiali di frumento tenero (10% circa); dopo il crollo produttivo del 2018 e 2019 (in media 16 mln di tonnellate l'anno), nel 2020 i raccolti si attestano su livelli standard dell'area raggiungendo 28 milioni di tonnellate (ISMEA, 2020);
- Unione Europea: concentra quasi il 20% dei raccolti mondiali di frumento ed è tra i principali esportatori (circa il 15% del totale). Nel 2020-2021 si è avuto un calo dell'offerta (-21% a 123 mln t) e delle scorte (-20% a 11 mln t) (ISMEA, 2020);
- Italia: nello specifico del frumento duro, l'Italia, dopo il Canada, è il secondo produttore mondiale (11% del totale) e il primo importatore (circa 25% del totale). Nel 2021-2022 si evidenzia un leggero aumento dei raccolti (4 mln t) (ISMEA, 2021). La produzione di frumento tenero, invece, ha subito un costante calo dal 2012, cioè da quando le rese avevano raggiunto 5,9 t ha⁻¹ con superfici pari a 593.500 ettari; negli anni successivi le due variabili produttive sono risultate molto instabili mantenendosi su livelli più bassi. Il calo dei raccolti nel 2019 è da ricondurre alla flessione delle superfici (531.000 ettari vs. 543.000 ettari del 2018), mentre i rendimenti unitari sono rimasti stabili a 5,2 t ha⁻¹. Dopo gli abbondanti raccolti di frumento duro nel 2016, grazie all'aumento delle superfici e soprattutto delle rese (3,7 t ha⁻¹ per 1,4 milioni di ettari), l'offerta si è ridotta tra il 2017 e 2019 in ragione della flessione delle superfici investite, le rese invece sono rimaste sostanzialmente stabili. Nel 2019 sono stati seminati poco più di 1,2 milioni di ettari con rese pari a 3,2 t ha⁻¹ (ISMEA, 2020).

1.1.2 Classificazione botanica

I frumenti, come tutti i cereali, sono delle piante Angiosperme (phylum *Anthophyta*), monocotiledoni (classe *Liliopsida*), appartenenti alla famiglia *Poaceae* (o *Graminaceae*). I frumenti coltivati fanno parte del complesso tassonomico *Triticum*. Il *Triticum aestivum* è un frumento esaploide ($2n=6\times=42$) che si è formato in seguito a processi di poliploidizzazione iniziati circa 10.000 anni fa

nella Mezzaluna fertile. Nel dettaglio, l'unione di *T. dicoccum* ($2n=4\times=28$) con *T. tauschii* ($2n=2\times=14$) ha dato origine a un ibrido interspecifico ($2n=3\times=21$) dalla cui diploidizzazione si è formato *T. aestivum*.

È individuabile una serie genomica poliploide con numero cromosomico base $n=7$ con presenza di specie diploidi ($2n=14$), tetraploidi ($2n=28$) ed esaploidi ($2n=42$), formatisi successivamente a fenomeni di ibridazione naturale. *Triticum aestivum* (frumento tenero) è esaploide ($2n=42$) e deriva dall'ibridazione di una sottospecie coltivata di *Triticum turgidum* e una specie selvatica, l'*Aegilops tauschii*; esso presenta delle differenze rispetto a *Triticum turgidum* in termini di altezza del fusto, tempi di maturazione, percentuale di proteina, presenza o meno di ariste (Figura 1.2). Il frumento tenero rispetto al duro ha una base genetica ben più ampia e questo ne ha consentito una miglior adattabilità ed espansione (Toderi e D'Antuono, 2001).

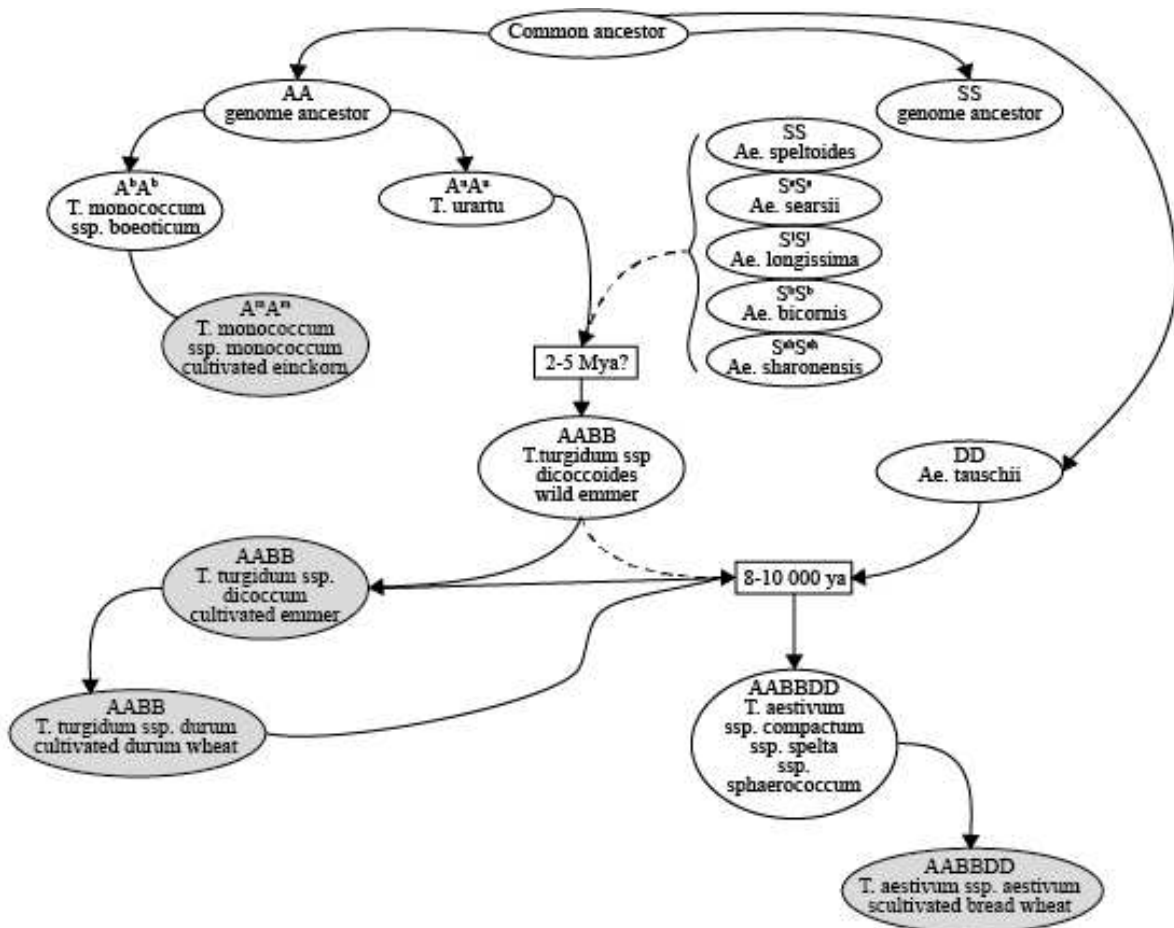


Figura 1.2. Schematizzazione dell'origine dei principali frumenti coltivati. I cerchi scuri rappresentano le specie coltivate, mentre le linee tratteggiate rappresentano le possibili diverse provenienze del genoma AABB negli esaploidi.

1.1.3 Caratteristiche morfologiche

Fusto. Il fusto del frumento, denominato culmo, può raggiungere altezze variabili in funzione della specie, della varietà e della condizione ambientale e nutrizionale in cui si trovano le piante; attualmente si hanno varietà che non superano i 70-80 cm (molto più basse rispetto al passato) per evitare il fenomeno dell'allettamento. Il culmo presenta una sezione cilindrica, formato da 5-8 nodi e internodi in funzione delle diverse varietà. Il frumento è una coltura che presenta accestimento, ossia dal culmo principale si sviluppano altri culmi che riproducono la struttura del culmo primario; il numero di accestimenti è alto anche se i culmi di accestimento fertili sono solitamente 2-3 (Figura 1.3).

Foglia. Il numero di foglie per pianta può variare da 5 a 8 ed è correlato alla durata del ciclo vegetativo. Sono di colore verde ma tendono ad ingiallire in seguito a carenze nutrizionali e idriche; la guaina fogliare avvolge completamente il culmo per buona parte della lunghezza dell'internodo soprastante il nodo di inserimento della foglia. La lamina ha forma lineare-lanceolata appuntita, ha portamento eretto, con superficie eretta o glabra. È d'importanza notevole l'ultima foglia, detta a bandiera, nella fase di riempimento delle cariossidi. Sono presenti anche la ligula e le auricole: la ligula ben sviluppata abbraccia il culmo e ha margine frastagliato provvisto di sottili peli, le auricole sono sempre presenti, ben visibili e provviste di peli (Figura 1.3).

Radici. Le radici variano di norma da 5 a 7 e sono vitali per l'intero ciclo produttivo, si differenziano in primarie e avventizie. Le prime rivestono un ruolo fondamentale nelle prime fasi di emergenza della plantula, mentre in seguito rimangono poco o per nulla attive, mentre le avventizie si originano dal culmo e costituiscono la maggior parte dell'apparato radicale. La profondità raggiunta dall'apparato radicale di frumento può raggiungere i 150 cm, anche se di norma si aggira sui 120 cm ed il 70% della biomassa radicale si trova tra 0 e 40 cm (Figura 1.3).

Infiorescenza. La spiga rappresenta l'asse principale o rachide sul quale sono inserite le spighe, una ad ogni nodo alterne su 2 file opposte, ogni spiga presenta circa 18-20 spighe, ogni spighe è costituita dalla rachilla, breve asse non ramificato sul quale sono inserite le glume e i fiori (2 o 3). Le spighe mediane portano più fiori di quelle basali e apicali. Le due glume, poste alla base di ogni spighe, hanno lunghezza, forma e colore che variano a seconda della specie e della varietà.

La glumetta è dotata di un'arista, che nel frumento duro può essere lunga anche 20 cm, mentre nel frumento tenero può essere assente o misurare da 3 a 8 cm (Figura 1.3).

Fiore. Il fiore è di tipo ermafrodito ipogino e di struttura semplice, comprende un androceo di 3 stami a basi fisse composti da antere bilobate con sacchi pollinici che bloccano il polline, un gineceo composto da un pistillo con ovario supero monocarpellare e con stilo provvisto di stigma bifido e piumoso e presenta ovario obovato. Androceo e gineceo sono protetti da due formazioni membranacee, le glumette, delle quali una, detta palea, è posizionata superiormente, e una, la lemma, è sottostante al fiore e può terminare o meno con la resta o arista (Toderi e D'Antuono, 2001) (Figura 1.3).

Frutto. Il frumento presenta il frutto tipico delle *Poaceae* denominato cariosside, essa ha forma ellittica ovoidale che presenta un solco nella parte ventrale, mentre la parte laterale presenta gibbosità. Il colore può essere chiaro o rosso brunastro o di gradazioni intermedie, le due estremità sono denominate polo pilifero e polo germinativo. Sezionando una cariosside di frumento, potremmo notare come esternamente essa sia avvolta dai tegumenti seminali, costituiti da pericarpo e spermoderma. A seguire è presente l'endosperma, che può avere una struttura farinosa, vitrea o semi-vitrea. Tipicamente nel frumento tenero l'endosperma è farinoso e di colore biancastro, semi-vitreo solo in alcune varietà, e vitreo nel frumento duro. L'endosperma è a sua volta suddivisibile in più parti quali: l'aleurone, il quale rappresenta lo strato più esterno, e il parenchima interno, essenzialmente costituito da globuli di amido, componente che rappresenta in peso circa il 70% della cariosside. Tra endosperma ed embrione è presente infine uno strato sottile, denominato scutello, il quale andrà, al momento della germinazione, a costituire il cotiledone e presiederà alla biosintesi di enzimi ed ormoni necessari a tale processo. L'embrione presenta già formati al suo interno l'apice del germoglio, o piumetta, avvolto da una guaina denominata coleoptile, e l'apice radicale, protetto dalla cosiddetta coleorizza. Il fusticino o epicotile infine unisce la piumetta alla radichetta (Grimaldi, 1954; Toderi e D'Antuono, 2001).

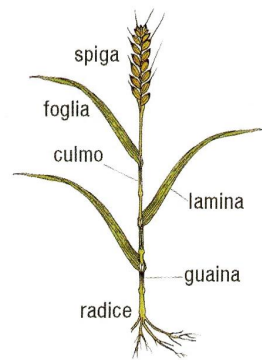


Figura 1.3. Struttura di una pianta di frumento.

1.1.4 Ciclo fenologico

Il frumento è una pianta annuale, il cui ciclo biologico coincide con quello produttivo. Le principali fasi di sviluppo sono caratterizzate da importanti cambiamenti della morfologia della pianta e sono facilmente rilevabili con osservazioni morfologiche (Figura 1.4).

Emergenza. Questa prima fase inizia con la germinazione della cariosside e procede con l'accrescimento della plantula fino alla sua fuoriuscita dalla superficie del terreno (emergenza). La germinazione avviene dopo che la cariosside ha assorbito acqua dal terreno raggiungendo il 35-40% di umidità. Dopo di che fuoriesce la radichetta protetta dalla coleoriza, seguita dalla piumetta avvolta dal coleoptile. Lo sviluppo dell'apparato radicale avviene con l'emissione di 2-3 palchi di radici embrionali. Questa fase, in condizioni ottimali, dura solitamente 10-15 giorni (Toderi e D'Antuono, 2001).

Accestimento. Dopo l'emergenza, lo sviluppo procede con l'emissione di nuove foglie. All'ascella di ogni foglia, compreso il coleotile, si sviluppa una gemma che ripete la struttura dell'asse principale. Questa struttura, sviluppandosi, può dare origine al culmo di accestimento, il primo culmo di accestimento che fuoriesce dal terreno, di norma, è quello situato all'ascella della prima foglia. Nelle semine autunnali l'accestimento inizia generalmente prima dell'inverno, per poi rallentare in inverno e riprendere successivamente con l'innalzamento delle temperature. Nelle semine primaverili non si invece ha nessuna stasi. Durante l'accestimento, vi è una crescita attiva dell'apparato radicale, con un differenziamento da parte di ogni culmo di radici avventizie che si aggiungono a quelle embrionali (Toderi e D'Antuono, 2001).

Levata. L'emissione dei culmi è regolata dall'andamento termico. La differenziazione della spighetta terminale corrisponde con l'allungamento rapido degli internodi che avviene a partire da quelli basali. Più si procede verso l'apice del culmo e più gli internodi si allungano, portando verso l'alto la spiga. Contemporaneamente vi è l'emissione delle foglie, l'ultima è chiamata foglia a bandiera, per il portamento caratteristico. La sua guaina è particolarmente allungata e contiene all'interno la spiga che, prima dell'uscita ne determina l'ingrossamento (stadio di botticella). Durante la levata la spiga continua il suo sviluppo, con la differenziazione di glumette, stami e ovario (Toderi e D'Antuono, 2001).

Fioritura e impollinazione. Il frumento è una specie autogama e cleistogama. La fioritura (durata di 4-8 giorni) inizia dalle spighe centrali ed è evidenziata dalla fuoriuscita delle antere dalle glumette, che si divaricano per la turgescenza delle lodicole. Al momento della fioritura le antere si sono già aperte e l'impollinazione è già avvenuta (cleistogamia) (Toderi e D'Antuono, 2001).

Maturazione. Essa può essere divisa in tre sotto fasi. All'inizio avviene la *moltiplicazione cellulare* dove le moltiplicazioni mitotiche dello zigote si susseguono molto rapidamente e la cariosside aumenta di dimensioni lineari fino alla lunghezza definitiva. Poi, c'è l'*accumulo di sostanze di riserva*, la cui durata varia dai 20 ai 40 giorni a seconda delle temperature. In questa fase vi è un rapido accumulo di amido nella cariosside che ne determina l'aumento di peso, e al contempo aumenta anche l'accumulo di acqua fino allo stadio di maturazione lattea (65-70% di umidità). Infine durante l'ultima fase, l'*essiccamento*, la cariosside perde rapidamente umidità, passando dal 30% (maturazione cerosa) al 15-18% (maturazione piena) (Toderi e D'Antuono, 2001).

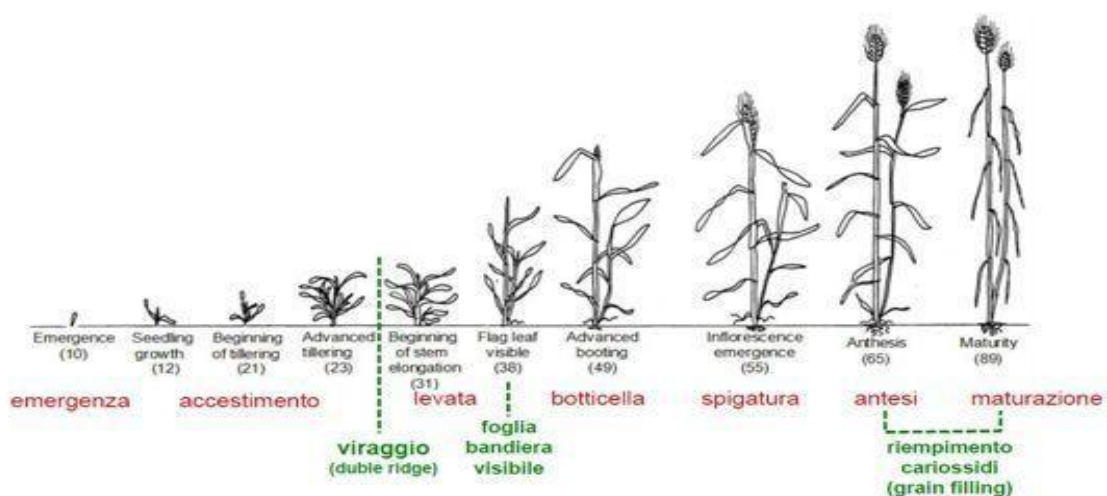


Figura 1.4. Stadi fenologici osservabili durante le fasi di sviluppo del frumento.

1.1.5 Esigenze ambientali

Il frumento è un cereale microtermo, per cui è adattato a svolgere gran parte del suo ciclo biologico durante i periodi freddi dell'anno. Lo zero di vegetazione è prossimo a 0 °C, dalla germinazione alla spigatura, e 6 °C dalla fioritura alla maturazione, mentre le temperature ottimali per lo sviluppo e la resa sono di 20-25 °C. La resistenza al freddo dipende dalle varietà e dallo stadio fenologico; la sensibilità è elevata durante le fasi di germinazione ed emergenza, dove anche pochi gradi sotto lo zero possono essere dannosi. La resistenza al freddo aumenta tra l'emergenza e la quarta foglia raggiungendo il massimo in pieno accostamento. In generale tutte le varietà resistono senza gravi danni a temperature di 8-10 °C sottozero.

Il frumento riesce ad adattarsi a molte tipologie di suolo differenti, anche se predilige terreni tendenzialmente argillosi con un buon tenore di sostanza organica e dotati di buona struttura. Il pH ottimale è compreso tra 6,5 e 7,8 con buona resistenza all'alcalinità e tollera discretamente la salinità. Il frumento soffre particolarmente il ristagno idrico, in quanto può portare all'asfissia radicale con morte delle piante (Toderi e D'Antuono, 2001).

1.1.6 Tecnica colturale

Negli ultimi decenni la coltivazione del frumento ha subito numerose mutazioni con il diffondersi di nuovi mezzi tecnici e varietà. L'evoluzione delle tecniche colturali fa riferimento allo sviluppo della meccanizzazione agricola e all'utilizzo di nuovi input di fertilizzanti e prodotti fitosanitari per la difesa da malattie, insetti e infestanti. Il tutto è comunque supportato da una costante ricerca e selezione di varietà sempre più produttive e resistenti.

Il frumento è una coltura che trae molti benefici dall'avvicendamento con le colture cosiddette “*da rinnovo*” (ad esempio, pomodoro, mais, patata, barbabietola, girasole), riutilizzando il residuo di fertilità lasciato da queste colture. Può succedere anche alle colture dette “*miglioratrici*” come, ad esempio, le leguminose, sfruttando ottimamente la fertilità residua.

Di norma si tende a non far succedere il frumento a se stesso per evitare il fenomeno del ringrano o ristoppio, tale fenomeno causa una diminuzione delle rese già dal primo anno. Questa situazione è riconducibile ad un aumento di proliferazione di erbe infestanti, insetti, nematodi e malattie.

La scelta varietale ha un ruolo importante nella tecnica colturale, essa va fatta tenendo in considerazione il clima e il terreno della zona, resistenza al freddo, allettamento, ecc. Nei climi

semi-aridi con primavera siccitosa sono preferibili varietà resistenti alla “stretta”, dove tale fenomeno può provocare consistenti perdite di prodotto.

La preparazione del terreno per la semina è fondamentale per una corretta germinabilità del seme.

