
LA VITA IPOGEA DEI SUOLI VESUVIANI

di
Giancarlo Moschetti

Abstract

In questo capitolo viene descritta la vita ipogea dei suoli vesuviani. Il Vesuvio, con le sue frequenti eruzioni, ha dato vita a suoli molto eterogenei in termini di qualità minerologica, rappresentati da più di 35 minerali ricchi di macro e microelementi essenziali per la vita delle piante e dei microrganismi. Pertanto i suoli vesuviani sono considerati dei suoli fertili per la coltivazione delle piante. Un suolo per essere fertile non deve solo contenere le sostanze minerali per la crescita della pianta, ma deve possedere tutti gli attori biologici che permettono ad un suolo di essere autosufficiente e di autoregolarsi: microrganismi degradatori della sostanza organica, batteri promotori la crescita delle piante, “mangiatori” di batteri e funghi, azotofissatori del terreno e delle acque, decontaminatori di sostanze tossiche. Questa alta biodiversità speciografica e funzionale permette al suolo di mantenere la sua fertilità biologica la quale può essere minacciata solo da sversamenti di rifiuti tossici e nocivi, da un’agricoltura intensiva e da una cattiva gestione dell’ambiente forestale.

This chapter describes the underground life of the Vesuvian soils. Vesuvius, with its frequent eruptions, has given rise to very heterogeneous soils in terms of mineral quality, represented by more than 35 minerals rich in macro and microelements essential for the life of plants and microorganisms. The Vesuvian soils are considered fertile soils for plants crop. In order to be fertile, a soil must not only contain the mineral substances for plant growth, but must possess all the biological actors that allow a soil to be self-sufficient and self-regulate: microorganisms degrading organic matter, bacteria promoting plant growth, “eaters” of bacteria and fungi, nitrogen fixing bacteria of the soil and water and decontaminators of toxic substances.

This high speciographic and functional biodiversity allows the soil to maintain its biological fertility which can only be threatened by spills of toxic and noxious waste, intensive agriculture and poor management of the forest environment.

La fertilità biologica dei suoli del comprensorio vesuviano è determinata dalle attività eruttive dell'omonimo vulcano. Nel corso dei secoli, i prodotti delle eruzioni si sono sovrapposti, dando luogo a suoli ricchi in minerali. Si contano più di 35 minerali diversi nell'areale vesuviano dall'Avogadrite, ricca di potassio e cesio alla Cuprorivaite ricca di rame, zolfo e silice. Questa notevole diversità mineralogica ha dato vita, attraverso il processo di pedogenesi, a suoli ricchi di macro e microelementi, nonché a elementi rari indispensabili non solo per la vita delle piante, ma per la vita ipogea dei microrganismi. Fra questi, da ricordare il pioniere delle lave vesuviane: il lichene *Stereocaulon vesuvianum*. I licheni sono organismi simbiotici derivanti dall'associazione di due individui: un organismo autotrofo (un cianobatterio o un'alga) e un fungo eterotrofo. I due simbiotici convivono traendo reciproco vantaggio: il fungo, eterotrofo, sopravvive grazie ai composti organici prodotti dalla fotosintesi del cianobatterio o dell'alga, mentre quest'ultima riceve in cambio protezione, sali minerali ed acqua.

L'ambiente vesuviano ne è ricco, specie sulle colate laviche più recenti dove il suo colore grigio argenteo ne testimonia la presenza.

Nel secolo scorso, l'immissione di specie floristiche alloctone quali la *Robinia pseudoacacia* L. e la *Genista aetnensis* (Raf. ex Biv.) DC.) ha alterato il naturale dinamismo della vegetazione endemica compromettendo non solo il paesaggio, ma anche la qualità dei suoli vesuviani, come riportato da Gentile, 2005. L'autrice, analizzando i suoli di tre boschi vesuviani (Lecceta, Pineta e Robinieta) ha riscontrato una biodiversità microbica inferiore in quello a Robinia. La specie esotica invasiva *Robinia pseudoacacia* L. tende a conferire al suolo proprietà chimiche e biologiche diverse rispetto a quelle riscontrate nei suoli della specie nativa, *Q. Ilex* L. e della specie naturalizzata *P. pinea* L. In particolare il suolo del robinieto è risultato caratterizzato da valori più bassi, rispetto agli altri suoli considerati, di carbonio organico, contenuto idrico, biomassa microbica, respirazione, incremento medio di respirazione e valori più alti del coefficiente di mineralizzazione endogena. Inoltre esso ha presentato valori di omogeneità catabolica simili a quelli del suolo della pineta ma più bassi di quelli del suolo della lecceta. L'effetto negativo della Robinia sulla comunità microbica del suolo potrebbe essere dovuto all'attività antibatterica dei peptidi contenuti nei semi di questa pianta, ma anche alla omogeneità della lettiera, data la sua tendenza a formare boschi monospecifici. La minore attività microbica nella lettiera di Robinia vs Pino è stata riscontrata anche da Esposito (2008).

