

Gli elementi essenziali della nutrizione minerale delle piante



Walt Disney
ZIO PAPERONE
FLORICOLTURA
PREZIOSA



Fine

I tentativi di relazionare il biochimismo della pianta con aria, acqua e suolo risalgono a tempi remoti
Liebig (1840) esplorò per primo e con basi scientifiche i meccanismi della nutrizione minerale delle piante



Nel sec. XIX nasce la chimica agraria

Elementi essenziali ed elementi utili

Secondo Arnon e Stout (1939) un nutriente è essenziale:

- se la sua assenza non consente alla pianta di completare il suo ciclo vegetativo, causando crescita anormale o morte prematura
- se le sue specifiche funzioni non possono essere sostituite da un altro elemento
- se esso svolge un ruolo unico e diretto nel metabolismo della pianta

Un nutriente è utile se può:

- compensare gli effetti tossici di altri elementi
- sostituire un nutriente essenziale in *alcune* funzioni metaboliche *non specifiche*

Gli elementi della nutrizione minerale delle piante

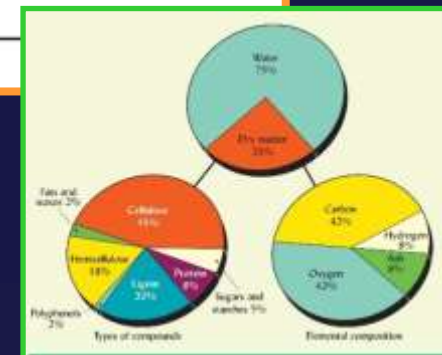
																		18					
1																	2	He					
1 H Idrogeno 1,00794																	2 He Elio 4,002602						
3 Li Litio 6,941	4 Be Berillio 9,012182																	5 B Boro 10,811	6 C Carbonio 12,011	7 N Azoto 14,00674	8 O Ossigeno 15,9994	9 F Fluoro 18,998403	10 Ne Neon 20,1797
11 Na Sodio 22,989768	12 Mg Magnesio 24,3050																	13 Al Alluminio 26,981539	14 Si Silicio 28,0855	15 P Fosforo 30,973762	16 S Zolfo 32,066	17 Cl Cloro 35,4527	18 Ar Argo 39,948
																		13	14	15	16	17	
19 K Potassio 39,0983	20 Ca Calcio 40,078	21 Sc Scandio 44,955910	22 Ti Titanio 47,867	23 V Vanadio 50,9415	24 Cr Cromo 51,9961	25 Mn Manganese 54,93805	26 Fe Ferro 55,845	27 Co Cobalto 58,93320	28 Ni Nichel 58,6934	29 Cu Rame 63,546	30 Zn Zinco 65,39	31 Ga Gallio 69,723	32 Ge Germanio 72,61	33 As Arsenico 74,92159	34 Se Selenio 78,96	35 Br Bromo 79,904	36 Kr Cripto 83,80						
37 Rb Rubidio 85,4678	38 Sr Stronzio 87,62	39 Y Ittrio 88,90585	40 Zr Zirconio 91,224	41 Nb Niobio 92,90638	42 Mo Molibdeno 95,94	43 Tc Tecnecio [98]	44 Ru Rutenio 101,07	45 Rh Rodio 102,90550	46 Pd Palladio 106,42	47 Ag Argento 107,8682	48 Cd Cadmio 112,411	49 In Indio 114,818	50 Sn Stagno 118,710	51 Sb Antimonio 121,760	52 Te Tellurio 127,60	53 I Iodio 126,90447	54 Xe Xeno 131,29						
55 Cs Cesio 132,90543	56 Ba Bario 137,327	†	72 Hf Aftio 178,49	73 Ta Tantalio 180,9479	74 W Tungsteno 183,84	75 Re Renio 186,207	76 Os Osmio 190,23	77 Ir Iridio 192,217	78 Pt Platino 195,08	79 Au Oro 196,96654	80 Hg Mercurio 200,59	81 Tl Tallio 204,3833	82 Pb Piombo 207,2	83 Bi Bismuto 208,98037	84 Po Polonio [209]	85 At Astatio [210]	86 Rn Radon [222]						
87 Fr Francio [223]	88 Ra Radio [226]	‡	104 Rf Rutherfordio [267]	105 Db Dubnio [268]	106 Sg Seaborgio [271]	107 Bh Bohrio [272]	108 Hs Hassio [270]	109 Mt Meitnerio [276]	110 Ds Darmstazio [281]	111 Rg Roentgenio [280]	112 Cp Copernicio [285]	113 Uut Ununtrio [284]	114 Uuq Ununquadio [289]	115 Uup Ununpentio [288]	116 Uuh Ununhexio [293]	117 Uus Ununseptio [?]	118 Uuo Ununoctio [294]						
† Lantanidi			57 La Lantanio 138,9055	58 Ce Cerio 140,115	59 Pr Prasodimio 140,90765	60 Nd Neodimio 144,24	61 Pm Promezio [145]	62 Sm Samario 150,36	63 Eu Europio 151,965	64 Gd Gadolinio 157,25	65 Tb Terbio 158,92534	66 Dy Disprosio 162,50	67 Ho Olmio 164,93032	68 Er Erbio 167,26	69 Tm Tulio 168,93421	70 Yb Itterbio 173,04	71 Lu Lutezio 174,967						
‡ Attinidi			89 Ac Attinio [227]	90 Th Torio 232,0381	91 Pa Protattinio 231,03588	92 U Uranio 238,0289	93 Np Nettunio [237]	94 Pu Plutonio [244]	95 Am Americio [243]	96 Cm Curio [247]	97 Bk Berkelio [247]	98 Cf Californio [251]	99 Es Einsteinio [252]	100 Fm Fermio [257]	101 Md Mendelevio [258]	102 No Nobelio [259]	103 Lr Lawrenzio [262]						
Elementi essenziali per i vegetali, assorbiti da aria e acqua			Elementi essenziali per i vegetali, assorbiti dal terreno				Elementi benefici, forse essenziali per i vegetali				Elementi benefici, ma non essenziali per i vegetali		Elementi essenziali per alghe o batteri		Elementi non essenziali, che possono essere assorbiti dai vegetali								

Gli elementi essenziali della nutrizione minerale delle piante

Table 1 Essential plant nutrients and their relative and average plant concentrations

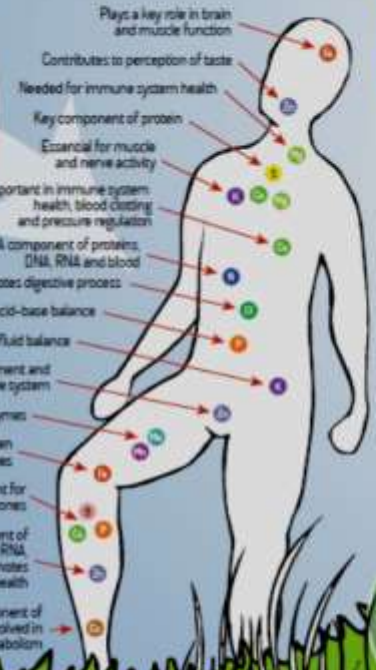
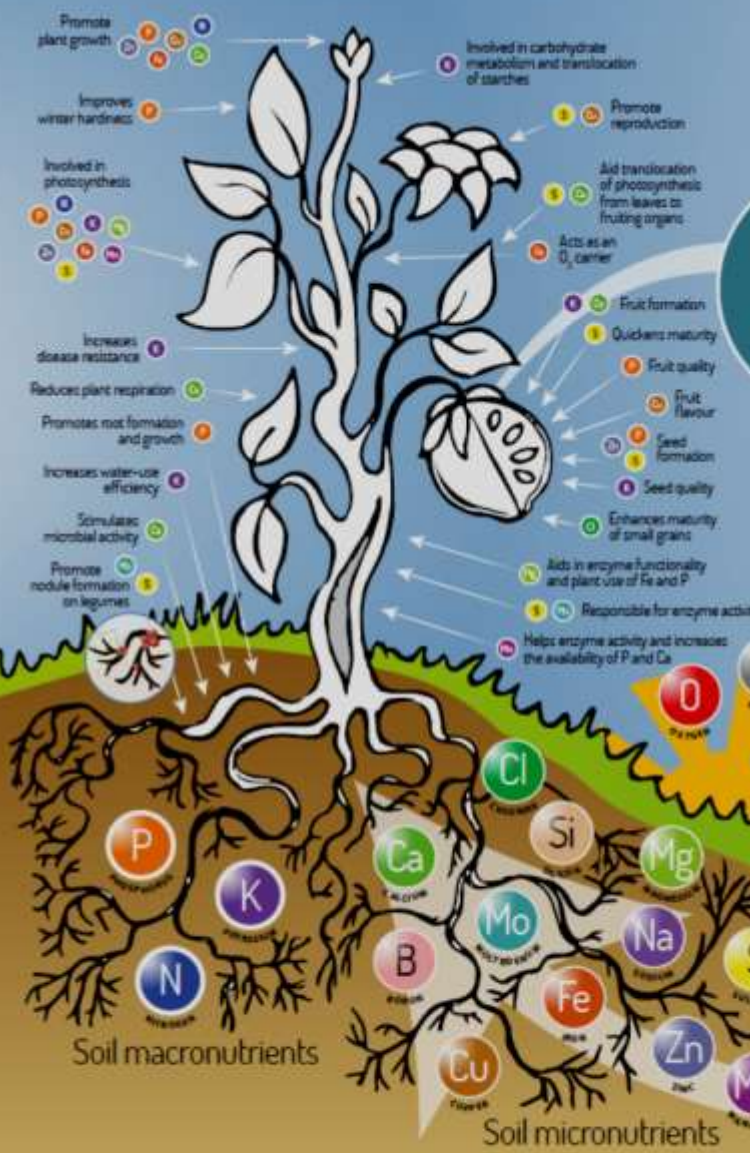
Element or nutrient	Plant concentration ^a		Classification
	Relative	Average	
Hydrogen H	60 000 000	6.0%	Primary Macronutrients
Oxygen O	30 000 000	45.0%	
Carbon C	30 000 000	45.0%	
Nitrogen N	1 000 000	1.5%	
Potassium K	400 000	1.0%	
Phosphorus P	30 000	0.2%	
Calcium Ca	200 000	0.5%	
Magnesium Mg	100 000	0.2%	
Sulfur S	30 000	0.1%	
Chloride Cl	3000	100 ppm (0.01%)	
Iron Fe	2000	100 ppm	
Boron B	2000	20 ppm	
Manganese Mn	1000	50 ppm	
Zinc Zn	300	20 ppm	
Copper Cu	100	6 ppm	
Molybdenum Mo	1	0.1 ppm	
Nickel Ni	1	0.1 ppm	