A seconda della coltura che precede il frumento ed alle condizioni climatiche e pedologiche, le lavorazioni differiscono per tipo di lavorazione, profondità ed epoca di lavoro. Le lavorazioni del terreno si dividono in primarie e secondarie; l'aratura è la lavorazione primaria più praticata e si attua quando il terreno è compattato e presenta residui colturali o concimazioni da interrare: per il frumento la profondità ottimale di aratura si aggira sui 20-25 cm. In alternativa all'aratura si può effettuare una lavorazione a due strati, ovvero si esegue prima una ripuntatura a 40-50 cm e successivamente si passa con un erpice per affinare le zolle. Questa doppia lavorazione permette di migliorare la struttura del terreno e garantire un buon drenaggio delle precipitazioni autunnali e invernali. Al momento della semina l'utilizzo di seme prodotto in azienda è da evitare, preferendo l'acquisto dalle ditte sementiere di semente certificata, che possiede un'elevata germinabilità (non inferiore al 95%) ed è stata selezionata, al fine di evitare la presenza di semi di piante infestanti e la contaminazione da organi di propagazione di patogeni (ad esempio funghi del genere *Fusarium* e *Septoria*). Generalmente, la semente è concia con prodotti fungicidi, allo scopo di difendere i germinelli e le piantine nelle prime fasi del loro sviluppo (Toderi, 1982).

Nelle condizioni climatiche italiane la semina è eseguita normalmente nella stagione autunnale. In particolare, l'epoca ottimale per il nord inizia nella seconda decade di Ottobre, per il centro nella prima decade di Novembre e per il sud nella seconda e nella terza decade. In annate con condizioni climatiche avverse, la semina si può eseguire a fine inverno o all'inizio della primavera utilizzando varietà di tipo alternativo (tali varietà non necessitano della vernalizzazione per essere indotte a fiore). La semina è solitamente eseguita con seminatrici universali in file distanti tra i 15 e 20 cm e con una deposizione del seme ad una profondità di 3-4 cm. La densità di semina si attesta sulle 400-500 cariossidi m⁻², utilizzando circa 180-200 kg ha⁻¹ di semente, valore che consente di ottenere 600-700 spighe m⁻². Nel caso di semine tardive è opportuno incrementare la dose di semina poiché l'indice di accostamento è minore rispetto a quello che si ottiene da una semina autunnale (Toderi e D'Antuono, 2001).

1.1.7 Esigenze nutritive

La quantità di elementi nutritivi necessari al frumento varia in funzione di fattori genetici e ambientali, ma soprattutto è influenzata dalle rese, elevate produzioni corrispondono a maggiori

apporti di elementi nutritivi. La concimazione influenza la concentrazione di alcuni elementi all'interno delle cariossidi e della paglia andando a influire sulla qualità del prodotto finale, ovvero la granella. L'assorbimento degli elementi varia a seconda delle diverse fasi del ciclo fenologico, in particolare durante la levata la pianta assorbe il 70-80% del fabbisogno totale.

La concimazione deve essere effettuata sulla base dei fabbisogni colturali, per una resa di 6-7 tonnellate gli apporti prevedono il reintegro di 160-200 kg ha⁻¹ di N, 80 kg ha⁻¹ di P₂O₅ e 100-120 kg ha⁻¹ di K₂O. Fosforo e potassio vengono interamente distribuiti in presemina mentre per l'azoto si procede con una distribuzione frazionata. Per la produzione di 100 kg di granella (e relativa paglia) sono necessari circa 2,5-3 kg di N, 1,5 kg di P₂O₅ e 2,3 kg di K₂O (Toderi e D'Antuono, 2001).

Azoto. L'azoto, insieme alla disponibilità idrica, è il principale fattore limitante le rese, per cui la quantità di concime azotato distribuito e la tempistica di distribuzione assumono particolare importanza. Un'adeguata disponibilità di N ha effetti positivi in tutte le fasi di sviluppo del frumento: favorisce la formazione di un congruo numero di culmi di accestimento (numero di spighe m⁻²), influenza positivamente la morfogenesi delle spighe (numero di cariossidi a spiga), stimola la crescita in levata aumentando quindi la superficie fogliare fotosintetizzante, favorisce la fecondazione e migliora le proprietà della granella (dimensione delle cariossidi) e il tenore proteico. Al contrario, eccessi di azoto possono favorire fenomeni di allettamento e provocare una maggiore incidenza delle malattie fogliari (Alley *et al.*, 2009). La concimazione azotata viene frazionata per evitare di avere carenze nelle fasi di maggior necessità da parte della coltura. Solitamente gli interventi si eseguono alla semina, fine accestimento-viraggio e inizio levata. Un altro intervento con dosi molto basse che non sempre viene eseguito e non comporta aumenti di resa, ma migliora il contenuto proteico delle cariossidi, è al momento della spigatura.

Fosforo. Il fosforo è richiesto dalla pianta durante tutti gli stadi vegetativi, ma in particolar modo durante la fase di accestimento e durante la levata; infatti in quest'ultimo stadio vegetativo ne viene assorbita la quota più consistente, corrispondente al 70-75% del fabbisogno totale. La carenza di tale elemento si manifesta con minore accrescimento e accestimento delle piante.

Potassio. Il potassio contrasta il fenomeno dell'allettamento e la sua carenza determina un'alterazione del colore delle foglie che tendono ad arrossarsi all'apice e ai margini del lembo e ad essiccarsi nell'apice. La quantità maggiore di potassio viene assorbita durante la fase di levata raggiungendo il massimo assorbimento 30-40 giorni prima della maturazione. Carenze di questo

elemento causano un arrossamento degli apici e dei margini delle foglie fino ad arrivare all'essiccamento dell'apice fogliare.

Altri elementi assorbiti in quantità elevata sono: calcio, magnesio, zolfo. Solitamente sono presenti a sufficienza nel terreno anche se in certi casi bisogna intervenire con concimazione. Altri microelementi utili sono: zinco, rame e manganese che sono assorbiti in quantità molto basse, per cui si trovano nel terreno in quantità sufficienti ai fabbisogni della coltura (Toderi e D'Antuono, 2001).

1.1.8 Avversità

L'elevata densità di semina e il rapido accrescimento del frumento non permettono buone condizioni per lo sviluppo delle malerbe, permettendone un buon controllo. Tuttavia il problema della lotta alle infestanti è notevole anche negli appezzamenti di frumento, in quanto possono comportare cali di resa non indifferenti. Per questo motivo è consigliabile intervenire al superamento delle soglie minime di tolleranza, eseguendo un accurato scouting delle malerbe presenti. Le malerbe infestanti fanno parte sia delle dicotiledoni, che delle graminacee, queste ultime più difficili da controllare (soprattutto le avene selvatiche: ludoviciana, fatua, barbata) e le falaridi, che per essere controllate hanno bisogno di prodotti con azione specifica elevata (Toderi e D'Antuono, 2001).

Le principali malattie fungine sono il mal del piede, l'oidio, le ruggini, le septoriosi, la carie e il carbone. Il mal del piede è provocato da varie specie di funghi che attaccano le radici e/o la parte basale dei culmi principali e secondari. L'oidio attacca le parti epigee della pianta, in particolare gli attacchi all'ultima foglia sono i più dannosi, in quanto incidono negativamente sulla resa del prodotto. L'oidio è favorito da densità di semina elevate e da abbondanti concimazioni azotate. Le ruggini dipendono soprattutto dalle condizioni climatiche e dalla resistenza varietale. I fattori colturali che favoriscono gli attacchi di ruggini sono anche in questo caso, oltre alla scarsa resistenza della varietà di frumento, le abbondanti concimazioni azotate e le elevate densità di piante. La septoriosi attacca le glume, il rachide della spiga ed è favorita dal fenomeno del ringrano e da abbondanti concimazioni azotate. La carie attacca durante la germinazione delle cariossidi ma si manifesta visivamente alla maturazione del prodotto, quando si ha la formazione di pseudo cariossidi rotondeggianti, piene di massa nera costituita dalle clamidospore del fungo che, durante la trebbiatura, contaminano le cariossidi sane. Il carbone attacca il frumento durante la germinazione (Toderi e D'Antuono, 2001).

Per quanto riguarda gli insetti, i più rilevanti sono la *Phytophaga destructor*, le cui larve colpiscono le giovani piantine provocando l'arresto della crescita. Il *Cephus pigmaeus* è un insetto che provoca danni allo stadio larvale penetrando nel culmo e nutrendosi della sua parte interna, mentre lo *Zabrus tenebroides* provoca diradamenti delle giovani piante (Toderi e D'Antuono, 2001).

La lotta contro i parassiti può essere direttamente eseguita con la concia del seme, con trattamenti al terreno contro gli insetti, oppure con trattamenti specifici alla pianta contro specie animali e fungini. Alcune pratiche agronomiche come l'avvicendamento colturale e l'interramento delle stoppie riducono efficacemente gran parte delle avversità precedentemente descritte.

1.1.9 Raccolta e conservazione del prodotto

La maturazione del prodotto e di conseguenza l'epoca di raccolta dipendono dalla temperatura e dall'umidità atmosferica. In Italia, la raccolta inizia a partire dalla terza decade di maggio nelle zone più calde del sud, per poi arrivare a fine giugno o inizio luglio nelle regioni del nord. Solitamente le cariossidi vengono raccolte con un contenuto di umidità del 14%, qualora l'umidità risultasse troppo elevata al momento della raccolta, la granella passa attraverso un processo di essiccamento prima dello stoccaggio nei silos. Per evitare danni ingenti al prodotto, è necessaria inoltre una particolare attenzione agli insetti che possono attaccare la granella durante la conservazione (Toderi e D'Antuono, 2001).

1.1.10 Composizione e qualità della cariosside

Nella cariosside di frumento si distingue una parte ventrale e una dorsale. L'endosperma può essere farinoso, come nel frumento tenero, duro e nello spelta, oppure semi-vitrea, come in alcune varietà di tenero. Nelle cariossidi di grano duro si possono individuare zone farinose biancastre; questo fenomeno è noto come bianconatura e costituisce un difetto qualitativo del prodotto.

Il peso di una cariosside di frumento tenero varia tra 30 e 40 mg.

Il chicco di grano, appare come un seme anche se in realtà è un frutto secco. Esso è costituito principalmente da (Figura 1.5):

- **Germe:** rappresenta il 2,5% del grano e contiene le parti che origineranno la nuova pianta;
- **Crusca:** costituisce il 14% del chicco ed è ricca in sali minerali e fibre;

- **Endosperma:** costituisce la restante parte (83,5%) del chicco.

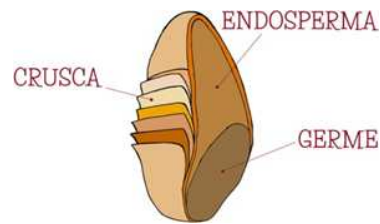


Figura 1.5. Principali componenti del chicco di grano.

Il germe è ricchissimo di grassi e vitamine. La crusca è costituita prevalentemente da cellulosa, ma anche da vitamine e sali minerali. I suoi strati più profondi (tegumento interno e strato aleuronico) sono la parte più ricca, in percentuale, di proteine. L'endosperma, invece, che è composto da amido e contiene il glutine, rappresenta la parte farinosa del chicco di grano. Esso inoltre contiene principalmente carboidrati, poche proteine e in minima parte vitamine e sali minerali. Dal punto di vista dell'apporto calorico è la parte più importante del chicco. Il peso specifico in media è attorno a 80 kg hL^{-1} , un buon tenore proteico si aggira attorno al 12-15% (Toderi e D'Antuono, 2001).

1.2 La nutrizione azotata in frumento

1.2.1 L'utilizzo dei concimi in Italia

In Italia, negli ultimi 10-15 anni è stata registrata una progressiva riduzione o stabilizzazione dell'utilizzo per uso agricolo di concimi minerali rispetto ai decenni precedenti (Figura 1.6).

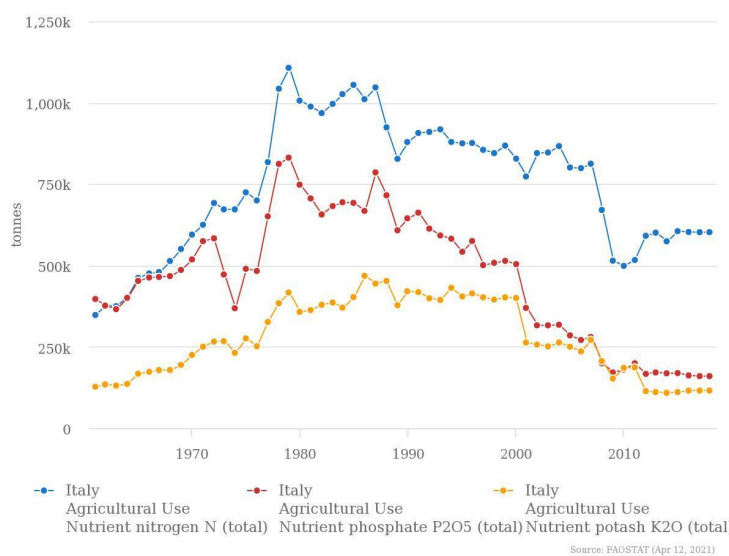


Figura 1.6. Consumo annuale di N, P₂O₅ e K₂O (in migliaia di tonnellate) in Italia per uso agricolo dal 1961 al 2018 (dati FAO, 2021).

La diminuzione dei consumi dei fertilizzanti è dovuta non ad un drastico taglio da parte degli agricoltori (che comunque si devono confrontare con un mercato sempre più difficile caratterizzato da prezzi variabili) ma soprattutto dalla razionalizzazione del loro impiego. In particolare, l'utilizzo di tecnologie di precisione (realizzazione di mappe geo-referenziate in base alla fertilità dei terreni ottenute con droni e satelliti) e l'uso di prodotti con maggiore efficienza (ad esempio concimi a rilascio lento o controllato) consentono un impiego mirato dei fertilizzanti, minimizzando gli sprechi e migliorando la sostenibilità ambientale.

1.2.2 L'azoto e l'importanza per il frumento

Tra i macronutrienti, l'azoto è quello principale e quello più importante per la vita della pianta, in quanto esplica un'azione positiva per lo svolgimento di numerose funzioni biologiche.

L'azoto nella pianta costituisce l'1-3% della sostanza secca nei tessuti maturi, mentre nei tessuti giovani si può arrivare anche al 6%, anche se i valori possono variare di molto a seconda delle diverse famiglie botaniche e dei diversi organi. Nel frumento tenero, l'azoto costituisce il 2,4 % della sostanza secca nelle foglie giovani, lo 0,9 % nelle foglie mature e lo 0,4 % nel culmo (Toderi e D'Antuono, 2001).

L'azoto è un nutriente che va fisicamente a comporre la struttura della pianta (componente fondamentale nella clorofilla, acidi nucleici e proteine) e occupa il primo posto tra gli elementi essenziali, data l'elevata quantità di cui le piante ne hanno bisogno per la crescita. L'apporto di concimi azotati dal terreno è fondamentale per le produzioni agricole ed è correlato a un aumento dello sviluppo vegetativo, anche se dosaggi eccessivi comportano effetti negativi sulla coltura e sull'ambiente (Toderi e D'Antuono, 2001).

Dopo essere stato assorbito, l'azoto in parte resta nelle radici e in parte viene traslocato verso la parte aerea. Il suo assorbimento avviene durante l'intera vita della pianta, anche se i fabbisogni non sono costanti. Nei cereali, ad esempio, il picco di assorbimento si ha nel momento della levata, ossia il periodo di massimo accrescimento.

Nel frumento, la distribuzione dell'azoto è effettuata in 3-4 interventi in determinate fasi fenologiche. Gli interventi frazionati consentono di rispondere meglio ai fabbisogni della pianta, riducendo eventuali situazioni sia di carenza che di spreco di concime. Il frazionamento degli interventi, inoltre, riduce il rischio di allettamento della coltura, con conseguente diminuzione della perdita di prodotto finale e della difficoltà di raccolta.

La distribuzione dell'azoto è frazionata in più apporti in base agli effetti che la disponibilità di nutriente esercita nelle diverse fasi di sviluppo (Figura 1.7).

- **Concimazione autunnale (pre-semina)**

Il primo intervento si effettua alla semina o ad inizio accostamento con dosi basse (35-40 kg N ha⁻¹). Questa prima concimazione non è essenziale, ma è consigliata in caso di difficoltà durante la fase di accostamento. Solitamente questo si può verificare quando il frumento succede ad una coltura fortemente depauperante (come il sorgo) e che lascia il terreno povero di sostanze nutritive.

Tuttavia, dato che fino alla 2-3^a foglia i fabbisogni sono molto bassi, si può decidere di non intervenire.

- **Concimazione di fine inverno (fine accestimento)**

Il secondo intervento è effettuato in pieno accestimento con un dosaggio di 40-60 kg N ha⁻¹. In questa fase fenologica è importante garantire una buona disponibilità azotata per favorire la ripresa vegetativa, mentre la spighetta inizia a differenziarsi all'interno della pianta. Al fine di evitare futuri fenomeni di allettamento, soprattutto in caso di semine fitte, con questo intervento si distribuisce indicativamente il 30% del fabbisogno totale di azoto.

- **Concimazione primaverile (inizio levata)**

Il terzo apporto fondamentale si applica in fase di levata, distribuendo una quantità di circa 60-90 kg N ha⁻¹, indicativamente il 40-50% del fabbisogno totale. In questa fase la pianta necessita di molto nutriente per l'elevato tasso di accrescimento, perciò questo intervento influenza direttamente il numero finale di semi per spiga e le loro dimensioni. In questa fase fenologica i rischi di lisciviazione di azoto nel suolo diminuiscono dato l'elevato sviluppo dell'apparato radicale.

- **Concimazione in spigatura**

Il quarto intervento è effettuato in fase di botticella, distribuendo un dosaggio di azoto pari a 35-45 kg N ha⁻¹, da dimezzare in caso di applicazione fogliare. Questo intervento non sempre viene effettuato, in quanto risulta essere un intervento importante soprattutto per i grani duri e i grani teneri di forza, poiché l'assorbimento di azoto in questa fase è fondamentale per migliorare i parametri qualitativi della granella. L'azoto somministrato in questa fase è traslocato e successivamente accumulato nella granella sotto forma di proteine. Quest'ultimo intervento spesso è fatto con concime fogliare per migliorarne l'assorbimento, soprattutto in periodi siccitosi (Alley *et al.*, 2009).

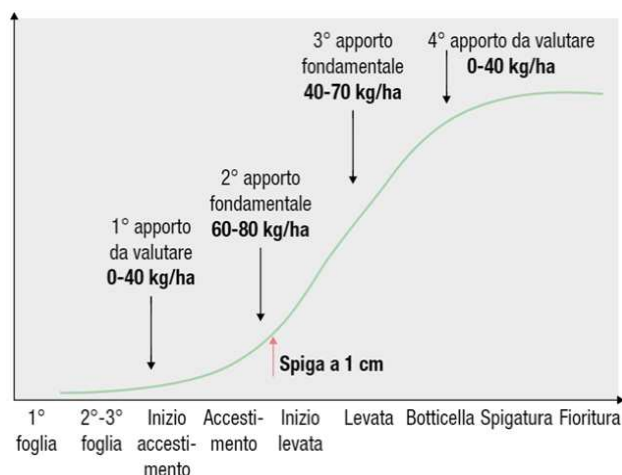


Figura 1.7. Curva di assorbimento dell'azoto nei vari stadi fenologici in frumento tenero e indicazione delle epoche di concimazione.

1.2.3 Aspetti ambientali relativi all'impiego di concimi azotati

A partire dalla seconda metà del XX secolo il settore agricolo subì un grosso cambiamento chiamato “rivoluzione verde”. È stata definita “rivoluzione” perché vi fu un vero e proprio stravolgimento dell'intero settore agricolo, e la conseguenza più evidente fu l'aumento esponenziale della produttività delle colture.

L'incremento delle rese è stato fondamentale per assecondare la crescente domanda di materie prime per soddisfare le richieste dell'aumento demografico mondiale. Alla base dell'incremento produttivo vi è stato uno sviluppo della meccanizzazione agricola, che ha permesso di alleviare sempre di più le fatiche fisiche degli agricoltori. La scienza poi ha avuto un ruolo altrettanto importante. Il miglioramento genetico, in particolare, ha consentito di selezionare e incrociare varietà sempre più produttive e varietà che andassero incontro alle esigenze degli agricoltori. Infine, l'industria chimica ha studiato e sviluppato vari concimi chimici e prodotti per la difesa delle colture contro infestanti e parassiti. Tutti questi miglioramenti hanno permesso ai campi agricoli di diventare ambienti perfetti per la crescita delle colture e in condizioni di esprimere al massimo il loro potenziale produttivo.

Per sostenere la crescita delle colture, i concimi e i prodotti per la difesa sono stati usati in quantità elevate, molto spesso eccedendo nelle dosi. Questo utilizzo, molto spesso poco controllato, ha tuttavia determinato successivamente numerose criticità. I principali problemi hanno riguardato gli ecosistemi naturali, come l'inquinamento delle falde acquifere profonde e delle acque superficiali

(fiumi, canali, ecc.) tramite dilavamento e lisciviazione dei concimi dai terreni e la volatilizzazione e il trasporto tramite correnti d'aria dei prodotti fitosanitari.

