

1. GLI ELEMENTI NUTRITIVI

1.1 Classificazione degli elementi nutritivi

Come è noto, le piante sono organismi autotrofi, in cui la nutrizione è costituita dall'organizzazione della CO₂, attuata per mezzo della fotosintesi e dell'assunzione degli altri elementi nutritivi essenziali attraverso l'assorbimento radicale dell'acqua e dei sali minerali. I vegetali necessitano quindi solo di sostanze semplici e inorganiche per la loro crescita. Di tutti gli elementi presenti in natura, solo una ventina sono oggi ritenuti indispensabili alla vita vegetale; a seconda della loro importanza, possono essere così classificati:

- ❖ **Elementi nutritivi essenziali per tutte le specie vegetali**, che vengono suddivisi, in base alla loro abbondanza relativa nelle piante in due gruppi:
 - I **macroelementi**, presenti nelle piante in quantità mediamente superiori allo 0.1% sulla sostanza secca, che sono, in ordine decrescente di contrazione: C, O, H, K, Ca, Mg, P e S. Di questi, alcuni entrano a far parte integrante del citoplasma e quindi della struttura stessa della cellula vegetale, e sono quindi chiamati macroelementi plastici (C, O, H, N, P e S). I rimanenti si trovano quasi esclusivamente nel liquido cellulare contenuto nei vacuoli, non svolgono funzioni costruttive ma contribuiscono allo svolgimento di fondamentali processi metabolici; questi ultimi sono perciò chiamati **macroelementi dinamici** (K, Ca e Mg) (fig.1)
 - I **microelementi**, detti anche **elementi oligodinamici** sono contenuti in piccole quantità nei vegetali, che non superano di norma lo 0,1%=1000 ppm; essi sono, sempre in ordine decrescente di concentrazione: Fe Cl Mn, Zn, B, Cu e Mo.
- ❖ **Elementi nutritivi essenziali solo per alcune specie vegetali**: alcune piante presentano dei sintomi di sofferenza ascrivibili alla carenza di microelementi, non compresi nell'elenco sopra citato, e che per questi vegetali sono quindi stati riconosciuti come fattori indispensabili alla crescita. Essi sono Na, Se, Si, Co, I e V.

❖ **Elementi nutritivi non essenziali e potenzialmente tossici:** tutti gli elementi che in qualche misura non sono stati trovati, sia pure per caso, nell'analisi della sostanza secca delle piante. Sono in genere elementi che non fanno parte della biosfera ma sono stati introdotti in essa dalle attività antropiche. Vengono quindi considerati inquinanti e possono provocare danni notevoli quando entrano nelle catene alimentari. Rientrano in queste caratteristiche anche molti microelementi considerati essenziali per tutte o per alcune specie vegetali i quali, se presenti in quantità eccessive, possono dar luogo a fenomeni di tossicità. Essi vengono di solito assorbiti in modo passivo dalle radici in quanto contenuti nella soluzione circolante, oppure per via fogliare quando sono azotati nell'atmosfera. A seconda dei danni che possono provocare alle piante e agli animali si possono così distinguere:

- **Elementi zootossici e fitotossici**, come F e As.
- **Elementi zootossici ma non fitotossici**, come Al, Ni, Pb, Cd e Hg.

TAVOLA PERIODICA degli ELEMENTI

The periodic table is color-coded by groups:

- Orange:** GAS (Group 0)
- Light Blue:** LIQUIDI (Groups III A, IV A, V A, VI A, VII A)
- Light Green:** SOLIDI (Groups I A, II A, III B, IV B, V B, VI B, VII B, VIII B, I B, II B)
- Dark Green:** PREPARATI ARTIFICIALMENTE (Groups III B, IV B, V B, VI B, VII B, VIII B, I B, II B)
- Blue:** ELEMENTI DI TRANSIZIONE (Groups III B, IV B, V B, VI B, VII B, VIII B, I B, II B)

Key element details for Gold (Au):

- Numero Atomico (Z): 79
- Massa atomica relativa Ar: 196,9665
- Valenze: [1, 3]
- Elettronegatività: 2,4

Legend:

- Orange box: GAS
- Light Blue box: LIQUIDI
- Light Green box: SOLIDI
- Dark Green box: PREPARATI ARTIFICIALMENTE
- Blue box: ELEMENTI DI TRANSIZIONE

by Bottasso & Ribba ©

Fig.1 - Tavola periodica degli elementi.

2. MACROELEMENTI

2.1 L'azoto e le piante

L'azoto entra nella composizione delle piante in una proporzione che, rapportata al peso secco, è dell'ordine dello 0,5-3% nei tessuti maturi, mentre è più alta (5-6%) nei tessuti giovani. Anche se queste percentuali possono sembrare modeste, l'azoto è l'elemento più rappresentato, dopo C, O e H, nel mondo vegetale, e comunque svolge funzioni di straordinaria importanza per la vita dei vegetali e, quindi, per tutta la biosfera. L'azoto nella pianta è presente essenzialmente sotto forma di proteine (contenenti dal 15 al 17% di N):

- a) **proteine funzionali**, cioè base costitutiva degli enzimi preposti a catalizzare tutti i complessi passaggi ed eventi metabolici che caratterizzano la crescita e lo sviluppo dei vegetali; tra i più importanti ricordiamo gli enzimi preposti alla carbossilazione e che con la loro presenza nei cloroplasti determinano il livello della fotosintesi;
- b) **proteine costitutive** del protoplasma cellulare;
- c) **proteine di riserva**, che si depositano negli organi di propagazione (semi, tuberi) per sopperire ai bisogni iniziali delle piantine che si origineranno da essi;
- d) **lipoproteine** delle membrane, dalle quali dipende il gioco degli assorbimenti e degli scambi tra pianta e suolo e tra cellula e cellula;
- e) **porfirine**, tra le quali importantissima la clorofilla, molecola chiave del processo fotosintetico;
- f) **nucleoproteine e nucleotidi**, responsabili della trasmissione dell'informazione genetica e, conseguentemente, di tutte le sintesi proteiche. Altre forme di azoto possono trovarsi nei vegetali, ma d'importanza limitata o transitoria: azoto nitrico, che si può accumulare nel succo cellulare in attesa di essere ridotto e organicato; azoto cosiddetto «solubile», rappresentato da composti aminici o amidici, in particolare asparagina e glutammina, talvolta abbondanti in radici, bulbi e tuberi; azoto combinato negli alcaloidi e in certi glucosidi, ecc. Considerate tutte queste fondamentali funzioni dei composti azotati e soprattutto il fatto che l'azoto interferisce direttamente e fortemente sul ciclo del carbonio

attraverso la fotosintesi, non fa meraviglia che sia un elemento di efficacia straordinariamente marcata.