^aConcentration expressed on a dry-matter-weight basis.



Soil the foundation of nutrition

Role of 18 nutrients necessary for plant growth and human health



Soil degradation leads to the loss of soil micro and macronutrients

Nutrient-poor soils are unable to produce healthy food with all the necessary nutrients for a healthy person

Over 2 billion people suffer from micronutrient deficiencies



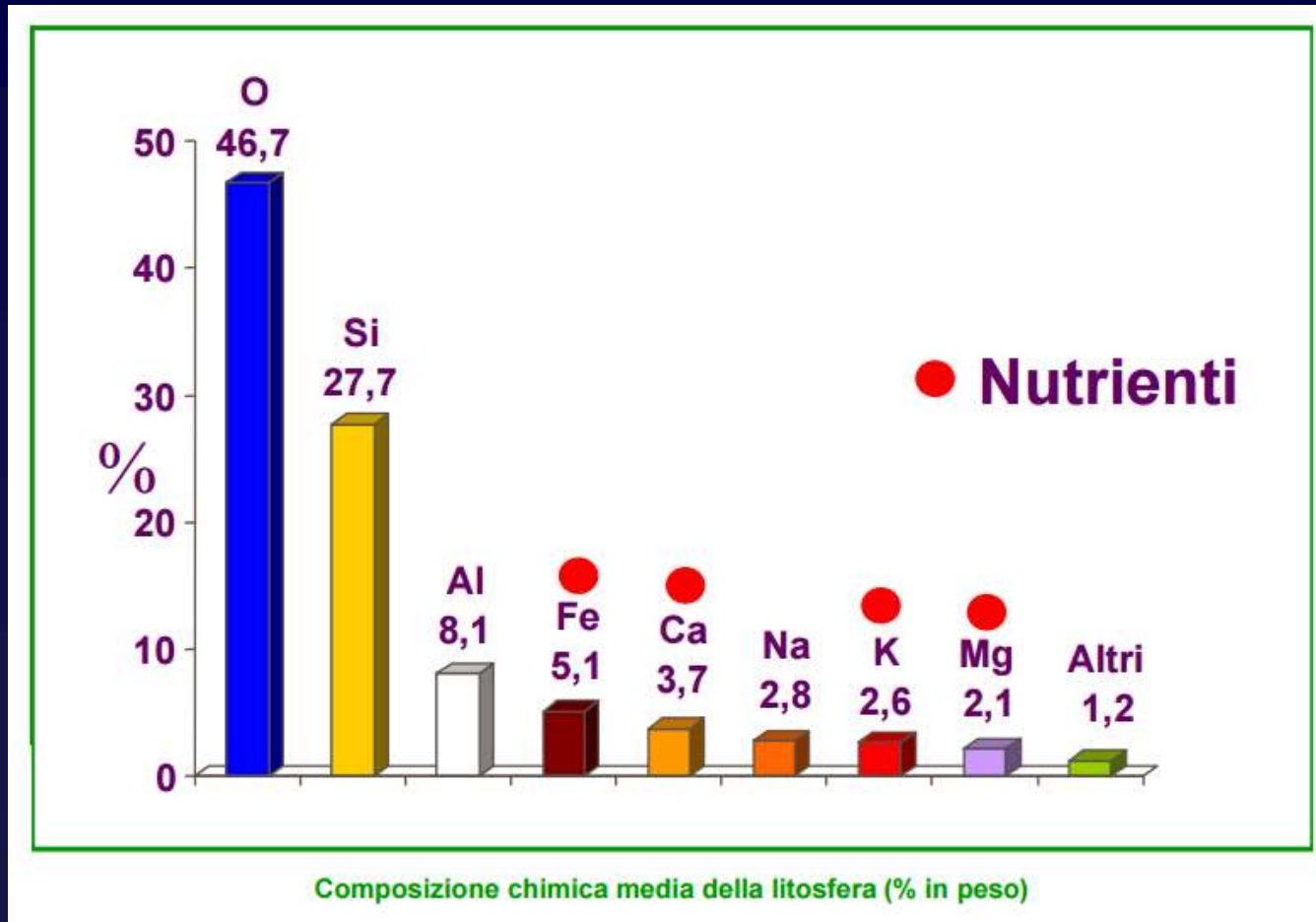
Gli organismi viventi si comportano come sistemi altamente selettivi che concentrano al loro interno gli elementi della nutrizione minerale prelevandoli dall'ambiente circostante (aria, acqua e suolo).

Litosfera

Cellula vegetale

Litosfera		% (p/p)	Cellula vegetale	
Ossigeno (O)	46.7		Carbonio (C)	45
Silicio (Si)	27.7		Ossigeno (O)	45
Alluminio (Al)	8.1		Idrogeno (H)	6
Ferro (Fe)	5.1		Azoto (N)	1.5
Calcio (Ca)	3.7		Potassio (K)	1.0
Sodio (Na)	2.8		Calcio (Ca)	0.5
Potassio (K)	2.6		Magnesio (Mg)	0.2
Magnesio (Mg)	2.1		Fosforo (P)	0.2
Altri	1.2		Zolfo (S)	0.1
			Ferro (Fe)	0.01