La fertilità del suolo come indice di sostenibilità

Il concetto di fertilità, che sembra essere così familiare ed empirico, in realtà è un concetto molto complesso e non sempre riconducibile all'idea di produttività o resa agricola. Un suolo per essere fertile non deve solo contenere le sostanze minerali per la crescita della pianta, ma deve possedere tutti gli attori biologici che permettono ad un suolo di essere autosufficiente e di autoregolarsi. Pertanto, un'impostazione corretta della fertilità del suolo è considerarne i fondamenti bio-ecologici che si basano sulle strette relazioni intercorrenti fra l'habitat suolo e le attività microbiche stimulate dagli essudati radicali. Da tali interazioni dipendono i processi fondamentali che portano a definire un suolo fertile, come i cicli biogeochimici, la mineralizzazione e neosintesi di sostanza organica (SO), lo stato di aggregazione del suolo, la presenza massiva, ma equilibrata di Rizobatteri Promotori la Crescita delle Piante (PGPR) che non solo stimolano direttamente la crescita delle piante ma proteggono le stesse dagli agenti patogeni. Pertanto, il suolo è da considerarsi un sistema vivente in quanto ambiente per una biomassa microbica che svolge processi biologici fondamentali. Questo habitat, in un sistema naturale, è in equilibrio fra i guadagni (input) dovuti alla fotosintesi, all'azotofissazione, alla sintesi di humus e le perdite (output) che sono esclusivamente la degradazione della sostanza organica e quindi la mineralizzazione e l'allontanamento fisico di ioni quali il nitrico nelle falde acquifere. Senza la presenza di microrganismi chemiorganotrofi gli input sarebbero più degli output ed i nutrienti per la crescita delle piante sarebbero praticamente inaccessibili. Quindi dobbiamo considerare il terreno parte integrante di un biotopo definito "sub-sistema ipogeo" la cui funzionalità dipende dalla vegetazione, il "sub-sistema epigeo", che funge da fonte di energia continua per il suolo, ne aumenta la complessità strutturale e lo fa diventare stabilizzante l'ecosistema stesso. Centro di controllo e di equilibrio di questo sistema è l'humus, la vera "banca" di SOS (sostanza organica stabile) la cui sintesi e la sua lenta mineralizzazione rappresentano rallentamento o accelerazione dei processi che condizionano in maniera rappresentativa la nutrizione della pianta.

Pertanto in un sistema aperto il terreno dotato del suo "fingerprint" strutturale, funzionale e biologico tende alla autosufficienza e all'autoregolazione. L'autosufficienza si basa sull'equilibrio fra input e output descritti prima, mentre l'autoregolazione permette di tendere all'omeostasi che è il fine di tutti i sistemi viventi. Ed è proprio dal mantenimento della stabilità ecologica di tale sistema che si basa la conservazione della fertilità del suolo. Questo discorso è reso più complesso dalle alterazioni esterne che può ricevere il sistema pianta-suolo a

livello di gravi perturbazioni. Se tali perturbazioni non sono estreme, il sistema tende a ripristinare l'equilibrio perché la distruzione di una componente della "cenosi" microbica comporta lo sviluppo di una comunità ristrutturata dominata da una nuova popolazione. L'uomo ad esempio ha sempre attentato l'omeostasi del suolo alterandolo nella componente biotica con erbicidi, anticrittogrammici di sintesi e altri xenobiotici tossici, nonché diminuendo la biodiversità della rizosfera con le colture intensive monovarietalì. Questo ha portato ad un impoverimento della composizione quali-quantitativa della microflora e quindi ad una diminuzione di quelle attività che rendono fertili un suolo. Inoltre mentre in un sistema naturale c'è ritorno della SO, in un sistema agricolo c'è un feedback negativo cioè gli output sono maggiori degli input e il sistema pianta-suolo non regge. Con feedback negativo si ha la soppressione della biodiversità microbica, avviene una selezione di popolazioni che si adattano alle nuove condizioni: < biodiversità < cicli biogeochimici < mobilitazione degli Elementi Nutritivi < degradazione della SO < sintesi di humus < fertilità. Pertanto bisogna ridurre il flusso di energia che dalle campagne va alle città che ha portato negli anni ad un aumento delle concimazioni minerali che senza dubbio vanno razionalizzate per non incorrere a seri problemi di desertificazione.