Effetti dell'azoto

L'azoto esercita sui vegetali una potente azione di stimolo della crescita: una pianta ben provvista di azoto cresce rapidamente per la veloce moltiplicazione cellulare e allungamento dei tessuti giovani, produce un apparato assimilatore ampio, di colore verde scuro per l'abbondanza della clorofilla, e che rimane verde e funzionale a lungo: tutte sicure premesse per un'attività assimilatoria intensa e prolungata. Inversamente, una pianta carente di azoto cresce stentata e clorotica, assimila poco e per breve tempo, dato che l'apparato fogliare va incontro a senescenza precoce e che la maturazione viene accelerata, con grave compromissione della produttività. È per questo che l'azoto è il fattore nutritivo che maggiormente determina il livello produttivo dei vegetali. Secondo Demolon il limite di produttività di una coltura è dato dalla quantità massima di N che gli può essere utilmente applicata. Il progresso colturale nella maggior parte delle aziende agricole del mondo è condizionato dalla possibilità di aumentare il consumo di azoto (ciò, per lo meno, per tutte le colture non leguminose).

Disponibilità e fabbisogni

Il prelevamento di azoto che una coltura può fare avendone a disposizione è sempre notevole (fino ad alcune centinaia di kg/ha all'anno) mentre la fornitura di azoto da parte del terreno è limitata per lo più ad alcune decine di kg/ha all'anno. Questo divario quantitativo tra esigenze e disponibilità naturali di azoto giustifica due fatti:

- 1) il ruolo di fattore limitante che questo elemento ha in natura;
- 2) l'assoluta necessità di assicurare agli «agroecosistemi» un adeguato «input» di azoto per stimolarne la produttività, sotto forma di concimazioni con concimi azotati di sintesi. C'è poi da considerare il fatto che la fornitura di azoto che un terreno agrario è capace di assicurare, oltre che inadeguata come quantità, è spesso sfasata rispetto al fabbisogno delle colture. Per determinare razionalmente la tecnologia della concimazione azotata è quindi necessario che per ogni coltura si conosca l'andamento (entità e calendario) dei suoi fabbisogni di azoto e l'andamento della fornitura di azoto da parte del terreno. Dalla comparazione dei due andamenti emergerà l'entità e il calendario dell'integrazione da assicurare con la

concimazione azotata. È impostandola su questa base razionale, che la concimazione azotata potrà essere fatta con il massimo di efficienza e quindi di beneficio economico e con il minimo impatto ambientale, nel senso della tutela degli acquiferi da inquinamento di nitrati.

Risposta delle colture all'azoto

A parte le leguminose, che sono autosufficienti, tutte le altre colture non trovano in genere nel terreno azoto in quantità sufficiente a promuovere appieno le loro potenzialità di fotosintesi, tant'è vero che quasi senza eccezione le colture rispondono

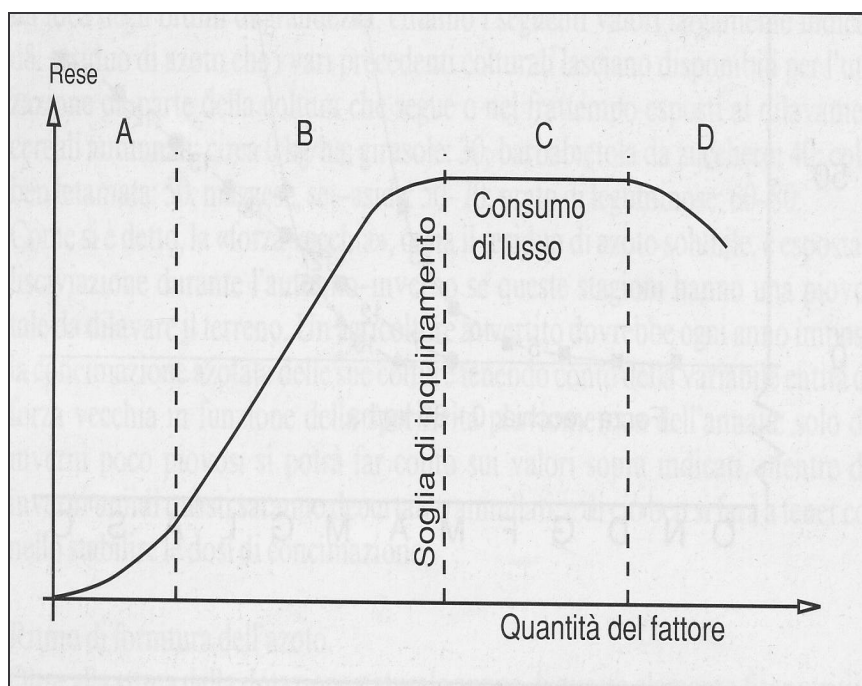


Fig. 2 - Relazione tra resa e disponibilità di un fattore della produzione. A) zona di deficienza acuta; B) zona di deficienza moderata; C) zona di sufficienza; D) zona di tossicità.

alla concimazione azotata con aumenti delle loro rese per ettaro che giustificano questa tecnica dal punto di vista economico.

La risposta delle colture all'azoto è variabile in funzione di molti fattori (specie, varietà, terreno, clima, presenza di altri fattori limitanti, andamento stagionale, ecc.), tuttavia si può tracciarne l'andamento generale con la curva della figura 2

rappresentante la funzione che esprime le variazioni della produzione vegetale all'aumentare della disponibilità di un qualsiasi fattore della produzione. Questa tipica curva di produzione si ripete nel suo andamento generale per ogni fattore produttivo, anche se con particolarità caratteristiche di ognuno. La curva può essere divisa in varie zone.