Oltre a danneggiare l'ambiente, l'elevato uso dei prodotti chimici (concimi, erbicidi, fungicidi) ha determinato numerosi problemi per la salute umana, con danni diretti agli operatori coinvolti in prima persona e danni indiretti per la popolazione (Pimentel, 1996).

Numerose sono state le problematiche, a distanza di molti anni, verso le stesse colture. In particolare, l'elevato uso degli stessi principi attivi per più annate nello stesso terreno ha determinato la comparsa di fenomeni di resistenza, sia per le infestanti sia per i parassiti, che venivano controllate con maggior difficoltà. Inoltre, le eccessive concimazioni hanno aumentato la salinità e il depauperamento della sostanza organica causando l'impoverimento dei suoli.

Dagli anni '90 si iniziò a capire però che questo modello di sviluppo agricolo non era più sostenibile e le esigenze in campo agricolo iniziarono a mutare. I prezzi delle materie prime iniziavano a calare e i costi ad aumentare, favorendo il cambio di visione degli agricoltori e di tutto il settore: bisognava iniziare a produrre di più consumando e inquinando di meno. Per questo motivo, il progresso e la ricerca scientifica si stanno sempre più focalizzando su pratiche e prodotti che possano permettere di incrementare la sostenibilità ambientale, attraverso un miglioramento dei diversi input agricoli. Il continuo studio sulla genetica varietale mira a selezionare piante e cultivar che riescano a sfruttare al meglio i nutrienti distribuiti con le concimazioni e in grado di resistere ai vari stress biotici e abiotici. L'industria chimica, inoltre, sta valutando concimi di nuova generazione, che siano in grado di coprire il fabbisogno delle colture senza disperdersi nell'ambiente.

L'azoto distribuito attraverso la concimazione o naturalmente presente nel suolo può subire trasformazioni continue ed essere disponibile sotto forma di varie forme chimiche, facendo parte di un sistema definito "ciclo dell'azoto". Si tratta di un ciclo complesso che coinvolge differenti ecosistemi, in questo caso ci si limiterà all'ecosistema del suolo o all'agroecosistema (Figura 1.8).

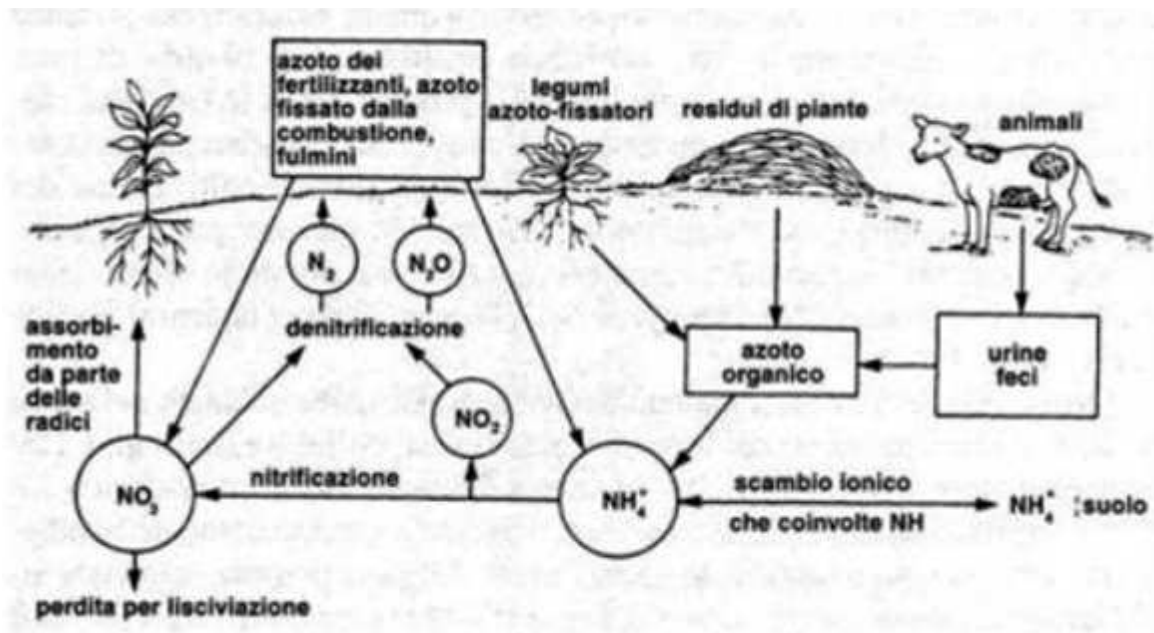


Figura 1.8. Versione semplificata del ciclo dell'azoto.

Il ciclo inizia con i processi che aumentano il contenuto di azoto nel terreno: fissazione atmosferica, fissazione biologica (operata dai microorganismi del terreno che possono essere simbiotici e non-simbiotici) e concimazione. Gli organismi simbiotici (*Rhizobium* spp., *Bradyrhizobium* spp., *Mesorhizobium* spp., ecc.) dipendono direttamente dalle piante con le quali creano associazioni simbiotiche, grazie alla presenza dell'enzima nitrogenasi, e rendendo disponibile l'azoto. Al contrario, gli organismi non-simbiotici (ad es., *Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp., *Azoarcus* spp., *Pseudomonas* spp., ecc.) vivono liberi nel terreno, non dipendendo direttamente dai vegetali per l'apporto energetico o ricavando l'energia direttamente dalla radiazione solare. In agricoltura, i più importanti batteri appartengono al genere *Rhizobium*, e sono in grado di fissare quantità importanti di azoto (fino a 200 di kg N ha⁻¹ annui), la cui quasi totalità è ceduta alla pianta che a sua volta cede sostanze carboniose (Smith e Smith, 2009).

Successivamente, il ciclo prosegue con la mineralizzazione, processo nel quale l'azoto contenuto nella sostanza organica del terreno viene convertito in azoto organico. Questo processo, mediato da batteri, avviene in due fasi: ammonificazione (da azoto organico ad ammonico) e nitrificazione (da ammonio a nitrato). Nel suolo l'azoto si trova quasi totalmente in forma stabile ossia nella forma organica, rappresentata da humus, sostanze in via di decomposizione, masse batteriche, residui colturali. La restante parte (3-5%) costituisce la frazione minerale che risulta essere meno stabile ed è la parte che viene assorbita dalle piante, composta prevalentemente dallo ione nitrato (NO₃⁻) e ione ammonio (NH₄⁺) (Smith e Smith, 2009).

Vi sono poi i processi di impoverimento, ossia tutti i processi che portano a una diminuzione del contenuto di azoto nel terreno, principalmente attraverso l'asportazione della biomassa prodotta dalla coltura che viene raccolta, e i fenomeni di denitrificazione, lisciviazione e volatilizzazione. La denitrificazione è la progressiva riduzione dei nitrati e/o nitriti che vengono trasformati in composti gassosi, effettuata da un gruppo di batteri detti denitrificanti. La volatilizzazione è il processo attraverso il quale l'ammonio presente nel terreno passa nell'atmosfera sotto forma di ammoniaca (NH_3). La lisciviazione, invece, è la perdita di azoto, sotto forma di NO_3^- , ad opera dell'acqua di ruscellamento e di percolazione, sia essa derivata da irrigazione che da precipitazioni atmosferiche. Il fenomeno della lisciviazione è molto importante nell'agroecosistema poiché è uno delle principali cause di perdita di nitrati nel suolo e di inquinamento delle falde sotterranee. Inoltre, la lisciviazione determina una diminuzione del quantitativo di concime effettivamente disponibile per la pianta rispetto alla quantità somministrata. Questa riduzione si traduce in una perdita economica per l'agricoltore e in una minore efficienza della concimazione azotata. Il fenomeno della lisciviazione dei nitrati causa anche l'inquinamento dei corsi d'acqua superficiali, causando eutrofizzazione e inquinamento delle falde acquifere, utilizzate per il prelievo di acqua potabile (Aschonitis *et al.*, 2012). Questo aspetto non è secondario, in quanto nel corpo umano un quantitativo troppo elevato di nitrati può causare gravi danni sanitari e di salute. Il problema dei nitrati è diventato importante negli ultimi anni, tanto da aver richiesto numerosi studi scientifici per la fissazione di un limite massimo della loro presenza nelle acque potabili, che deve essere inferiore a 50 mg L^{-1} (D. Lgs. 31 del 02/02/2001). Anche la comunità europea è intervenuta con la “*direttiva nitrati*” (direttiva comunitaria 91/676/CEE), per la tutela delle acque dell'Europa prevenendo l'inquinamento di nitrati derivati da fonti agricole e favorendo l'utilizzo di corrette pratiche agricole al fine di migliorare la sostenibilità agricola. A livello regionale la direttiva è applicata attraverso il piano di smaltimento degli effluenti agricoli, stabilendo la suddivisione in specifiche zone in base a diversi parametri, e definendo per ciascuna zona un limite massimo di quantitativo di azoto annualmente apportabile.

Il fenomeno della lisciviazione e della perdita di nitrati rappresenta un'inefficienza delle varie tecniche di coltivazione durante il ciclo di una coltura e per limitare questo problema nel corso degli anni sono state valutate e adottate differenti strategie (Di e Cameron, 2002). Una pratica che si sta diffondendo molto in Italia è l'utilizzo delle colture di copertura (coprono il terreno nella stagione autunnale e invernale, assorbendo l'azoto che verrebbe perso a causa delle precipitazioni). Altre pratiche riguardano la limitazione della quantità (e il frazionamento) di azoto distribuito ad ogni intervento, l'utilizzo di concimi con inibitori della nitrificazione o a lento rilascio, la creazione di

fasce tampone, l'applicazione dell'agricoltura di precisione per una distribuzione ottimale del concime e l'applicazione di fertilizzanti liquidi tramite irrorazione fogliare.

1.2.4 La concimazione fogliare

La concimazione fogliare è una tecnica agronomica che ben si adatta alle colture cerealicole ed in particolare al frumento. Questa tecnica è spesso utilizzata e si dimostra essere più efficiente rispetto all'applicazione con i concimi granulari. I principali vantaggi sono (Fageria *et al.*, 2009):

- Maggiore velocità di assorbimento del nutriente;
- Correzione di eventuali carenze osservate nella coltura in tempi più brevi rispetto alla distribuzione al suolo;
- Superamento di diverse e particolari condizioni del suolo che limitano la disponibilità o l'assorbimento dei nutrienti (condizioni di stress idrico o suoli salini);
- Riduce il tasso di perdita di nutrienti nel terreno;
- Migliore efficienza per la distribuzione di elementi immobili nel terreno;
- Permette di effettuare trattamenti diversi insieme (es. fungicidi e concimi).

Dal punto di vista ambientale, è stato dimostrato come la distribuzione di concime azotato (es. urea) per via fogliare al frumento tenero consenta di ridurre le perdite per denitrificazione e lisciviazione, permettendo inoltre di soddisfare i bisogni della pianta, soprattutto se l'apparato radicale è in sofferenza, ad esempio a causa della siccità (Gooding e Davis, 1992). La concimazione fogliare è solitamente eseguita in fase di spigatura al fine di garantire un significativo miglioramento del contenuto proteico nella granella finale (Visioli *et al.*, 2018).

Gli svantaggi che devono essere considerati sono (Fageria *et al.*, 2009):

- Minore efficacia nel lungo periodo rispetto alla distribuzione al terreno;
- La soluzione fogliare deve avere una salinità minore di quella che le foglie possono tollerare per evitare bruciature fogliari;
- Difficilmente applicabile in giornate ventose e, in caso di pioggia, c'è il rischio che il prodotto sia dilavato prima dell'assorbimento.

La concimazione fogliare è considerata una delle possibili strategie per il miglioramento dell'efficienza d'uso dell'azoto (NUE, *Nitrogen Use Efficiency*) (Muchow, 1998).

Rispetto alla concimazione granulare al suolo, l'applicazione diretta del fertilizzante sulla vegetazione permette di ridurre significativamente la dose impiegata e l'utilizzo di una maggiore quantità da parte della coltura, rendendo questa pratica più efficace (Visioli *et al.*, 2018).

1.2.5 L'assorbimento dei nutrienti per via fogliare

I concimi fogliari sono distribuiti per irrorazione della parte epigea con bassi volumi d'acqua, di conseguenza l'assorbimento del nutriente avviene con meccanismi diversi da quanto accade a livello radicale, per tale motivo ci sono diversi fattori da considerare al momento dell'applicazione.

Rispetto al rizoderma, l'epidermide fogliare è ricoperta dalla cuticola, uno strato lipidico impermeabile che si trova all'esterno della parete cellulare delle cellule epidermiche. Nel dettaglio, è costituita da una matrice di biopolimeri di cutina al di sopra o all'interno dei quali si depositano particolari cere, oltre ad una quantità variabile di polisaccaridi e fenoli.

La composizione specifica dello strato di cutina è variabile a seconda delle condizioni ambientali di crescita. La cuticola, pur essendo idrofobica, è permeabile agli ioni e alle molecole indissociate; il superamento della cuticola, infatti, è necessario sia per i nutrienti che entrano nel simplasto mediante sistemi di trasporto attivo, sia per quelli che si spostano attraverso l'apoplasto. L'apoplasto è lo spazio intercellulare delimitato dalle membrane cellulari, in esso si trova quindi un elevato numero di gruppi funzionali dei polisaccaridi costituenti le pareti cellulari per cui si possono instaurare legami covalenti polari e legami idrogeno con i soluti disciolti nell'acqua citoplasmatica. La presenza di cariche negative spiega come mai i nutrienti in forma cationica siano maggiormente trattenuti nell'apoplasto fogliare. Gli elementi assorbiti per via fogliare possono avere mobilità diverse, in particolare si distinguono elementi con mobilità elevata (N, P, K, S, Cl, Ni), media (Fe, Zn, Cu, B, Mo) e molto bassa (Ca e Mn) (Bergström e Brink, 1986).

Un altro importante aspetto determinante per l'efficacia di questa pratica riguarda la maturità della foglia. Le foglie non mature non sono in grado di asportare nutrienti in quanto fungono da sink, mentre le foglie completamente sviluppate non riescono a importare i nutrienti (Readman *et al.*, 2002). L'efficacia dell'applicazione dei nutrienti per via fogliare dipende anche dalle proprietà chimico-fisiche (solubilità, pH, tensione superficiale, capacità di diffusione, carica elettrica, ecc.) del prodotto, dalle condizioni ambientali e dalle caratteristiche delle piante trattate. Temperatura, umidità relativa e luce al momento della concimazione sono le condizioni ambientali che possono influenzare sia le caratteristiche del concime liquido, sia la risposta della pianta. Infine, le principali caratteristiche della pianta che possono influire sull'efficacia del trattamento sono: la struttura della

cuticola e della parete cellulare, la presenza di tricomi, lo stadio fenologico e la presenza di stress abiotici o biotici (Fernandez e Brown, 2013).

1.3 L'apparato radicale

1.3.1 Caratteristiche morfologiche e funzioni

L'apparato radicale del frumento ha la struttura tipica di tutte le graminacee monocotiledoni, con struttura fascicolata disposta a raggiera attorno al fusto. Alla nascita, la pianta emette la radice principale e le radichette secondarie che vanno a costituire le radici seminali. Esse sono destinate a disseccarsi e lasciare spazio alle radici avventizie emesse successivamente a partire dalla base del culmo principale e dai culmi secondari (Toderi e D'Antuono, 2001).



Figura 1.9. Apparato radicale in giovani piante di frumento.

Le radici possono raggiungere una lunghezza di 50-60 cm, in alcuni casi possono raggiungere profondità superiori (fino a 2 m). Le principali caratteristiche radicali, come lunghezza, diametro e numerosità sono influenzate dal genotipo e da fattori ambientali. Le principali funzioni delle radici riguardano l'ancoraggio della pianta al suolo e l'assorbimento di acqua e nutrienti dal suolo.

L'acqua entra nella radice per via osmotica, è richiamata alle radici grazie alla differenza di potenziale che all'interno della radice è normalmente maggiore. Successivamente, l'acqua attraversa gli spazi intracellulari attraverso le membrane fino ai vasi xilematici, questo processo avviene lentamente e non riesce a far fronte alle esigenze idriche della pianta. Una via più veloce di assorbimento di acqua è per imbibizione, ossia attraverso le pareti cellulari e gli spazi intercellulari saturi di acqua (Toderi e D'Antuono, 2001).

Gli elementi nutritivi entrano nelle radici con diverse modalità suddivise in trasporto attivo e passivo. Nel trasporto attivo la pianta consuma energia per far entrare in nutrienti contro gradiente chimico; nel caso del trasporto passivo invece i nutrienti entrano senza che la pianta debba consumare energia (Toderi e D'Antuono, 2001).

1.3.2 Metodi di studio dell'apparato radicale

Per studiare la morfologia dell'apparato radicale in risposta a determinati stimoli e/o condizioni ambientali e di terreno differenti ci sono due distinti gruppi di metodi: distruttivi e non distruttivi (conservativi). Essi consentono di rilevare parametri fondamentali come superficie, diametro, lunghezza e numerosità. Il parametro più utilizzato per descrivere l'accrescimento radicale è la lunghezza delle radici per unità di volume, che descrive anche la capacità di assorbimento di acqua e nutrienti. La superficie esprime l'estensione delle strutture ipogee di una pianta ed è riferita come indice di area radicale in un determinato volume di terreno. L'area della radice influenza la cinetica di assorbimento dell'acqua, mentre il diametro, l'influsso netto di ioni (Marangoni e Toselli, 2000).

- **Metodi non distruttivi (o conservativi)**

Sono definiti tali in quanto con il loro utilizzo non si disturba lo sviluppo dell'apparato radicale. Sono tutti accomunati dalla presenza, nella loro struttura, di materiale trasparente che permette di osservare le radici che si sviluppano. I più utilizzati sono:

- metodo della finestra;
- rizotroni;
- minirizotroni.

Il metodo della finestra consiste nell'installazione di pareti trasparenti in materiale plastico o vetro nel suolo, permettendo di effettuare osservazioni continuamente, senza arrecare gravi disturbi alle radici. Di contro, però, le radici possono essere deviate dalle pareti e perciò le misure sono eseguite non immediatamente dopo l'installazione, ma dopo un periodo di assestamento del terreno. Il sistema più utilizzato per raccogliere dati consiste nel riportare su fogli di acetato trasparente il percorso delle radici, anche se il risultato può però essere una distorsione della realtà per il motivo citato prima (modificazione della traiettoria operata dalle pareti). L'installazione delle finestre può avvenire in diversi modi ed inclinazioni. Le loro dimensioni ed il loro posizionamento possono essere molto variabili, in funzione della specie studiata e della durata dell'esperimento.

Normalmente le finestre sono installate su lisimetri rialzati e poi ricoperte da una parete rimovibile in modo da poter efficacemente valutare la crescita delle radici. Questo metodo, inoltre, risulta interessante nella stima del grado di ramificazione dell'apparato radicale (Fernandez e Caldwell, 1975).

I rizotroni, invece, sono strutture complesse, veri e propri laboratori sotterranei, costituite da pareti trasparenti poste in posizione verticale, a ridosso del profilo del terreno, alle quali si accede per mezzo di un corridoio centrale percorribile a piedi. Le finestre sono affacciate al corridoio per permettere l'osservazione del suolo e delle radici. Sono considerati strumenti molto efficaci nel fornire dati descrittivi e quantitativi delle variazioni nel tempo di uno stesso sistema radicale. Il loro uso è però limitato dal costo elevato e dalla necessità di prestare una continua e dispendiosa manutenzione (Govi *et al.*, 2000).

I minirizotroni sono dei tubi di vario diametro e lunghezza realizzati in materiale trasparente, che sono inseriti nel terreno. Attraverso l'introduzione periodica al loro interno di adeguati apparati ottici è possibile l'osservazione delle radici presenti sulla superficie del cilindro con il terreno circostante (Figura 1.10) (Govi *et al.*, 2000).

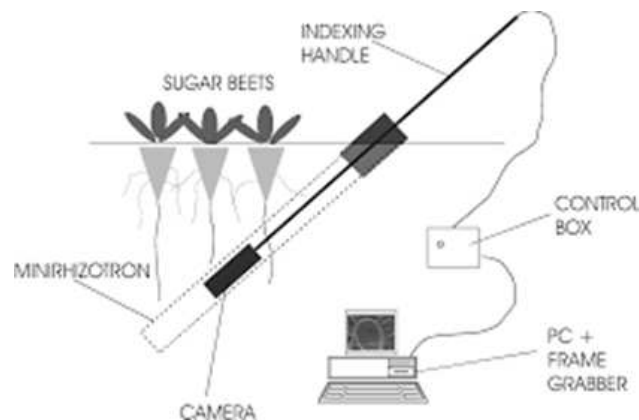


Figura 1.10. Sistema di osservazione radicale tramite minirizotroni.

● **Metodi distruttivi**

I metodi distruttivi sono così chiamati perché il loro impiego comporta la distruzione parziale o, come avviene per le colture erbacee, dell'intero apparato radicale. I principali sono:

- monolito;
- pinboard;
- profilo di trincea;
- core-break;
- carotaggio.