Il ciclo dei nutrienti negli agrosistemi vesuviani

La rete trofica del suolo può essere definita come il "network" delle interazioni consumatore-risorse tra differenti gruppi funzionali di organismi del suolo. Batteri e funghi sono i consumatori primari di sostanza organica morta (SOM) nel suolo. La SOM deriva da residui di piante e radici, microrganismi e organismi in decomposizione, essudati radicali, escrementi animali. La decomposizione di questi complessi biopolimeri in anidride carbonica (CO_2), acqua (H_2O), azoto minerale (N), fosforo (P) e altri elementi minerali viene chiamata "mineralizzazione" ed è tanto più lenta tanto più è complessa la materia organica, come anche dimostrato da Mariniello et al. (2008) utilizzando film di finocchio (Figura 1). La mineralizzazione è effettuata non solo dai batteri e funghi, ma anche indirettamente dai cosiddetti "microbivori", cioè i mangiatori di microbi e da i predatori che decompongono i microbi ed altri organismi. I nutrienti minerali rilasciati dai decompositori sono disponibili per essere assorbiti dalle piante e dai microrganismi per la produzione di nuova biomassa. Pertanto, i nutrienti vanno in circolo attraverso l'ecosistema.

In un ecosistema naturale la mineralizzazione della sostanza organica (SO) è la principale risorsa di nutrienti per lo sviluppo della pianta e c'è un bilanciato equilibrio fra mineralizzazione e assorbimento dei nutrienti. Purtroppo, in agricoltura convenzionale la maggior parte dei nutrienti è immessa nell'agrosistema come fertilizzanti chimici. Solo in aree a forte vocazione zootecnica viene aggiunto al suolo del letame animale. In questo modo si aumenta enormemente la resa agricola, ma ci sono enormi perdite di nutrienti nell'ambiente. Le perdite di azoto (N) possono aumentare enormemente quando la fertilizzazione azotata arriva a valori soglia che spesso coincidono con l'optimum per la produzione agricola. I risultati di tali eccessi sono l'aumento della concentrazione dei nitrati e dei fosfati nelle acque di falda e in quelle superficiali, l'abbondante crescita di alghe, la bassa qualità delle acque e pertanto l'alto costo per renderle potabili. L'alta concentrazione di azoto minerale nel suolo può portare a processi di denitrificazione mediata da batteri e pertanto perdita di azoto nella forma di ossido di azoto (N_2O) nell'atmosfera, specialmente durante i periodi piovosi con bassa concentrazione di ossigeno nel suolo. N_2O può contribuire al riscaldamento globale dello strato inferiore dell'atmosfera e alla diminuzione dello strato dell'ozono attraverso reazioni fotochimiche dei suoi prodotti di decomposizione nella stratosfera. Da quanto detto si evince che c'è bisogno di porre un freno a questa degrado ambientale mediato dall'agricoltura intensiva attraverso il ritorno di pratiche agricole che consentano di nutrire le piante non in maniera diretta ma in maniera indiretta, a lungo periodo. In pratica bisogna nutrire dapprima gli organismi del suolo con SO e quindi indirettamente nutrire la pianta attraverso la mineralizzazione dei nutrienti operata dai microrganismi del suolo. Pertanto bisogna utilizzare come fertilizzanti solo letame maturo, compost, sovesci polifiti con l'aggiunta di 2-3 essenze di leguminose. Questo extra input di SO stabilizzata serve per aumentare e conservare le riserve di humus giovane nel suolo che deve servire da lento rilascio di nutrienti nel tempo.

Ma come avviene il nutrimento indiretto della pianta? Quali sono gli attori del ciclo dei nutrienti?

