

Pietro Violante

Chimica e fertilità del suolo



1ª edizione: luglio 2013

GRUPPO **24** ORE

© Copyright 2013 by «Edagricole - Edizioni Agricole de Il Sole 24 ORE Spa»,
via Monte Rosa, 91 - 20149 Milano
Redazione: P.zza G. Galilei, 6 - 40123 Bologna

5417

Proprietà letteraria riservata - printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o trasmessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norma di legge.

Realizzazione grafica: Emmegi prepress, via F. Confalonieri, 36 - 20124 Milano
Impianti e stampa: Faenza Industrie Grafiche, via Vittime Civili di Guerra, 35 - Faenza (RA)
Finito di stampare nel luglio 2013

ISBN 978-88-506-5417-8

Prefazione

Justus von Liebig ha scritto: "Agriculture is, of all industrial pursuits, the richest in facts and the poorest in comprehension".

In larga misura quest'affermazione è vera ancora oggi, anche se è necessario considerare e chiarire, nella forma più semplice possibile, le attuali conoscenze, i dati, le informazioni, i risultati, le conclusioni, i fatti cioè, derivati negli anni più recenti dalle attività di campo e di laboratorio e di riesaminare i principi fondamentali che da essi hanno avuto origine e che costituiscono i presupposti della corretta gestione della pratica agricola. A conclusione di un lungo percorso accademico, per completare un articolato e coerente discorso didattico, il mio obiettivo è stato la realizzazione di un libro che potesse essere utile, per lo studio della Scienza della Fertilità del Suolo, agli studenti che frequentano i corsi di laurea, triennali e magistrali, di Tecnologie Agrarie, Scienze e Tecnologie Agrarie, Scienze Agrarie, Scienze Agrarie e Ambientali che si svolgono presso le Facoltà di Agraria italiane. Un testo specialistico che, dopo aver illustrato con rigore scientifico le caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche del suolo, unico mezzo per la crescita ottimale delle piante, fornisce notizie sui rapporti acqua: suolo e sulla qualità dell'acqua d'irrigazione, analizza il ciclo biogeochimico dei nutrienti, dei quali considera il ruolo e la dinamica e definisce la disponibilità per le specie vegetali coltivate, analizza il destino dei materiali organici e inorganici aggiunti al sistema suolo: pianta, compara le tecniche della fertilizzazione, valuta i metodi d'analisi per la stima del fabbisogno nutrizionale delle diverse colture.

Particolare cura è stata posta nell'aggiornamento dei settori in continua e rapida evoluzione.

Il testo si articola in trentadue capitoli, corredati di molte figure e di numerose tabelle che riportano i risultati di rigorose indagini apparse nella letteratura scientifica più recente e presenti nelle opere metodologicamente più significative.

Parte del materiale utilizzato per la compilazione dello scritto è stata da me raccolta nel tempo per lo svolgimento dei corsi di Chimica Agraria, di Agrochimica e di Chimica del Suolo e della Nutrizione delle Piante presso le Facoltà d'Agraria dell'Università Federico II di Napoli, della Basilicata di Potenza e della Tuscia di Viterbo.

Molti dati derivano dall'attività condotta presso il Centro di Sperimentazione di Chimica Agraria - Azienda Pilota di Castelvoturno (CE), struttura didattica e di ricerca del Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e delle Produzioni Animali, di cui per molti decenni ho tenuto la Direzione.

Numerosi riferimenti bibliografici di carattere internazionale possono consentire opportuni approfondimenti dei diversi argomenti trattati.

Desidero ringraziare tutti quelli, colleghi, ex allievi, amici, che con consigli, suggerimenti, critiche, hanno contribuito alla realizzazione della stesura finale del testo.

Sono grato in particolare ai responsabili dell'Edagricole - Il Sole 24 ORE per la competenza, l'attenzione e la celerità con cui hanno portato a compimento il lavoro editoriale.

Indice generale

1. La fertilità del suolo	Pag.	1
1.2 La produzione agraria	"	1
1.3 I componenti funzionali della fertilità propria del suolo	"	2
1.4 Le riserve dei fattori di crescita	"	3
1.5 Il trasferimento dei fattori di crescita	"	3
2. I componenti minerali del suolo	"	5
2.1 I minerali che costituiscono le rocce	"	5
2.2 La struttura cristallina dei minerali	"	5
2.3 I silicati	"	6
2.3.1 La classificazione strutturale dei silicati	"	6
2.4 I non silicati	"	8
2.4.1 I carbonati	"	8
2.4.2 I fosfati	"	8
2.4.3 I solfati	"	9
2.4.4 I solfuri	"	9
2.4.5 Gli alogenuri	"	9
2.4.6 Gli ossidi	"	9
3. Gli scambiatori inorganici di ioni	"	19
3.1 I processi d'alterazione dei componenti minerali	"	19
3.2 I prodotti dell'alterazione	"	19
3.3 I minerali argillosi	"	19
3.4 Minerali a struttura dimorfica o di tipo 1:1 o TO	"	19
3.4.1 La caolinite	"	19
3.4.2 L'halloysite	"	20
3.5 Minerali a struttura trimorfica o di tipo 2:1 o TOT	"	21
3.5.1 L'illite	"	21
3.5.2 Gruppo delle smectiti	"	21
3.5.3 Gruppo della vermiculite	"	22
3.5.4 Gruppo dei minerali di transizione	"	22
3.6 Minerali argillosi a struttura tetramorfica o di tipo 2:1:1 o TOTO	"	23
3.6.1 Gruppo delle cloriti	"	23
3.7 Minerali argillosi con struttura a nastro	"	23
3.8 Minerali argillosi a scarso ordine cristallino	"	24
3.8.1 Allofani	"	24
3.8.2 Imogolite	"	26
3.9 Gli ossidi e gli idrossidi	"	27
3.10 Limo e sabbia	"	27

4.	Sostanza organica e humus	Pag.	37
4.1	La sostanza organica	"	37
4.2	L'humus	"	38
4.3	Caratteristiche delle frazioni umiche	"	41
4.3.1	L'umina	"	41
4.3.2	Gli acidi umici	"	41
4.3.3	Acidi fulvici	"	43
4.4	Le sostanze umiche e la fertilità del suolo	"	43
4.4.1	Disponibilità dell'acqua nel suolo	"	43
4.4.2	Formazione e stabilità dell'organizzazione strutturale	"	44
4.4.3	Degradazione e inattivazione di sostanze tossiche	"	44
4.4.4	Capacità tampone	"	45
4.4.5	Stabilizzazione e inattivazione degli enzimi	"	45
4.4.6	Termoregolazione del suolo e limitazione della velocità di evaporazione dell'acqua	"	45
4.4.7	Coinvolgimento in specifiche reazioni chimiche	"	45
4.5	Influenza delle sostanze umiche sulla crescita e lo sviluppo delle piante	"	47
5.	Biocomunità ed ecologia del suolo	"	57
5.1	I principali gruppi tassonomici	"	57
5.1.1	Batteri	"	57
5.1.1.1	<i>Caratteristiche dei batteri</i>	"	57
5.1.2	Tipi di batteri	"	57
5.1.2.1	<i>Batteri eterotrofi e autotrofi</i>	"	57
5.1.2.2	<i>Decompositori</i>	"	59
5.1.2.3	<i>Azoto fissatori</i>	"	59
5.1.2.4	<i>Soppressori d' infezioni patologiche</i>	"	61
5.1.2.5	<i>Cianobatteri</i>	"	61
5.1.3	Attinomiceti	"	61
5.1.4	Funghi	"	61
5.1.4.1	<i>Micorrize</i>	"	63
5.1.5	Alghe	"	64
5.1.6	Radici delle piante	"	65
5.1.7	Protozoi	"	66
5.1.8	Nematodi	"	66
5.1.9	Enchitreidi e lombrichi	"	69
5.1.10	Formiche e termiti	"	69
5.1.11	Lumache e chiocchie	"	71
5.2	Ecologia del suolo	"	72
5.2.1	La biodiversità del suolo	"	72
5.2.1.1	<i>Le funzioni ecologiche del suolo in relazione alla biodiversità che lo caratterizza</i>	"	72
6.	Proprietà fisiche del suolo	"	87
6.1	Il colore	"	87
6.2	La granulometria	"	89
6.2.1	Influenza della granulometria su alcune caratteristiche e comportamenti del suolo .	"	89
6.2.2	Granulometria e composizione mineralogica	"	90
6.3	La tessitura	"	90
6.3.1	Le classi tessiturali	"	90
6.3.2	Significato della tessitura	"	92
6.4	La struttura	"	92
6.4.1	La formazione della struttura	"	93
6.4.1.1	<i>I processi fisico-chimici</i>	"	93
6.4.1.2	<i>I processi biologici</i>	"	94