Le tecniche del monolito e del pinboard sono adatte a descrivere lo sviluppo tridimensionale dell'apparato radicale, mentre il profilo di trincea solo in bi-dimensione. Queste tre metodologie richiedono tempi di lavoro abbastanza lunghi con costi elevati, di conseguenza la loro applicazione è limitata agli studi con un numero basso di tesi. Nel dettaglio, con il monolito è prelevato il volume di terreno interessato dall'apparato radicale, le radici sono pulite dal terreno tramite getti di acqua. Un aspetto negativo di questa tecnica è rappresentato dalla possibile perdita di radici (fino al 30%) (Rubino, 2000). Il pinboard consente, invece, di prelevare l'intero apparato radicale mediante lo scavo di una trincea, estraendo il monolito con la conseguente separazione dal terreno. Il profilo di trincea viene utilizzato prevalentemente per le colture arboree, e si compone di uno scavo di una trincea perpendicolare alle file di impianto e di dimensioni adatte allo sviluppo della pianta (Figura 1.11 A). La mappatura è effettuata con l'aiuto di un reticolo a maglie quadrate che permette di facilitare il conteggio e la mappatura delle radici, anche se questo metodo causa una sottostima dovuta dalla difficoltà di conteggio delle radici più piccole (Figura 1.11 B). Il core-break consiste, invece, nel prelevare una carota di terreno della stessa profondità dell'apparato radicale. Essa è poi suddivisa in pezzi di 10 cm, ogni segmento è sbriciolato per separare le radici dalla terra per poi effettuare il conteggio. Questo approccio risulta essere semplice e veloce, e per questo è preferito nei casi dove il numero di tesi da confrontare sia elevato (Rubino, 2000). I dati ottenuti però possono essere utilizzati solo per fini comparativi.

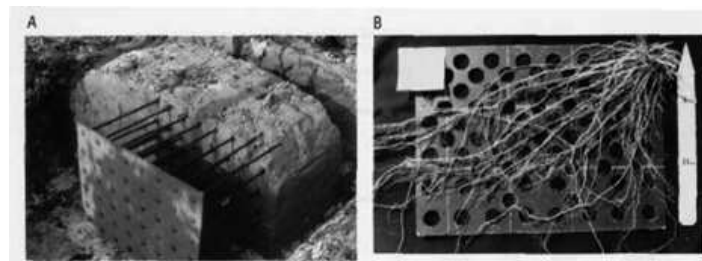


Figura 1.11. Metodo del pinboard. Applicazione della tavola chiodata al profilo di terreno (A) ed apparato radicale ottenuto (B) dopo il lavaggio.

Il metodo del carotaggio consiste nel prelevare dei campioni di terreno (carote) utilizzando sonde manuali o meccaniche. Le carote di terreno solitamente hanno lunghezza di 1-1,5 m e diametro di 5-10 cm. In condizioni di terreni ricchi di scheletro, molto argillosi o sabbiosi si possono avere difficoltà nell'ottenere la carota integra. Dopo l'estrazione, i campioni sono suddivisi in sub-campioni di lunghezza di 10 cm, per poi essere conservati in sacchetti riposti in congelatore fino al momento del lavaggio. Per separare le radici dal terreno, i sub-campioni devono essere immersi prima in una soluzione di acqua e acido ossalico per facilitare la separazione degli

aggregati strutturali. Il lavaggio può essere manuale utilizzando setacci o, facilitato utilizzando la “flottazione”. Questa tipologia di lavaggio sfrutta l’energia cinetica dell’acqua che, fatta circolare in un setaccio particolare porta via le particelle di terreno, lasciando le radici raccolte. Dopo il lavaggio, le radici devono essere pulite per separarle da quelle morte e dai residui organici, venendo poi conservate in una soluzione al 15-25% di alcool in frigorifero (Foti e Tuttobene, 2000). La lunghezza radicale è il parametro di misurazione più utilizzato, questo perché è in relazione con la capacità di assorbimento di acqua ed elementi nutritivi. La lunghezza è messa in relazione all’unità di volume di terreno (RLD - *Root Length Density*), e l’unità di misura si esprime in cm di lunghezza di radici per cm³ di suolo esplorato. Ulteriori parametri analizzati sono la superficie radicale (RAD - *Root Area Density*) che è espressa in cm² di area radicale per cm³ di suolo esplorato. Infine, il diametro radicale è misurato normalmente in μm .

1.3.2 Analisi d’immagine

L’analisi delle immagini è la fase successiva a quelle precedentemente descritte e viene solitamente applicata ai metodi del carotaggio e del monolito o altri. Questo metodo permette di acquisire le immagini dell’apparato radicale in maniera più veloce ed accurata rispetto ai rilievi manuali. Per il rilievo delle immagini si utilizzano degli scanner o telecamere, facendo particolare attenzione alla risoluzione. Da vari studi (Vameralli, 2000), è emerso che una risoluzione radiometrica (numero massimo di livelli di grigio) di 256 (immagini a 8 bit) è sufficiente per l’elaborazione delle immagini. La risoluzione spaziale (massimo numero di pixels per unità di superficie) determina la massima dimensione dell’immagine acquisita e deve essere tale da rilevare anche le radici più sottili, e può essere differente per ogni immagine. Per acquisire le immagini si procede mettendo un sottile strato d’acqua in un vassoio sul quale si vanno a distendere le radici prima di procedere con la scannerizzazione. Per aumentare il contrasto con la superficie si possono aggiungere delle sostanze coloranti. L’immagine può essere salvata in vari formati, solitamente si preferisce il formato TIFF (*Tagged Image File Format*), perché permette di gestire meglio i dati dell’immagine senza comprimerne le dimensioni (Vameralli, 2000).

Le immagini ottenute vengono poi analizzate tramite specifici software, al fine di determinare i principali parametri radicali.

2. Scopo del lavoro

L'agricoltura nel corso degli ultimi decenni ha contribuito all'aumento dell'inquinamento delle acque a causa di fertilizzanti chimici e di prodotti fitosanitari, spesso utilizzati in quantità elevate e senza tener conto dei rischi per la salute umana e ambientale. Per questo motivo, l'Unione Europea è intervenuta con l'emanazione di nuove direttive per la tutela ambientale, come la “*direttiva nitrati*” (Direttiva Comunitaria 91/676/CEE) e, successivamente, con la “*direttiva quadro sulle acque*” (2000/60/EC) al fine di cercare di limitare il problema della lisciviazione dei nitrati da fonti agricole (principalmente concimi ed effluenti zootecnici) e, di conseguenza, l'inquinamento delle acque sotterranee e di superficie. La norma italiana di recepimento della Direttiva Nitrati è il Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n. 152, articolo 92 e le Regioni italiane sono le Amministrazioni responsabili dell'attuazione degli obblighi della Direttiva Nitrati.

In un'ottica di miglioramento della sostenibilità ambientale, la ricerca in agricoltura si sta focalizzando sempre più sullo sviluppo e lo studio di pratiche agricole che permettano un incremento della produttività e della qualità delle colture, limitando gli input chimici e riducendo di conseguenza l'impatto ambientale.

Per questo motivo, è stata condotta una sperimentazione in lisimetro al fine di valutare e quantificare la lisciviazione dei nitrati oltre a vari parametri vegetazionali e dell'apparato radicale, ottenuti confrontando la concimazione azotata convenzionale (fertilizzante granulare applicato al terreno) e la concimazione azotata esclusivamente per via fogliare in frumento tenero, coltivato in due diversi tipi di terreni (medio-impasto e torboso).

3. Materiali e Metodi

3.1 Descrizione della prova

La prova si è svolta utilizzando dei lisimetri presenti presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo", sita in comune di Legnaro (PD) durante la stagione colturale 2019-2020.

I lisimetri sono vasche riempite di terreno posizionate all'aperto, aventi forma di parallelepipedo con dimensioni pari a $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ di profondità. Ciascuna struttura è composta da pareti in vetroresina ed è completamente interrata nel suolo. Ogni lisimetro, inoltre, possiede un serbatoio sul fondo per la raccolta dell'acqua di percolazione, recuperabile tramite l'ausilio di una pompa.

Pur delimitando un volume di terreno ben definito, ciascun lisimetro permette di riprodurre le reali condizioni di campo (Figura 3.1).



Figura 3.1. Vista dei 4 lisimetri utilizzati nella prova sperimentali. Si noti i due diversi tipi di terreno: torboso (più scuro) e medio-impasto (più chiaro).

La prova sperimentale ha messo a confronto quattro diverse tesi (trattamenti): 2 diversi tipi di concimazione azotata (convenzionale e fogliare) \times 2 diversi tipi di suolo (medio-impasto e torboso). In particolare, sono state confrontate una tesi che prevedeva un piano di gestione convenzionale della concimazione azotata (G-C) (distribuzione di azoto granulare al suolo in copertura nelle fasi di accestimento e levata, seguita da un'applicazione di azoto per via fogliare allo stadio di spigatura), e una tesi che prevedeva la distribuzione di un dosaggio di 16 kg N ha^{-1} ripetuta 4 volte esclusivamente per via fogliare (F-96). Prima della semina, in tutte le tesi è stata applicata una quantità di 32 kg ha^{-1} di N, 96 kg ha^{-1} di P_2O_5 e 96 kg ha^{-1} di K_2O (concime N-P-K al dosaggio di 400 kg ha^{-1}), incorporando il concime nel terreno tramite erpicatura manuale.

Le dosi, le modalità e l'epoca di distribuzione delle concimazioni azotate svolte durante l'intero ciclo colturale nelle due diverse tesi sperimentali sono riportate in dettaglio nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1. Dettaglio delle dosi di N (kg ha⁻¹) e delle loro epoche e date di applicazione nelle 2 diverse tesi a confronto (G-C; F-96).

Anno	Data applicazione	Stadio fenologico	Trattamento	
			G-C	F-96
2019-2020	18 Nov 2019	Pre-semina	32 (s)	32 (s)
	24 Feb 2020	Accestimento (ZDS 26)	58 (s)	16 (f)
	28 Mar 2020	Levata (ZDS 37)	58 (s)	16 (f)
	27 Apr 2020	Botticella (ZDS 40)	-	16 (f)
	5 Mag 2020	Fioritura (ZDS 62)	12 (f)	16 (f)
Dose totale di azoto			160	96
N risparmiato (%) vs. trattamento G-C			Rif.	-40%

s = concimazione granulare al suolo; f = concimazione fogliare.

Le altre due tesi riguardavano il tipo di suolo contenuto in ciascun lisimetro: medio-impasto (M-IMP) e torboso (TOR). Il primo suolo è stato raccolto dai campi circostanti presenti nell'azienda agraria che, appartenendo alla pianura padana, ha origine alluvionale e una discreta fertilità (C/N 9,72). Il terreno torboso, invece, è caratterizzato da un'abbondante presenza di sostanza organica e un ottimo rapporto C/N, presentando inoltre una maggiore percentuale di azoto e una più alta capacità di scambio cationico (C.S.C.) rispetto al terreno di medio-impasto. Le caratteristiche chimico-fisiche di entrambi i suoli presenti nei lisimetri sono descritte in Tabella 3.2.

Tabella 3.2 Principali caratteristiche chimico-fisiche dei suoli presenti nei lisimetri.

Suolo dei lisimetri		
	Medio-impasto o (M-IMP)	Torboso (TOR)
Limo (%)	65	40
Sabbia (%)	15	40
Argilla (%)	20	20
pH	8,15	7,91
Densità apparente (g cm⁻³)	1,26	1,06
S.O. (%)	1,77	3,6
N (%)	0,11	0,19
C/N	9,72	10,9
CSC (cmol(+) kg⁻¹)	15,4	37,5
P totale (g P₂O₅ kg⁻¹)	0,81	1,39
P disponibile (mg P₂O₅ kg⁻¹)	8,46	22,2
K scambiabile (mg K₂O kg⁻¹)	59,9	108
Mg scambiabile (mg kg⁻¹)	247	460
Ca scambiabile (mg kg⁻¹)	2619	6659
Na scambiabile (mg kg⁻¹)	26,1	36,5
S (mg kg⁻¹)	408	496

Dati gli elevati costi di installazione e manutenzione, i lisimetri sono costruiti solo in poche repliche e per questo motivo le quattro tesi appartenenti a questa prova sperimentale sono state confrontate mediante schema sperimentale che prevedeva un blocco completamente randomizzato all'interno del singolo lisimetro/trattamento (Figura 3.2).

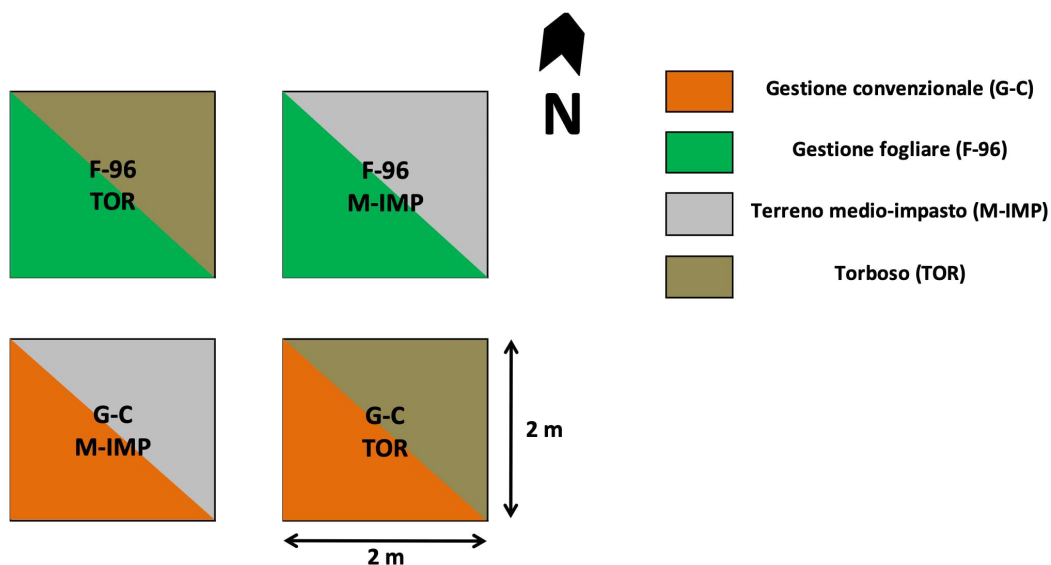


Figura 3.2. Schema rappresentativo della prova.

3.2 Operazioni colturali

Viste le esigue dimensioni della superficie dei singoli lisimetri, le lavorazioni sono state effettuate manualmente. Inizialmente è stata eseguita una vangatura che ha interessato i primi 15-20 cm di suolo, seguita da un affinamento della zollosità.

La semina dei lisimetri è avvenuta il 18/11/2019, utilizzando semente della varietà di frumento tenero “*Bologna*” (SIS, Italia) conciaata con il fungicida REDIGO (p.a., protioconazolo). La dose di semina era pari a 200 kg ha⁻¹, seminando 16 file per ciascun lisimetro, con un’interfila di 12,5 cm.

La coltura è stata trattata in data 02/04/2020 con un trattamento erbicida di post-emergenza con GRANSTAR ULTRA SX (dose 50 g ha⁻¹; p.a. tifensulfuron metile + tribenuron metile) + trattamento fungicida con KISHAR (dose 1 L ha⁻¹; p.a. azoxistrobin + ciproconazolo) + adesivante VECTOR (dose 0,4 L ha⁻¹; alcol isodecilico etossilato).

In data 08/05/2020 è stato eseguito un successivo trattamento fungicida con CARAMBA (dose 1 L ha⁻¹; p.a. metconazolo) + trattamento insetticida con KARATE ZEON (dose 0,15 L ha⁻¹; p.a. lambda-cialotrina).

La raccolta è avvenuta in data 22/06/2020.

Per quanto riguarda i concimi, per la concimazione granulata al suolo è stato utilizzato nitrato ammonico (27% N) (NAC 27 N; Borealis L.A.T., Linz, Austria), distribuito manualmente e in

maniera uniforme su tutta la superficie dei lisimetri in gestione convenzionale G-C (Figura 3.3). L'applicazione fogliare di azoto è stata invece eseguita utilizzando una pompa a spalla, mantenendo l'ugello a circa 50 cm di altezza dalla coltura, distribuendo un volume d'acqua pari a 430 L ha⁻¹ (Figura 3.3). Il formulato commerciale impiegato è stato CIFO 26 N.S.Z. (Cifo, Italia), contenente una soluzione di urea-nitrato ammonico (UAN, 26% N totale di cui 6% N nitrico, 8% N ammoniacale e 12% N ureico).



Figura 3.3. Concimazione granulare (sinistra) e fogliare (destra).

3.3 Rilievi sperimentali

3.3.1 Campionamento dell'acqua di percolazione e quantificazione di NO_3^- lisciviato

Dopo forti precipitazioni o periodi di pioggia prolungati, l'acqua di percolazione presente nella vasca interrata sotto ogni lisimetro è stata raccolta attraverso una pompa autoadescante.

Durante ogni raccolta, l'acqua di ciascuna vasca veniva svuotata in un recipiente graduato per rilevare il volume, tenendo poi un campione di 50 mL in una provetta Falcon, che veniva successivamente congelata a $-18\text{ }^\circ\text{C}$ (per non alterare la concentrazione di nitrati) fino alle successive analisi di laboratorio.

Al termine della prova, la determinazione della quantità dei nitrati disciolti è stata effettuata scongelando i campioni di acqua a temperatura ambiente, filtrandoli con carta da filtro e successivamente analizzandoli con il metodo proposto da Goldman e Jacobs (1961).

La determinazione dei nitrati è stata ottenuta mediante spettrofotometria UV-visibile utilizzando una opportuna retta di taratura ed esprimendo i risultati in mg L^{-1} di NO_3^- .

Nel dettaglio, è stata preparata una soluzione madre sciogliendo 0,163 g di KNO_3 , dopo averlo precedentemente disidratato a circa $105\text{ }^\circ\text{C}$ per 24 ore, in un matraccio e portato al volume di 1 L con acqua bi-distillata. Tale soluzione madre aveva una concentrazione di $100\text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$. Da questa soluzione madre sono state poi ottenute 6 soluzioni standard (0-2,5-5-10-20-40 e $50\text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$), utilizzate per costruire la retta di taratura.

Successivamente, attraverso uno spettrofotometro Agilent Cary 60 UV-Vis (Agilent Technologies, Florida, USA) tarato alla lunghezza d'onda di 220 nm è stata misurata l'assorbanza degli standard contro il bianco. Su un grafico Excel è stata riportata l'assorbanza (asse Y) in funzione della concentrazione nota (in mg L^{-1}) degli standard (asse X). Quindi è stata misurata l'assorbanza di ciascun campione di acqua raccolta e per interpolazione grafica si è ottenuto e determinato la concentrazione di NO_3^- -N in mg L^{-1} .

3.3.2 Rilievi sulla parte epigea

3.3.2.1 Sviluppo delle piante

Dalla fase di accestimento fino alla fioritura, ad intervalli di circa 10-15 giorni sono stati misurati parametri vegetazionali (indici SPAD e NDVI), mentre non è stato possibile prendere in considerazione regolarmente quelli di natura morfologica (biomassa e superficie fogliare e dei culmi), data la piccola superficie disponibile per ciascun lisimetro (4 m²).

SPAD (*Soil Plant Analysis Development*)

Per ogni campionamento sono state individuate sei piante rappresentative distribuite omogeneamente all'interno di ciascun lisimetro. Su ognuna di queste si sono eseguiti i rilievi di SPAD. Il valore rilevato per ogni pianta deriva dalla media di due letture effettuate a circa un terzo e due terzi della lamina fogliare dell'ultima foglia completamente sviluppata, utilizzando lo SPAD-502 (Konica Minolta, Giappone). Questo strumento esegue una misurazione puntiforme del contenuto in clorofilla della foglia. In base al principio della trasmittanza, lo strumento misura la differenza tra la radiazione luminosa emessa da un diodo e la radiazione che oltrepassa la lamina fogliare e che viene rilevata da una fotocellula. L'assorbimento di radiazione da parte dei tessuti fogliari è calcolato per differenza e viene espresso in unità adimensionali comprese tra 0 e 100. Il valore della radiazione assorbita dipende dal contenuto fogliare in clorofilla che, a sua volta, è un indice rappresentativo dell'attività fotosintetica, del contenuto azotato e dell'attività enzimatica. Dall'elaborazione di questi valori è possibile avere indicazioni istantanee sullo stato nutrizionale della coltura (Seemann *et al.*, 1987; Takabe e Yoneyama, 1989). Questa tecnica non è distruttiva e permette la lettura immediata del dato, "pinzando" la lamina fogliare e leggendo il dato sul display (Figura 3.4). Tuttavia, trattandosi di una misura puntiforme, le informazioni sono relative a superfici fogliari molto ristrette e per questa ragione la misurazione deve essere ripetuta più volte ed è necessario individuare ogni volta il punto della pagina fogliare da monitorare.



Figura 3.4. Pinzatura della foglia di frumento per la misurazione dello SPAD.