A. Il tratto iniziale (zona A) corrisponde alla situazione di deficienza acuta ed è formato da una curva con concavità rivolta verso l'alto indicante un effetto meno che proporzionale delle primissime dosi del fattore, e un effetto più che proporzionale delle successive dosi. Nella comune pratica agricola non è frequente che ci si trovi in questa situazione di estrema carenza, dato che nel terreno agrario esiste sempre una certa disponibilità di azoto.

B. La successiva zona B è quella di deficienza moderata, caratterizzata da una curva asintotica, indicante incrementi di resa via via decrescenti man mano che ci si avvicina alla resa massima. È in questa situazione, molto frequente nella pratica, che la concimazione azotata ha la massima importanza.

C. Raggiunta la soglia di sufficienza (zona C) la produzione non cresce più all'aumentare della dose. È in questa situazione che spesso può verificarsi il cosiddetto «consumo di lusso», cioè l'assorbimento dell'elemento nutritivo in quantità superiore al necessario, non accompagnato da aumento di produzione, ma solo da aumento di concentrazione dell'elemento nei tessuti. In certi casi il «consumo di lusso» è vantaggioso. In altri casi l'accumulo può essere nocivo (nitrati nei foraggi, azoto «nocivo» nella barbabietola da zucchero, proteine nell'orzo da birra).

D. Aumentando ulteriormente la dose si può oltrepassare la soglia di eccesso, cioè si possono manifestare diminuzioni di resa provocate da eccesso del fattore. Per l'azoto questa soglia può facilmente essere superata, in quanto si trova piuttosto vicina alla soglia di sufficienza. Nel caso dell'azoto gli effetti negativi prodotti da un'eccessiva disponibilità di questo elemento possono manifestarsi in diverse maniere: calo di produzione dovuto ad allattamento o ad accentuato consumo d'acqua; maggior suscettibilità a certe avversità crittogamiche; accumulo di nitrati nei tessuti verdi (foraggi, ortaggi); peggioramento della qualità tecnologica (eccesso di «azoto nocivo» nelle barbabietole da zucchero, di clorofilla nelle foglie di tabacco, di proteine nell'orzo da birra, ecc.).

Tutto ciò rende evidente che l'uso dei concimi azotati va fatto con oculatezza ed entro limiti ben definiti: ciò per considerazioni economiche non meno che ecologiche.

La concimazione azotata di qualsiasi coltura va fatta tenendo conto della risposta produttiva, del valore degli incrementi realizzabili e del costo della concimazione.

2.2 Fosforo

Funzioni, carenze ed eccessi

Il fosforo ha diversi ruoli nel metabolismo dei vegetali, tutti comunque di importanza fondamentale; a grandi linee, si possono distinguere tre diverse funzioni che questo macroelemento svolge nella vita delle piante:

- una **funzione strutturale**, entrando, soprattutto come H_3PO_4 , nella composizione di alcune importanti sostanze biologiche, quali gli acidi nucleici, i fosfolipidi, i dinucleotidi e il coenzima A.

- una **funzione energetica**, fungendo da trasportatore di energia chimica grazie ai legami che lo ione fosfato forma con alcuni composti organici; l'esempio più importante di questo ruolo svolto dal fosforo è quello del complesso ADP/ATP, che costituisce il veicolo principale di trasporto dell'energia in tutti gli organismi viventi.

- una **funzione enzimatica**, entrando nella composizione della parte coenzimatica di buona parte degli enzimi che intervengono nel metabolismo dei carboidrati.

Conseguenze delle carenze e degli eccessi:

La **carenza** di fosforo, come quella dell'azoto, implica sintomi generalizzati.

La prima conseguenza è la ridotta sintesi degli acidi nucleici e dell'ATP che si ripercuotono direttamente sull'entità della sintesi proteica, per cui si verifica un aumento dei composti azotati a basso peso molecolare. La riduzione dell'ATP deprime in pratica tutti i processi metabolici. I sintomi più evidenti della carenza di fosforo sono una ridotta crescita e una drastica diminuzione dello sviluppo di frutti e semi, che risultano anche di qualità scadente. Le piante si presentano più piccole rispetto alla norma, con fusto esile e poco ramificato e apparato radicale poco sviluppato. Le foglie, a partire da quelle più vecchie, appaiono più verdi rispetto alla norma. La maturazione dei frutti viene ritardata, specie se la carenza di fosforo è associata a un relativo eccesso di azoto.

L'eccesso di fosforo ha in generale effetti opposti a quelli dell'eccesso di azoto; infatti esso provoca uno sviluppo più elevato dell'apparato radicale rispetto alla parte aerea e una maturazione anticipata dei frutti.

2.3 Zolfo

Funzioni, carenze ed eccessi

Le **funzioni** che lo zolfo svolge nel metabolismo delle piante sono molteplici; tra le più importanti ricordiamo:

- È un componente degli amminoacidi solforati, la cisteina e la metionina, e perciò entra a far parte di tutte le proteine, nelle quali, mediante i ponti disolfuro, contribuisce a creare la struttura terziaria.
- Fa parte di molti enzimi, tra cui il coenzima A e molti enzimi trasportatori di H, nei quali il gruppo -SH costituisce spesso il sito attivo. In altri, come alcune vitamine del gruppo **B**, lo zolfo è compreso nella struttura eterociclica del composto. Risulta essenziale anche nella sintesi della clorofilla.

In alcune piante, inoltre, lo zolfo entra a far parte di alcuni ormoni e di composti volatili, come i **mercaptani** che conferiscono un odore caratteristico, spesso poco gradevole; è il caso ad esempio dell'aglio e della cipolla e del cavolo.

Conseguenze delle carenze e degli eccessi:

La **carenza** di zolfo, dato che anch'esso è un componente essenziale delle proteine, causa una sintomatologia simile a quella della carenza di azoto: interferisce con la crescita delle piante e provoca una diffusa clorosi, essendo coinvolto nella formazione dei cloroplasti. Può provocare anche un accumulo di nitrati nelle foglie, perché inibisce la loro trasformazione in azoto proteico.

L'**eccesso** di zolfo (sotto forma di SO_2 , SO_3 e SO_4^{2-}) favorito dalle piogge acide, determina una progressiva acidificazione dei suoli e delle acque interne, oltre a provocare danni diretti alla vegetazione.