6.4.2	La classificazione della struttura	Pag.	96
	6.4.2.1 <i>Tipi di struttura</i>	"	96
	6.4.2.2 <i>La dimensione</i>	"	96
	6.4.2.3 <i>Il grado di distinzione</i>	"	96
6.4.3	La stabilità degli aggregati strutturali	"	97
6.4.4	Il mantenimento dello stato della struttura	"	97
6.5	La densità e la porosità del suolo	"	99
	6.5.1 <i>Compattazione e variazione dei parametri fisici del suolo</i>	"	100
6.6	I condizionatori del suolo	"	103
	6.6.1 La sostanza organica	"	104
	6.6.2 Gli umati	"	104
	6.6.3 Il letame	"	104
	6.6.4 Altri condizionatori organici	"	105
	6.6.5 I condizionatori minerali	"	105
	6.6.6 Polimeri organici di sintesi	"	105
6.7	La temperatura del suolo	"	105
	6.7.1 Temperatura e germinazione dei semi	"	105
	6.7.2 Temperatura e attività fisiologica delle radici	"	107
	6.7.3 Temperatura e intensità dell'evapotraspirazione	"	107
	6.7.4 Temperatura e crescita delle piante	"	107
	6.7.5 Temperatura e attività delle entità microbiche	"	108
	6.7.6 Variazione della temperatura con la profondità del suolo	"	109
6.8	La consistenza	"	109
7.	L'acqua del suolo: caratteristiche e comportamento	"	115
7.1	Struttura molecolare dell'acqua	"	115
7.2	Le proprietà dell'acqua	"	115
7.3	I rapporti acqua-suolo	"	117
	7.3.1 I punti caratteristici nei rapporti acqua-suolo	"	117
	7.3.1.1 <i>Capacità idrica massima (θ_{max})</i>	"	118
	7.3.1.2 <i>Capacità di campo (θ_{cc})</i>	"	118
	7.3.1.3 <i>Punto d'appassimento permanente (θ_{pa})</i>	"	119
	7.3.1.4 <i>Coefficiente igroscopico (Ci)</i>	"	120
7.4	L'acqua disponibile	"	120
	7.4.1 Contenuto di sostanza organica nel suolo e disponibilità dell'acqua per le piante ...	"	120
7.5	Il potenziale dell'acqua nel suolo	"	121
7.6	La determinazione del contenuto d'acqua del suolo	"	123
	7.6.1 Metodo gravimetrico	"	123
	7.6.2 Metodo con l'impiego di sonda elettronica	"	124
	7.6.3 Metodo elettrometrico	"	124
	7.6.4 Metodi elettromagnetici	"	125
7.7	La determinazione del potenziale dell'acqua del suolo	"	125
	7.7.1 Metodo con l'impiego d'apparecchio di pressione a membrana	"	125
	7.7.2 Metodo per equilibramento con soluzioni a potenziale noto	"	127
	7.7.3 Metodo tensiometrico	"	127
7.8	La riserva idrica utile	"	128
7.9	Il ciclo idrologico globale	"	128
	7.9.1 Il ciclo idrologico su scala locale	"	128
7.10	Il movimento dell'acqua nel suolo	"	129
	7.10.1 Flusso idrico nel suolo saturo d'acqua	"	130
	7.10.2 Flusso idrico nel suolo non saturo d'acqua	"	131
	7.10.3 Movimento dell'acqua allo stato di vapore	"	132
	7.10.4 Infiltrazione	"	132
	7.10.5 Percolazione	"	133
	7.10.6 Risalita capillare	"	134

Indice generale

7.11	Il <i>continuum</i> suolo-pianta-atmosfera	Pag.	135
7.12	Il bilancio idrico	"	137
7.12.1	Espressione del bilancio idrico	"	139
8.	L'irrigazione	"	141
8.1	Cenni storici	"	141
8.2	I sistemi d'irrigazione	"	142
8.2.1	Irrigazione per scorrimento	"	142
8.2.2	Irrigazione per sommersione	"	144
8.2.3	Irrigazione per infiltrazione laterale	"	145
8.2.4	Irrigazione per aspersione (o a pioggia)	"	146
8.2.4.1	<i>Irrigazione per aspersione meccanizzata (irrigatori auto avvolgenti)</i>	"	147
8.2.4.2	<i>Irrigazione per aspersione meccanizzata (irrigatori ad ali imperniate - Pivot)</i>	"	148
8.2.4.3	<i>Irrigazione per aspersione meccanizzata (irrigatori ad ali traslanti)</i>	"	149
8.2.5	Microirrigazione	"	149
9.	Valutazione dell'idoneità dell'acqua da utilizzare per l'irrigazione	"	155
9.1	La qualità dell'acqua d'irrigazione	"	155
9.1.1	Il grado di salinità	"	156
9.1.2	La velocità d'infiltrazione dell'acqua	"	160
9.1.2.1	<i>Interventi chimici</i>	"	161
9.1.2.2	<i>Interventi fisici</i>	"	162
9.1.2.3	<i>Gestione della pratica irrigua</i>	"	163
9.1.3	Tossicità causata dalla presenza di cloro, sodio, boro, elementi in traccia	"	163
9.1.3.1	<i>Gli ioni cloruro</i>	"	164
9.1.3.2	<i>Gli ioni sodio</i>	"	164
9.1.3.3	<i>Il boro</i>	"	166
9.1.3.4	<i>Gli elementi in traccia</i>	"	168
9.1.4	Complicazioni dovute a contenuto elevato di composti azotati che può provocare riduzione della quantità e della qualità della produzione	"	168
9.1.5	Complicazioni dovute alla presenza di sali scarsamente solubili capaci di ridurre la commercializzazione dei prodotti (frutti e foglie) e di compromettere il funzionamento degli impianti irrigui utilizzati	"	169
9.1.6	Complicazioni dovute all'impiego di acqua d'irrigazione caratterizzata da valori di pH anomali	"	171
9.2	Tolleranza delle piante coltivate a condizioni di salinità	"	172
10.	L'aerazione del suolo	"	175
10.1	La composizione dell'aria tellurica	"	175
10.2	Problemi derivanti dall'aerazione del suolo	"	176
10.2.1	<i>Conseguenze della presenza di eccesso d'acqua</i>	"	176
10.3	Il ricambio dell'aria tellurica	"	177
10.4	Aerazione delle entità biotiche	"	178
10.5	Le reazioni di ossido-riduzione	"	179
10.6	Il potenziale redox	"	180
10.7	Significato del potenziale redox	"	180
11.	I suoli acidi	"	183
11.1	Variazione della concentrazione idrogenionica nel suolo	"	183
11.1.1	Presenza di CO ₂	"	185
11.1.2	Accumulo di sostanze umiche	"	186
11.1.3	I meccanismi di scambio a livello delle superfici delle entità colloidali presenti nel suolo	"	186

11.1.4	Processi che modificano la specie chimica di alcuni nutrienti	Pag.	186
11.1.5	L'assorbimento di elementi nutritivi da parte delle piante	"	188
11.1.6	La lisciviazione	"	189
11.1.7	L'ossidazione di alcuni fertilizzanti	"	189
11.1.8	Le precipitazioni acide	"	190
11.2	Ruolo dell'alluminio nel processo d'acidificazione del suolo	"	191
11.3	Classificazione dell'acidità del suolo	"	193
11.3.1	L'acidità attuale	"	193
11.3.2	L'acidità di scambio (o potenziale)	"	193
11.3.3	L'acidità residua	"	193
11.3.4	L'acidità virtuale	"	193
11.4	Grado di saturazione del complesso di scambio	"	193
11.5	Il potere tampone del suolo	"	194
11.5.1	Equilibrio tra le diverse forme d'acidità (attuale, di scambio, residua)	"	195
11.5.2	La dissociazione dei gruppi Si-OH e Al-OH degli ossidi di alluminio e presenti ai margini della struttura dei minerali argillosi	"	196
11.5.3	Solubilizzazione e precipitazione di carbonati	"	196
11.6	La misura del pH del suolo	"	197
11.7	Variazione del pH del suolo	"	199
11.8	Il pH del suolo e la produzione vegetale	"	199
11.9	Fattori che influenzano il metabolismo delle entità biotiche presenti nei suoli acidi	"	200
11.9.1	Tossicità dell'alluminio	"	201
11.9.2	Tossicità del manganese	"	203
11.9.3	Tossicità del ferro	"	204
11.9.4	Tossicità degli ioni H ⁺	"	205
11.9.5	Carenza di calcio	"	205
11.9.6	Carenza di magnesio	"	205
11.9.7	Carenza di molibdeno	"	205
11.9.8	Carenza di fosforo	"	205
11.10	Il recupero dei suoli acidi	"	206
11.10.1	Il fabbisogno in "calce"	"	208
11.10.2	Gestione degli interventi di correzione	"	208
11.10.3	Gli effetti dell'acidità negli strati profondi del suolo	"	209
11.10.4	Conseguenze dovute a eccessiva aggiunta di correttivi basici	"	209
12.	I suoli neutri e moderatamente alcalini	"	211
12.1	Carenza e tossicità di nutrienti	"	213
12.1.1	Carenza di fosforo	"	213
12.1.2	Carenza di boro	"	213
12.1.3	Carenza di ferro	"	214
12.1.4	Carenza di zinco	"	214
12.1.5	Carenza di manganese	"	216
12.1.6	Tossicità del molibdeno	"	216
13.	I suoli salini, salino-sodici e sodici	"	219
13.1	I suoli salini	"	220
13.1.1	Recupero e gestione dei suoli salini	"	221
13.2	I suoli salino-sodici	"	224
13.3	I suoli sodici	"	224
13.4	Fattori che influenzano la crescita delle piante nei suoli sodici	"	225
13.4.1	Aumentata disponibilità di fosforo	"	225
13.4.2	Carenza d'azoto	"	226
13.4.3	Carenza e tossicità di micronutrienti	"	226
13.4.4	Diminuito assorbimento di potassio e calcio	"	226