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

Questo indice è descritto dall'equazione:

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

dove ref_{NIR} indica le lunghezze d'onda riflesse del vicino infrarosso, mentre ref_{RED} le lunghezze d'onda riflesse del rosso visibile. Una coltura in piena attività fotosintetica assorbe la radiazione rossa visibile, mentre riflette quella infrarossa. Di conseguenza l'indice assume valori crescenti all'aumentare della superficie coperta dalla coltura e della sua attività fotosintetica. Il valore di tale indice varia, in genere, per le superfici coltivate tra +0,3 (suolo nudo) e +1. Lo strumento utilizzato durante i rilievi in pieno campo, il Greenseeker (Ntech Industries, California, USA), è dotato di un sensore posto al termine di un'asta estensibile in grado di registrare i valori alla frequenza di 10 Hz (10 letture al secondo).

La lettura è stata effettuata avanzando longitudinalmente lungo un lato di ciascun lisimetro, mantenendo lo strumento a circa 40-50 cm sopra la coltura e coprendo pressoché l'intera area superficiale.

Biomassa e numero di spighe

Data l'impossibilità di monitorare ad intervalli regolari la biomassa e il numero di spighe, questi valori sono stati misurati solo in fase di fioritura (fase di massimo sviluppo vegetativo) in concomitanza dell'indagine radicale (08/05/2020).

A circa 20 cm dal bordo, sono state raccolte tre file di piante da 20 cm l'una in tre repliche per ciascun lisimetro. Per questi campioni sono state contate il numero di spighe e, dopo essere state

ripulite da eventuali corpi estranei, sono state essiccate (65 °C per 72 ore) determinandone il peso secco. Entrambi i parametri (biomassa secca e numero di spighe) sono state rapportate al m².

3.3.2.2 Resa e qualità della granella

Resa

In data 22/06/2020, quando la granella aveva raggiunto un grado di umidità di circa il 13%, si è proceduto alla mietitura delle piante presenti nei lisimetri, raccogliendole da un'area delimitata centrale, evitando così l'effetto bordo. In seguito, le piante sono state trebbiate tramite una trebbiatrice da laboratorio.

La quantità di prodotto utile ricavata da ogni tesi è stata pesata, per poi ricavare la produzione unitaria rapportando i kg di granella ottenuti a quello di una superficie pari a 1 m². I valori di resa sono riferiti alla quantità di granella prodotta in termini di sostanza secca.

Harvest index

Questo indice è espresso come il rapporto fra il peso della granella e quello della biomassa epigea totale presenti su di una determinata superficie. Tale indice è stato ottenuto prelevando le piante da una superficie di saggio uniforme in tutti i lisimetri (1 fila della lunghezza di 1,20 m). La biomassa aerea è stata raccolta tagliando le piante a livello della corona di accostamento; si è pesata la biomassa totale e separata la granella dalle altre componenti epigee (paglia e lolla) tramite trebbiatura, si è poi proceduto alla pesatura della granella. Determinando anche le relative percentuali di umidità delle diverse componenti è stato possibile esprimere l'HI in termini di sostanza secca.

Peso di 1000 semi

È un dato fondamentale in fase di semina, poiché serve a quantificare il dosaggio di semente da distribuire per unità di superficie considerando la percentuale di germinabilità e la densità di semina. Questo parametro, inoltre, fornisce anche un indice di qualità della granella, essendo strettamente correlato alla dimensione della cariosside.

Il valore del peso di 1000 semi è stato calcolato pesando tre repliche casuali di 100 semi ciascuna, estratte dalla produzione di ogni lisimetro. I tre valori sono stati mediati e il risultato moltiplicato per 10 per ottenere il riferimento ai 1000 semi.

Peso ettolitrico

Conosciuto più comunemente come peso specifico, questo parametro fa riferimento alla misura della massa di un volume noto di granella ed è influenzato da aspetti come la forma, grossezza, rugosità e umidità dei semi. Il peso ettolitrico non è adottabile come indicazione definitiva di qualità, perché la presenza di spazi vuoti all'interno di cariossidi di grosse dimensioni o l'elevata compattezza di cariossidi di piccole dimensioni possono infatti avere una certa influenza sul peso specifico. Questo parametro è stato determinato attraverso l'impiego dello strumento GAC 500XT (Dickey-John, IL-USA), in dotazione all'azienda agraria "Lucio Toniolo" dell'Università di Padova.

Qualità della granella

La qualità delle cariossidi è stata valutata attraverso la tecnologia NIRS (*Near InfraRed Spectroscopy*), mediante strumentazione Infratec-1241 (Foss Analytical, Hillerød, Danimarca) analizzando un campione di circa 300 g, prelevato dalla quantità totale di granella raccolta in ogni lisimetro. Questo procedimento di analisi sfrutta le interazioni della materia con le radiazioni del vicino infrarosso. È noto infatti che, quando un oggetto viene investito da un fascio luminoso, è in grado di assorbire parte della radiazione, mentre la frazione restante viene trasmessa o riflessa. La quantità di luce assorbita dipende strettamente dalla composizione chimica dell'oggetto ed è data dalla differenza tra la luce trasmessa e quella emessa. A seconda delle lunghezze d'onda selezionate, che determinano la qualità della radiazione luminosa impiegata, le interazioni che si verificano sono diverse e di conseguenza lo saranno anche le informazioni ottenibili riguardo al campione.

I parametri riguardanti la qualità della granella determinati tramite questa strumentazione sono stati: il contenuto proteico, la percentuale di glutine umido e l'indice di Zeleny, che indica l'attitudine di un prodotto farinoso alla panificazione in relazione alla qualità della sua componente proteica.

3.3.3 Rilievi sulla parte radicale

3.3.3.1 Carotaggio e preparazione dei campioni

In data 8 maggio 2020 (fase di fioritura) è stato eseguito un carotaggio per il monitoraggio dell'apparato radicale, estraendo una carota di terreno in tre repliche per ogni lisimetro ($n = 3$). Ciascuna sonda è stata posizionata sulla fila di semina, inserita nel terreno con l'ausilio di un martello pneumatico ed estratta tramite un paranco. Il carotatore impiegato è formato da due emicamicie di alluminio separabili, poste all'interno da un cilindro metallico che presenta un bordo inferiore affilato e che facilita la penetrazione nel suolo. La carota di terreno estratta aveva una lunghezza complessiva di 1 metro, suddivisa poi in sub-campioni di 10 cm (Figura 3.5), riposti in sacchetti di plastica, catalogati e conservati a -18°C in attesa del successivo lavaggio.



Figura 3.5. Carota di terreno di 1 m di lunghezza e suddivisione in sub-campioni di 10 cm.

Successivamente, le radici sono state separate dal terreno secondo il metodo descritto da Oliveira et al. (2000). I campioni sono stati scongelati il giorno prima del lavaggio ed immersi in una soluzione al 15% di acido ossalico, per facilitare lo scongelamento e la separazione degli aggregati strutturali. Per il lavaggio è stato utilizzato il metodo detto “flottazione”, che sfrutta la forza centrifuga dell'acqua per separare le radici dal terreno (Figura 3.6). Al centro della centrifuga vi è un foro per il deflusso dell'acqua, sotto il quale è stato posto un setaccio a maglia di $500\ \mu\text{m}$, che trattiene solo le radici.

Dopo il lavaggio è seguita una fase di pulizia e di separazione dalle radici morte e da altre componenti estranee, organiche e inorganiche. Le radici pulite ottenute sono state conservate in provette Falcon da 50 mL con una soluzione conservante di etanolo al 15% a $+4\ ^{\circ}\text{C}$ fino al momento della digitalizzazione allo scanner.



Figura 3.6. Impianto di lavaggio delle carote di terreno.

3.3.3.2 Acquisizione e analisi delle immagini

Questa parte del lavoro è stata svolta in laboratorio e consisteva nello scannerizzare le radici di ogni singolo campione in modo da poter elaborare i vari parametri attraverso software dedicati.

Le radici, una volta estratte dalla provetta Falcon, venivano lavate accuratamente con acqua demineralizzata e disposte su vassoi trasparenti in plexiglas ($20,5 \times 30,7$ cm) a bordi rialzati (2 cm).

Le radici sono state disposte su tutta la superficie del vassoio con un sottile velo d'acqua ed eliminando eventuali residui organici e materiale estraneo, aiutandosi delle pinzette da laboratorio. I campioni di radici particolarmente estesi sono stati suddivisi in più vassoi.

La scansione delle immagini è stata effettuata con uno scanner EPSON Expression 11000XL PRO (Epson, Suwa, Japan) e relativo software, impostando la risoluzione a 400 DPI. Le immagini in bianco e nero sono state salvate in formato TIFF (*Tagged Image File Format*) non compresso (Figura 3.7).

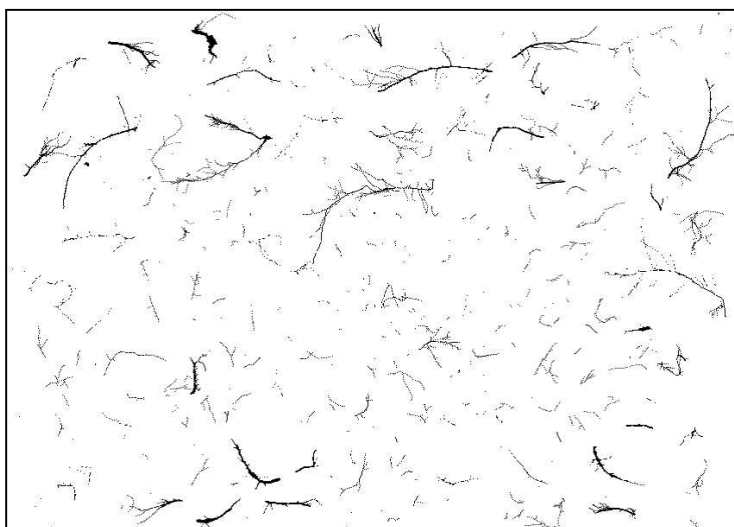


Figura 3.7. Esempio di immagine di radici acquisita allo scanner.

Successivamente, le immagini sono state analizzate tramite il software KS 300 ver. 3.0 (Karl Zeiss Vision GmbH, München, Germany) che ha permesso di eseguire le misurazioni in automatico, impostando una funzione macro creata appositamente allo scopo. La macro prevedeva il caricamento automatico delle immagini in sequenza in base alla loro numerazione (motivo per il quale sono state nominate con numeri progressivi crescenti) e la conversione in RGB (*Red Green Blue*). Dopo di che, sono state caricate le condizioni per la misurazione delle radici: sono stati infatti selezionati solo gli oggetti grafici aventi valori di area superiore o uguale a 40 pixel e di indice di allungamento (P^2/A , dove P = perimetro e A = area) superiori a 40. Gli oggetti con indice di allungamento inferiore a 40, di forma tendenzialmente tondeggianti, sono stati considerati corpi estranei (residui vegetali, semi di infestanti, piccoli sassolini, etc.). In seguito, la funzione stessa sovrapponeva a questi oggetti grafici una nuova immagine binaria, disegnando nuovi oggetti (radici) con un valore di background pari a 0 (nero) ed un valore di foreground (ovvero le radici) pari a 255 (bianco). Per calcolare la lunghezza delle radici sono stati utilizzati due algoritmi diversi, FbLm (*Fiber length algorithm*) e ASkl (*Skeletonization method*). Il primo consiste nel calcolare la lunghezza della radice, riconoscendo innanzitutto le regioni chiuse di pixel bianchi nell'immagine (le radici), calcolando area e perimetro di questi oggetti e utilizzando l'equazione:

$$FIBERLENGTH_{MODIFICATO} = \frac{1}{4} (PERIMETRO + \sqrt{PERIMETRO^2 - 16 AREA})$$

L'equazione è semplicemente la soluzione del sistema ottenuto dalle equazioni per calcolare il perimetro e l'area degli oggetti radicali (assimilabili a piccoli rettangoli), nei quali la loro lunghezza è l'incognita (Vameralli *et al.*, 2003).

Il secondo algoritmo prevede l'erosione dei pixel esterni dell'oggetto radice, ma non di quelli alle due estremità e nella parte centrale, convertendo le radici in linee di spessore 1 pixel (denominate scheletri) aventi la stessa topologia delle radici, e di cui era poi possibile calcolarne l'area. La lunghezza reale del campione di radici disposte casualmente si ricava dividendo il numero di pixel dell'area degli oggetti di spessore 1 pixel per la risoluzione e moltiplicando per un fattore di correzione pari a 1,12 (Smith *et al.*, 1994; Vameralli *et al.*, 2003).

I due metodi (FbLm e Skeletonization) sono risultati entrambi affidabili, e correlati positivamente ($r=0,97$). Il metodo della Scheletronizzazione tendeva a sottostimare la lunghezza, a causa dell'elevata risoluzione delle immagini, per ovviare questo problema sono stati utilizzati i dati di lunghezza ottenuti con l'algoritmo FbLm. Il diametro radicale è stato ottenuto dal rapporto tra l'area delle radici e la loro lunghezza per ciascun sub-campione.

Infine, rapportando la lunghezza e l'area radiale con il volume di suolo di ogni subcambione o carota, si è determinata la densità volumetrica di area radicale (RAD, *Root Area Density*) e la densità di lunghezza radicale (RLD, *Root Length Density*).

3.3.3.3 Peso secco dell'apparato radicale

Dopo l'analisi delle immagini radicali, le radici sono state raggruppate in sottocampioni a intervalli di profondità 0-20, 20-50 e 50-100 cm e sono state poste in forno (105 °C, 36 h) al fine di determinare il peso secco.

3.3.4 Valutazione della ritenzione fogliare del concime liquido

Parallelamente alla prova principale con i lisimetri, è stato impostato un altro esperimento volto a valutare il volume d'irrorazione di azoto fogliare trattenuta dalla coltura e, per differenza, non intercettato dalle piante. In campo aperto, sono state identificate mini-parcelle di 1 m² con tre repliche in cui il frumento è stato seminato e coltivato allo stesso modo dei lisimetri.

Le tre mini-parcelle sono state concimate negli stessi tempi e dosaggi del trattamento F-96 (4 applicazioni fogliari da 16 kg N ha⁻¹; totale concime liquido azotato distribuito: 64 kg ha⁻¹) come nei lisimetri (Tabella 3.1). Ogni applicazione consisteva nell'irrorare tramite pompa a spalla la soluzione di concime azotato fogliare per 17 secondi sul mini-appezzamento di 1 m², distribuendo in questo modo una quantità di volume pari a 430 L ha⁻¹. Durante ogni concimazione, strisce di carta assorbente con fondo in polietilene (Benchkote[®]) (Whatman[®], GE Healthcare UK Limited, Little Chalfont, UK) sono state collocate tra le file di piante di frumento, pesandole prima ed immediatamente dopo l'irrorazione fertilizzante fogliare (Figura 3.8). La differenza di peso (applicato rispetto a quello raccolto al suolo) è stata calcolata come quantità di soluzione fertilizzante trattenuto dalla coltura in quella fase fenologica. Questa operazione è stata eseguita settimanalmente nel periodo di maggior sviluppo delle piante (da inizio aprile a metà maggio), spruzzando solo acqua quando le concimazioni azotate non erano previste.



Figura 3.8. Strisce di carta assorbente posizionate tra le file di grano (a sinistra) e irrorazione della soluzione azotata nella mini parcella di 1 m² (a destra).

Dopo ogni applicazione, vicino a ciascuna mini-parcella è stata raccolta una fila di piante lunga 1 m, al fine di misurare l'area delle foglie (LAI - Indice di Area Fogliare), dei culmi (CAI - Indice di Area dei Culmi) e delle spighe (SAI - Indice di Area delle Spighe) verdi (fotosinteticamente attivi). Questi indici, generalmente definiti indici di vegetazione verde sono stati misurati attraverso la strumentazione Li-Cor (LI-3100C Area Meter, Li-Cor) allo scopo di correlare la ritenzione di fertilizzante azotato liquido (sulla coltura) con la crescita delle piante nelle varie fasi fenologiche del frumento.

3.4 Analisi statistica

I dati sottoposti ad analisi della varianza (ANOVA) sono stati elaborati usando il programma statistico Costat (Cohort Software, Birmingham, UK), tramite test di Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

4. Risultati e Discussioni

4.1 Andamento meteorologico

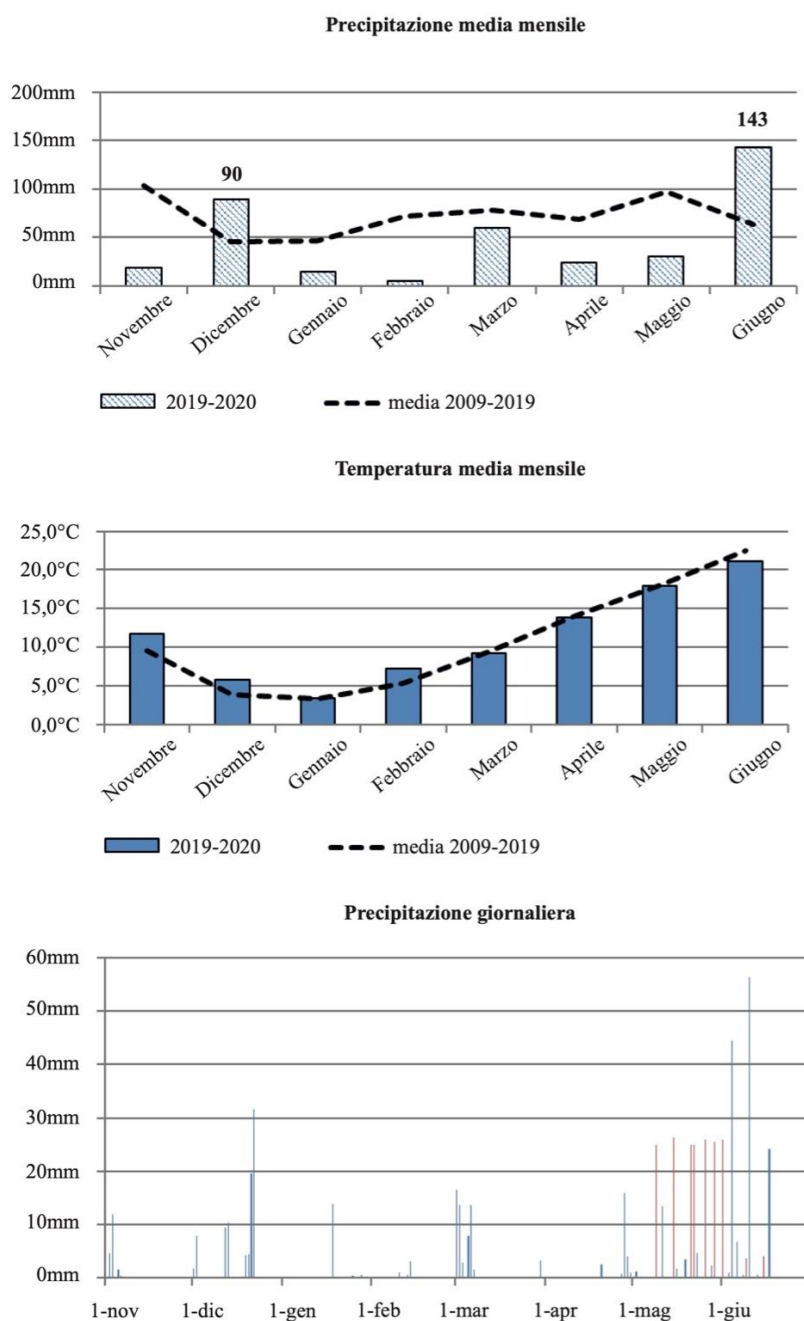


Figura 4.1. Confronto tra l'andamento delle precipitazioni mensili (A) e giornaliere (B) durante la sperimentazione (novembre 2019-giugno 2020). Gli istogrammi in rosso nel grafico B indicano un'irrigazione artificiale di soccorso effettuata distribuendo 100 L (25 mm) di acqua per ciascun lisimetro. Nel grafico (C) sono presentate le temperature medie mensili registrate durante la prova in riferimento alla media dell'ultimo decennio (2010-2020).

Dall'andamento della piovosità mensile (Figura 4.1 A) rilevata a Legnaro nel periodo interessato dalla prova, è emersa una situazione anomala e ben diversa rispetto alla rilevazione media dei dieci anni precedenti, con periodi siccitosi durante l'intero ciclo colturale. Le uniche eccezioni hanno riguardato i mesi di dicembre (90 mm), giugno (143 mm) (con valori oltre la media) e marzo, con piovosità simile a quella media. Inoltre, la piovosità giornaliera è stata molto scarsa e distribuita non omogeneamente, con valori che raramente hanno superato i 10-15 mm ad evento, ad eccezione di alcuni picchi elevati (> 15-20 mm) registrati a dicembre e a giugno. Dato l'elevato stress idrico in cui versava la coltura durante gli stadi di fine fioritura e maturazione, è stato deciso di effettuare delle irrigazioni di soccorso da metà maggio fino alla raccolta (Figura 4.1 B). Le temperature medie mensili sono state pressoché in linea con quelle del periodo 2010-2020, anche se valori superiori alla media decennale sono stati registrati in novembre, dicembre e febbraio, mentre nel mese di giugno si sono misurati valori di temperatura inferiori (Figura 4.1 C).