La componente inorganica del suolo



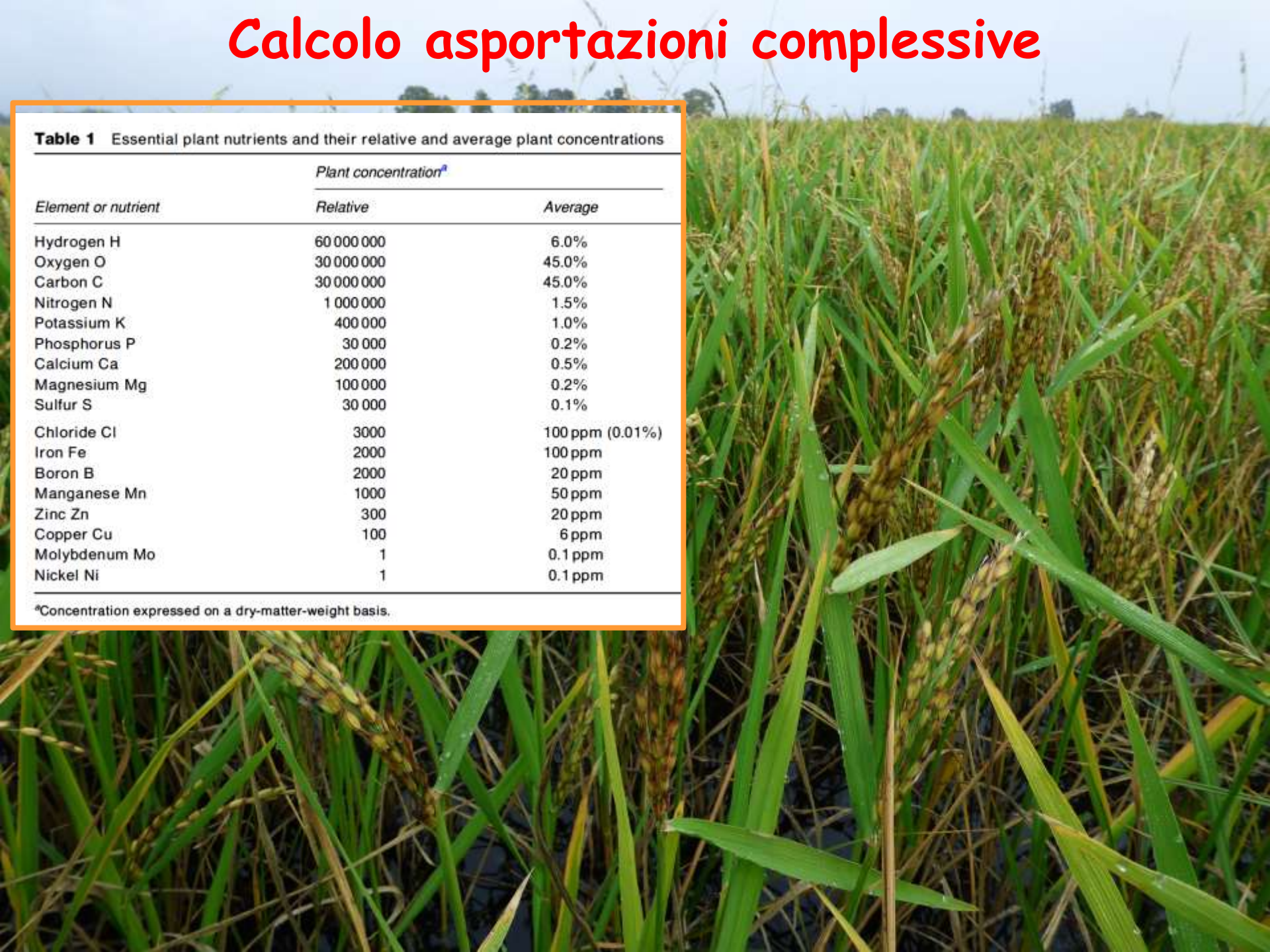
I corpi rocciosi rappresentativi dallo strato superficiale della crosta terrestre sono costituiti da otto elementi chimici presenti in quantità in peso più elevata dell'1%

Calcolo asportazioni complessive

Table 1 Essential plant nutrients and their relative and average plant concentrations

Element or nutrient	Plant concentration ^a	
	Relative	Average
Hydrogen H	60 000 000	6.0%
Oxygen O	30 000 000	45.0%
Carbon C	30 000 000	45.0%
Nitrogen N	1 000 000	1.5%
Potassium K	400 000	1.0%
Phosphorus P	30 000	0.2%
Calcium Ca	200 000	0.5%
Magnesium Mg	100 000	0.2%
Sulfur S	30 000	0.1%
Chloride Cl	3000	100 ppm (0.01%)
Iron Fe	2000	100 ppm
Boron B	2000	20 ppm
Manganese Mn	1000	50 ppm
Zinc Zn	300	20 ppm
Copper Cu	100	6 ppm
Molybdenum Mo	1	0.1 ppm
Nickel Ni	1	0.1 ppm

^aConcentration expressed on a dry-matter-weight basis.



Gli elementi essenziali e le forme chimiche della nutrizione minerale delle piante

Table 37.1 Essential Nutrients in Plants

Element	Form Available to Plants	Major Functions
Macronutrients		
Carbon	CO ₂	Major component of plant's organic compounds
Oxygen	CO ₂	Major component of plant's organic compounds
Hydrogen	H ₂ O	Major component of plant's organic compounds
Nitrogen	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	Component of nucleic acids, proteins, hormones, and coenzymes
Sulfur	SO ₄ ²⁻	Component of proteins, coenzymes
Phosphorus	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	Component of nucleic acids, phospholipids, ATP; several coenzymes
Potassium	K ⁺	Cofactor that functions in protein synthesis; major solute functioning in water balance; operation of stomata
Calcium	Ca ²⁺	Important in formation and stability of cell walls and in maintenance of membrane structure and permeability; activates some enzymes; regulates many responses of cells to stimuli
Magnesium	Mg ²⁺	Component of chlorophyll; activates many enzymes
Micronutrients		
Chlorine	Cl ⁻	Required for water-splitting step of photosynthesis; functions in water balance
Iron	Fe ³⁺ , Fe ²⁺	Component of cytochromes; activates some enzymes
Boron	H ₂ BO ₃ ⁻	Cofactor in chlorophyll synthesis; may be involved in carbohydrate transport and nucleic acid synthesis
Manganese	Mn ²⁺	Active in formation of amino acids; activates some enzymes; required for water-splitting step of photosynthesis
Zinc	Zn ²⁺	Active in formation of chlorophyll; activates some enzymes
Copper	Cu ⁺ , Cu ²⁺	Component of many redox and lignin-biosynthetic enzymes
Molybdenum	MoO ₄ ²⁻	Essential for nitrogen fixation; cofactor that functions in nitrate reduction
Nickel	Ni ²⁺	Cofactor for an enzyme functioning in nitrogen metabolism

Ciascuno di essi svolge una specifica funzione fisio-metabolica nella cellula vegetale, divenendo quindi essenziale per la crescita e lo sviluppo della pianta.

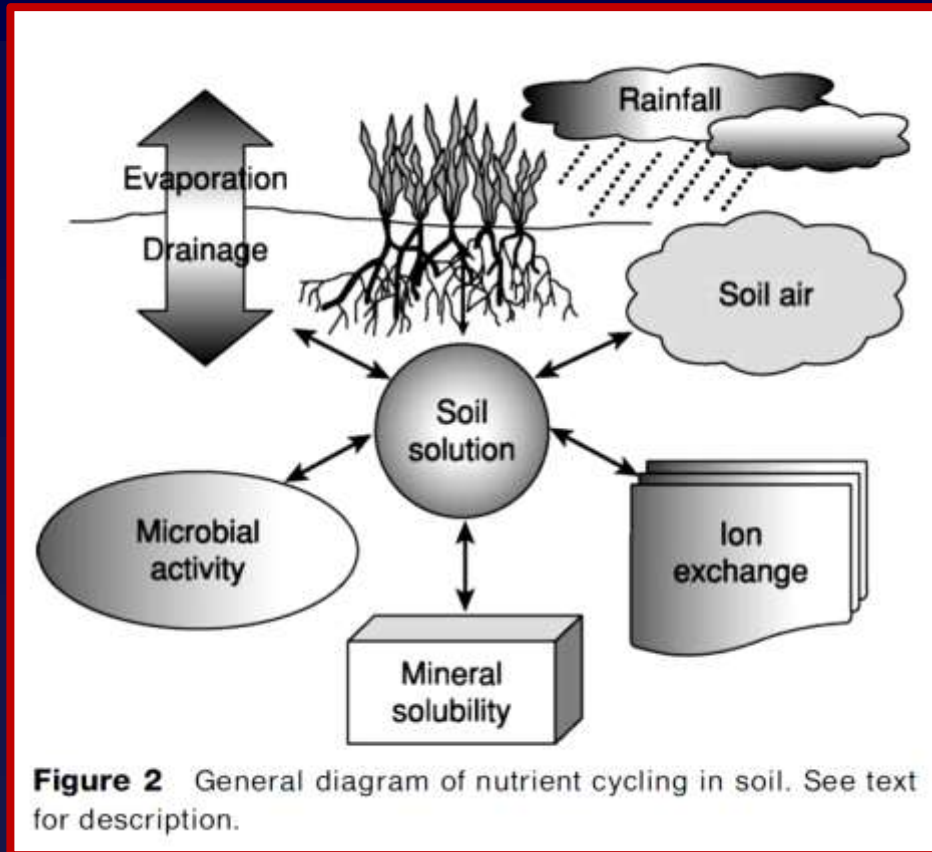
Gli elementi della nutrizione minerale delle piante

Elemento	Ruolo
<u>Carbonio</u>	Componente dell'organizzazione molecolare di tutte le biomolecole (carboidrati, proteine, lipidi, acidi nucleici, alcaloidi, etc.).
<u>Ossigeno</u>	Come il carbonio partecipa alla costituzione molecolare di tutte le biomolecole.
<u>Idrogeno</u>	Componente della costituzione molecolare di tutte le biomolecole. Svolge un ruolo funzionale nel controllare il bilancio ionico, il potenziale di membrana, i processi redox. Fondamentale nel trasferimento dell'energia.
<u>Azoto</u>	Componente della costituzione molecolare di biomolecole quali proteine, acidi nucleici, ormoni, clorofilla, vitamine, enzimi.
<u>Fosforo</u>	Coinvolto nei processi di trasferimento dell'energia. Componente della costituzione molecolare di lipidi, acidi nucleici e, negli organi di riserva, della fitina.
<u>Zolfo</u>	Componente della costituzione molecolare di biomolecole quali amminoacidi, enzimi, cofattori e vitamine. Coinvolto nei processi biosintetici e di trasferimento dell'energia.
<u>Potassio</u>	Ruolo funzionale, stabilizza la conformazione di molti enzimi. Partecipa ai meccanismi di regolazione osmotica e di controllo del bilancio idrico, ionico e del turgore cellulare. Coinvolto nella traslocazione dei prodotti della fotosintesi. Contrasta gli effetti di stress.
<u>Calcio</u>	È necessario per la distensione e la divisione cellulare. Mantiene l'integrità della cellula e la permeabilità delle membrane. Coinvolto nella traslocazione dei carboidrati. Mitiga l'azione tossica dei metalli pesanti. Favorisce l'infezione nodulare dei rizobi.
<u>Magnesio</u>	Componente della clorofilla. Cofattore enzimatico coinvolto nei processi di trasferimento di energia e del fosfato. Stabilizza i ribosomi nella sintesi delle proteine.
<u>Ferro</u>	Cofattore enzimatico nelle ossidoriduttasi partecipa al trasferimento di energia. Coinvolto nella biosintesi della clorofilla nei cloroplasti e nella riduzione di S e N.