Indice generale

13.5	Recupero dei suoli salino-sodici e sodici	Pag.	227
13.5.1	Il fabbisogno di gesso	"	229
13.6	Gestione dei suoli salino-sodici e sodici recuperati	"	229
14.	Ruolo, disponibilità e dinamica dei nutrienti	"	231
14.1	Elementi essenziali ed elementi utili	"	231
14.2	I nutrienti nel suolo	"	233
14.3	La soluzione del suolo e i nutrienti disponibili	"	233
14.4	La dinamica dei nutrienti nel suolo	"	234
14.5	I nutrienti nella pianta	"	235
14.6	Flusso dei nutrienti nel sistema suolo-pianta	"	236
14.6.1	Intercettazione	"	236
14.6.2	Flusso di massa	"	236
14.6.3	Diffusione	"	238
14.6.4	Importanza relativa dei fenomeni d'intercettazione, flusso di massa e diffusione	"	239
14.7	Il ciclo dei nutrienti nel sistema suolo-pianta	"	240
14.7.1	Perdita di nutrienti per asportazione colturale	"	240
14.7.2	Perdita di nutrienti per lisciviazione	"	240
14.7.3	Perdita di nutrienti per volatilizzazione	"	241
14.7.4	Perdita di nutrienti per erosione	"	242
14.7.5	Apporto di nutrienti al suolo con le deposizioni atmosferiche umide e secche (<i>wet and dry deposition</i>)	"	242
14.7.6	Apporto di nutrienti con la fertilizzazione	"	243
15.	Il ciclo biogeochimico dell'azoto	"	245
15.1	Fissazione biologica dell'azoto	"	245
15.1.1	Fissazione non simbiotica dell'azoto	"	246
15.1.2	Fissazione simbiotica dell'azoto con le Leguminose	"	247
15.1.3	Fissazione simbiotica dell'azoto con non Leguminose con formazione di noduli	"	248
15.1.4	Fissazione simbiotica dell'azoto con non Leguminose senza formazione di noduli ..	"	249
15.1.5	Biochimismo della fissazione dell'azoto	"	249
15.1.6	Quantità dell'azoto fissato biologicamente	"	251
15.2	Apporto di composti azotati dall'atmosfera	"	251
15.3	Amminizzazione e ammonificazione	"	251
15.4	Volatilizzazione	"	253
15.4.1	Fattori che influenzano la volatilizzazione	"	253
15.5	Fissazione degli ioni ammonio	"	254
15.6	Nitrificazione	"	256
15.6.1	Condizioni ambientali che influenzano il processo di nitrificazione	"	258
15.6.2	Lisciviazione dei nitrati	"	259
15.7	Assorbimento nutrizionale	"	260
15.7.1	Vantaggi e svantaggi degli ioni nitrato come fonte d'azoto per la crescita delle piante	"	260
15.7.2	Vantaggi e svantaggi degli ioni ammonio come fonte d'azoto per la crescita delle piante	"	260
15.8	Denitrificazione	"	261
15.8.1	Ossido di diazoto e effetto serra	"	261
15.9	Il metabolismo dell'azoto nelle piante	"	263
15.9.1	Conversione dell'azoto inorganico in composti azotati di basso peso molecolare ...	"	263
15.9.1.1	Addizione diretta di NH_3	"	263
15.9.1.2	Amminazione riduttiva	"	263
15.9.1.3	Formazione di ammidi	"	264
15.9.1.4	Transamminazione	"	265
15.9.1.5	Ruolo fisiologico dei composti azotati di basso peso molecolare	"	265
15.9.2	Sintesi di composti organici azotati di elevato peso molecolare	"	266

15.9.2.1	Protidi e proteine	Pag.	266
15.9.2.2	Nucleoprotidi	"	267
15.9.3	Degradazione delle macromolecole contenenti azoto, operata da enzimi idrolitici	"	267
15.9.3.1	Gli enzimi proteolitici (proteasi)	"	267
15.9.3.2	Le nucleasi	"	268
15.10	Assorbimento e accumulo d'azoto nei tessuti vegetali	"	268
15.10.1	La concentrazione d'azoto nei tessuti vegetali	"	268
15.10.2	L'assorbimento nutrizionale	"	270
15.10.3	Interazione dell'azoto con altri nutrienti	"	271
15.11	Conseguenze della carenza e dell'eccesso d'azoto	"	273
16.	Il ciclo biogeochimico del fosforo	"	275
16.1	Gli ioni fosfato nella soluzione del suolo	"	277
16.2	Forme inorganiche del fosforo presenti nel suolo	"	277
16.2.1	Disponibilità del fosforo inorganico nei suoli caratterizzati da pH alcalino	"	277
16.2.2	Disponibilità del fosforo inorganico nei suoli caratterizzati da pH acido	"	279
16.2.3	Influenza sull'immobilizzazione del fosforo della quantità di frazione argillosa e del tipo di minerali argillosi presenti nel suolo	"	279
16.3	Forme organiche del fosforo presenti nel suolo	"	281
16.3.1	Dinamica del fosforo organico nel suolo	"	283
16.4	Il metabolismo del fosforo nelle piante	"	286
16.4.1	La concentrazione di fosforo nei tessuti vegetali	"	286
16.4.2	L'assorbimento nutrizionale del fosforo	"	288
16.4.3	Interazione del fosforo con altri nutrienti	"	289
16.5	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di fosforo	"	289
17.	Il ciclo biogeochimico dello zolfo	"	291
17.1	Lo zolfo nell'atmosfera	"	293
17.2	Lo zolfo nella biosfera e nella pedosfera	"	296
17.3	Dinamica dello zolfo nel suolo	"	297
17.3.1	Mineralizzazione	"	297
17.3.2	Immobilizzazione	"	298
17.3.3	Ossidazione	"	298
17.3.4	Riduzione	"	299
17.4	Adsorbimento degli ioni solfato e lisciviazione di "basi"	"	299
17.5	Il metabolismo dello zolfo nelle piante	"	299
17.5.1	Biochimica dell'assimilazione dello zolfo	"	299
17.5.2	Composti organici solforati presenti nelle piante	"	300
17.5.3	La concentrazione di zolfo nei tessuti vegetali	"	301
17.5.4	L'assorbimento nutrizionale	"	302
17.5.5	Interazione dello zolfo con altri nutrienti	"	303
17.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di zolfo	"	304
18.	Il ciclo biogeochimico del potassio	"	307
18.1	Il potassio nel suolo	"	308
18.1.1	Il potassio limitatamente scambiabile	"	309
18.1.2	Il potassio lentamente scambiabile	"	310
18.1.3	Il potassio scambiabile	"	310
18.1.4	Il potassio solubile	"	310
18.1.5	La misura della disponibilità del potassio	"	310
18.2	Aspetti pratici dell'impiego del potassio in agricoltura	"	311
18.3	Il metabolismo del potassio nelle piante	"	315
18.3.1	La concentrazione di potassio nei tessuti vegetali	"	317
18.3.2	L'assorbimento nutrizionale del potassio	"	317

Indice generale

18.3.3	Interazione del potassio con altri nutrienti	Pag.	318
18.4	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di potassio	"	321
19.	Il ciclo biogeochimico del calcio	"	323
19.1	Dinamica del calcio nel suolo	"	323
19.2	Il metabolismo del calcio nelle piante	"	324
19.2.1	La concentrazione del calcio nei tessuti vegetali	"	325
19.2.2	L'assorbimento nutrizionale del calcio	"	325
19.2.3	Interazione del calcio con altri nutrienti	"	325
19.2.4	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di calcio	"	327
20.	Il ciclo biogeochimico del magnesio	"	329
20.1	Il magnesio nel suolo	"	329
20.2	Il metabolismo del magnesio nelle piante	"	332
20.2.1	La concentrazione del magnesio nei tessuti vegetali	"	332
20.2.2	L'assorbimento nutrizionale del magnesio	"	332
20.2.3	Interazione del magnesio con altri nutrienti	"	333
20.2.4	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di magnesio	"	334
21.	Il ciclo biogeochimico dei micronutrienti	"	335
21.1	Il ferro	"	336
21.1.1	Il ferro nel suolo	"	337
21.1.2	Il metabolismo del ferro nelle piante	"	339
21.1.3	La concentrazione del ferro nei tessuti vegetali	"	340
21.1.4	L'assorbimento nutrizionale del ferro	"	340
21.1.5	Interazione del ferro con altri nutrienti	"	342
21.1.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di ferro	"	344
21.2	Il manganese	"	344
21.2.1	Il manganese nel suolo	"	344
21.2.2	Il metabolismo del manganese nelle piante	"	345
21.2.3	La concentrazione del manganese nei tessuti vegetali	"	345
21.2.4	L'assorbimento nutrizionale del manganese	"	346
21.2.5	Interazione del manganese con altri nutrienti	"	346
21.2.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di manganese	"	347
21.3	Lo zinco	"	349
21.3.1	Lo zinco nel suolo	"	349
21.3.2	Il metabolismo dello zinco nelle piante	"	350
21.3.3	La concentrazione dello zinco nei tessuti vegetali	"	351
21.3.4	L'assorbimento nutrizionale dello zinco	"	352
21.3.5	Interazione dello zinco con altri nutrienti	"	352
21.3.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di zinco	"	353
21.4	Il rame	"	355
21.4.1	Il rame nel suolo	"	355
21.4.2	Il metabolismo del rame nelle piante	"	356
21.4.3	La concentrazione del rame nei tessuti vegetali	"	357
21.4.4	L'assorbimento nutrizionale del rame	"	358
21.4.5	Interazione del rame con altri nutrienti	"	359
21.4.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di rame	"	359
21.5	Il boro	"	359
21.5.1	Il boro nel suolo	"	360
21.5.2	Il metabolismo del boro nelle piante	"	361
21.5.3	La concentrazione del boro nei tessuti vegetali	"	362
21.5.4	L'assorbimento nutrizionale del boro	"	362
21.5.5	Interazione del boro con altri nutrienti	"	363
21.5.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di boro	"	363