2.4 Potassio

Funzioni, carenze ed eccessi

Le **funzioni** del potassio sono collegate soprattutto alla sua presenza nelle soluzioni cellulari; questo elemento infatti si trova in prevalenza nei vacuoli e nonostante questo, è rappresentato in abbondanza nella sostanza secca. I ruoli principali che il potassio svolge nel metabolismo vegetale sono i seguenti:

- È un importante **attivatore enzimatico**, trovandosi associato ai siti attivi di molti enzimi che intervengono nella sintesi delle proteine, dell'amido e di altre macromolecole organiche. Esso presiede anche al mantenimento dell'equilibrio tra la produzione di carboidrati e quella di proteine.

- Agisce come **regolatore dell'equilibrio osmotico** della cellula vegetale, determinandone il turgore e normalizzando il processo di traspirazione. Una discreta ricchezza di K nell'acqua cellulare presente all'interno dei vacuoli aumenta quindi la resistenza al gelo e alla siccità

- **Regola il processo fotosintetico**, agendo in due modi distinti: da un lato è stato accertato che un aumento del tasso di K nelle cellule di guardia accompagna sempre l'apertura degli stomi; dall'altro questo elemento determina l'entità della traslocazione degli elaborati fotosintetici dalle foglie alle altre parti della pianta.

- Costituisce un fattore che incide molto sulla qualità e sulla serbevolezza dei prodotti, specialmente per alcuni come il tabacco, dove le proprietà organolettiche come sapore, colore, consistenza, profumi, sono determinati per le caratteristiche qualitative del prodotto finale.

Conseguenze delle carenze e degli eccessi:

La **carenza** di potassio si manifesta soprattutto per la formazione di zone necrotiche localizzate sui margini e sulle punte delle foglie, a partire da quelle più vecchie. Inoltre essa determina un aumento in sostanze azotate a basso peso molecolare (soprattutto amminoacidi e ammine) che inducono, in molte piante alimentari, un peggioramento della qualità del prodotto e, a volte, anche una riduzione delle rese. La comparsa di questi fenomeni negativi è spiegata con la formazione di putrescine, dovuta appunto all'accumulo di amminoacidi e ammine nelle foglie.

L'**eccesso** di potassio può indurre una carenza relativa di altri cationi nutritivi, in particolare Ca e Mg.

2.5 Magnesio

Funzioni, carenze ed eccessi

Il magnesio è il macroelemento cationico meno rappresentato nella composizione delle cellule vegetali; nonostante ciò svolge un insieme di ruoli metabolici essenziali, sicuramente di maggiore importanza rispetto a quelli del calcio, che pure viene assorbito dalle piante in quantità molto più elevate. Nel terreno il catione scambiabile Mg^{++} è considerato un vicariante di Ca^{++} , in quanto svolge le stesse funzioni di quest'ultimo; il rapporto Ca/Mg nel suolo è di solito 10 - 12, ma può variare entro ampi margini in una direzione o nell'altra.

Le principali **funzioni** biologiche del magnesio sono le seguenti:

- È un **costituente fondamentale della clorofilla**, nella quale è posto al centro dell'anello porfirinico. La quota di magnesio presente nella clorofilla non supera tuttavia il 10 – 20% del totale.

- È un **attivatore enzimatico** tra i più importanti, in quanto interviene in quasi tutte le reazioni che coinvolgono il sistema ADP /ATP ed altri nucleotidi; interagisce in modo sinergico con gli enzimi della catena respiratoria e svolge un ruolo essenziale, nella biosintesi delle proteine. Il magnesio risulta inoltre indispensabile per l'attività dei due principali enzimi che intervengono nella fissazione dell'anidride carbonica durante la fotosintesi.

Conseguenze delle carenze e degli eccessi:

Le **carenze** di magnesio si manifestano a partire dalle foglie più vecchie con la formazione di aree clorotiche e, spesso, con il ripiegamento dei margini fogliari verso l'alto; con il progredire dello stato di carenza si può verificare una filloptosi precoce. Più di rado si possono rilevare pigmentazioni anomale e punti necrotici.

Gli **eccessi** di magnesio sono poco conosciuti, dato che l'assorbimento di questo elemento risente molto della competizione con gli altri cationi nutritivi (soprattutto K e Ca).

3. MICROELEMENTI

L'importanza del ruolo degli oligoelementi o microelementi nell'alimentazione minerale delle piante coltivate risulta crescente con l'intensificazione produttiva delle colture di pieno campo.

I sempre più frequenti danni dovuti a carenze devono essere prevenuti o perlomeno corretti. Oggi la conduzione di una coltura non può più essere fatta senza tener conto del ruolo dei microelementi.

La loro caratteristica principale è quella di essere indispensabili alle piante, ma solamente in piccola quantità: qualche chilo per ettaro e per anno. Nonostante i microelementi possano essere presenti in grande quantità nella roccia madre e nei terreni, essi non sono sempre sufficientemente disponibili per le piante; i fattori che ne limitano la disponibilità sono numerosi. In particolare, la disponibilità dipende in misura notevole dalle condizioni del substrato: le carenze di ferro compaiono nei suoli calcarei, il manganese è maggiormente disponibile nei suoli compatti e lo zinco è molto meno assimilato dalle piante durante il periodo freddo e umido. D'altra parte, esistono numerose piante che risultano molto sensibili ad alcune carenze: la barbabietola e il girasole al boro, i cereali a paglia al rame e al manganese, il mais allo zinco.

Gli apporti dei microelementi alle colture non devono essere sistematici, ma ben ragionati. Ciò esige una individuazione delle situazioni a rischio, che ha come premessa la conoscenza delle condizioni in cui si manifestano le carenze. Studiare le caratteristiche del suolo diviene, quindi, fondamentale. È necessario appoggiarsi all'analisi del suolo e quindi interpretarla, su base regionale e per tipo di terreno. I bisogni delle colture sono conosciuti per ogni specie. L'individuazione dei sintomi delle carenze più tipiche è necessaria; così come è possibile basarsi sull'analisi vegetale. Alcuni lavori recenti propongono, per coltura, delle norme di interpretazione sulla base della diagnostica fogliare.