Gli elementi della nutrizione minerale delle piante

Elemento	Ruolo
Manganese	Cofattore enzimatico nei processi redox di trasferimento di elettroni nella fotosintesi e nella fotolisi dell'acqua. Interviene nella biosintesi di alcune vitamine e delle auxine.
Zinco	Cofattore enzimatico nelle ossidoriduttasi. Coinvolto nel metabolismo dei carboidrati e nella biosintesi del triptofano.
Rame	Cofattore enzimatico nei processi redox di trasferimento di elettroni nella fotosintesi e nella catena di trasporto di elettroni. Partecipa alla biosintesi di IAA.
Boro	Coinvolto nei processi di fioritura, germinazione del polline, fruttificazione e divisione cellulare. Favorisce la traslocazione degli zuccheri e degli ormoni.
Molibdeno	Cofattore nel sistema enzimatico della nitrogenasi e nella nitrato-riduttasi.
Nichel	Cofattore enzimatico dell'ureasi. Favorisce l'assorbimento del Fe e la germinazione dei semi.
Cloro	Interviene nella fotolisi dell'acqua. Regola il potenziale osmotico della cellula.
Silicio	Conferisce resistenza alle pareti cellulari (riso) ed aumenta la resistenza alle infezioni fungine.
Sodio	Regolazione del tono osmotico e del bilancio ionico cellulare.
Selenio	Ritenuto benefico per gli organismi animali che lo rinvergono in piante accumulatrici.
Cobalto	Coinvolto nella biosintesi della vitamina B12 è essenziale per gli animali e per i batteri azotofissatori simbiotici delle Leguminosae.
Vanadio	Stimola la crescita di alcune specie vegetali. Può sostituire il Mo nella azotofissazione.

Dinamica dei nutrienti nel suolo



Le piante assorbono i nutrienti **prelevandoli dalla fase liquida del suolo**. Le interazioni dinamiche tra processi di natura chimica, chimico-fisica e biologica che interessano la fase liquida ne modulano la disponibilità per l'assorbimento radicale. **La reintegrazione del nutriente è legata allo stabilirsi di equilibri dinamici tra le frazioni (pool).**

Dinamica dei nutrienti nel suolo



Nutriente	mg · L ⁻¹	μM
Cl ⁻	60 - 600	2000 - 20000
S [SO ₄ ²⁻]	50 - 500	500 - 5000
Ca ²⁺	30 - 300	800 - 8000
Mg ²⁺	5 - 50	200 - 2000
Si [(Si(OH) ₄]	10 - 50	400 - 2000
K ⁺	1 - 10	20 - 200
Na ⁺	0.5 - 5	20 - 200
F ⁻	0.1 - 0.5	5 - 20
Mn ²⁺	0.1 - 10	2 - 20
Cu ²⁺	0.03 - 0.3	0.5 - 5
P [H ₂ PO ₄ ⁻]	0.002 - 0.03	0.06 - 1
Mo [HMoO ₄ ⁻]	0.001 - 0.01	0.01 - 0.1
Al [Al(OH) ²⁺]	<0.01	<0.4
Fe ²⁺ + Fe(OH) ₂ ⁺	<0.005	<0.01
Zn ²⁺	<0.005	<0.01

Concentrazione di alcuni nutrienti nella soluzione di suoli delle regioni temperate
(modificata da Murrman e Koutz, 1972)

La quantità dei nutrienti presenti **in forma solubile nella fase liquida del suolo** è generalmente poco elevata e varia in funzione del contenuto di acqua, delle caratteristiche minerali e fisico-chimiche del suolo, della quantità di humus, dell'attività microbica, del clima, della vegetazione, della gestione del suolo.

Dinamica dei nutrienti nel suolo



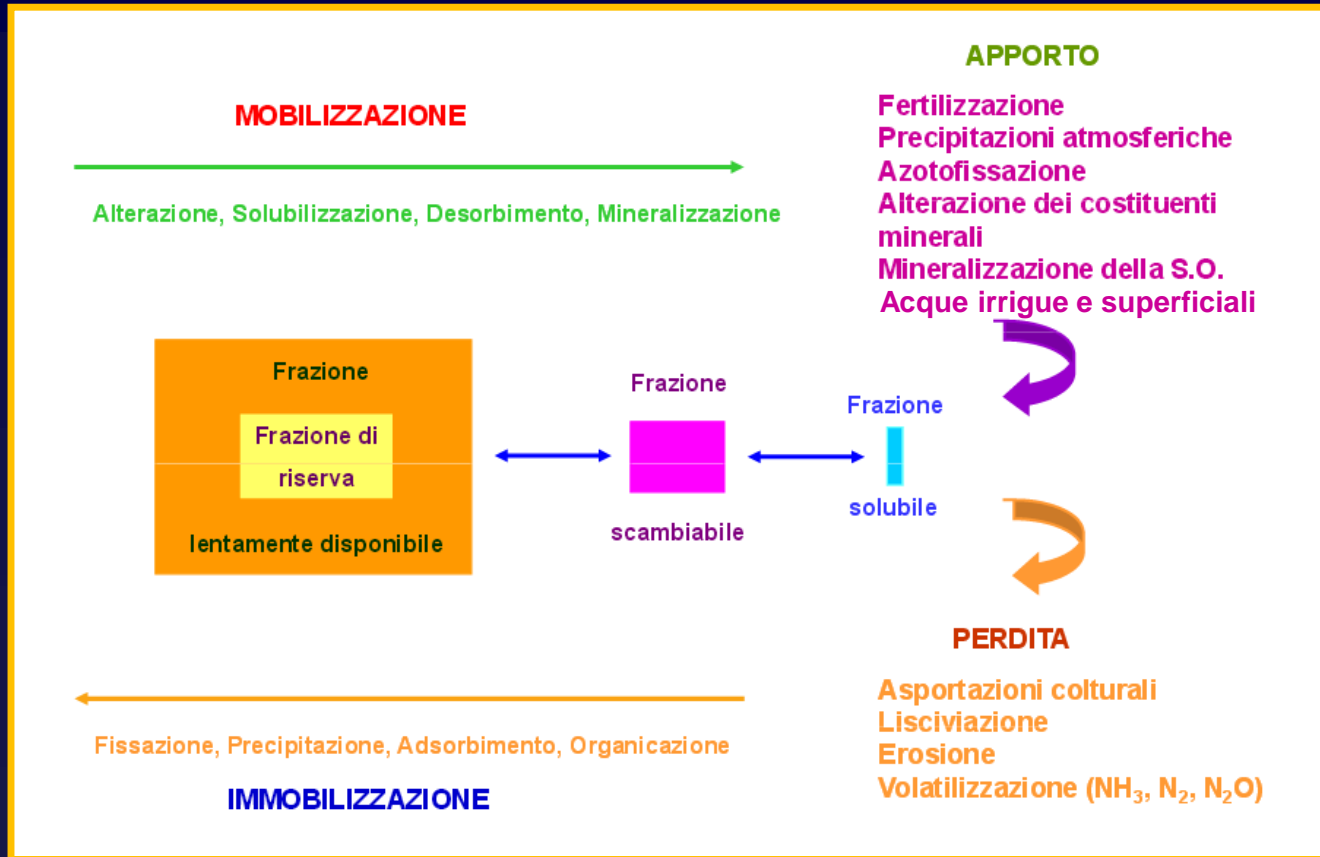
Table 1.3
QUANTITIES OF SIX ESSENTIAL ELEMENTS FOUND IN UPPER 15 CM OF REPRESENTATIVE SOILS
IN TEMPERATE REGIONS

Essential element	Humid Region Soil			Arid Region Soil		
	In solid framework, kg/ha	Exchangeable, kg/ha	In soil solution, kg/ha	In solid framework, kg/ha	Exchangeable, kg/ha	In soil solution, kg/ha
Ca	8,000	2,250	60–120	20,000	5,625	140–280
Mg	6,000	450	10–20	14,000	900	25–40
K	38,000	190	10–30	45,000	250	15–40
P	900	—	0.05–0.15	1,600	—	0.1–0.2
S	700	—	2–10	1,800	—	6–30
N	3,500	—	7–25	2,500	—	5–20

(da Weil & Brady, 2017)

La quantità dei nutrienti presenti in forma solubile nella fase liquida del suolo è generalmente poco elevata, non bilanciata e varia secondo le caratteristiche pedoclimatiche del sito.