21.6	Il molibdeno	Pag.	365
21.6.1	Il molibdeno nel suolo	"	365
21.6.2	Il metabolismo del molibdeno nelle piante	"	366
21.6.3	La concentrazione del molibdeno nei tessuti vegetali	"	366
21.6.4	L'assorbimento nutrizionale del molibdeno	"	367
21.6.5	Interazione del molibdeno con altri nutrienti	"	367
21.6.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di molibdeno	"	367
21.7	Il nichel	"	368
21.7.1	Il nichel nel suolo	"	369
21.7.2	Il metabolismo del nichel nelle piante	"	370
21.7.3	La concentrazione del nichel nei tessuti vegetali	"	370
21.7.4	L'assorbimento nutrizionale del nichel	"	370
21.7.5	Interazione del nichel con altri nutrienti	"	372
21.7.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di nichel	"	372
21.8	Il cloro	"	372
21.8.1	I cloruri nel suolo	"	373
21.8.2	Il metabolismo dei cloruri nelle piante	"	373
21.8.3	La concentrazione dei cloruri nei tessuti vegetali	"	373
21.8.4	L'assorbimento nutrizionale dei cloruri	"	374
21.8.5	Interazione dei cloruri con altri nutrienti	"	375
21.8.6	Conseguenze della carenza e dell'eccesso di cloruri	"	377
21.9	Aggiunta di micronutrienti al suolo	"	377
22.	Il ciclo biogeochimico degli elementi benefici	"	379
22.1	Il silicio	"	379
22.1.1	Il silicio nel suolo	"	379
22.1.2	L'assorbimento e il metabolismo del silicio nelle piante	"	380
22.2	Il sodio	"	381
22.2.1	Il sodio nel suolo	"	382
22.2.2	L'assorbimento e il metabolismo del sodio nelle piante	"	382
22.3	Il selenio	"	383
22.3.1	Il selenio nel suolo	"	384
22.3.2	L'assorbimento e il metabolismo del selenio nelle piante	"	385
22.3.3	La volatilizzazione	"	387
22.3.4	La tossicità del selenio nei vegetali	"	388
22.4	Il cobalto	"	388
22.4.1	Il cobalto nel suolo	"	388
22.4.2	L'assorbimento e il metabolismo del cobalto nelle piante	"	389
22.5	Il vanadio	"	391
22.5.1	Il vanadio nel suolo	"	391
22.5.2	L'assorbimento e il metabolismo del vanadio nelle piante	"	392
22.5.3	La tossicità del vanadio nei vegetali	"	393
23.	Fertilizzanti e fertilizzazione	"	395
23.1	I fertilizzanti	"	395
23.2	Le disposizioni di legge che regolano il commercio dei fertilizzanti	"	395
23.2.1	I concimi	"	395
23.2.2	Ammendanti e correttivi	"	396
23.2.3	Immissione sul mercato	"	396
24.	I concimi azotati	"	401
24.1	Concimi organici	"	401
24.2	Concimi azotati minerali di sintesi	"	403
24.2.1	Concimi ammoniacali	"	403
24.2.2	Concimi nitrici	"	404

Indice generale

24.2.3	Concimi ammonio-nitrici	Pag.	404
24.2.4	Concimi cianamidici	"	405
24.2.5	Urea	"	405
24.2.6	Concimi azotati a lenta cessione	"	406
25.	I concimi fosfatici	"	409
25.1	Concimi fosfatici molto solubili	"	410
25.2	Concimi fosfatici mediamente solubili	"	411
25.3	Concimi fosfatici poco solubili	"	413
26.	I concimi potassici	"	415
26.1	Concimi potassici minerali	"	415
27.	I concimi organo-minerali	"	417
28.	Ammendanti e correttivi	"	419
28.1	Ammendanti organici naturali	"	419
28.1.1	Il letame	"	419
28.1.2	Il letame artificiale	"	421
28.1.3	L'ammendante vegetale semplice	"	422
28.1.4	L'ammendante compostato verde	"	422
28.1.5	L'ammendante compostato misto	"	422
28.1.6	L'ammendante torboso composto	"	422
28.1.7	Le torbe	"	423
28.1.8	La leonardite (humalite)	"	423
28.1.9	Gli estratti umici	"	424
28.1.10	Il vermicompost	"	424
28.1.11	L'ammendante animale idrolizzato	"	424
28.1.12	Gli umati solubili solidi	"	424
28.1.13	Gli umati solubili fluidi	"	424
28.2	Correttivi	"	424
28.2.1	I correttivi calcici e magnesiaci	"	424
28.2.2	I fanghi industriali provenienti dagli zuccherifici	"	424
28.2.3	Calcio e magnesio solfati	"	424
28.3	Ammendanti e correttivi diversi	"	426
29.	Tecniche e aspetti generali della fertilizzazione	"	427
29.1	Modo di somministrare i concimi	"	427
29.1.1	Apporto per spargimento	"	427
29.1.2	Apporto per posizionamento	"	428
29.1.3	Apporto per posizionamento a strisce	"	428
29.1.4	Indice salino	"	429
29.2	Fertilizzazione fogliare	"	429
29.3	Fertirrigazione	"	430
29.4	Epoca della somministrazione	"	432
29.5	Rapporto tra nutrienti	"	432
29.6	Fertilizzazione e consumo energetico	"	434
29.7	Fertilizzazione e impatto ambientale	"	435
29.8	Aspetti generali della fertilizzazione	"	436
29.8.1	Consumo di concimi e produzione agraria	"	436
29.8.2	L'efficienza dell'impiego dei nutrienti	"	437
29.8.2.1	L'efficienza agronomica (AE)	"	438
29.8.2.2	L'efficienza fisiologica (PE)	"	438
29.8.2.3	L'efficienza agro-fisiologica (APE)	"	439
29.8.2.4	L'efficienza del recupero apparente (ARE)	"	439

29.8.2.5	<i>L'efficienza d'utilizzazione (UE)</i>	Pag.	439
29.8.2.6	<i>Risultati sperimentali</i>	"	439
30.	La valutazione della fertilità del suolo	"	441
30.1	L'identificazione dei sintomi di carenza nelle piante	"	441
30.2	L'analisi dei tessuti delle specie vegetali coltivate	"	443
30.2.1	Test di pieno campo	"	443
30.2.1.1	<i>Test condotti sul succo vacuolare</i>	"	443
30.2.2	Analisi totale	"	444
30.2.3	Interpretazione dei risultati analitici	"	444
30.2.4	Misura del contenuto di clorofilla per l'accertamento dello stato nutrizionale di una coltura	"	446
30.2.5	Impiego di sensori remoti per la valutazione dello stato nutrizionale azotato delle colture	"	446
30.2.6	Analisi dei semi e dei tessuti vegetali al termine del ciclo vitale delle piante	"	447
30.3	Test biologici che consentono di definire la fertilità del suolo dalla crescita delle piante	"	449
30.4	Indagini analitiche condotte su campioni di suolo	"	450
30.4.1	Obiettivi delle indagini analitiche condotte su campioni di suolo	"	451
30.4.2	Prelevamento di un campione di suolo	"	451
30.4.2.1	<i>Profondità del prelevamento</i>	"	453
30.4.2.2	<i>Epoca del prelevamento</i>	"	453
30.4.3	Determinazione nel campione di suolo del contenuto di nutrienti disponibili per le piante	"	454
30.4.3.1	<i>Metodologie analitiche per determinare il grado di reazione (pH) del suolo</i>	"	455
30.4.3.2	<i>Metodologie analitiche per determinare il contenuto d'azoto disponibile nel suolo</i>	"	456
30.4.3.3	<i>Metodologie analitiche per determinare il contenuto di fosforo disponibile nel suolo</i>	"	456
30.4.3.4	<i>Metodologie analitiche per determinare il contenuto di potassio disponibile nel suolo</i>	"	457
30.4.3.5	<i>Metodologie analitiche per determinare il contenuto di zolfo disponibile nel suolo</i>	"	457
30.4.3.6	<i>Metodologie analitiche per determinare il contenuto di micronutrienti disponibili nel suolo</i>	"	458
30.4.4	Interpretazione dei risultati ottenuti e valutazione del fabbisogno nutrizionale della specie vegetale coltivata	"	458
30.4.5	Correlazione e calibrazione delle indagini analitiche	"	459
31.	L'agricoltura sostenibile	"	465
31.1	Agricoltura sostenibile e pratica agronomica	"	466
31.1.1	La coltivazione convenzionale	"	466
31.1.2	L'agricoltura moderna	"	466
31.1.3	L'esercizio dell'agricoltura come pratica industriale	"	466
31.2	Qualità del suolo e agricoltura sostenibile	"	469
31.3	Criteri per la gestione sostenibile del suolo	"	469
32.	La qualità del suolo	"	471
32.1	Qualità e stato di salute del suolo	"	472
32.2	Segmenti della qualità del suolo	"	472
32.2.1	La crescita delle piante	"	472
32.2.2	La regolazione e la ripartizione dell'acqua	"	472
32.2.3	La stabilizzazione ambientale	"	473
32.3	La modificazione della qualità del suolo	"	473