Come sopra accennato, i batteri e i funghi eterotrofi assumono l'energia e i nutrienti dalla decomposizione della SO. Parte del materiale decomposto è utilizzato per la produzione di biomassa microbica (per la loro crescita) e un'altra parte è mineralizzata a CO_2 , H_2O , N minerale, P ed altri nutrienti. La frazione del C consumato che è convertito in C della biomassa microbica (efficienza di sviluppo o resa) può variare dallo 0 al 70%. Questo ampio range di conversione può essere spiegato con le differenze nella qualità del substrato organico (rapporto C:N e complessità molecolare) e disponibilità di nutrienti inorganici (specialmente N). Sotto estreme limitazioni di nutrienti, il carbonio organico si trasforma tutto in CO_2 senza nessuna produzione di biomassa microbica. Tuttavia, un'alta efficienza di sviluppo microbico può essere osservata anche sotto

limitazioni di N in batteri che accumulano carboidrati come fonte di riserva.

Se la SO da decomporre contiene poco N e P, (C/N alto, per i batteri deve essere circa 15) tutto l'azoto e P rilasciato durante la decomposizione è utilizzato per lo sviluppo batterico e non avviene una mineralizzazione completa. Ad esempio se il batterio ha una biomassa con un rapporto C/N pari a 5 e un'efficienza di sviluppo del 30%, utilizzando un substrato organico con un rapporto C/N di 15, la quantità di N richiesta per la crescita batterica è la stessa e quindi non ci sarà una mineralizzazione netta. Se invece il rapporto C/N del substrato organico è ancora più elevato (ad es. 30) i batteri sono costretti a prelevare l'N necessario per la loro crescita non solo dal substrato che stanno degradando, ma anche dall'ambiente e lo immobilizzano nella loro biomassa. Infatti è stato osservato che non c'è rilascio da parte dei batteri di ioni ammonio quando il rapporto C/N della SO da decomporre è più alto di circa 15. I nutrienti minerali immobilizzati nella biomassa microbica verranno in seguito rilasciati quando i batteri verranno "fagocitati" dai microbivori, come nematodi batteriofagi e protozoi. Il loro rapporto C/N è simile o leggermente più alto delle loro prede e la loro efficienza di crescita è di circa il 40%. Pertanto, la predazione risulterà in una escrezione del surplus di N e P in forma di ioni NH_4^+ e fosfati. Quindi la presenza di microbivori è fondamentale per accelerare i processi di decomposizione della SO e per la remineralizzazione di nutrienti inorganici. Infatti i microbivori stimolano l'attività microbica poiché mantengono a livelli di equilibrio numerico le popolazioni microbiche le quali vivendo in habitat meno "affollati" migliorano le loro "performance" metaboliche.

La degradazione della sostanza organica nel terreno

I microrganismi chemio-organotrofi del terreno utilizzano come fonte di energia e di carbonio la sostanza organica (SO) che verrà in parte mineralizzata in forma di CO_2 . Tuttavia, si possono distinguere SO di facile degradazione (es. Glucosio, amido, cellulosa,) e SO di difficile degradazione (es. lignina, acidi umici). Ogni SO subisce una mineralizzazione direttamente proporzionale alla propria struttura molecolare: tanto è più complessa tanto più sarà difficile da parte dei microrganismi utilizzarla come fonte di energia e di carbonio. Se si aggiunge al terreno 10 gr. di glucosio, dopo una settimana il 73% del carbonio del glucosio si è mineralizzato in CO_2 . Se aggiungiamo al terreno 10 gr. di cellulosa dopo una settimana solo il 27% dei suoi carboni verranno mineralizzati a CO_2 . Situazione estrema riguarda gli acidi umici: dopo una settimana solo l'1% dei suoi carboni si evolveranno in CO_2 . Tuttavia, dopo 6 mesi di permanenza nel terreno anche una molecola semplice come il glucosio non riuscirà del tutto ad essere mineralizzata, ma rimarrà sempre un 10% che rimane nel terreno in forma non disponibile. Se seguiamo la vita della cellulosa dopo 6 mesi ci sarà sempre un 16% che non viene utilizzato dai microrganismi. Tutte le molecole organiche che rimangono parzialmente degradate nel terreno si polimerizzano in una struttura molecolare di neo sintesi che è proprio l'humus del terreno.

Ma chi sono i degradatori della SO del terreno? In base alla complessità della struttura della SO si distinguono 2 principali gruppi di microrganismi definiti "gruppi ecofisiologici della microflora del suolo": 1) la microflora zimogena e 2) la microflora autoctona. Qui di seguito si riportano le definizioni e alcune caratteristiche di questi 2 gruppi eco-fisiologici:

1. microflora zimogena: gruppo di microrganismi suscettibile di moltiplicarsi velocemente quando in suolo viene aggiunta SO di facile degradazione come ad esempio un sovescio di piante erbacee;
2. microflora autoctona: gruppo di microrganismi con attività metabolica costante non suscettibile all'aggiunta nel terreno di materiale organico di facile degradazione.