I nutrienti minerali si trovano nel suolo in forma libera, adsorbita e combinata



Nel suolo processi di natura chimica, chimico-fisica e biologica ne modulano la disponibilità, cioè la loro concentrazione nella fase liquida.

Dinamica dei nutrienti nel suolo



Il nutriente è allontanato dalla fase liquida, viene dinamicamente reintegrato in virtù dell'equilibrio che si stabilisce tra frazioni (*pool*) caratterizzate da un diverso grado di disponibilità.

I *pool* comprendono i nutrienti:

- immediatamente disponibili, se presenti come ioni, molecole e chelati in soluzione (*frazione solubile*)
- facilmente disponibili in tempo breve, se adsorbiti sulle superfici degli scambiatori (*frazione scambiabile*)
- lentamente disponibili, se combinati in forme minerali ed organiche poco complesse o adsorbiti in posizioni poco accessibili (*frazione lentamente disponibile*)
- molto lentamente disponibili, se coinvolti nella struttura di composti molto resistenti all'alterazione e alla mineralizzazione (*frazione riserva*).

Il ciclo dei nutrienti nel sistema suolo-pianta

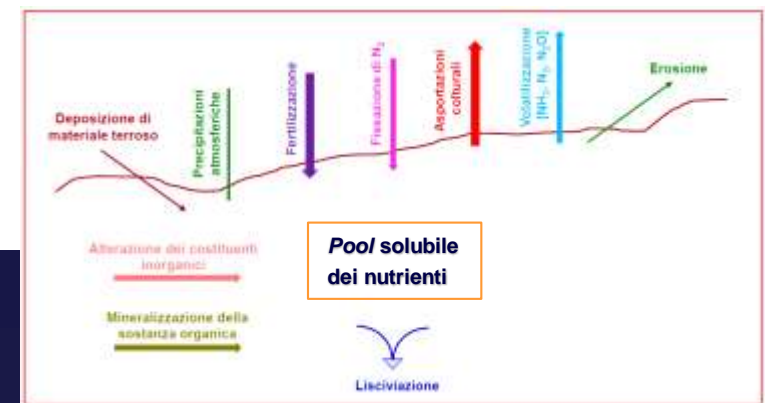
Nei suoli coltivati, numerosi processi esercitano influenza sul bilancio dei nutrienti.

Allontanano nutrienti dal suolo:

- ✓ le asportazioni colturali
- ✓ la lisciviazione
- ✓ la volatilizzazione (NH_3 , N_2 , N_2O)
- ✓ l'erosione

Apportano nutrienti al suolo:

- ✓ i processi di alterazione dei costituenti inorganici
- ✓ i processi di mineralizzazione della sostanza organica
- ✓ la fertilizzazione
- ✓ l'azotofissazione
- ✓ le precipitazioni atmosferiche
- ✓ le acque irrigue e superficiali



Perdita di nutrienti per asportazione colturale

L'assorbimento dei nutrienti operato dalle piante è definito non solamente dalla disponibilità di questi ma anche dalla loro vicinanza alle superfici radicali. Penetrando nel suolo, l'apparato radicale intercetta e assorbe non solamente gli ioni presenti in soluzione ma anche quelli fissati in posizione di scambio.

Deve essere precisato che le piante possono assorbire i nutrienti per trasporto passivo ma possono trasferirli all'interno delle cellule anche per trasporto attivo mediato da carrier localizzati nelle membrane cellulari

La quantità di nutrienti che una coltura rimuove dal suolo durante la crescita dipende essenzialmente dalla specie e dalla produzione realizzata. Esigenze nutritive e produzione risultano funzione anche delle caratteristiche genetiche della cultivar utilizzata. Cultivar molto produttive hanno bisogno di più elevata disponibilità di nutrienti.

Quantità di nutrienti mediamente asportate dal suolo da differenti colture agrarie

Colture	Produzione	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn
	Mg · ha ⁻¹	kg · ha ⁻¹						g · ha ⁻¹		
Cereali										
Orzo (Granella)	2,2	40	8	10	1	2	3	34	30	70
Orzo (Paglia)	2,5	17	3	30	9	2	5	11	360	60
Frumento (Granella)	2,7	56	13	14	1	7	3	33	100	170
Frumento (Paglia)	3,8	22	3	33	7	4	6	11	180	56
Avena (Granella)	2,9	55	10	14	2	3	6	34	134	56
Avena (Paglia)	5,0	28	8	75	9	9	10	34	-	330
Mais (Granella)	9,5	150	27	37	2	9	11	66	100	170
Mais (Stocchi)	11,0	110	19	135	29	22	17	55	1700	330
Riso (Granella)	2,0	39	11	11	2	3	8	22	247	34
Riso (Paglia)	3,4	17	9	28	9	2	3	11	156	78
Sorgo (Granella)	5,4	73	34	25	4	8	11	22	67	56
Sorgo (Stocchi)	9,0	90	28	129	36	25	-	-	-	-
Leguminose										
Arachide (Semi)	4,5	157	24	40	7	6	11	45	336	280
Arachide (Pianta)	5,6	112	19	168	99	22	12	134	168	-
Soia (Granella)	3,4	210	46	83	21	11	26	56	67	56
Soia (Stocchi)	6,7	100	18	83	34	10	13	-	-	-
Foraggere										
Erba medica	10,0	200	20	170	125	24	21	66	500	470
Trifoglio rosso	6,0	110	13	95	77	19	8	45	600	400
Coda di topo	6,0	168	27	213	20	7	6	33	347	224
Festuca aurundinacea	7,8	151	20	179	-	15	22	-	-	-
Loietto	11,2	240	49	224	-	45	-	-	-	-
Altre colture										
Canna da zucchero	75,0	110	27	250	31	26	26	-	-	-
Tabacco (Foglie)	2,2	83	8	110	83	20	15	33	600	80
Cotone (Semi e Fiocco)	1,7	45	11	14	2	4	3	66	120	350
Cotone (Steli e Foglie)	2,2	39	5	33	31	9	17	-	-	-
Patata (Tuberi)	27,0	90	15	140	3	7	7	44	100	60
Pomodoro (Frutti)	50,0	130	20	150	8	12	15	80	145	180
Cavolo	50,0	145	18	120	22	9	50	44	110	90
Cipolla	16,6	50	22	45	12	3	20	33	89	347
Spinacio	11,2	56	17	34	13	6	4	22	112	112

TABELLA 9.1 Quantità di biomassa secca della produzione utile e dei residui aerei, harvest index e concentrazione di N, P₂O₅ e K₂O della produzione utile e dei residui aerei delle principali colture erbacee e ortive