Indice generale

32.3.1 L'aratura	Pag.	473
32.3.2 La fertilizzazione	"	473
32.3.3 La rotazione delle colture	"	474
32.3.4 La gestione dell'acqua	"	474
32.3.5 La scelta delle piante da coltivare	"	474
32.4 Processi che riducono la qualità del suolo	"	480
32.4.1 L'erosione	"	481
32.4.1.1 L'erosione operata dall'acqua	"	481
32.4.1.2 L'erosione operata dal vento	"	484
32.4.2 La perdita di sostanza organica e la degradazione della struttura	"	485
32.4.3 La salinizzazione	"	486
32.4.4 La contaminazione chimica	"	486
32.4.4.1 I pesticidi	"	492
32.4.4.2 Gli elementi in traccia	"	495
32.4.4.3 Le biomasse organiche	"	499
32.4.4.4 I radionuclidi	"	501
32.4.4.5 Le deposizioni acide	"	502
32.5 La valutazione della qualità del suolo	"	504
32.6 Gli indicatori della qualità del suolo	"	506
32.6.1 Gli indicatori fisici	"	506
32.6.2 Gli indicatori chimici	"	507
32.6.3 Gli indicatori biologici	"	508
Tavole a colori	"	509
Appendici	"	513
Bibliografia	"	519

1 Fertilità e produttività del suolo

1.1 La fertilità del suolo

Definisce l'attitudine del suolo, utilizzato per fini agronomici, a consentire abbondante produzione vegetale.

Più precisamente, la fertilità è espressa dal rendimento massimo che è possibile ottenere da un suolo coltivato con le specie vegetali più adeguate alle condizioni climatiche di specifico ambiente. Pertanto, la propensione a produrre non è funzione delle sole caratteristiche del suolo, ma rappresenta la potenzialità produttiva del sistema, considerato come insieme pedoclimatico.

1.2 La produzione agraria

La crescita ottimale delle piante coltivate, condizione indispensabile per ottenere la migliore resa produttiva, costituisce il risultato delle azioni concomitanti e interdipendenti di numerosi fattori, diversi tra loro, non tutti perfettamente identificati o carat-

terizzati da sicura, specifica influenza (Figura 1.1). Tuttavia, è necessario precisare che:

- l'energia luminosa è prevalente fattore di crescita nella misura in cui, alle temperature dell'ambiente considerato, le piante coltivate possono beneficiare dell'apporto al suolo di quantità sufficienti di acqua e di nutrienti;
- gli interventi agronomici che meglio possono consentire ai fattori di crescita suscettibili di controllo di agire al massimo dell'efficacia sono:
 - la scelta delle specie e delle varietà da coltivare in funzione delle condizioni pedoclimatiche;
 - l'organizzazione delle rotazioni colturali;
 - la lavorazione del suolo;
 - la conservazione del contenuto di sostanza organica;
 - l'apporto di nutrienti;
 - la regolazione del contenuto di acqua (irrigazione, drenaggio);
 - la correzione della reazione del suolo;
 - l'utilizzazione dei mezzi di lotta antiparassitaria;

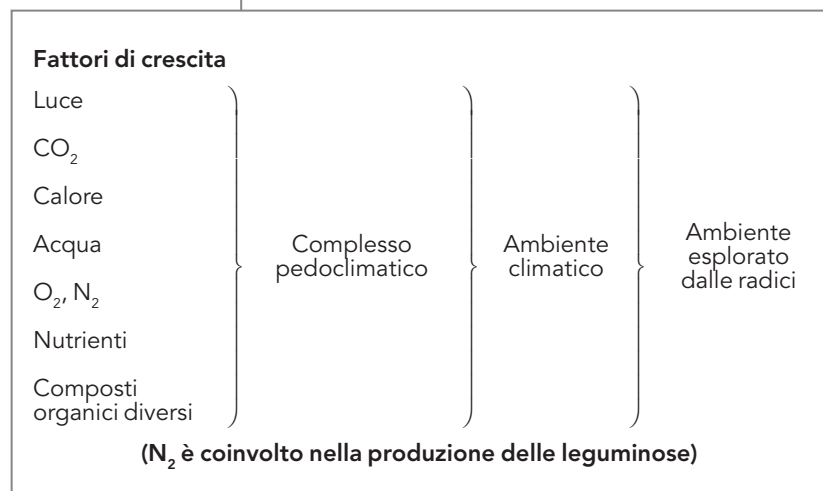


Fig. 1.1 - Fattori che con azioni concomitanti e interdipendenti esercitano specifica influenza sulla crescita ottimale delle piante coltivate (modificata da Morel, 1989).

1. Fertilità e produttività del suolo

- l'azione di ciascun fattore di crescita considerato individualmente, è stata definita analiticamente da Mitscherlich (1930).

L'espressione formulata assume che: *esaltando l'attività di uno solo dei fattori, quando tutti gli altri vengono mantenuti costanti, si consegue incremento della produzione proporzionale alla quota mancante al raggiungimento della produzione massima possibile.*

Precisamente:

$$\frac{dy}{dx} = c \cdot (A-y)$$

dove:

y = produzione conseguita in funzione del fattore x
A = produzione massima possibile
c = fattore di proporzionalità

Integrando la produzione y per ciascun valore di x risulta:

$$y = A \cdot (1 - e^{-cx})$$

Incremento della produzione può essere realizzato fino al valore massimo possibile A, oltre il quale successivo aumento dell'attività del fattore x porta al manifestarsi di fenomeni di depressione (Figura 1.2);

- l'azione dei fattori di crescita è interdipendente, nel senso che ciascuno di essi non può esplicare effetto ottimale se uno solo degli altri non agisce in modo pienamente efficace. Per esempio, la somministrazione d'azoto provoca il risultato migliore solamente se l'acqua, il fosforo o anche uno specifico nutriente si accertano nel suolo in quantità sufficienti.

L'interdipendenza tra i fattori di crescita riguardo i nutrienti, risulta già evidenziata nella legge del minimo formulata da Liebig (1840): *l'elemento che manca totalmente o che si trova in quantità insufficiente impedisce agli altri di esplicare effetto adeguato e, in ogni caso, ne diminuisce l'azione nutritiva* (Figura 1.3).

1.3 I componenti funzionali della fertilità propria del suolo

La fertilità del suolo è stata definita come attitudine a consentire soddisfacente produzione vegetale in funzione delle condizioni ambientali (caratteristiche pedoclimatiche) e degli interventi agronomici. Per quanto concerne esclusivamente il suolo è possibile individuare le cause intrinseche della sua capacità di consentire la produzione migliore. Perché sia assicurato sviluppo ottimale di una determinata coltura, è necessario che l'apparato radicale delle piante riesca a beneficiare liberamente, durante tutto il ciclo vegetativo, dell'azione di specifici fattori di crescita.

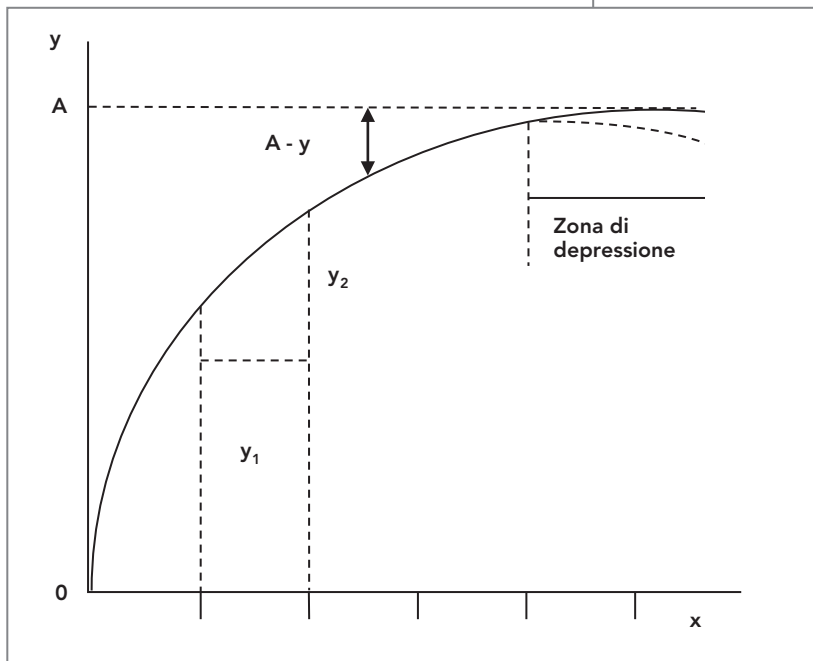


Fig. 1.2 - Incremento della produzione in funzione dell'accresciuta attività di uno solo dei fattori di crescita.