4.2 Quantificazione del volume di percolazione e lisciviazione di NO_3^-

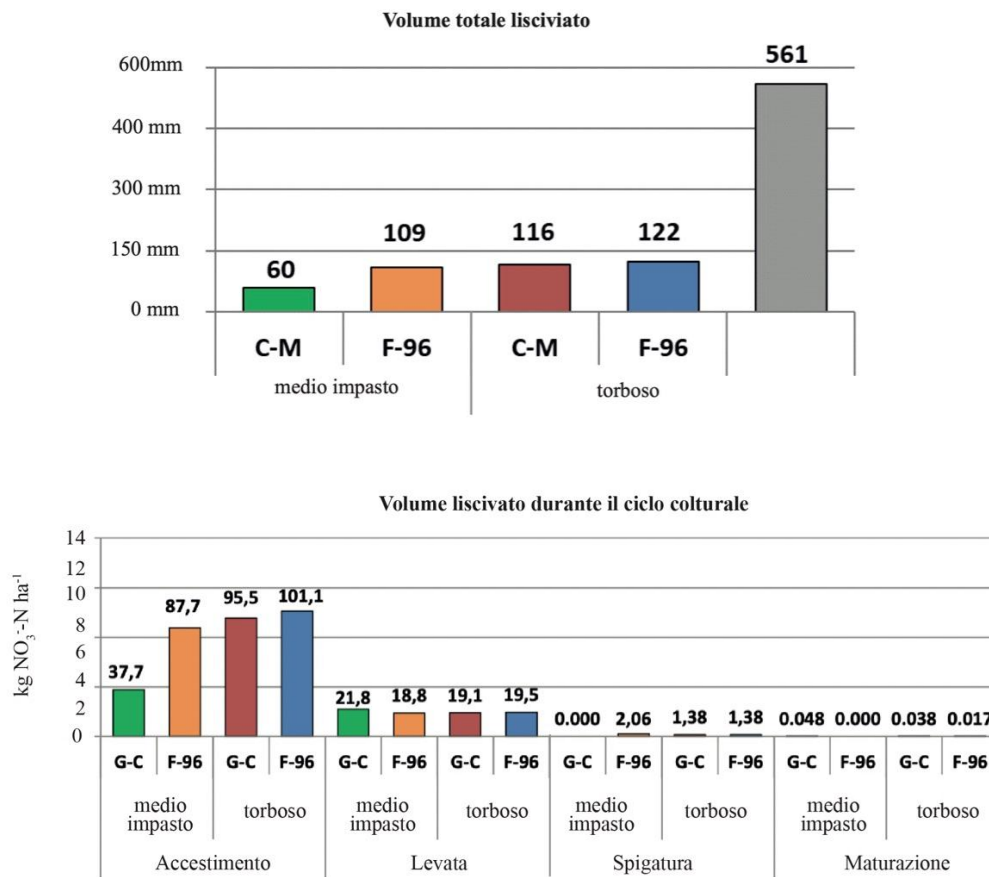


Figura 4.2. Volume d'acqua percolato (mm) totale (A) e durante le varie fasi di crescita del frumento (accestimento, levata, spigatura e maturazione) (B) raccolto da ciascun lisimetro.

Nel periodo della prova, la quantità cumulata di pioggia caduta è stata di 561 mm. Nel terreno torboso il volume totale lisciviato è stato molto simile per entrambe le tesi. Nel terreno di medio-impasto, invece, la quantità d'acqua lisciviata nel trattamento fogliare è risultata leggermente superiore alla gestione convenzionale, dove probabilmente il compattamento del suolo può aver ridotto la quantità di acqua percolata (Figura 4.2 A). Durante l'intero ciclo culturale, la maggior parte di acqua lisciviata è stata rilevata durante accestimento e, in misura minore, in levata. Nei successivi stadi fenologici (spigatura e maturazione) la quantità d'acqua lisciviata è stata molto bassa o nulla per effetto dell'elevata evapotraspirazione (Figura 4.2 B). La quantità di azoto lisciviato è influenzata significativamente da vari fattori (Johnston, 1986), anche se il principale è il

volume di percolazione, che è a sua volta correlato oltre che alla quantità di azoto distribuito anche con le precipitazioni e/o irrigazioni (Sieling e Kage, 2006; Liang *et al.*, 2011; Wild e Cameron, 1980). In dettaglio, il volume maggiore è stato rilevato nel periodo invernale (accestimento) dove si è verificata un'elevata piovosità, mentre le scarse precipitazioni registrate durante il periodo primaverile hanno sicuramente condizionato la quantità di acqua percolata e quindi di lisciviazione di NO_3^- . Tuttavia, alla rilevante piovosità di giugno non è corrisposto un elevato volume di percolazione, data l'elevata evapotraspirazione di fine primaverile-inizio estate di una coltura coltivata in lisimetro (Di e Cameron, 2002).

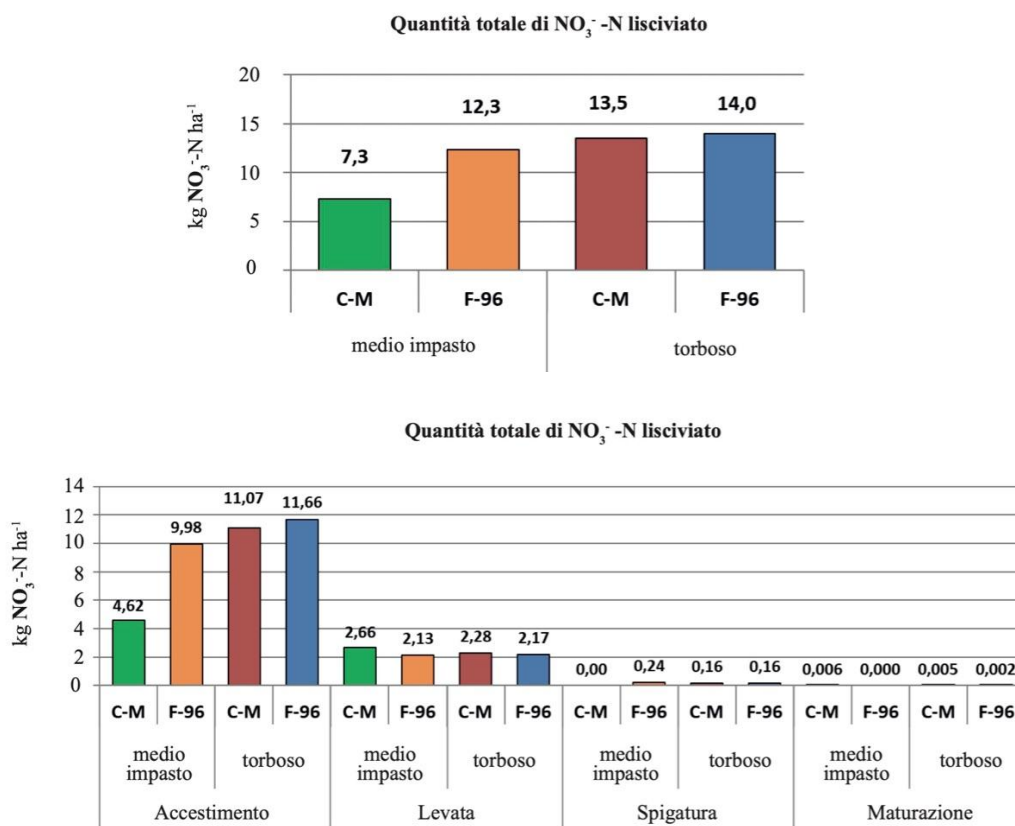


Figura 4.3. Quantità di NO_3^- -N (kg ha^{-1}) lisciviato totale (A) e durante le varie fasi di crescita del frumento (accestimento, levata, spigatura e maturazione) (B) per ciascun trattamento.

Nel terreno torboso la quantità di NO_3^- -N lisciviato è stata praticamente la stessa tra le due diverse concimazioni, mentre nel terreno di medio-impasto la concimazione fogliare ha inaspettatamente registrato un valore leggermente maggiore ($12,3 \text{ kg NO}_3^-$ -N ha^{-1}) rispetto alla gestione convenzionale ($7,3 \text{ kg NO}_3^-$ -N ha^{-1}) (Figure 4.3 A). Questa riduzione da parte di G-C è attribuibile probabilmente al minor volume di acqua percolata dal lisimetro contenente suolo a medio-impasto (Dong *et al.*, 2005).

La quantità di nitrato lisciviata è variata durante le diverse fasi fenologiche ed ha avuto un andamento simile in tutte le tesi. La maggiore lisciviazione si è registrata dopo la semina e principalmente durante la fase di accestimento, per poi progressivamente ridursi con lo sviluppo della coltura (Figura 4.3 B). L'elevata percolazione di NO_3^- nei primi stadi fenologici è imputabile all'elevata disponibilità idrica (precipitazioni di dicembre) unita al basso fabbisogno idrico delle giovani piantine di frumento (Basso e Ritchie, 2005), oltre che a un minore assorbimento di azoto da parte delle radici, ancora poco profonde e sviluppate. Al contrario, dalla fase di levata fino allo stadio di maturazione, l'azoto distribuito è stato ampiamente assorbito dalle piante in aggiunta alla scarsa piovosità, determinando una marcata riduzione della quantità di nitrato nel percolato (Gu *et al.*, 2015).

4.3 Quantità di concime azotato fogliare che ha raggiunto la coltura

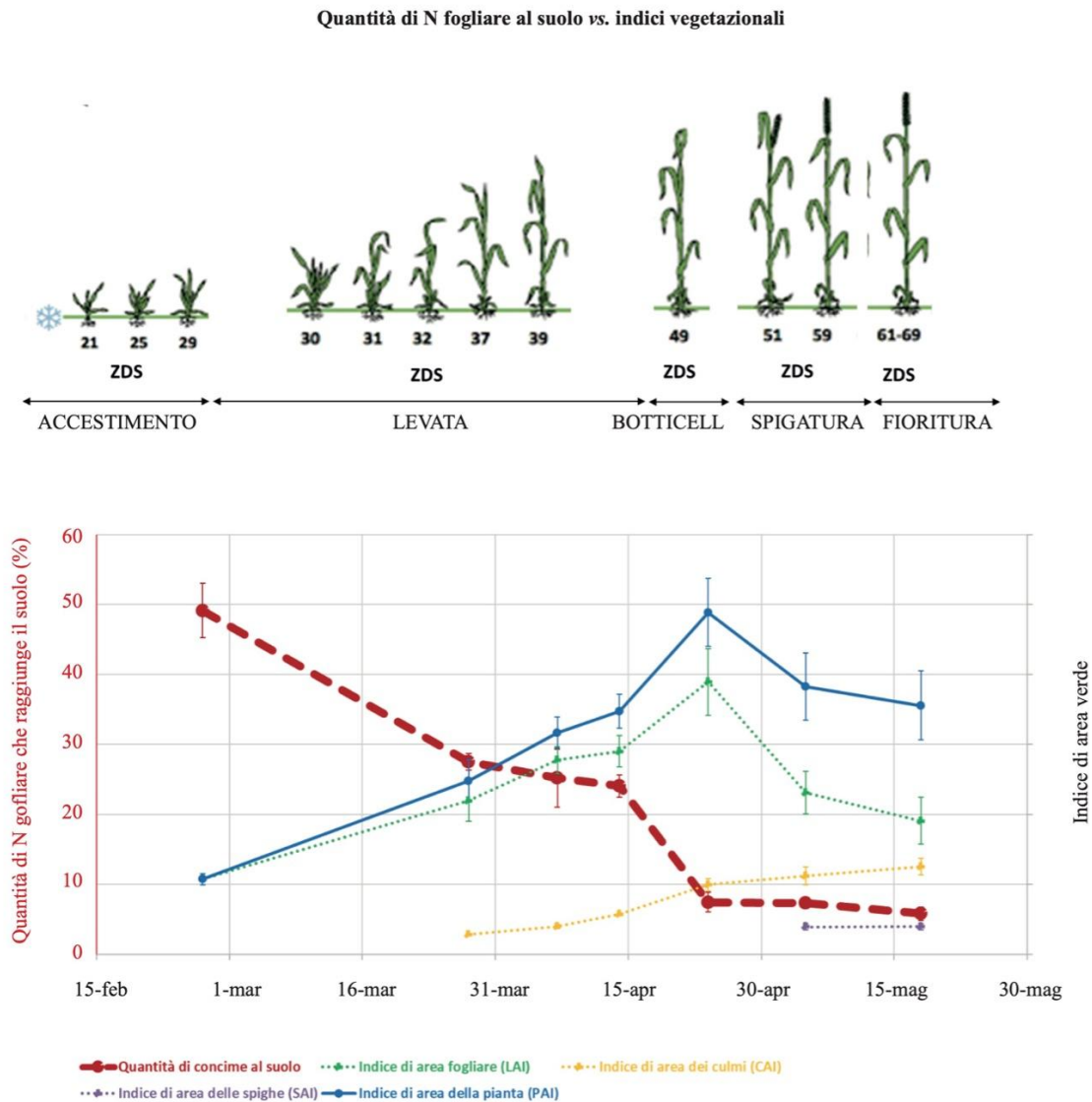


Figura 4.4. Frazione di fertilizzante azotato (%) che raggiunge la coltura vs. indici di vegetazione verde (LAI, CAI, SAI e PAI) (linee colorate) dalla fase di accestimento fino alla fioritura a seguito di fertilizzazione fogliare con 430 L ha⁻¹.

L'assorbimento del concime azotato fogliare da parte del frumento è in funzione del grado di copertura del suolo. In questa prova, si è rilevato come nelle prime fasi vegetative lo sviluppo della coltura era molto limitato e, nella fase di accestimento, solo il 50% del concime applicato tramite irrorazione fogliare è stato trattenuto dalla coltura, mentre la restante raggiungeva il terreno. Dalla levata in poi, la coltura aveva sviluppato un discreto grado di copertura (LAI e CAI) in grado di

intercettare circa il 70% dell'azoto applicato per via fogliare. Successivamente, dalla fase di botticella le piante hanno raggiunto il massimo sviluppo vegetativo e quindi il massimo assorbimento (circa il 90%) del concime fogliare, che si è mantenuto pressoché costante anche nei successivi stadi fenologici, mentre il LAI si è progressivamente ridotto a differenza di CAI e SAI (indice delle spighe) che invece sono aumentati (Figura 4.4).

Da questo andamento risulta evidente come, già dalla fase di levata, la maggior parte della soluzione azotata sia stata ritenuta (e verosimilmente assorbita) e resa disponibile per la coltura, mentre in fase di accestimento metà del prodotto ha raggiunto il terreno, creando potenzialmente problematiche ambientali se non assorbito. Il basso assorbimento è dovuto principalmente allo scarso sviluppo radicale e al basso grado di copertura del terreno. In questa sperimentazione, la massima ritenzione/assorbimento del concime fogliare è stata registrata quando l'indice di area fogliare LAI aveva raggiunto valori compresi tra 6 ed 8, come riportato anche da (Gooding e Davies, 1992).

In conclusione, l'assorbimento medio del concime azotato fogliare rapportato alle 4 distribuzioni è stato di circa il 77% che, rispetto alla dose totale distribuita (64 kg N ha^{-1}) corrispondono a poco meno di 50 kg N ha^{-1} .

4.4 Parametri epigei

4.4.1 SPAD

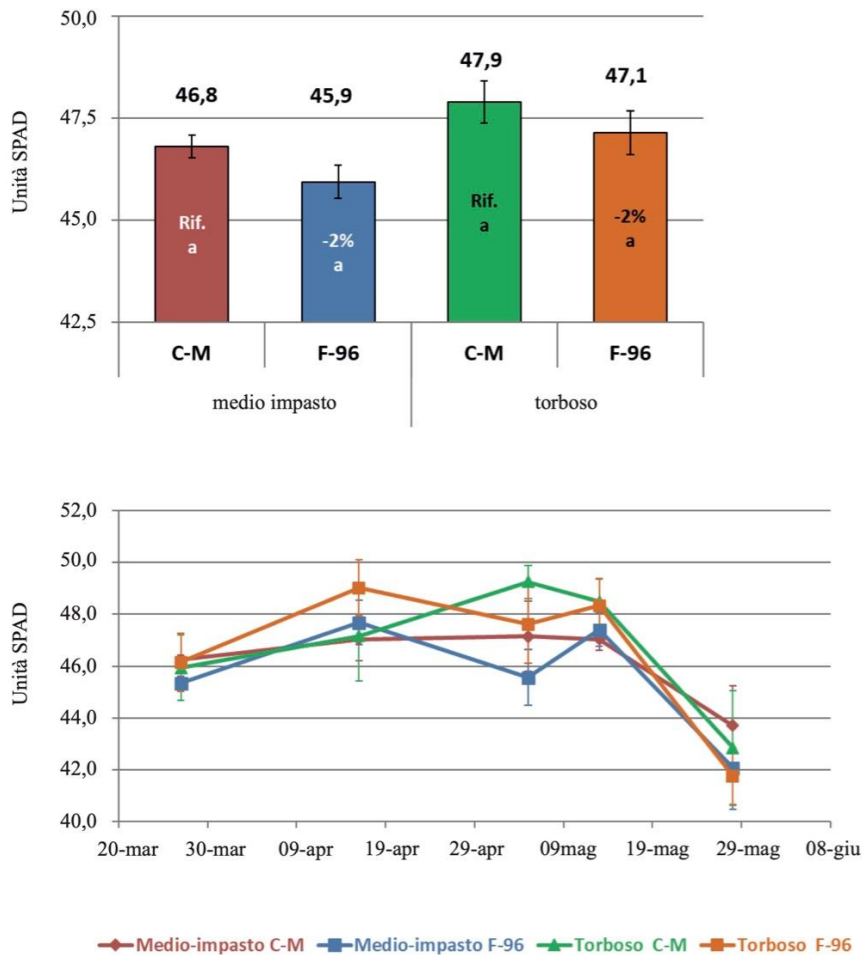


Figura 4.5. Contenuto di clorofilla medio (unità SPAD; $n=6$; \pm E.S.) delle varie tesi a confronto ottenuto da rilievi eseguiti durante il ciclo colturale (A) (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$). Andamento del contenuto di clorofilla fogliare (espresso in unità SPAD) delle varie tesi a confronto eseguiti durante il ciclo colturale (B).

I valori di SPAD misurati nelle tesi F-96 sono risultati inferiori solamente del 2% rispetto alla gestione convenzionale in entrambi i terreni, e l'ampia variabilità sperimentale non ha determinato differenze statisticamente significative (Figura 4.5 A). I valori ottenuti nel suolo torboso sono risultati in generale leggermente maggiori rispetto a quelli del terreno di medio-impasto pressoché durante l'intero ciclo colturale, nonostante qualche leggera fluttuazione (Figura 4.5 B), verosimilmente per la maggiore fertilità del terreno torboso.

La leggera diminuzione di SPAD nelle tesi concimate con solo azoto fogliare, potrebbe dipendere dalla minore quantità di concime applicato, sia come quantità totale sia come quantità di ogni singola concimazione (Montemurro *et al.*, 2007).

4.4.2 NDVI

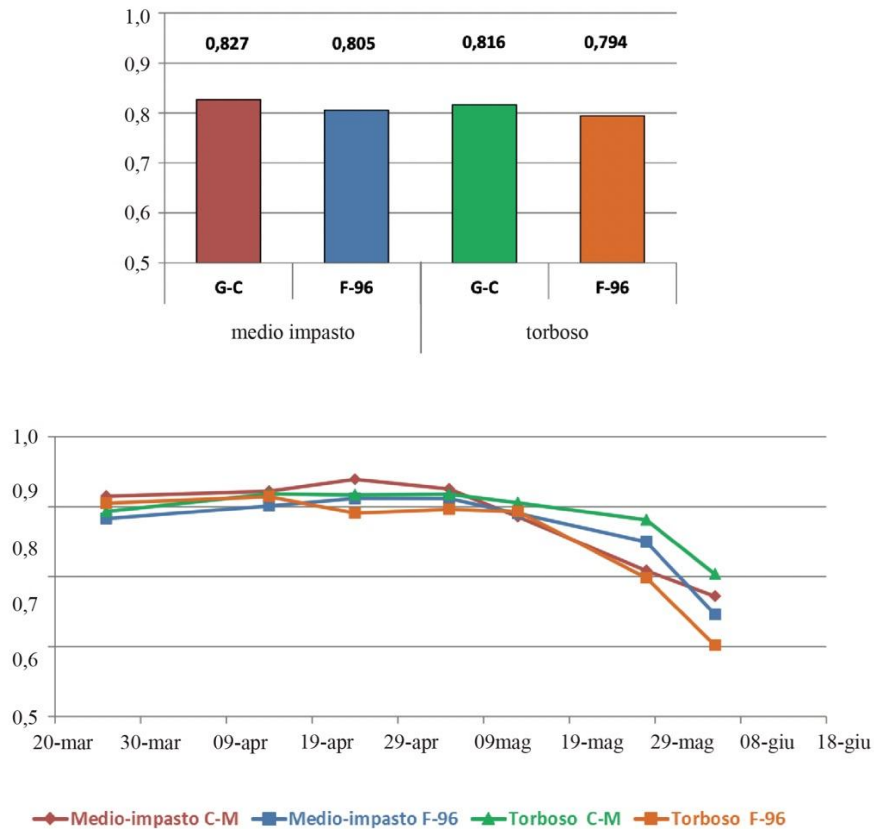


Figura 4.6. NDVI medio ($n=1$) delle varie tesi a confronto ottenuti da rilievi eseguiti durante il ciclo colturale (A) (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$). Andamento di NDVI delle varie tesi a confronto eseguiti durante il ciclo colturale (B).