Coltura	Produzione utile				Harvest index	Residui aerei			
	t ha ⁻¹ di s.s.	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)		t ha ⁻¹ di s.s.	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Aglio	2,0-4,0	2,6	1,0	1,6	0,75	0,7-1,3	3,3	0,8	5,4
Anguria	5,0-7,0	1,0	0,8	1,7	0,85	0,9-1,2	3,3	1,3	4,2
Asparago	0,5-1,0	5,5	1,8	3,4	0,25	1,5-3,0	3,1	0,9	2,4
Avena da granella	3,0-5,0	2,1	0,9	1,3	0,40	4,5-7,5	0,5	0,3	1,2
Barbabietola	8,8-11,0	1,2	0,5	2,0	0,80	2,2-2,8	2,4	1,0	3,0
Carciofo rifiorente	2,4-3,6	2,6	1,2	2,3	0,42	3,3-5,0	3,6	0,5	3,6
Carota	2,4-3,6	1,8	0,9	3,0	0,85	0,4-0,6	3,6	1,0	4,5
Cavolfiore	6,0-8,0	4,0	1,2	4,4	0,98	0,1-0,2	4,4	2,1	4,4
Cavolo Broccolo	4,0-6,0	4,0	1,2	4,4	0,98	0,1	4,4	2,1	4,4
Cavolo verza	2,0-3,0	3,3	0,8	3,7	0,98	0,0-0,1	4,7	2,2	4,7
Cece	2,0-3,0	3,5	0,9	1,2	0,33	4,1-6,1	1,2	0,3	1,7
Cetriolo	3,0-5,0	2,2	1,2	3,7	0,80	0,8-1,3	4,4	1,6	4,9
Cipolla	3,6-4,8	2,8	1,6	2,2	0,80	0,9-1,2	4,7	0,8	4,7
Colza granella	2,0-4,0	4,2	2,0	2,4	0,33	4,1-8,1	2,0	1,3	2,5
Erba medica (fieno)	10,0-15,0	2,8	0,6	2,0	1,00				
Erbai graminacee (fieno)	5,0-10,0	2,4	0,9	3,1	1,00				
Fagiolina fresco	1,0-1,2	2,4	0,9	2,4	0,45	1,2-1,5	1,5	0,5	1,5
Fagiolo secco	2,0-3,0	2,4	1,0	2,7	0,75	0,7-1,0	1,5	0,5	1,5
Favino	2,0-4,0	4,8	1,6	2,3	0,40	3,0-6,0	1,6	0,6	1,4
Finocchio	1,8-2,7	2,8	1,2	3,5	0,80	0,5-0,7	2,8	1,2	3,5
Fragola	3,5-4,5	1,3	0,7	2,5	0,40	5,3-6,8	4,2	1,5	6,0
Frumento duro	3,0-6,0	2,5	1,1	1,3	0,40	4,5-9,0	0,5	0,2	1,1
Frumento tenero	4,0-8,0	2,3	1,0	1,2	0,40	6,0-12,0	0,5	0,2	1,0
Girasole	3,0-6,0	3,3	1,6	1,8	0,40	4,5-9,0	1,0	0,6	3,3
Indivia	1,4-2,1	3,0	1,0	6,0	0,98				
Latuga	1,2-1,8	3,8	1,1	6,3	0,98				
Loiessa-fieno	7,0-15,0	1,5	0,3	1,0	1,00				
Mais granella	8,0-12,0	1,7	0,8	0,7	0,50	8,0-12,0	0,7	0,3	1,4
Mais trinciato	17,0-28,0	1,3	0,6	1,2	1,00	0,0			
Melanzana	2,4-4,0	2,5	1,0	3,6	0,50	2,4-4,0	4,2	0,9	4,6
Melone	4,0-6,0	1,5	0,8	3,8	0,60	2,7-4,0	5,0	1,8	5,0
Orzo granella	3,0-5,0	2,4	1,1	1,3	0,40	4,5-7,5	0,6	0,4	1,2
Orzo insitato	4,0-6,0	1,2	0,6	1,2	1,00				
Patata	6,9-11,5	1,6	0,6	3,2	0,80	1,7-2,9	4,0	0,7	5,0
Pomodoro da industria	3,6-6,0	2,8	1,1	5,6	0,70	1,5-2,6	4,0	0,9	5,0
Riso	5,0-7,0	1,4	0,8	0,6	0,46	5,9-8,2	0,7	0,4	2,4
Soia	2,0-4,0	6,6	1,7	2,7	0,40	3,0-6,0	1,9	0,6	1,8
Sorgo trinciato	7,0-9,0	1,6	0,5	1,1	1,00				
Spinacio fresco	1,8-2,3	4,5	1,2	6,4	0,90	0,2-0,3	4,5	1,2	6,4
Tabacco Burley	3,0-6,0	2,6	1,1	3,2	0,65	1,6-3,2	2,0	1,1	3,3
Triticale	5,0-8,0	1,9	1,0	0,8	0,45	6,1-9,8	0,4	0,2	1,5
Zucca	3,6-4,8	3,9	1,6	5,5	0,60	2,4-3,2	3,2	1,5	4,6
Zucchini	1,2-1,8	3,9	1,6	5,5	0,60	0,8-1,2	3,2	1,5	4,6

Perdita di nutrienti per lisciviazione

La quantità di nutrienti allontanati dal suolo per fenomeni di lisciviazione dipende dal **clima**, dal **tipo di suolo** e dalla **solubilità delle specie chimiche presenti**.

Suoli permeabili, ben drenati, dalla tessitura sabbiosa si lasciano attraversare facilmente dall'acqua risultando molto suscettibili alla rimozione dei nutrienti per lisciviazione, tanto più intensa quanto maggiore è la piovosità.

Tra i macronutrienti il fosforo è il meno lisciviato in quanto presente in forme non solubili o fissate fortemente sulle superfici dei costituenti del suolo. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , anche se coinvolti nei processi chimico-fisici di scambio cationico, possono essere facilmente dilavati. Il K^+ risulta difficilmente allontanabile dai suoli caratterizzati dalla presenza di minerali argillosi a struttura trimorfica. L'azoto viene lisciviato come ione NO_3^- . La copertura vegetale svolge azione protettiva contro la lisciviazione.

Perdita di nutrienti per lisciviazione

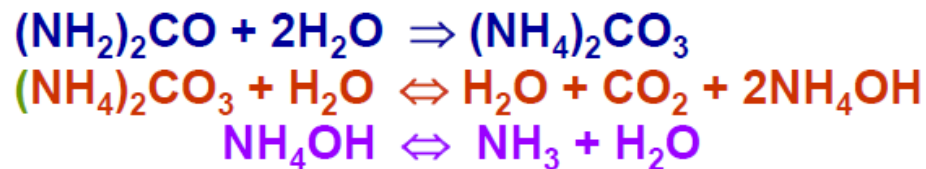
Nutriente	kg di nutriente · ha ⁻¹ · anno ⁻¹	
	Suolo non coltivato	Suolo coltivato
N	142	62
P	0.3	0.3
K	46	24
Ca	310	230
Mg	24	18

Quantità di nutrienti perdute per lisciviazione da un suolo di tessitura franco argillosa (18 % di argilla) coltivato e non coltivato (modificata da Coppenet, 1969)

La copertura vegetale svolge un'azione protettiva contro la lisciviazione

Perdita di nutrienti per volatilizzazione

L'azoto può allontanarsi dal suolo allo stato gassoso. NH_3 si sviluppa successivamente alla somministrazione di sali di ammonio a suoli caratterizzati da presenza di calcare o, in genere, da elevato valore di pH. L'enzima **ureasi**, diffuso nel suolo, catalizza l'idrolisi dell'urea ad ammonio carbonato:



In condizioni di anaerobiosi più o meno spinta, i nitrati sono ridotti biologicamente a N_2 e N_2O . Il processo, detto di **denitrificazione** risulta più spinto quando elevate quantità di carboidrati (paglia, radici) sono disponibili come fonte di energia per i batteri denitrificanti. Per denitrificazione può essere perduto dal 10 al 40% dell'azoto somministrato al suolo sotto prato-pascolo. Nei suoli peracidi ($\text{pH} < 4.5$) la perdita di azoto per denitrificazione è totalmente inibita.

Perdita di nutrienti per erosione

Perdita di nutrienti può derivare dall'asportazione della parte superficiale del suolo operata dalle acque meteoriche.

La perdita di suolo per erosione dipende:

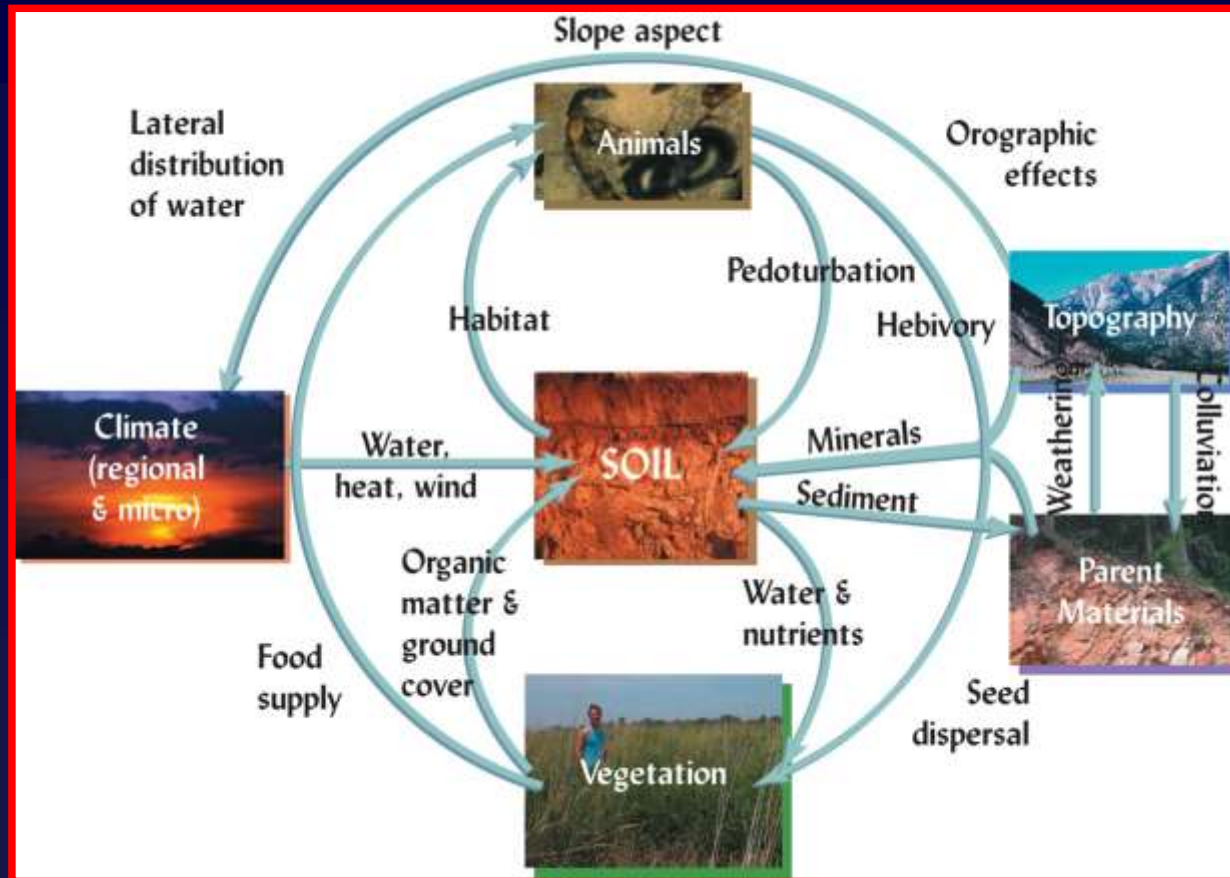
❖ **dalla erosività**, cioè dalla potenzialità della pioggia a provocare erosione.