Le dosi di apporto dipendono direttamente dalla scelta del tipo di prodotto. Le modalità di apporto devono essere idonee: al suolo o per via fogliare. Ad esempio, la carenza dello zinco su mais può essere più facilmente controllata con degli apporti al suolo eseguiti prima della semina. Correzioni con concimazione fogliare saranno preferibili nel caso della carenza del manganese. I controlli sull'efficacia dell'apporto possono venire effettuati a posteriori, con i

metodi tradizionali di analisi (foglie e suolo). Prove di campo permettono di valutare gli effetti sulla resa e quindi indicare probabilità di risposta della coltura agli apporti di microelementi.

Sebbene i microelementi siano presenti in quantità ridotta nei vegetali, essi giocano dei ruoli fondamentali nella vita della pianta; ciò viene anche dimostrato dalle sintomatologie connesse con fenomeni di carenza. Tuttavia risulta insufficiente limitarsi alla trattazione delle sole carenze che sono spesso riconducibili a dei forti squilibri nell'attività fisiologica.

Le piante assorbono i microelementi prevalentemente sotto forma ionica: cationi (Fe^{++} , Cu^{++} , Mn^{++} , Zn^{++}) e anioni (BO_3H^- , MoO_4^{--}). Questi ioni si fissano nei siti specifici di grosse molecole organiche, chiamate enzimi, in tutte le funzioni metaboliche.

3.1 Ferro

Il ferro presenta un potenziale redox elevato. Esso svolge un ruolo molto importante in tutte le funzioni metaboliche che implicano reazioni di ossido-riduzione. Il ferro è presente nei citocromi, nelle citocromo ossidasi, nella ferridossina, nelle reduttasi, ecc. . Interviene, quindi, nella respirazione, nella sintesi della clorofilla, nella fotosintesi, nel metabolismo delle proteine, nella fissazione dell'azoto e nella riduzione dei nitrati.

3.2 Manganese

Il ruolo del manganese è ugualmente fondato sulle reazioni di ossido-riduzione. È anche un importante regolatore dell'azione enzimatica, ma le sue funzioni non sono sempre specifiche. Inoltre, interviene nella fotosintesi, nella fase dell'idrolisi dell'acqua ed ha un ruolo importante durante lo stadio finale della riduzione dei nitrati.

3.3 Zinco

Lo zinco è il più delle volte un cofattore degli enzimi ed interviene, quindi, con questo ruolo nella sintesi degli acidi nucleici e delle proteine e nel metabolismo delle auxine.

3.4 Rame

Il rame entra nella composizione di numerosi enzimi ed agisce, in particolare, nella fase delle ossidazioni finali. Interviene inoltre nella fotosintesi, tramite la plastocianina, nel metabolismo delle pareti cellulari, nella fissazione dell'azoto e nella sintesi delle proteine.

3.5 Boro

Il boro risulta indispensabile in molte attività funzionali alla vita delle piante; la sua carenza provoca, il più delle volte, gravi disturbi di funzionamento. Il boro interviene nella fase di crescita meristematica, nel trasporto e nell'utilizzazione dei glucidi. Inoltre partecipa alla sintesi delle proteine e al metabolismo degli acidi nucleici e dei fitormoni.

3.6 Molibdeno

Il molibdeno interviene soprattutto a livello degli enzimi importanti nella fase della riduzione dei nitrati e nella fissazione dell'azoto.

3.7 Fabbisogni delle piante

I fabbisogni delle piante in microelementi dipendono, come per gli elementi maggiori, dai livelli delle rese.

Possono essere determinati dalla produzione in sostanza secca della pianta e dalla loro concentrazione.

Contenuto delle piante in microelementi

I contenuti delle piante in microelementi dipendono dalle disponibilità del suolo e dalle condizioni di assimilazione. Essi variano naturalmente nel corso del ciclo vegetativo. Spesso si nota un calo di concentrazione dovuto alla diluizione durante i periodi di crescita intensa. Le interazioni con altri elementi sono importanti. È opportuno notare le forti differenze esistenti secondo la specie e la varietà. Generalmente i contenuti in Fe e Mn sono superiori a quelli in Zn e B (tab. 1), che sono a loro volta di gran lunga superiori a quelli in Cu mentre i contenuti in Mo sono molto bassi.

Tabella 1- Contenuto in microelementi (ppm materia secca) di diverse piante coltivate (Trocmé, 1960 e Lépine, 1980)

		Mn	Zn	Cu	B	Mo
Cereali	granella	30-80	20-50	4-8	2,5-8	0,2-0,5
	paglia	20-70	30-50	3-6	1-8	0,2-0,4
Mais	granella	10-20	20-50	3-6	10-20	0,2-0,5
	paglia	20-60	30-60	—	—	—
Patata	tuberi	4-10	8-16	5-8	8-15	0,2-0,4
Barbabietola	radici	10-15	5-10	6-10	15-20	—
	foglie	30-50	5-30	3-5	35-50	—
Colza	granella	40-50	35-40	3-6	15-20	—
Leguminose	foraggere	50	20	10	20-50	0,7-3
Graminacee	prative	75-100	20	5-10	10	0,5-3

Asportazioni colturali

È interessante conoscere le asportazioni delle piante. La tabella 2 da un ordine di grandezza. Si può prendere in considerazione in linea di massima le seguenti quantità medie: 500 g Mn, 250 g Zn, 200 g B, 80 g Cu, 5-10 g Mo per ettaro e per anno.

Tabella 2- Asportazioni colturali in g/ha (fonte Inra)

		t/ha prodotti	materia secca %	t/ha m.s.	Mn	Zn	Cu	B	Mo
Cereali	granella	5,7	88	5	150-400	100-250	20-40	12-40	1-2,5
	paglia	5,7	88	5	100-350	150-250	15-30	5-40	1-2
	totale				250-750	250-500	35-70	17-80	2-4,5
Mais	granella	10	85	8,5	35-90	150-250	5-30	—	—
	parti vegetative corrispondenti				250-600	150-350	20-60	—	—
	totale				285-690	300-600	25-90	40-50?	3-4?
Patata	tuberi	50	22	11	45-110	90-180	55-90	90-170	2,2-4,4
Barbabietola	radici	60	22	13,2	130-190	65-130	80-130	190-260	—
	verde	40	14	5,6	170-280	30-170	17-30	200-280	—
	totale				300-470	95-300	97-160	390-540	—
Erba medica			10	500	200	100	200-500	7-30	
Alberi da frutto		40 + accrescimento annuale			125	250	125	200	—
Vite	uva	100 hl + foglie a tralci			80-160	100-200	60-120	80-150	0,3-1

3.8. Comportamento dei microelementi nel suolo

I microelementi sono il più delle volte presenti in grande quantità nel suolo in raffronto ai bisogni delle piante (tab. 3).