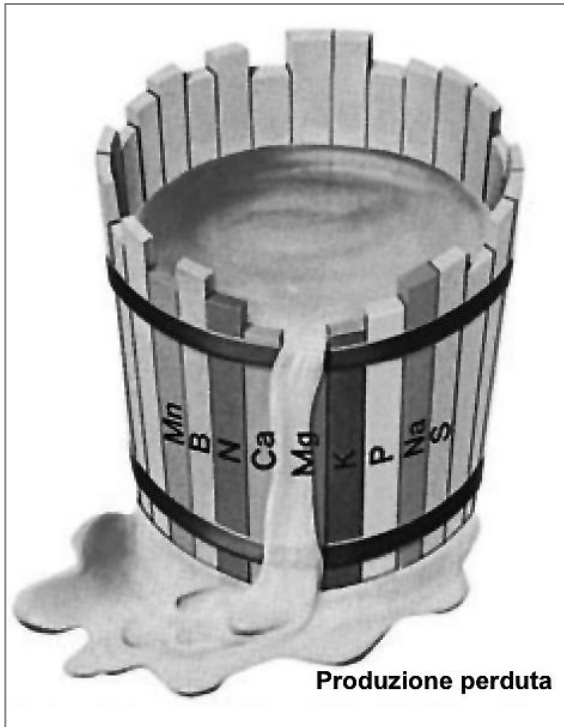


Fig. 1.3 - Rappresentazione grafica della legge del minimo formulata da Liebig. Il nutriente meno disponibile (in questo caso il magnesio) limita la produzione.

Questo comporta:

- l'esistenza di riserve sufficienti dalle quali possano risultare disponibili, mediante opportuni meccanismi, i diversi fattori di crescita;
- il realizzarsi delle condizioni necessarie per consentire alle radici di utilizzare i singoli fattori, in altre parole, che non risulti impedito il trasferimento di ciascuno di essi verso le superfici radicali.

Per esempio:

- l'atmosfera costituisce riserva d'ossigeno, la cui disponibilità nel suolo è regolata dai processi di aerazione. I fenomeni di diffusione in fase gassosa e in fase liquida che hanno luogo negli spazi lacunari (macro e micropori) ne assicurano il trasferimento agli organi ipogei;
- i fosfati, presenti nel suolo in forma più o meno solubile o fissati sulle superfici degli scambiatori sono riserva di fosforo, la disponibilità del nutriente è garantita da reazioni di solubilizzazione e da meccanismi di scambio anionico, il trasferimento è reso possibile dalla mobilità della fase liquida.

1.4 Le riserve dei fattori di crescita

I fattori di crescita possono essere suddivisi in due categorie:

- il calore e l'acqua, che dipendono dal clima ambientale e dalle sue variazioni;
- le specie chimiche necessarie alla coltura, che costituiscono nel suolo tre gruppi distinti:
 - elementi in forma gassosa [O_2 , N_2];
 - ioni e anioni [K^+ , NO_3^- , $H_2PO_4^-$];
 - composti organici solubili.

Le diverse specie chimiche possono essere presenti:

- in quantità costanti e in pratica illimitate come l'ossigeno e l'azoto atmosferico;
- in quantità limitate e variabili come le forme assimilabili dei diversi nutrienti.

I nutrienti si rendono disponibili per processo di:

- solubilizzazione (per esempio, gli ioni fosfato);
- scambio cationico (per esempio il potassio);
- distruzione dei complessi leganti organici: ioni metallici (per esempio il rame);
- mineralizzazione della sostanza organica.

I composti organici solubili, capaci di favorire lo sviluppo vegetale, sono costituiti da prodotti della degradazione delle sostanze umiche o della secrezione microbica.

1.5 Il trasferimento dei fattori di crescita

Mentre le riserve dei diversi fattori di crescita sono di tipo molto variabile, i meccanismi che ne assicurano il trasferimento verso le superfici delle radici sono caratterizzati da unicità funzionale. Ciascuno di essi, infatti, dipende dall'esistenza di un principio d'azione che agisce come gradiente nella direzione del trasferimento.

Così il trasferimento di:

- acqua in un suolo non saturo ha come principio d'azione il potenziale di matrice;
- calore ha come principio d'azione la temperatura;
- nutrienti ha come principio d'azione la concentrazione delle specie ioniche in soluzione.

L'espressione matematica del trasferimento è molto semplice.

1. Fertilità e produttività del suolo

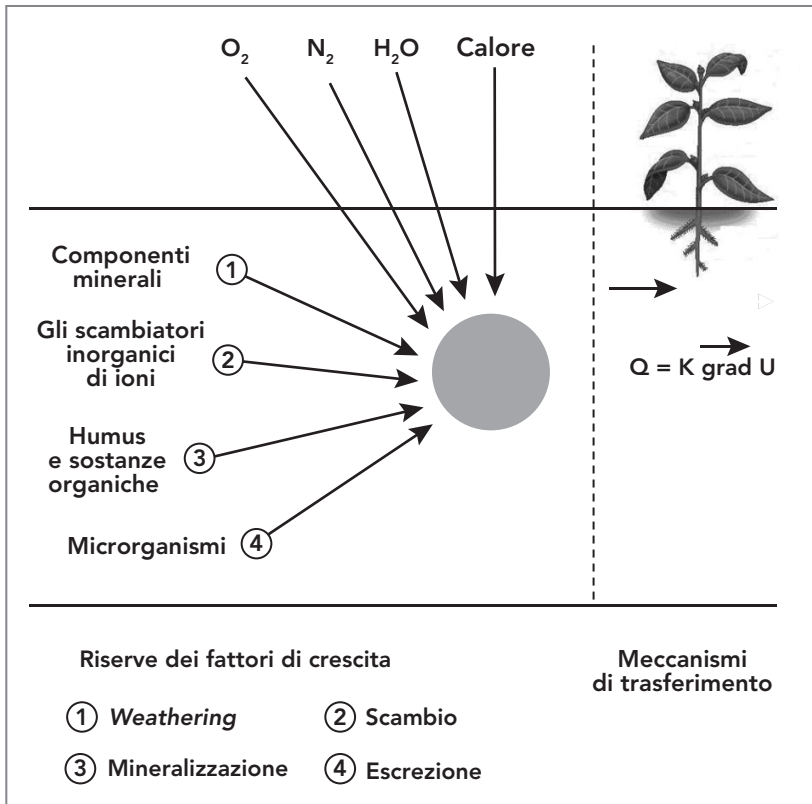


Fig. 1.4 - Schematizzazione del modo d'azione dei componenti funzionali della fertilità propria del suolo (modificata da Morel, 1989).

Se U rappresenta il principio d'azione e K è coefficiente di proporzionalità, l'ampiezza del trasferimento nella direzione x è data da:

$$Q = K \cdot \frac{dU}{dx} \text{ o } Q = K \overrightarrow{\text{grad } U}$$

In figura (Figura 1.4), è rappresentato graficamente il modo d'azione dei componenti funzionali della fertilità propria del suolo.

2 I componenti minerali del suolo

2.1 I minerali che costituiscono le rocce

Vengono definiti minerali le sostanze inorganiche che costituiscono il materiale litico (rocce) presente sulla superficie terrestre, caratterizzate da composizione chimica costante, o poco variabile, da proprietà fisiche specifiche e da particolare struttura cristallina, con assetto ordinato di atomi, ioni o molecole.

Sono definiti primari quelli che si formano durante la solidificazione del magma fuso, secondari, quelli originatisi per cristallizzazione successiva a processi di alterazione.

Dal punto di vista chimico si suddividono in:

- silicati, costituiti prevalentemente da ossigeno e silicio;
- non silicati, comprendenti ossidi, carbonati, fosfati, solfati, solfuri di alcuni elementi.

2.2 La struttura cristallina dei minerali

Con poche eccezioni, i minerali sono organizzati in strutture ioniche.

Ciascun catione è circondato e legato da ioni di carica opposta.

Il numero d'anioni che si dispone intorno ad ogni catione, è definito numero di coordinazione del catione e dipende dal rapporto dei raggi degli ioni considerati.

Per i cationi più comuni vengono riportati (Tabella 2.1) il raggio ionico, in nanometri ($1\text{nm} = 10^{-9}$ metri), il rapporto radiale con l'ossigeno e il numero di coordinazione.