Il lavoro necessario per rompere gli aggregati e spostare le particelle del suolo viene assicurato dall'energia cinetica delle gocce di pioggia e dell'acqua di ruscellamento

❖ **dalla erodibilità**, cioè dalla suscettibilità del suolo all'erosione.

Le caratteristiche topografiche, il contenuto di argilla e il tipo di cationi scambiabili, il contenuto di sostanza organica, la stabilità della struttura, la consistenza, la copertura vegetale e le pratiche agronomiche sono fattori che, in parte, definiscono l'erodibilità del suolo.

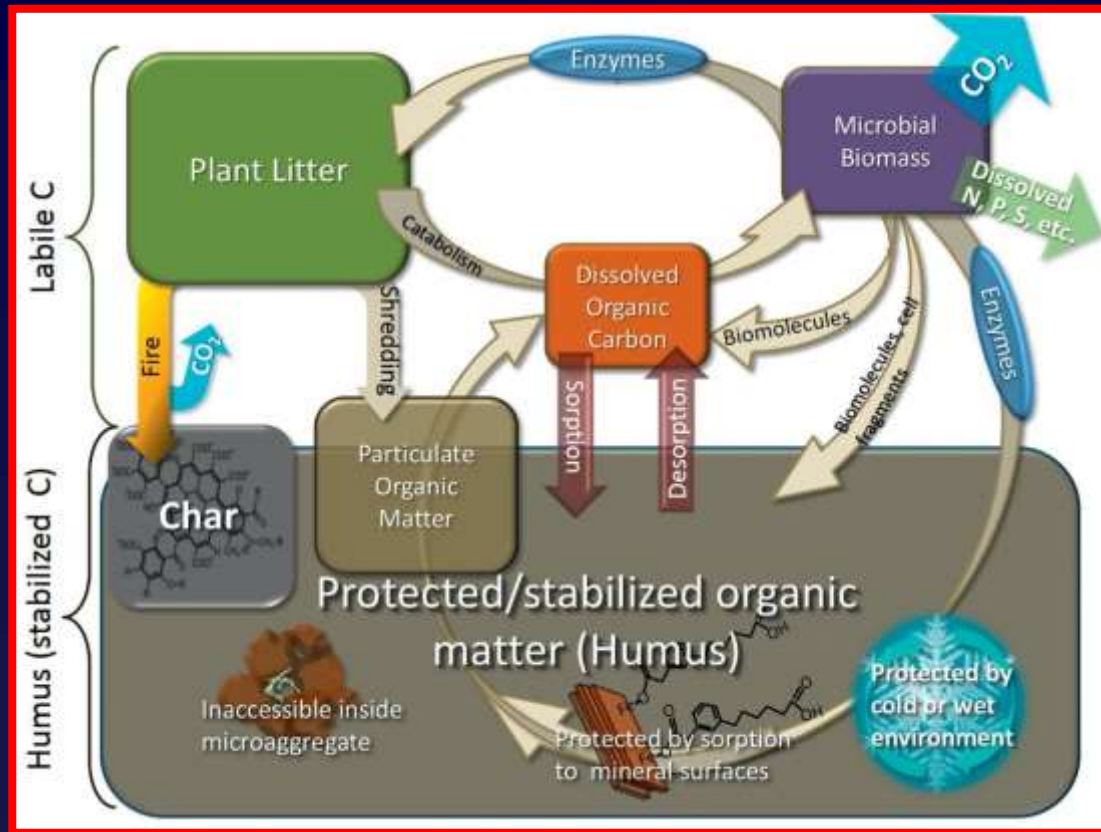
Apporto di nutrienti per alterazione pedogenetica



(da Weil & Brady, 2017)

Il rilascio di forme solubili di alcuni nutrienti (in particolare K, Ca, Mg, Na, S, B) è correlato all'azione dei fattori di pedogenesi operanti in un determinato contesto mineralogico.

Apporto di nutrienti per mineralizzazione della SOM



(da Weil & Brady, 2017)

Il rilascio di forme solubili di alcuni nutrienti (in particolare N, S, P e micronutrienti) è correlato all'azione dei fattori pedoclimatici che controllano il processo di mineralizzazione della sostanza organica del suolo.

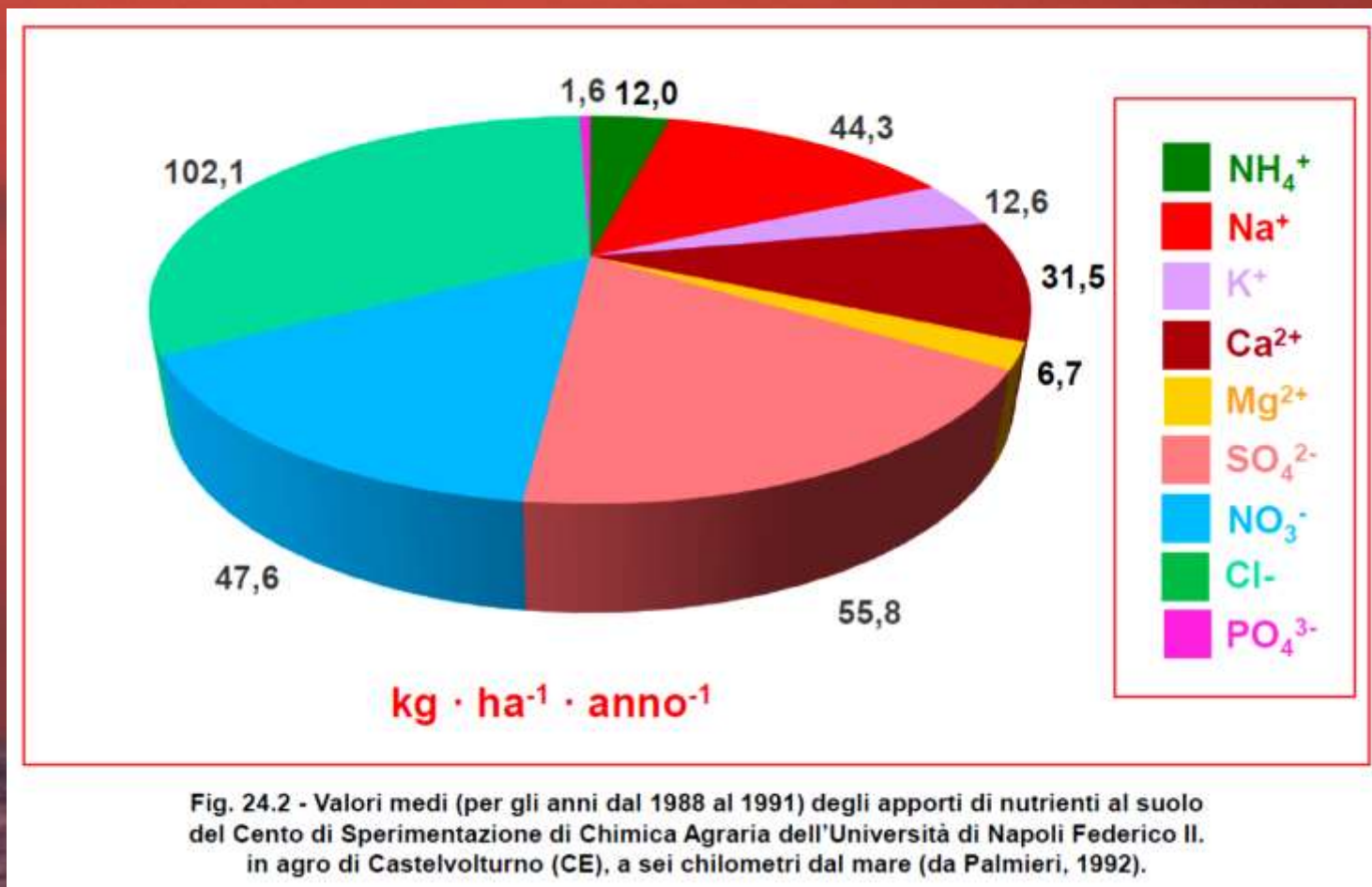
Apporto di nutrienti per deposizione atmosferica

TABELLA 1.6 Elementi che giungono al suolo attraverso le precipitazioni ($\text{kg ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$). La variabilità riportata per alcune località ed elemento dipende dalla vicinanza ai centri di emissione (es. centri urbani, complessi industriali, vulcani)

Località	N	P	K	Ca	Na	S
Inghilterra	8-14	0,3-1	3-4	9-13	25-35	12
Germania	18,5	0,4	3,5	15,5	-	-
Italia	5-25,0	2,8	3,3	13,2	39,3	14

La quantità di nutrienti che raggiungono il suolo con le precipitazioni è molto variabile (distanza dal mare, presenza di centri abitati e insediamenti industriali, vulcani) e raramente è sufficiente a soddisfare l'intero fabbisogno nutrizionale della coltura, ma può assicurare apporti significativi di alcuni elementi.