I valori medi di NDVI sono risultati praticamente uguali ($\sim 0,8$) tra tutte le quattro tesi messe a confronto (Figura 4.6 A). Questi valori sono rimasti pressoché costanti durante le prime fasi del ciclo, mentre dalla fioritura fino alla maturazione la tesi G-C in terreno torboso e la tesi F-96 su terreno a medio-impasto hanno mantenuto valori di NDVI e *greenness* maggiori rispetto alle restanti tesi (Figura 4.6 B)

4.4.3 Biomassa secca e numero di spighe

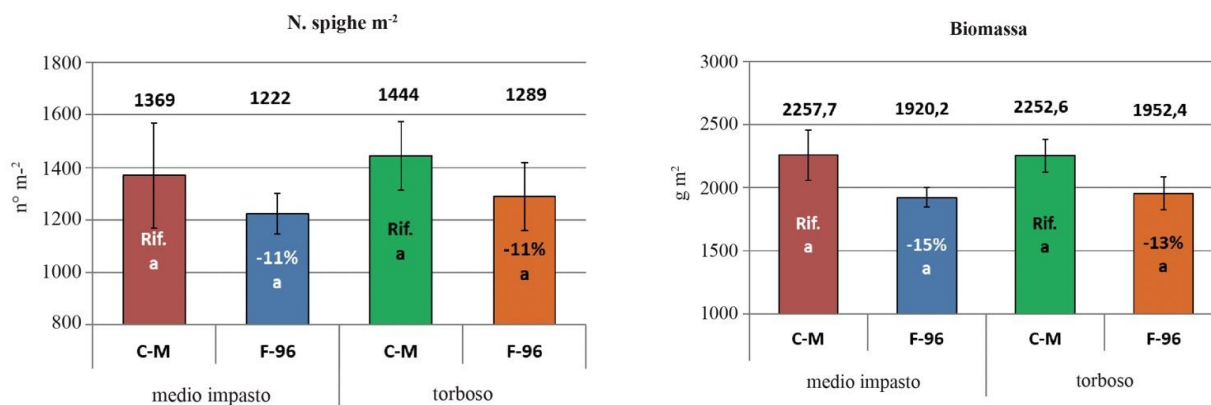


Figura 4.7. Biomassa epigea (S.S. g m⁻²; n=3; ± E.S.) (A) e numero delle spighe (n° spighe m⁻²; n=3; ± E.S.) (B) delle varie tesi a confronto ottenuti da rilievi eseguiti durante la fase di fioritura (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$).

Rispetto alla gestione convenzionale, la concimazione fogliare F-96 a minor dosaggio di azoto ha determinato una diminuzione della biomassa epigea di -15% e -13%, rispettivamente nel terreno di medio-impasto e torboso (Figura 4.7 A). Nonostante non siano state riscontrate differenze significative tra le tesi, questo risultato è verosimilmente attribuibile al minor dosaggio di N.

Analogamente, il trattamento F-96 ha determinato una riduzione (-11%) sul numero di spighe per m² rispetto a G-C in entrambe le tipologie di suolo, ma senza variazioni statisticamente significative (Figura 4.7 B). Il minor numero di spighe rilevata nelle tesi fogliari potrebbe essere spiegato dal fatto che il numero dei culmi è fortemente influenzato dalla quantità di azoto disponibile durante l'accestimento. In tale epoca la concimazione fogliare in termini quantitativi è stata inferiore di quasi due terzi rispetto alla concimazione granulare e questo potrebbe aver influito sullo sviluppo di nuovi culmi e, di conseguenza sul peso secco delle piante (Ercoli *et al.*, 2013).

4.4.4 Resa e qualità della granella

Tabella 4.1. Parametri di produttività del frumento: resa, harvest index (HI), peso di 1000 semi e peso ettolitro (n=1) delle varie tesi a confronto ottenuti alla raccolta.

Tipo suolo	Trattamento	Resa (kg m ⁻²)	Harvest index (%)	Peso 1000 semi (g)	Peso ettolitrico (kg hL ⁻¹)
Medio-impasto	G-C	0,341	28,3	35,5	76,5
	F-96	0,340	42,3	40,4	77,9
Torboso	G-C	0,389	39,4	38,4	78,1
	F-96	0,534	40,0	39,7	79,2

Le rese nel terreno di medio impasto si sono dimostrate uguali, mentre nel terreno torboso vi è stata una migliore performance con la concimazione fogliare (F-96). Questo potrebbe essere attribuibile al fatto che in un terreno organico, la quota di azoto distribuita con concimi tradizionali si leghi in parte alla sostanza organica stabile e quindi risulti più difficilmente assorbibile dalla coltura (Meissner *et al.*, 1995) (Tabella 4.1).

L'harvest index era maggiore nelle tesi F-96, dovuto dalla minore biomassa totale riscontrata in queste tesi. Una biomassa secca inferiore influenza il rapporto utilizzato per ricavare questo indicatore, aumentando quindi l'Harvest index nei campioni trattati per via fogliare (Tabella 4.1).

Valori leggermente superiori rispetto a G-C sono stati riscontrati da parte di F-96 in entrambi i tipi di terreno sia per quanto riguarda il peso di 1000 semi che il peso ettolitrico (Tabella 4.1).

Tabella 4.2. Parametri qualitativi della granella di frumento: contenuto proteico, indice di Zeleny e glutine umido (n=1) delle varie tesi a confronto ottenuti alla raccolta.

Tipo di suolo	Trattamento	Contenuto proteico (%)	Indice di Zeleny	Glutine umido (%)
Medio-impasto	G-C	16,6	59,8	35,3
	F-96	14,3	43,2	28,9
Torboso	G-C	15,7	59,1	33,8
	F-96	14,0	40,0	28,7

Il contenuto proteico, determinato con la tecnologia NIRS, ha evidenziato valori leggermente inferiori nelle tesi F-96 sia nel suolo torboso che di medio-impasto. Analogamente, valori più bassi rispetto alla gestione convenzionale sono stati riscontrati anche nei parametri qualitativi della granella, come l'indice di Zeleny e il glutine umido (Tabella 4.2).

La concimazione fogliare a basso dosaggio non ha compromesso la qualità della granella. Valutando anche i precedenti parametri, la gestione convenzionale ha registrato in generale risultati migliori rispetto alla concimazione fogliare. I risultati vanno ovviamente valutati anche in funzione dalla coltivazione del frumento in lisimetri, sistemi che, rispetto al campo aperto, sono chiusi e dove la disponibilità idrica e nutritiva, il calore e l'evapotraspirazione sono fortemente influenzati e alterati rispetto al campo aperto e all'ambiente circostante (Podlasly and Schwärzel, 2013; Ashktorab *et al.*, 1989). In queste condizioni "artificiali", gli elementi nutritivi sono più facilmente disponibili ed assorbiti dalle piante e nel caso di questa prova sperimentale probabilmente tutto il concime granulare, distribuito in dosaggio maggiore, è stato utilizzato dal frumento, incrementando la crescita, la produttività e la qualità della granella.

4.5 Parametri radicali

4.5.1 Densità di lunghezza radicale (RLD)

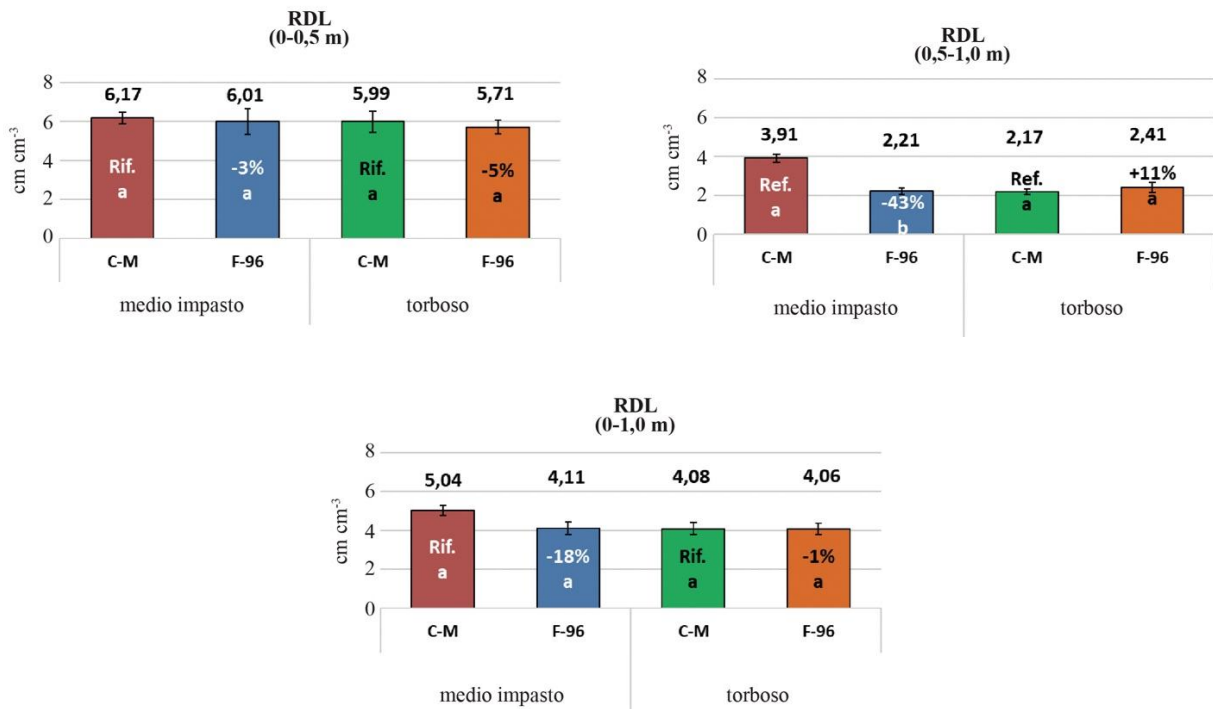


Figura 4.8. Densità di lunghezza radicale media (RLD, Root Length Density; cm cm⁻³; n=3; ±E.S.), lungo il profilo di suolo 0-50 cm (A), 50-100 cm (B) e 0-100 cm (C) delle varie tesi a confronto rilevate tramite carotaggio eseguito in fase di fioritura (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$).

Il primo parametro di sviluppo radicale considerato è stata la RLD (*Root Length Density*).

La profondità totale della carota di 1 m è stata divisa considerando due orizzonti, il primo che va da 0 a 0,5 m e il secondo da 0,5 a 1 m.

Nel primo macro-orizzonte non sono state riscontrate grandi differenze in entrambi i terreni, anche se nella tesi a fertilizzazione fogliare (F-96) vi è una lieve riduzione della lunghezza media (-3% e -5% nel medio-impasto e nel torboso, rispettivamente). Nel secondo orizzonte, invece, nel terreno medio-limoso il trattamento fogliare F-96 ha determinato una diminuzione significativa del -43% rispetto a G-C, mentre nel terreno torboso si è verificata una situazione opposta con un incremento dell'11% (non significativo, $P > 0,05$) da parte di F-96 rispetto alla gestione convenzionale. In generale, nell'intero profilo di 1 m, la concimazione fogliare ha registrato decrementi non rilevanti dal punto di vista statistico (-18% in M-IMP e -1% in TORB). La diminuzione di RLD nel

trattamento fogliare può essere dovuta al fatto che la pianta per andare alla ricerca dell'azoto (che tende a scendere lungo il profilo del terreno), non necessita di un apparato radicale profondo perché il nutrimento viene assorbito dalle foglie, mentre nella gestione convenzionale l'apporto maggiore di azoto ha migliorato e incrementato la lunghezza delle radici.

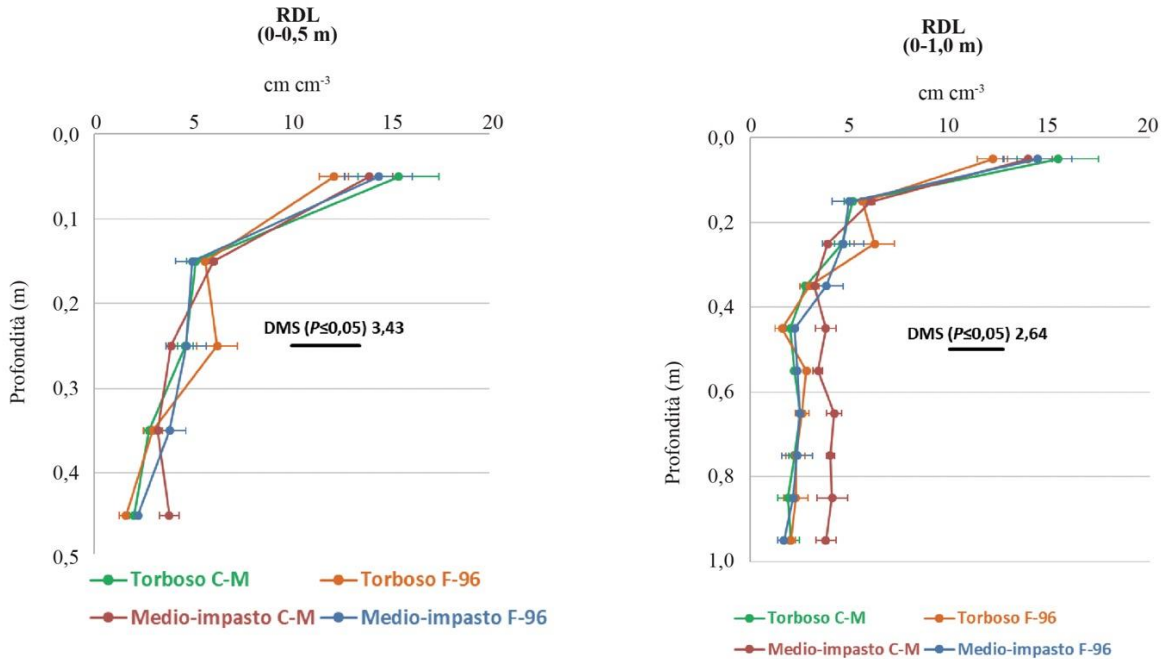


Figura 4.9. Andamento della lunghezza radicale media (RLD, Root Length Density; cm cm⁻³; n=3; ±E.S.) lungo il profilo 0-50 cm (A) e l'intero profilo 0-100 cm (B) delle varie tesi a confronto rilevate tramite carotaggio eseguito in fase di fioritura. DMS: Differenza Minima Significativa) per confronti multipli trattamento × profondità ($P \leq 0,05$).

Nei primi 5-10 cm di terreno la lunghezza radicale era elevata per tutti i trattamenti in entrambi i terreni, per subire poi una brusca diminuzione con l'aumentare della profondità. Nei primi 50 cm, RLD era praticamente simile, senza significative differenze, per tutte le tesi (Figura 4.9 A), mentre nella parte più profonda è stato rilevato un significativo incremento da parte di G-C M-IMP rispetto a tutte le altre 3 tesi che hanno registrato valori simili tra loro (Figura 4.9 B).

4.5.2 Densità di superficie radicale (RAD)

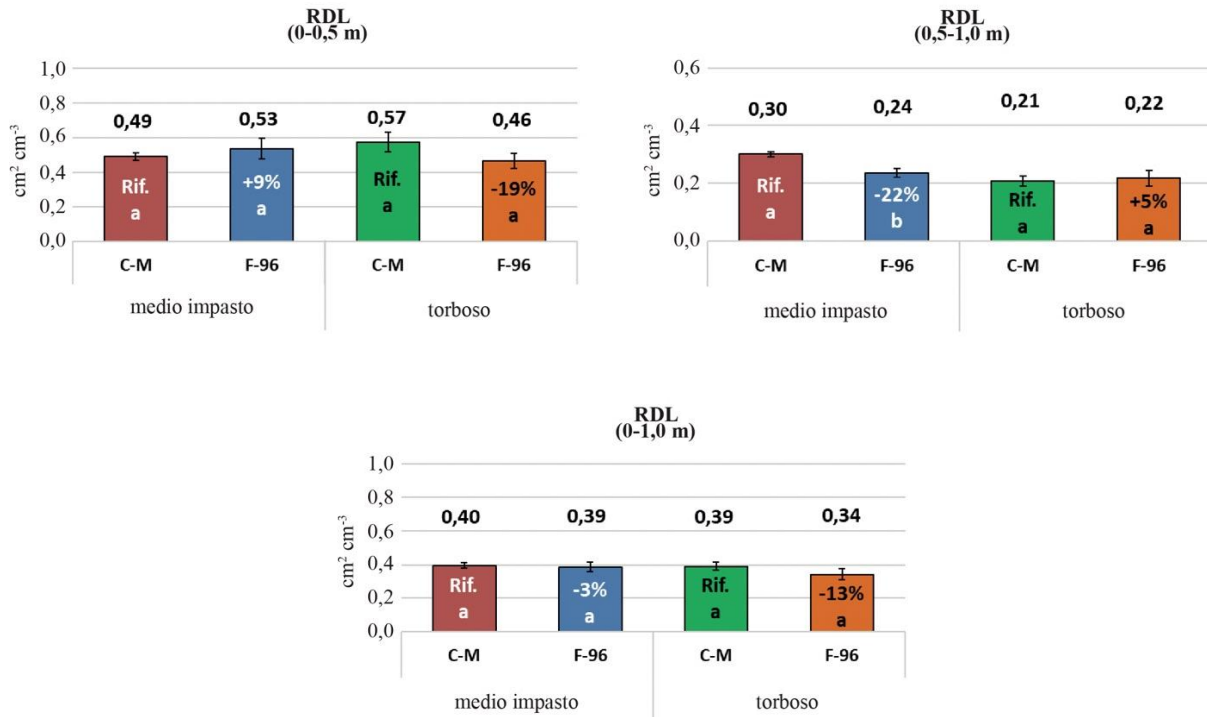


Figura 4.10. Densità di superficie radicale media (RAD, Root Area Density; $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$; $n=3$; $\pm\text{E.S.}$), lungo il profilo di suolo 0-50 cm (A), 50-100 cm (B) e 0-100 cm (C) delle varie tesi a confronto rilevate tramite carotaggio eseguito in fase di fioritura (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$).

Per quanto riguarda la superficie radicale (RAD), i risultati sono stati molto simili alla RLD. Il trattamento fogliare ha evidenziato un comportamento opposto tra i due suoli e nei due macro-orizzonti. Nell'orizzonte superficiale 0-0,5 m, la tesi fogliare ha leggermente aumentato la RAD (+9%) nel terreno di medio-impasto, mentre nel suolo torboso è diminuita del 19% rispetto a G-C, senza tuttavia mostrare differenze dal punto di vista statistico. Nell'orizzonte più profondo, invece, la situazione si capovolge, con F-96 significativamente inferiore del 22% rispetto alla gestione convenzionale nel terreno di medio-impasto, ed un +5% ($P > 0,05$) nel suolo torboso. In generale, nell'intero profilo radicale, il trattamento fogliare ha risentito di una diminuzione non significativa della RAD rispetto a G-C sia nel terreno di medio-impasto che in quello torboso (-3% e -13%, rispettivamente) (Figura 4.10 A).

Una lunghezza e una superficie radicale maggiore rilevata nella gestione convenzionale possono essere correlate al maggior assorbimento del concime azotato granulare, disponibile anche in quantità maggiore rispetto all'irrorazione fogliare. Inoltre, un maggiore sviluppo e accrescimento

radicale in gestione convenzionale possono aver determinato una riduzione della lisciviazione di NO_3^- in profondità.