Tabella 3- Tenore e quantità dei microelementi nel suolo

	Valore medio	Per 3000 t/ha
Mn	200-3000 ppm	600-9000 kg
Zn	10-300 ppm	30-900 kg
Cu	3-100 ppm	9-300 kg
B	5-100 ppm	15-300 kg
Mo	0,5-5 ppm	1,5-15 kg
Fe	da 200 ppm al 10%	da 600 kg a 300 t

Questi valori dipendono fortemente dalla composizione della roccia madre e dalla sua evoluzione pedogenetica. Ma l'analisi dei microelementi totali nel suolo da poche informazioni sulla loro disponibilità per le piante.

Per questo è importante conoscere il loro comportamento nel terreno.

Le differenti quote dei microelementi nel suolo

Classicamente sono distinte nel suolo 5 quote di microelementi, che rappresentano differenti stati chimici a cui corrispondono spesso delle disponibilità differenziate.

1. I microelementi nella soluzione del suolo: Piccole quantità di microelementi sono presenti nelle soluzioni del suolo essenzialmente sotto forma ionica. Questo stato dipende molto dal pH che determina la presenza dello ione o la sua forma di idrossido. D'altra parte, i microelementi possono essere chelati da molecole organiche solubili, in funzione della costante di stabilità del complesso ione agente chelante.

2. La quota scambiabile: Quantità nettamente più importanti di elementi cationici (Fe, Mn, Cu, Zn) sono presenti sotto forma scambiabile, cioè legati tramite cariche elettriche al complesso argillo-umico. I microelementi scambiabili sono più energicamente legati al suolo e sono dunque meno assimilabili che le basi scambiabili (K, Mg, Ca, Na).
3. I microelementi adsorbiti, chelati o complessati: I microelementi sono spesso dei metalli di transizione capaci di formare dei complessi con dei leganti generati dalla materia organica. Quantità notevoli di microelementi si trovano così legati con assimilabilità variabile.
4. I minerali argillosi e gli ossidi metallici insolubili: I microelementi costitutivi delle argille sono liberati molto lentamente. Sotto forma di ossido possono essere presenti in quantità notevole; una parte di questi può essere assimilabile.
5. I minerali primari :Sono gli elementi costitutivi dei minerali. Non sono disponibili per le piante. Le tre prime quote dei microelementi sono in equilibrio. Rappresentano piccole quantità in rapporto agli elementi totali. In compenso sono loro che assicurano l'alimentazione delle piante.

Fattori di assimilabilità dei microelementi

L'assimilabilità dei microelementi si può misurare per mezzo di reattivi chimici appropriati, la cui forza di estrazione è simile a quella delle piante. Altre determinazioni possono essere effettuate direttamente su delle piante coltivate in vasi di sabbia.

Numerosi fattori influenzano questa assimilabilità. I più importanti sono il pH, la sostanza organica, la tessitura, il regime idrico, le condizioni d'ossidazione/riduzione.

1. Il pH: influenza fortemente l'assimilabilità degli elementi nutritivi. Per i microelementi la sua importanza è fondamentale. L'aumento del pH riduce la concentrazione in soluzione e l'assorbimento di Fe, Cu, Zn, Mn e **B**; aumenta quello del Mo, come mostrano le figure 3 e 4. Il ferro è assimilabile dalle piante sotto forma di Fe^{++} , che è relativamente stabile nei terreni solo a pH bassi. D'altra parte, in terreno calcareo, gli

ioni HCO_3^- ostacolano l'assorbimento del ferro da parte delle piante. L'effetto pH è dunque particolarmente importante per questo elemento. L'assimilabilità di manganese, zinco e rame è diversamente influenzata dal pH dei terreni; il più sensibile è il manganese. Il molibdeno è senza dubbio il più condizionato dal pH. L'acidità dei suoli è sufficiente a provocare delle carenze in questo elemento. In compenso, l'assorbimento è forte in suoli alcalini e può provocare delle tossicità (soprattutto per gli animali che ingeriscono i foraggi che crescono su tali terreni).

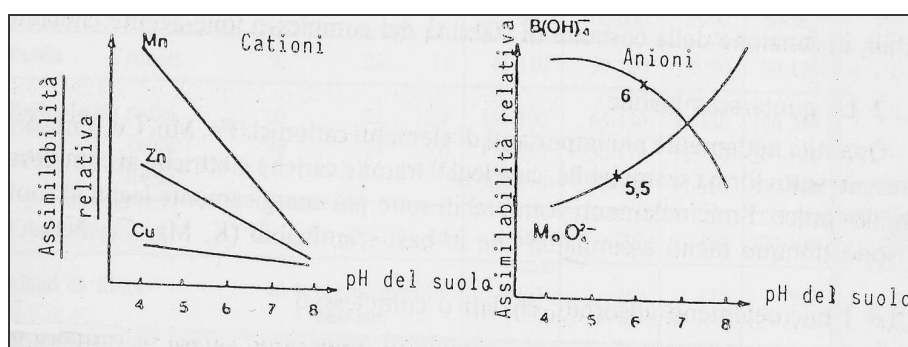


Figure 3 e 4 – Relazione fra l'assimilabilità dei microelementi e il pH del suolo.

2. La sostanza organica: La sostanza organica del suolo contiene un'abbondante quantità di microelementi assimilabili. Essa gioca dunque un ruolo molto importante nella nutrizione delle piante. Così i terreni poveri in sostanza organica possono presentare delle reali carenze in microelementi. Inversamente, i suoli molto ricchi possono porre qualche problema. Più dei tre quarti degli ioni Cu, Zn e Mn assimilabili dalle piante lo sono sotto forma complessata con la sostanza organica. Una parte si trova legata a delle molecole organiche di basso peso molecolare, solubili, che assicurano il trasporto dei microelementi verso i siti di assorbimento delle piante. Una parte, generalmente la più importante, è complessata dalle molecole organiche insolubili ed è, di conseguenza, non assimilabile. I composti a forte potere chelante sono numerosi: acidi organici, polifenoli, amminoacidi, proteine, polisaccaridi. È possibile determinare le costanti di stabilità di tali complessi che dipendono dalla natura dell'elemento, dalla sostanza e dalle condizioni del mezzo (soprattutto il pH).