Apporto di nutrienti per deposizione atmosferica



Dai dati della stazione campana è evidente il contributo legato alla presenza del vulcano e del mare.

Apporto di nutrienti con acque irrigue e superficiali

Tab.11.3 - Sali che normalmente si accertano presenti nell'acqua d'irrigazione

Sale	Formula chimica	Contributo alla definizione del contenuto salino totale
Sodio cloruro	NaCl	Modesto-Elevato
Sodio solfato	Na ₂ SO ₄	Modesto-Elevato
Calcio cloruro	CaCl ₂	Modesto
Calcio solfato (gesso)	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Modesto-Scarso
Magnesio cloruro	MgCl ₂	Modesto
Magnesio solfato	MgSO ₄	Modesto-Scarso
Potassio cloruro	KCl	Scarso
Potassio solfato	K ₂ SO ₄	Scarso
Sodio bicarbonato	NaHCO ₃	Scarso
Calcio carbonato	CaCO ₃	Molto scarso
Sodio carbonato	Na ₂ CO ₃	Quasi nullo
Borati	BO ₃ ³⁻	Quasi nullo
Nitrati	NO ₃ ⁻	Quasi nullo-Scarso

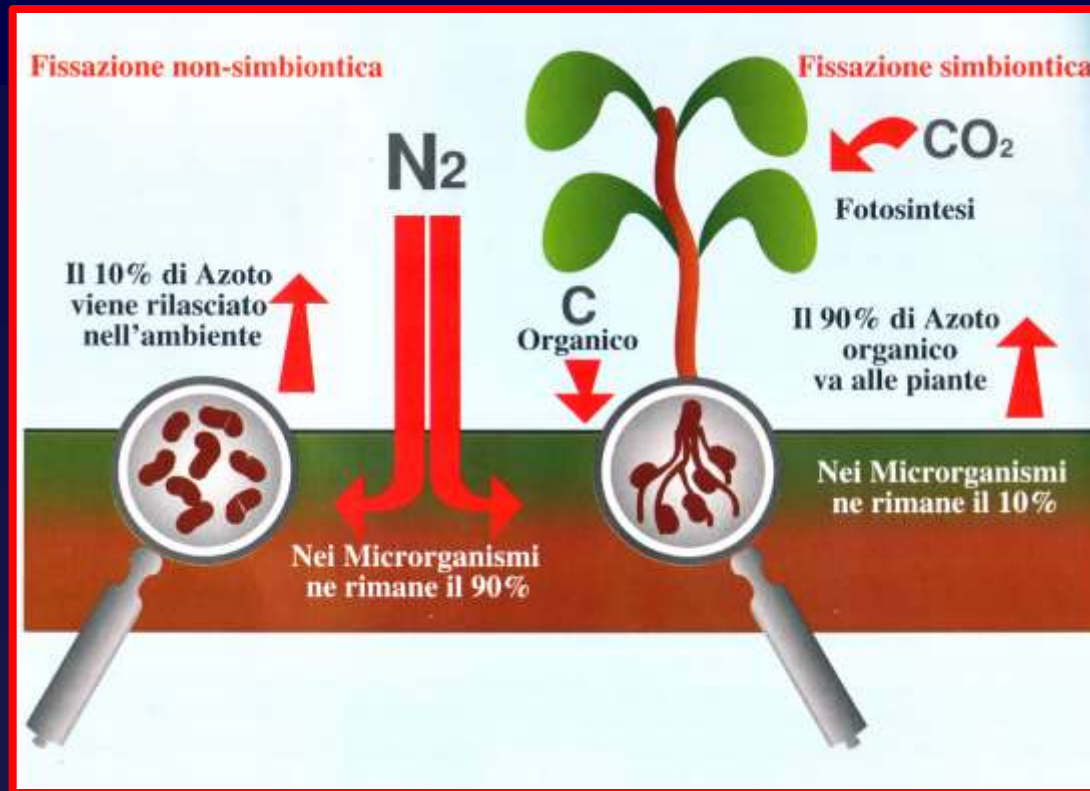
L'acqua di irrigazione contiene disciolti, in quantità variabile con le caratteristiche pedogenetiche e climatiche del sito, sali solubili costituiti dai cationi Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, dagli anioni Cl⁻, SO₄²⁻ e HCO₃⁻ ed in quantità ridotta da K⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, CO₃²⁻ e pochi altri ioni (BO₃³⁻).

Apporto di nutrienti per azotofissazione biologica

Specie vegetale	Entità biotica associata	Quantità d'azoto fissato (kg · ha ⁻¹ · anno ⁻¹)
Non simbiotiche		
	Batteri (<i>Azotobacter</i> , <i>Clostridium</i>)	5-20
	Cianobatteri	10-50
Simbiotiche		
Leguminose (con formazione di noduli)		
Mimosa bianca (<i>Leucaena leucocephala</i> Lam.)	Batteri (<i>Rhizobium</i>)	100-500
Robinia (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)		75-200
Erba medica (<i>Medicago sativa</i> L.)		150-250
Trifoglio (<i>Trifolium pratense</i> L.)		100-150
Meliloto bianco (<i>Melilotus albus</i> L.)		25-180
Lupino (<i>Lupinus</i> spp.)		50-100
Veccia vellutata (<i>Vicia villosa</i> Roth)		50-150
Fagiolo indiano (<i>Phaseolus mungo</i> L.)		90-150
Fagiolo (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)		30-50
Fava (<i>Vicia faba</i> L.)		55-225
Pisello (<i>Pisum sativum</i> Asch. et Gr.)		35-200
Fagiolo dall'occhio (<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp.)	Batteri (<i>Bradyrhizobium</i>)	50-100
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i> L.)		40-80
Soia (<i>Glycine max</i> L.)		50-150
Kudzu (<i>Pueraria lobata</i> Willd.)		100-140
Non Leguminose (con formazione di noduli)		
Ontano nero (<i>Alnus glutinosa</i> L. Gaertner)	Actinomiceti (<i>Frankia</i>)	50-150
Gunnera (<i>Gunnera</i> spp.)	Cianobatteri (<i>Nostoc</i>)	10-20
Non Leguminose (senza formazione di noduli)		
Erba Pangola (<i>Digitaria decumbens</i> Stent)	Batteri (<i>Azotospirillum</i>)	5-30
Erba Bahia (<i>Paspalum notatum</i> Flügge)	Batteri (<i>Azobacter</i>)	5-30
Azolla	Cianobatteri (<i>Anabena</i>)	150-300

Rappresenta quantitativamente il principale processo di trasferimento dell'azoto dall'atmosfera alla biosfera.

Apporto di nutrienti per azotofissazione biologica



Indagini con ^{15}N hanno confermato che solo il 2-3% dell' N fissato biologicamente può essere rilasciato per mineralizzazione del residuo organico nello stessa annata agraria. Nelle leguminose, la mineralizzazione del residuo assicura alle colture in successione un apporto di forme inorganiche di N pari, in regioni temperate umide, a circa 60 kg N ha^{-1} .

Apporto di nutrienti con la fertilizzazione

Per cause diverse nella maggior parte dei suoli coltivati le perdite di nutrienti risultano molto maggiori degli apporti naturali, conseguenti essenzialmente ai processi di alterazione e di mineralizzazione, rispettivamente, dei costituenti inorganici ed organici.

Per mantenere elevato livello di fertilità, risulta indispensabile la somministrazione al suolo di concimi minerali ed organici contenenti i nutrienti necessari alla crescita e allo sviluppo delle piante.

Secondo la legislazione italiana, il termine fertilizzante comprende **concimi**, **ammendanti**, **correttivi** e, in generale, tutti i prodotti il cui impiego consente la nutrizione delle specie vegetali coltivate e la modificazione o il miglioramento delle proprietà e le caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche del suolo.

Vanno contabilizzati anche gli apporti "criptici" tramite i coformulanti.