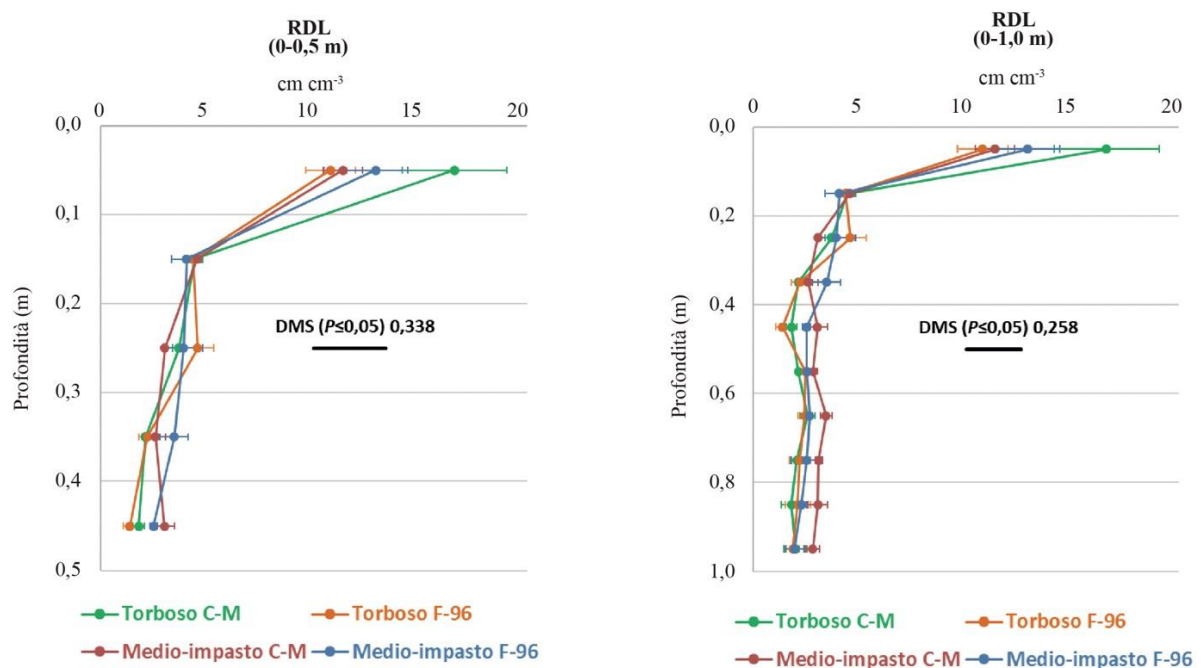


Figura 4.11. Andamento della densità di superficie radicale (RAD, Root Area Density; $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$; $n=3$) lungo il profilo 0-50 cm (A) e l'intero profilo 0-100 cm (B) delle varie tesi a confronto rilevate tramite carotaggio eseguito in fase di fioritura. DMS: Differenza Minima Significativa per confronti multipli trattamento \times profondità ($P \leq 0,05$).

L'andamento della densità di superficie radicale (RAD) lungo i vari orizzonti di suolo ha seguito un trend pressoché simile a quanto registrato per la lunghezza, anche se per questo parametro non sono state riscontrate variazioni o differenze rilevanti dal punto di vista statistico (Figura 4.11 A, B).

4.5.3 Diametro radicale

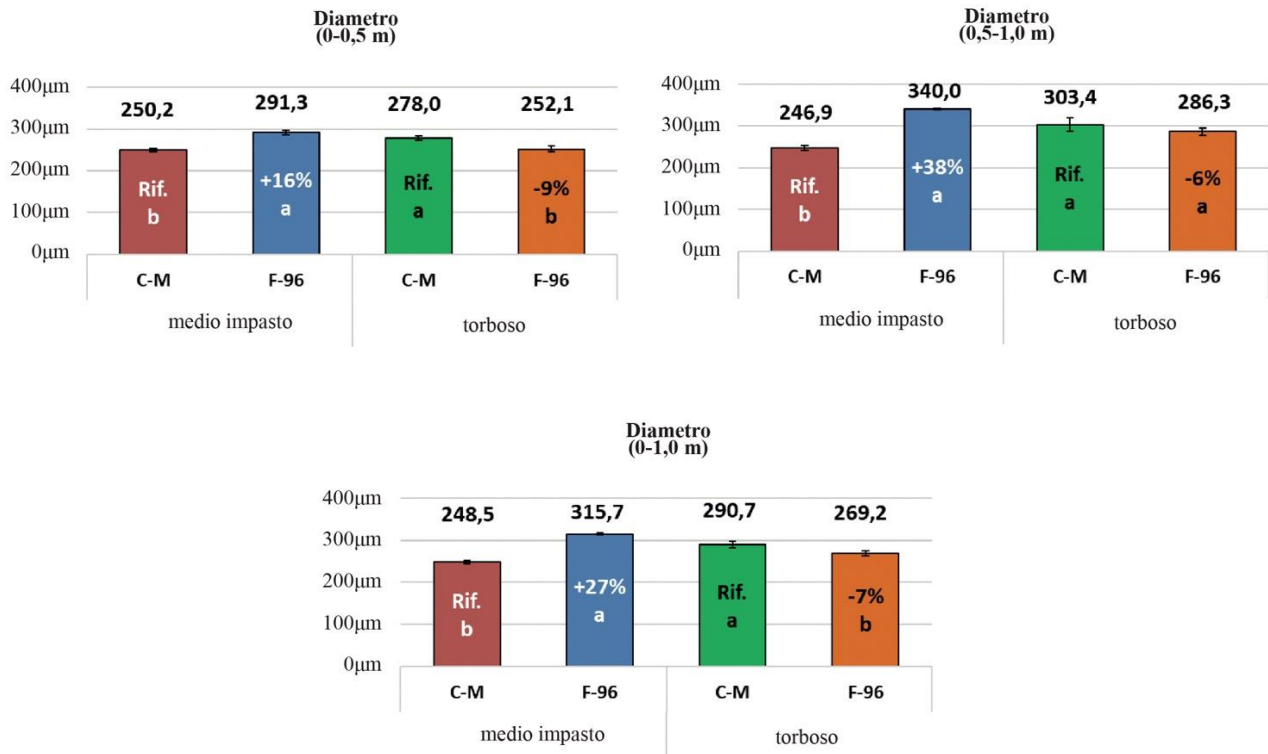


Figura 4.12. Diametro radicale medio (μm ; $n=3$; $\pm\text{E.S.}$), lungo il profilo di suolo 0-50 cm (A), 50-100 cm (B) e 0-100 cm (C) delle varie tesi a confronto rilevate tramite carotaggio eseguito in fase di fioritura (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$).

Come visto per la superficie radicale, anche il diametro radicale ottenuto dalle piante concimate attraverso irrorazione fogliare ha registrato risultati opposti tra i due terreni e negli orizzonti diversi. Nel medio-impasto, si sono riscontrati incrementi significativi di diametro radicale rispetto a G-C sia nell'orizzonte più superficiale (+16%) che in profondità (+38%). Nel terreno torboso, invece, F-96 ha registrato una riduzione del -19% ($P \leq 0,05$) nei primi 50 cm di suolo e un leggero decremento (-6%; n.s.) negli ultimi 50 cm di suolo.

Lungo l'intero profilo, rispetto alla gestione convenzionale F-96 ha determinato un significativo incremento del diametro radicale nel suolo di medio-impasto (+27%) e un decremento significativo (-7%) nel terreno torboso (Figura 4.12 A).

L'elevato incremento del diametro riscontrato dal trattamento fogliare, soprattutto nel terreno di medio-impasto, e in particolar modo negli orizzonti più profondi è correlato negativamente alla lunghezza e alla superficie radicale. Un apparato radicale poco sviluppato e ramificato ed avente discreti valori di diametro, come nella tesi F-96 M-IMP, può aver determinato una minore capacità

di assorbimento dell'azoto e quindi una maggiore lisciviazione di NO_3^- in profondità (Chen *et al.*, 2003).

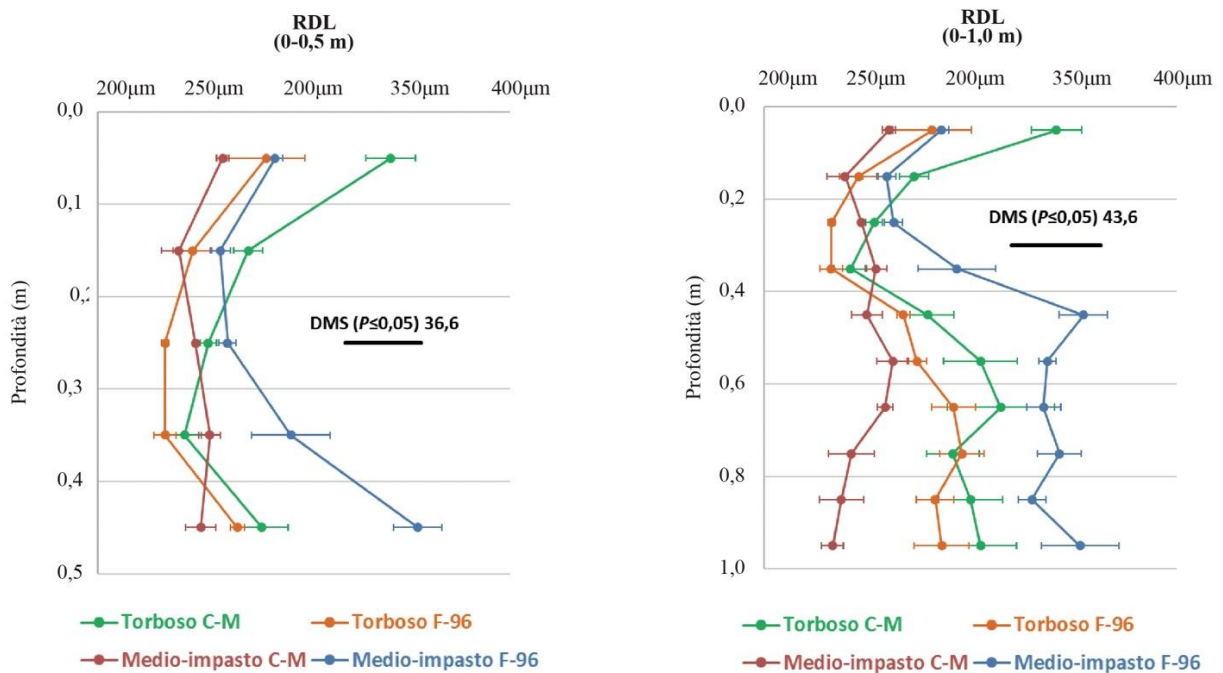


Figura 4.13. Andamento del diametro radicale (μm ; $n=3$; $\pm\text{E.S.}$) lungo il profilo 0-50 cm (A) e l'intero profilo 0-100 cm (B) delle varie tesi a confronto rilevate tramite carotaggio eseguito in fase di fioritura. DMS: Differenza Minima Significativa) per confronti multipli trattamento \times profondità ($P \leq 0,05$).

Significative differenze dei valori di diametro radicale tra tutte le varie tesi sono state riscontrate nei primi 5 cm di suolo e in particolar modo con l'aumentare della profondità dopo i 50 cm (Figura 4.13).

4.5.4 Peso secco dell'apparato radicale

Tabella 4.3. Peso secco dell'apparato radicale raggruppati negli orizzonti 0-0,20; 0,20-0,50 e 0,50-1,0 m (mg cm^{-3} ; $n=3$; \pm E.S.) determinati dopo l'analisi delle immagini radicali (test di Student Newman-Keuls, $P \leq 0,05$).

Tipo suolo	Trattamento	Peso secco (mg cm^{-3}) orizzonte 0-0,20 m		Peso secco (mg cm^{-3}) orizzonte 0,20-0,50 m		Peso secco (mg cm^{-3}) orizzonte 0,50-1,00 m	
Medio-impasto	G-C	0,437 \pm 0,011	b	0,110 \pm 0,015	a	0,107 \pm 0,009	a
	F-96	0,520 \pm 0,033	a (+19)	0,162 \pm 0,033	a (+47)	0,123 \pm 0,005	a (+15)
Torboso	G-C	0,749 \pm 0,128	a	0,092 \pm 0,003	a	0,088 \pm 0,006	a
	F-96	0,450 \pm 0,071	b (-47)	0,110 \pm 0,021	a (+19)	0,100 \pm 0,014	a (+14)

Nel terreno di medio impasto il peso secco delle radici ottenute dalla tesi F-96 è stato maggiore in tutti e tre gli orizzonti, dovuto probabilmente dall'aumento del diametro radicale.

Nel suolo torboso, invece, si è registrata una situazione opposta. Nello strato 0-20 cm, il peso secco della tesi F-96 ha visto una significativa riduzione (-47%; $P \leq 0,05$) rispetto a G-C, mentre negli orizzonti più profondi la concimazione fogliare ha determinato un incremento non significativo rispetto al trattamento convenzionale (Tabella 4.3).

5. Conclusioni

La tesi è finalizzata a valutare gli effetti agronomici e ambientali della concimazione azotata attraverso l'irrorazione fogliare in raffronto alla gestione convenzionale che ad oggi prevede la distribuzione del concime granulare ad un dosaggio elevato.

Nonostante una migliore sostenibilità economica, la riduzione del 40% della quantità di azoto applicata attraverso la concimazione fogliare non ha determinato un'immediata riduzione della lisciviazione di NO_3^- , poiché altri fattori come le condizioni meteorologiche e le caratteristiche chimico-fisiche del suolo la possono influenzare. In questa prova sperimentale, infatti, le modeste precipitazioni registrate durante l'intero ciclo colturale potrebbero aver largamente influenzato i vari parametri, determinando una sottostima della quantità di NO_3^- lisciviato tra le due diverse gestioni della concimazione e tipologia di suolo.

In generale, la gestione convenzionale ha registrato ottimi risultati sia sui parametri epigei che radicali, anche se in un sistema chiuso come può essere la coltivazione in lisimetro.

Nonostante la riduzione del 40% dell'apporto azotato, con la concimazione fogliare si è comunque ottenuta una buona performance agronomica, dimostrando come questa tecnica, avendo la possibilità di applicare contemporaneamente trattamenti di diserbo e difesa, è sfruttabile anche in pieno campo senza una grossa penalizzazione di resa e qualità della granella, traducendosi in un risparmio economico diretto ed importanti vantaggi (riduzione del dosaggio, risparmio economico di concime e lavoro, ecc.).

Date le straordinarie condizioni meteorologiche riscontrate in questa annata, sarebbero necessari esperimenti ripetuti in più annate e in condizioni ambientali più rappresentative, in modo da ottenere degli approfondimenti di conoscenze tra le due diverse gestioni della concimazione azotata, magari testando differenti combinazioni di dosaggi, tempi e concimi.

Bibliografia

- Alley M.M., Scharf P.C., Brann D.E., Baethgen W.E., Hammons J.L. (2009). Nitrogen management for winter wheat: Principles and recommendations. *Virginia Cooperative Extension*, 424-026;
- Aschonitis V.G., Mastrocicco M., Colombani N., Salemi E., Kazakis N., Voudouris K., Castaldelli G. (2012). Assessment of the intrinsic vulnerability of agricultural land to water and nitrogen losses via deterministic approach and regression analysis. *Water Air Soil Pollut.* 223, 1605-1614;
- Ashktorab H., Pruitt W.O., Paw U.K.T., George W.V. (1989). Energy balance determinations close to the soil surface using a micro-Bowen ratio system. *Agric. For. Meteorol.* 46, 259-274;
- Basso B., Ritchie J.T. (2005). Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 108, 329-341;
- Bergström L., Brink N. (1986). Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil. *Plant Soil* 93, 333-345;
- Chen X.M., Shen Q.R., Pan G.X., Liu Z.P. (2003). Characteristics of nitrate horizontal transport in a paddy field of the Tai Lake region, China. *Chemosphere* 50, 703-706;
- Di H.J., Cameron K.C. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 46, 237-256;
- Dong S., Neilsen D., Neilsen G.H., Fuchigami L.H. (2005). Foliar N application reduces soil NO₃⁻-N leaching loss in apple orchards. *Plant Soil* 268, 357-366;
- Ercoli L., Masoni A., Pampana S., Mariotti M., Arduini I. (2013). As durum wheat productivity is affected by nitrogen fertilisation management in Central Italy. *Eur. J. Agron.* 44, 38-45;

- Fageria N.K., Barbosa Filho M.P., Moreira A., Guimarães C.M. (2009). Foliar fertilization of crop plants. *J. Plant Nutr.* 32, 1044-1064;
- Fernandez O.A., Caldwell M.M. (1975). Phenology and dynamics of root growth of three cool semi-desert shrubs under field conditions. *The Journal of Ecology* 703-714;
- Fernandez V., Brown P.H. (2013). From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Front. Plant Sci.* 4, 289;
- Foti S., Tuttobene R. (2000). Metodologie di studio dell'apparato radicale - Metodi distruttivi - Metodo del carotaggio. In: Obiettivo radice: metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G., Vameralli T. (Eds.), Cleup editore, Padova, pp: 98-104;
- Goldman E., Jacobs R. (1961). Determination of nitrates by ultraviolet absorption. *J. Am. Water Works Ass.* 53, 187-191;
- Gooding M.J., Davies W.P. (1992). Foliar urea fertilization of cereals: a review. *Fertil. Res.* 32, 209-222;
- Govi G., Minotta G., De Giorgio D., Bona S. (2000). Metodologie di studio dell'apparato radicale - Metodi conservativi - Rizotroni e minirizotroni. In: Obiettivo radice: metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G., Vameralli T. (Eds.), Cleup editore, Padova, pp: 116-119;
- Grimaldi A. (1954). Il frumento e i cereali affini. In: Coltivazioni erbacee, Edizioni Agricole Bologna, pp: 9-53;
- Gu L., Liu T., Zhao J., Dong S., Liu P., Zhang J., Zhao B. (2015). Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain. *J. Integr. Agric.* 14, 374-388;
- Johnston A.E. (1986). Soil organic matter, effects on soils and crops. *Soil Use Manag.* 2, 97-105;

- Liang X.-Q., Xu L., Li H., He M.-M., Qian Y.-C., Liu J., Nie Z.-Y., Ye Y.-S., Chen Y. (2011). Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed. *Phys. Chem. Earth* 36, 395-400;
- Marangoni B., Toselli M. (2000). I fattori che condizionano l'accrescimento radicale. In: Obiettivo radice: metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G., Vamerli T. (Eds.), Cleup editore, Padova, pp: 39-43;
- Meissner R., Rupp H., Seeger J., Schonert P. (1995). Influence of mineral fertilizers and different soil types on nutrient leaching: results of lysimeter studies in East Germany. *Land Degrad. Rehabil.* 6, 163-170;
- Montemurro F., Convertini G., Ferri D. (2007). Nitrogen application in winter wheat grown in mediterranean conditions: effects on nitrogen uptake, utilization efficiency, and soil nitrogen deficit. *J. Plant Nutr.* 30, 1681-1703;
- Muchow R.C. (1998). Nitrogen utilization efficiency in maize and grain. *Field Crops Res.* 56, 209-216;
- Oliveira M.R.G., van Noordwijk M., Gaze S.R., Brower G., Bona S., Mosca G., Hairiah K. (2000). Auger sampling, in-growth cores and pinboard methods. In: Root growth and function: a handbook of methods. Smith A.L., Engels C., Bengough G., van Noordwijk M., Pellerin S., van de Geijn S. (Eds). Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 175-210;
- Pimentel D. (1996). Green revolution agriculture and chemical hazards. *Sci. Total Environ.* 188, S86-S98;
- Podlasly C., Schwärzel K. (2013). Development of a continuous closed pipe system for controlling soil temperature at the lower boundary of weighing field lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 2157-2163;
- Readman R.J., Kettlewell, P.S., Beckwith C.P. (2002). Effects of spray application of urea fertilizer at stem extension on winter wheat yield. *J. Agric. Sci.* 139, 1-10;

- Rubino P. (2000). Metodologie di studio dell'apparato radicale - Metodi distruttivi. In: Obiettivo radice: metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G., Vamerali T. (Eds.), Cleup editore, Padova, pp: 83-111;
- Seemann J.R., Sharkey T.D., Wang J., Osmond C.B. (1987). Environmental effects on photosynthesis, nitrogen-use efficiency, and metabolite pools in leaves of sun and shade plants. *Plant Physiol.* 84, 796-802;
- Sieling K., Kage H. (2006). N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape - winter wheat - winter barley rotation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 115, 261-269;
- Smith A.L., Sprangers J.F.C.M., Sablik P.W., Groenwold J. (1994). Automated measurement of root length with a three-dimensional high-resolution scanner and image analysis. *Plant Soil* 158, 145-149;
- Smith T.M., Smith R.L. (2009). Elementi di ecologia. 6° edizione, Pearson editore, Milano;
- Takabe M., Yoneyama T. (1989). Measurement of leaf colour scores and its implication to nitrogen nutrition of rice plants. *Jpn. Agric. Res.* 23, 86-93;
- Toderi G. (1982). Frumento (*Triticum* spp.). In Coltivazioni erbacee. Baldoni R., Giardini L. (Eds.), Pàtron editore, Bologna, pp. 15-89;
- Toderi G., D'Antuono L.F. (2001). Frumento (*Triticum* sp. pl.). In: Coltivazioni erbacee - cereali e proteaginose. Baldoni R., Giardini L. (Eds.), Patròn editore, Bologna, pp: 33-108;
- Vamerali T. (2000). Metodologie di studio dell'apparato radicale - Altri metodi. In: Obiettivo radice: metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo. Mosca G., Vamerali T. (Eds.), Cleup editore, Padova, pp: 127;
- Vamerali T., Guarise M., Ganis A., Bona S., Mosca G. (2003). Analysis of root images from auger sampling with a fast procedure: a case of application to sugar beet. *Plant Soil* 101, 387-397;

- Visioli G., Bonas U., Dal Cortivo C., Pasini G., Marmiroli N., Mosca G., Vamerali T. (2018). Variations in yield and gluten proteins in durum wheat varieties under late-season foliar versus soil application of nitrogen fertilizer in a northern Mediterranean environment. *J. Sci. Food Agric.* 98, 2360-2369;
- Wild A., Cameron K.C. (1980). Nitrate leaching through soils and environmental consideration with special reference to recent work in the United Kingdom. *Soil nitrogen as fertilizer or pollutant.*

Sitografia

ISMEA: www.ismeamercati.it (Luglio 2022)

ARPAV: www.arpa.veneto.it (Luglio 2022)