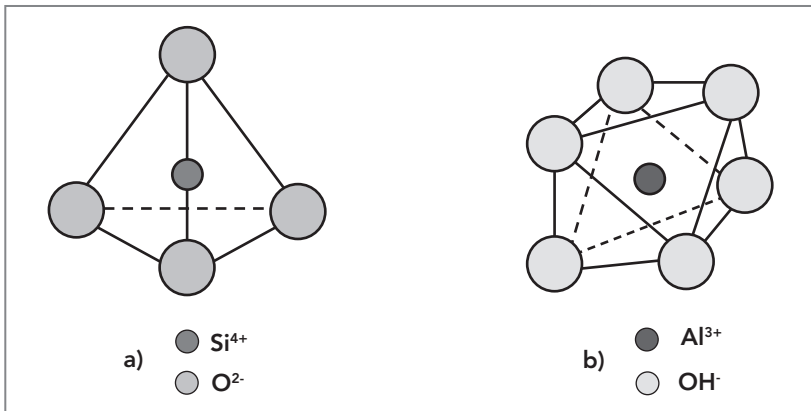
Considerando gli ioni come sfere rigide, la disposizione d'anioni e di cationi, tipica di una particolare struttura cristallina, è caratterizzata da specifica geometria e da stabilità elettronica.

Al concetto di numero di coordinazione si collega il fenomeno della sostituzione isomorfa eterovalente.

Tab. 2.1 - Raggio ionico, rapporto radiale con l'ossigeno ($R = 140 \text{ nm}$) e numero di coordinazione dei cationi più comuni.

Ione	Raggio ionico (nm)	Rapporto radiale catione: anione	Numero di coordinazione
O^{2-}	0,140	-	-
OH^-	0,155	-	-
Si^{4+}	0,042	0,300	4
Al^{3+}	0,051	0,364	4 - 6
Fe^{3+}	0,064	0,457	6
Mg^{2+}	0,066	0,471	6
Fe^{2+}	0,076	0,542	6
Na^+	0,095	0,678	8
Ca^{2+}	0,099	0,707	8
K^+	0,133	0,950	8 - 12

2. I componenti minerali del suolo



Cationi possono sostituirsi reciprocamente nella struttura delle entità cristalline se:

- il raggio ionico non è molto diverso;
- la carica ionica non differisce di più di un'unità di valenza;
- resta inalterata la morfologia della struttura.

Sostituzioni isomorfe eterovalenti determinano nel cristallo eccesso di cariche negative.

2.3 I silicati

2.3.1 La classificazione strutturale dei silicati

L'unità strutturale fondamentale dei silicati è costituita dall'associazione di quattro ioni O²⁻ tra i quali trova posto uno ione Si⁴⁺.

Il raggruppamento ionico definisce geometricamente un tetraedro regolare, con tre ioni O²⁻ disposti a formare la base, uno l'apice (Figura 2.1 a).

Negli alluminio-silicati si accerta una seconda unità formata da sei ioni, O²⁻ o OH⁻, disposti ai vertici di un ottaedro regolare, tra i quali può inserirsi uno ione Mg²⁺, Fe²⁺ o Al³⁺.

Tre dei vertici giacciono in un piano, tre in un piano a esso parallelo (Figura 2.1 b).

La polimerizzazione d'unità simili o diverse definisce l'organizzazione strutturale dei silicati.

L'impacchettamento compatto esagonale (*hexagonal closest packing*) definisce il modo migliore per sistemare in un piano un certo numero di sfere rigide (rappresentanti in modo semplice ma efficace, ioni O²⁻ e OH⁻). Una linea ideale, tracciata tra i centri delle sei sfere che vengono a trovarsi a contatto con ciascuna sfera, definisce, infatti, un esagono (Figura 2.2).

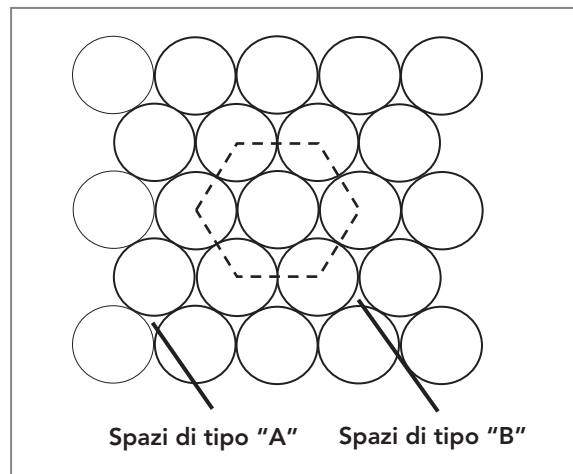


Fig. 2.2 - Impacchettamento compatto esagonale di sfere su un piano.

Gli spazi triangolari individuabili tra le sfere possono essere di tipo "A" o di tipo "B" secondo se il vertice del triangolo è rivolto verso il basso o verso l'alto.

Se una sfera del secondo piano di sfere sovrapposto al primo è sistemata nella cavità formata dalle tre sfere che delimitano il sito di tipo "A", tutte le altre sfere avranno analoga sistemazione (Figura 2.3).

La classificazione dei silicati dipende dalla disposizione strutturale dei tetraedri (Tabella 2.2):

- nesosilicati [SiO₄⁴⁻]_n - tetraedri indipendenti legati da cationi bivalenti;
- sorosilicati [Si₂O₇⁶⁻]_n - due tetraedri uniti con la condivisione di uno ione ossigeno;
- ciclosilicati [Si₃O₄⁶⁻]_n, [Si₄O₁₂⁸⁻]_n, [Si₆O₁₆¹²⁻]_n - formati dalla sovrapposizione d'anelli a 6, più raramente a 3 o a 4, unità tetraedriche;

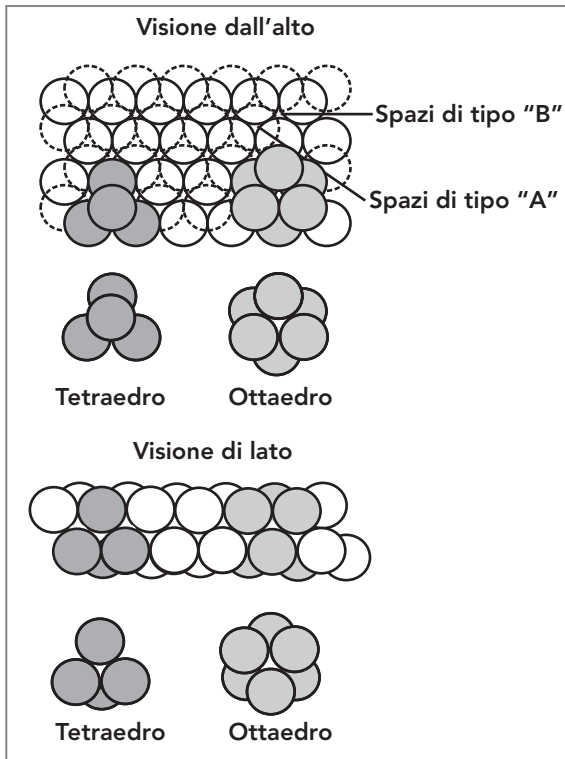


Fig. 2.3 - Tetraedri ed ottaedri individuabili in conseguenza dell'impacchettamento di sfere su due piani sovrapposti.

- inosilicati $[\text{SiO}_3^{2-}]_n$, $[\text{Si}_4\text{O}_{11}^{6-}]_n$ - tetraedri uniti, con la condivisione di ioni ossigeno, a formare una catena semplice o una catena doppia, più catene sono legate da cationi;
- fillosilicati $[\text{Si}_4\text{O}_{10}^{4-}]_n$ - due fogli di tetraedri (T) (Figura 2.4), disposti secondo maglie esagonali, uniti da un foglio di ottaedri (O) (Figura 2.5). Nei tetraedri lo ione Si^{4+} può essere solo parzialmente sostituito da uno ione Al^{3+} , negli ottaedri lo ione Al^{3+} può essere sostituito da ioni Mg^{2+} e Fe^{2+} . Nei fillosilicati (miche), più strati, formati da tre fogli (TOT), sono uniti da ioni K^+ ;
- tectosilicati $[\text{SiO}_2]_n$ - organizzazione strutturale tridimensionale di tetraedri che condividono tutti gli ioni ossigeno. Le zeoliti sono caratterizzate da peculiare disposizione spaziale di tetraedri con formazione di cavità intercomunicanti.

In funzione dei cationi che possono trovarsi al centro degli ottaedri (in coordinazione ottaedrica), i fillosilicati sono divisi in due gruppi:

- diottaedrici se cationi trivalenti occupano solo i 2/3 delle posizioni ottaedriche disponibili (Figura 2.5);
- triottaedrici se cationi bivalenti occupano tutti i centri ottaedrici (Figura 2.6).

Tab. 2.2 - Classificazione strutturale dei silicati.

Classi	Disposizione dei tetraedri	Gruppi strutturali	Rapporto silicio: ossigeno	Silicati
Nesosilicati		Tetraedri indipendenti	1:4	Olivine
Sorosilicati		Due tetraedri uniti	2:7	Gehlenite Akermanite
Ciclosilicati		Anelli esagonali di tetraedri	1:3	Berillo Tormalina
Inosilicati		Catene semplici di tetraedri	1:3	Piroseni
Inosilicati		Catene doppie di tetraedri	4:11	Anfiboli
Fillosilicati		Tetraedri disposti secondo maglie esagonali	2:5	Muscovite Biotite
Tectosilicati		Reticolo tridimensionale di tetraedri	1:2	Quarzo Feldspati Zeoliti

2. I componenti minerali del suolo

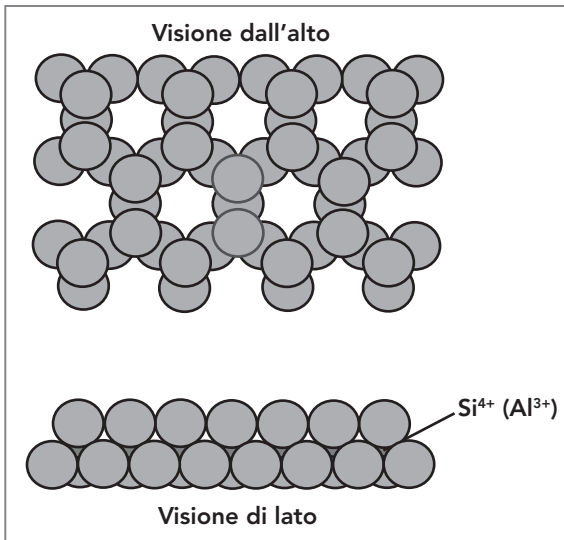


Fig. 2.4 - Visione dall'alto e di lato di un foglio tetraedrico.