Queste sono inferiori alla stabilità dei complessi ottenuti con degli agenti chelanti di sintesi.

3. Lo stato di ossidoriduzione: Le condizioni di ossidoriduzione intervengono soprattutto sulla disponibilità di Fe e Mn. Generalmente le condizioni riducenti, indotte da tenori in acqua elevati, aumentano la concentrazione della soluzione e dunque la disponibilità in Mn e Fe. Ma queste condizioni, risultanti spesso da un cattivo drenaggio, ostacolano una crescita normale del sistema radicale. L'effetto globale può essere una nutrizione meno buona.
4. Le condizioni meteorologiche. Il tenore in microelementi delle piante e l'assorbimento subiscono forti variazioni stagionali. Le temperature più elevate inducono forti assorbimenti. Per contro, le primavere fredde ed umide favoriscono spesso le carenze. Si parla di annate di clorosi ferrica o di annate di carenza in rame, ecc. L'attivazione della microflora del suolo da parte della temperatura è verosimilmente il fattore più esplicativo. Ma il manganese, per la sua sensibilità alle condizioni di ossido-riduzione, è l'elemento che subisce di più le influenze stagionali.

Le interazioni tra elementi nutritivi

Le interazioni tra elementi si traducono spesso in carenze indotte di microelementi o, qualche volta, in assorbimenti eccessivi. La tabella 4 riassume le principali interazioni.

Tra i microelementi, le interazioni con il fosforo sono le più numerose: una elevata disponibilità di fosforo nel suolo si può tradurre in carenze indotte di ferro, rame e soprattutto zinco. L'azoto gioca sovente un ruolo indiretto per le forti crescite che esso induce. Tra i microelementi conviene notare, in particolar modo, gli antagonismi tra ferro e manganese e tra rame e zinco.

Tabella 4 Principali interazioni tra elementi nutritivi suscettibili in grado di condizionare l'assimilabilità (o l'assorbimento o l'utilizzazione) dei microelementi in senso positivo (aumento) o negativo (diminuzione)

Microelemento	Effetto dei macroelementi	Effetto degli altri microelementi
Ferro	P negativo, K variabile (piuttosto positivo)	Mn, Cu, Zn, Mo piuttosto negativo in ordine decrescente
Manganese		Fe molto negativo
Zinco	P molto negativo N variabile	Interrelazione con il Fe nella pianta
Rame	N e P negativi	Zn poco negativo
Boro	N negativo, P positivo K variabile, Ca negativo	Poco importanti; Mn leggermente positivo; deficienza di Cu con effetto negativo sulla pianta
Molibdeno	P positivo, S negativo	Fe nettamente negativo; Mn e soprattutto Cu negativo

Trasporto dei microelementi dal suolo alla radice

Il trasporto dei microelementi dal suolo verso le radici differisce poco da quello degli altri elementi ed avviene essenzialmente attraverso un flusso convettivo e diffusivo.

La convezione (chiamata mass flow) è il trasporto di uno ione attraverso il movimento dell'acqua indotto dall'assorbimento radicale. La diffusione è il movimento degli ioni da una zona a forte concentrazione ad una zona a più debole concentrazione, senza che ci sia necessariamente movimento d'acqua.

Un'originalità dei microelementi deriva dal fatto che un'abbondante percentuale è complessata. Il loro movimento, dunque, dipende fortemente da quello delle molecole organiche. Un aumento della concentrazione in molecole organiche solubili aumenta la concentrazione in microelementi della soluzione del terreno. Il gradiente di diffusione più elevato induce un flusso notevole, anche se la dimensione notevole delle molecole organiche può abbassare un po' il coefficiente di diffusione dell'elemento nel terreno. Inoltre la sua reattività nei confronti del suolo diminuisce e la sua concentrazione nella soluzione del suolo probabilmente aumenta. Così, allorché lo ione è chelato, il movimento di diffusione è generalmente attivo.

L'assorbimento radicale può essere attivo o passivo a seconda che faccia intervenire o non il metabolismo della pianta. Per Fe e Mn l'assorbimento è soprattutto attivo. Questo sembra meno importante per Cu e Zn, mentre l'assorbimento del boro sarebbe piuttosto passivo.

Assorbimento fogliare

Gli apporti di microelementi sono spesso effettuati per via fogliare. È dunque importante conoscere il modo in cui possono penetrare nelle foglie e quali sono i fattori che favoriscono questo assorbimento.

La prima barriera che un microelemento deve superare al momento del suo assorbimento fogliare è la cuticola, un rivestimento protettore lipidico extracellulare specifico degli organi aerei. È stato dimostrato con l'aiuto di radioisotopi che ferro, rame, zinco e manganese vengono rapidamente fissati dalla cuticola. Il rame è fissato dalla cuticola in misura maggiore dello zinco; il manganese è quello meno fissato.

La diffusione all'interno della foglia avverrebbe attraverso un semplice fenomeno passivo che pone in gioco i gradienti di concentrazione. Questo trasporto dipende dunque dalla carica elettrica dei microelementi, dal pH, dal grado di assorbimento e dal loro raggio ionico (dimensione).

La penetrazione per via fogliare può avvenire solo se il prodotto apportato è effettivamente intercettato e trattenuto dalla superficie fogliare. Questo dipende dalla rugosità della superficie fogliare, ma anche dall'attitudine bagnante del prodotto apportato.

La forma chimica del microelemento apportato può avere importanza sull'assorbimento fogliare.

La chelazione del ferro ha un effetto positivo sulla sua mobilità a partire dalle foglie. Il pH della soluzione utilizzata induce dei fenomeni simili a quelli che si possono osservare nel terreno.

Così l'acqua alcalina favorisce la formazione di idrossidi, in particolare per il ferro.

La concentrazione della soluzione è importante poiché si è in presenza di fenomeni di diffusione. Si deve tener conto dei problemi d'antagonismo tra elementi a livello della foglia; ad esempio, esistono sulla superficie della foglia dei fenomeni di competizione fra rame e zinco. Anche gli ioni calcio entrano così in competizione con gli altri cationi. L'età delle foglie

influenza fortemente l'assorbimento: esso è generalmente superiore nelle giovani foglie che hanno una cuticola più fine e un metabolismo più attivo.

Trasporto dei microelementi nella pianta

Le difficoltà di trasporto dei microelementi nella pianta, regolato da alcuni principi a volte ancora poco conosciuti, possono spiegare le cause di carenze.

Passaggio dall'apoplasma radicale allo xilema

Il passaggio dell'acqua e dei microelementi dalla soluzione del terreno allo xilema (vasi legnosi conduttori della linfa grezza) avviene attraverso l'apoplasma radicale (spazio aperto costituito di pareti cellulari di corteccia e di spazi intercellulari). Molti fenomeni sono implicati: sembra esserci un trasporto passivo tranne che a livello della banda del Caspari, in cui si avrebbe un trasporto attivo.

Trasporto nello xilema

Il trasporto nello xilema è legato principalmente al movimento dell'acqua delle radici verso gli organi aerei. Il flusso di microelementi è dunque unidirezionale. Nel corso del loro trasporto verso gli organi aerei si possono verificare degli scambi di cationi con i tessuti circostanti. In linea di massima, nei momenti di forti flussi radicali, gli scambi sono nella direzione xilema-tessuti; sono inversi in periodi di scarsa attività radicale, in modo da permettere alle piante di mobilitare degli elementi stoccati nei loro tessuti. Tuttavia l'effetto della traspirazione è importante e nelle piante molto attive si nota un aumento delle concentrazioni a partire dai culmi verso l'estremità delle foglie: è tipico il caso del boro, per il quale i sintomi di tossicità si localizzano principalmente ai margini delle foglie.

D'altra parte, ai vari livelli di questo trasporto, i microelementi possono essere ritardati o bloccati. Si possono avere delle competizioni fra elementi: è il caso di MoO_4^- e di SO_4^- che hanno la stessa dimensione, lo stesso dicasi per Cu e Zn. Il ferro può precipitare sotto forma di fosfati di ferro. Quindi è possibile una traslocazione negativa degli elementi: così si spiega l'accentuarsi della carenza di zinco, legata ad una disponibilità troppo grande di fosforo nel suolo.

Trasporto nel floema

Il floema trasporta la linfa elaborata che contiene i metaboliti e una certa quota di microelementi. Il trasporto nel floema è bidirezionale, il che permette delle ridistribuzioni di elementi nella pianta. Alcune ricerche hanno permesso di conoscere la mobilità dei microelementi nel floema ed è stato possibile stabilire una classificazione.

Sintomi di carenze

Nei casi di carenze di microelementi sono spesso le parti più giovani della pianta ad essere colpite; ciò dimostra la debolezza dei fenomeni di rimobilitazione. Si osserva che le parti della foglia più lontane dalle nervature (gli spazi internervali) sono colpite per prime e ingialliscono rapidamente in caso di carenza. Alcuni elementi hanno un comportamento intermedio: così il rame sarebbe un elemento mobilissimo nelle piante sane e poco mobile nelle piante in stato di carenza; per il manganese non c'è possibilità di rimobilitazione delle riserve delle foglie, mentre quelle delle radici e dei culmi possono essere utilizzate.

Diagnosi delle situazioni a rischio

Se una carenza costituisce chiaramente un importante fattore limitante, l'apporto dei microelementi è indispensabile. Altrimenti, è il caso di interrogarsi sull'opportunità di un impiego di microelementi in modo quasi sistematico.

Partendo da tutti i dati che abbiamo menzionato, tenendo conto dei bisogni delle piante e delle caratteristiche del comportamento del suolo riguardo ai microelementi, è possibile definire situazioni a rischio che permettono all'agricoltura di gestire questi apporti.

Un modo semplice di procedere consiste nel definire le sensibilità alle carenze in microelementi della coltura in atto avvalendosi di una tabella come quella seguente, valida per le colture di pieno campo (tab. 5).

Tabella 5 – Sensibilità delle colture di pieno campo alle carenze in microelementi.

Coltura	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
Cereali		X	X			
Mais	x	x	x	X		
Riso	X	x		X		
Barbabetola		x			X	
Patata		x		x	x	
Pisello	X	x	x		x	X
Soia	X	X		x		X
Erba Medica		x	x		x	x
Colza		x			x	x
Girasole		x			X	

x: coltura sensibile X: coltura molto sensibile

Determinata la sensibilità della coltura, è necessario accertare se nell'appezzamento interessato esistono le condizioni per cui si manifesti la carenza. La tabella 6 riassume i fattori di rischio.

Tabella 6 – Condizioni o fattori che intervengono sulla riduzione della disponibilità dei micrelementi.

Condizioni o fattori	Ferro	Manganese	Rame	Zinco	Boro	Molibdeno
Climatici	Umidità elevata. Bassa temperatura del suolo	Tempo siccitoso. Bassa temperatura del suolo. Luminosità debole		Umidità elevata. Bassa temperatura del suolo. Luminosità elevata	Siccità. Luminosità elevata	
Pedologici	Calcare attivo elevato HCO ₃ X abbondante	pH superiore a 6. Suolo leggero e basso livello in sostanza organica. Suolo ghiaioso. Suolo argilloso-calcareo, ricco di sostanza organica. Elevato tenore in ferro del suolo	pH superiore a 7. Tenore elevato in sostanza organica	Suolo calcareo. Basso tenore in sostanza organica Tenore elevato di metalli sotto forma ossidata	Suolo neutro o calcareo. Debole tenore in sostanza organica (2%). Suolo molto permeabile	pH acido. Debole tenore in sostanza organica (2%) Elevato tenore in ferro del suolo
Agronomici	Danni alle radici. Tenore elevato in fosforo assimilabile e rame nel suolo. Concimazione nitrica	Sviluppo radicale limitato. Cattivo contatto suolo/radici. Suolo molto arieggiato, elevato tenore in rame del suolo	Elevato tenore in fosforo assimilabile e zinco	Suolo compatto. Esplorazione radicale limitata. Elevato tenore in fosforo assimilabile	Irrigazione eccessiva (lisciviazione). Elevata concimazione azotata	Tenore elevato in zolfo. Concimazione elevata in azoto ammoniacale