La muscovite $[KAl_2(AlSiO_3)O_{10}(OH)_2]$, mica diottaedrica, è tra i silicati più resistenti ai processi di alterazione.

La biotite $[K(Mg,Fe^{II})_3(AlSiO_3)O_{10}(OH)_2]$, mica triottaedrica, si altera molto rapidamente.

2.4 I non silicati

2.4.1 I carbonati

Il calcio carbonato $[CaCO_3]$ cristallizza come calcite (romboedrica) e come aragonite (rombica).

L'aragonite è metastabile rispetto alla calcite.

La dolomite, carbonato doppio di calcio e magnesio $[CaMg(CO_3)_2]$ ha minore diffusione e presenta solubilità ridotta.

Sono noti i carbonati caratterizzati:

- da struttura tipo calcite - magnesite $[MgCO_3]$, smitsonite $[ZnCO_3]$, siderite $[FeCO_3]$, rodocrosite $[MnCO_3]$;
- da struttura di tipo aragonite - stronzianite $[SrCO_3]$, cerussite $[PbCO_3]$, witherite $[BaCO_3]$.

2.4.2 I fosfati

Le apatiti sono i più comuni minerali caratterizzati dalla presenza di fosforo.

La fluoroapatite $[Ca_{10}(PO_4)_6F_2]$ è presente nelle rocce ignee e metamorfiche.

La cloroapatite $[Ca_{10}(PO_4)_6Cl_2]$ e l'idrossiapatite $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ sono poco diffuse.

Le carbonato apatiti $[Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(CO_3)_x F_2]$ trova-

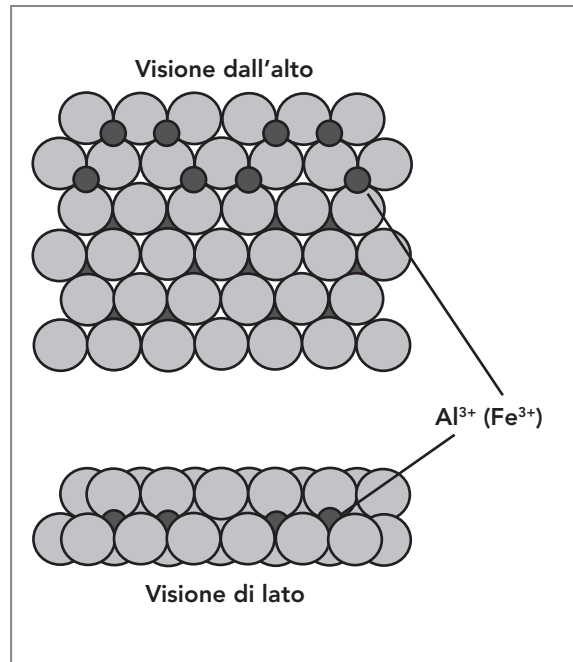


Fig. 2.5 - Visione dall'alto e di lato di un foglio ottaedrico (diottaedrico).

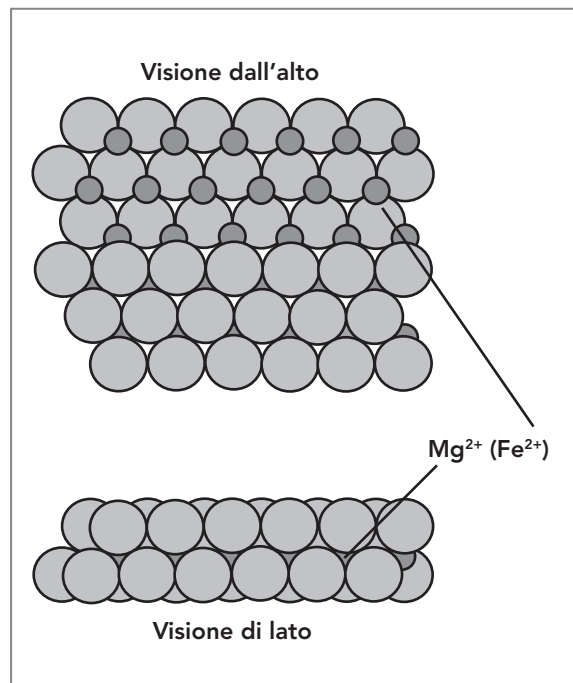


Fig. 2.6 - Visione dall'alto e di lato di un foglio ottaedrico (triottaedrico).

no utilizzazione nella preparazione industriale dei concimi fosfatici o per l'applicazione diretta in agricoltura.

Variscite $[\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$, wavellite $[\text{Al}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$, strengite $[\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ e vivianite $[\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ sono minerali abbastanza rari.

2.4.3 I solfati

Ampiamente diffuso nelle rocce sedimentarie d'origine marina, è il calcio solfato o gesso $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$.

Più rara è la forma anidra, anidrite $[\text{CaSO}_4]$.

2.4.4 I solfuri

La pirite $[\text{FeS}_2]$ è comunemente presente nelle rocce ignee, sedimentarie e metamorfiche. Si può trovare associata ad altri solfuri quali galena $[\text{PbS}]$ e blenda $[\text{ZnS}]$ o ai minerali di rame calcocite $[\text{Cu}_2\text{S}]$, bornite $[\text{Cu}_5\text{FeS}_4]$ e calcopirite $[\text{CuFeS}_2]$.

2.4.5 Gli alogenuri

Il salgemma $[\text{NaCl}]$, la silvite $[\text{KCl}]$ e la fluorite $[\text{CaF}_2]$ sono le entità mineralogiche più importanti.

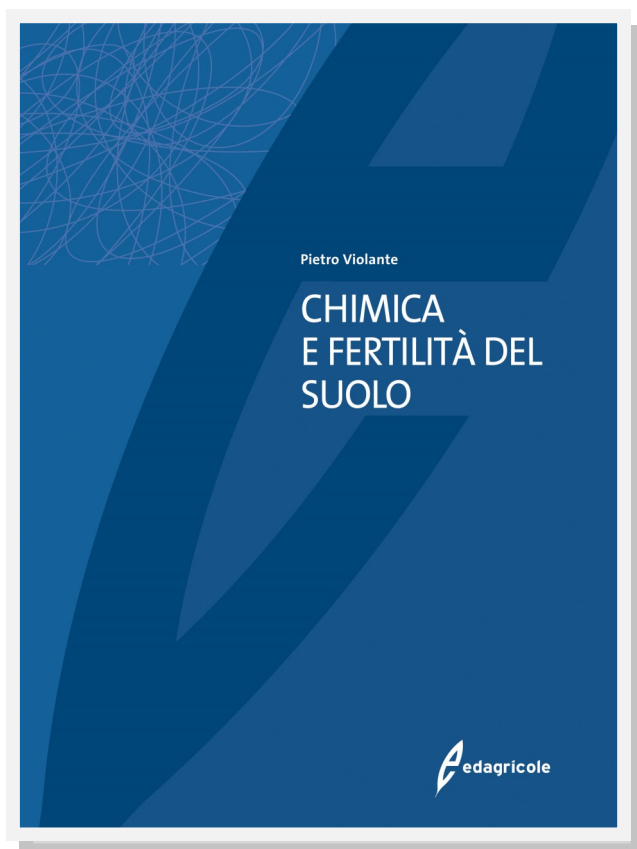
2.4.6 Gli ossidi

Diaspro $[\alpha \text{AlOOH}]$, corindone $[\alpha \text{Al}_2\text{O}_3]$, gibbsite $[\gamma \text{Al}(\text{OH})_3]$ e boehmite $[\gamma \text{AlOOH}]$ sono gli ossidi d'alluminio presenti in numerose formazioni litiche.

Ematite $[\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3]$, goethite $[\alpha \text{FeOOH}]$ e magnetite $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ sono gli ossidi di ferro più diffusi nel suolo e nelle rocce.

Il quarzo $[\text{SiO}_2]$ e la cristobalite, polimorfi di SiO_2 , sono comunemente presenti in molte rocce.

Dell'ossido di titanio $[\text{TiO}_2]$ sono diffusi in natura le forme polimorfe rutilo, brookite e anatasio.



**Clicca QUI per
ACQUISTARE il libro ONLINE**

**Clicca QUI per scoprire tutti i
LIBRI del catalogo EDAGRICOLE**

**Clicca QUI per avere maggiori
INFORMAZIONI**