In pratica, i primi sono i degradatori di strutture semplici (amido, cellulosa), mentre i secondi sono i degradatori di SO con strutture complesse (lignina e humus).

Infatti questi due gruppi hanno caratteristiche diametralmente opposte:

la microflora zimogena comprende batteri mobili, che si moltiplicano velocemente in presenza di substrato organico semplice, con tempi generazionali brevi (si scindono in meno di 1 ora) lasciando l'ambiente colonizzato una volta esaurito il substrato;

la microflora autoctona predilige habitat stabili e prevedibili, utilizzano come fonte di energia e di carbonio materiale organico complesso, hanno tempi generazionali molto lunghi, sono indigeni non migratori. In pratica sono i degradatori dell'humus, la S.O. più recalcitrante del suolo: basti pensare che dopo 6 mesi ancora il 98% dell'humus è stabile nel terreno a causa della sua difficile degradabilità.

E' facile intuire come questi 2 gruppi microbici sono fondamentali nel ciclo biogeochimico del carbonio: in mancanza degli zimogeni non ci formerebbero quei residui organici non degradati che sono i mattoni fondamentali per la neo-sintesi dell'humus, la mineralizzazione parziale di molecole semplici non avverrebbe e pertanto si avrebbe un arresto della disponibilità di ioni minerali per il nutrimento delle piante.

Il suolo vesuviano come habitat per la vita microbica

Il concetto di suolo come habitat per la vita microbica è basato su alcune verità e su alcune assunzioni empiriche quindi non supportate scientificamente. Fra le verità troviamo che il suolo è un habitat complesso e che ha un alto rapporto solido-liquido che lo distingue da molti altri habitat naturali. Fra le assunzioni non supportate sono che il suolo è un ambiente non favorevole ai microrganismi e che l'ecologia e la biodiversità microbica nel suolo non possono essere ben definite. Tali assunzioni sono, per molta parte, senza senso e basate sulla mancanza di investigazioni in quest'area e sulla visione antropocentrica per cui un habitat può essere "cattivo" o "buono" per la vita dei microrganismi. Sulla base di questa visione superficiale il suolo dovrebbe essere considerato "un cattivo" habitat per i microrganismi poiché è povero di nutrienti disponibili e costantemente esposto ad una serie di condizioni ambientali estreme e variegata che possono limitare lo sviluppo microbico (es. disponibilità di acqua, temperatura, radiazioni, nutrienti, pressione osmotica). Tuttavia, il suolo contiene più generi e specie di microrganismi di altri habitat microbici poiché il suolo è un habitat aperto che "riceve" tutti i microrganismi presenti sulla Terra. Alcune di queste specie sono presenti in basso numero nel suolo, probabilmente poiché le condizioni per la loro sopravvivenza e sviluppo sono limitate ad alcuni siti in cui i fattori ambientali nutrizionali e fisico-chimici necessari per il loro sviluppo e sopravvivenza sono molto localizzati. Questo è uno dei risultati di un ambiente strutturato con un alto rapporto solido-liquido. Conseguentemente, in termini di numero e diversità microbica nel suolo, esso appare essere un "buon" habitat per i microrganismi, in particolare per quelli indigeni "autoctoni" che meglio si sono adattati ad un ambiente così austero, mentre molti microrganismi "alloctoni" detti anche zimogeni non si adattano facilmente e non sopravvivono nel tempo nel suolo. Molti microbi autoctoni del suolo sono in termini metabolici considerati oligotrofi, in quanto adattati a vivere con quantità infinitesimali di differenti nutrienti. Questo spiega la grande diversità di microrganismi che è presente nel suolo rispetto ad ambienti ricchi di nutrienti disponibili dove le specie batteriche adattate sono poche e molto selezionate. I batteri, forse più di ogni altro organismo, sono molto adattabili sia fisiologicamente che geneticamente alle varie condizioni ambientali. Questo spiega la loro presenza sulla terra già da $3,5 \times 10^9$ anni. Inoltre, il suolo seleziona e quindi si arricchisce di alcuni batteri creando una specie di omeostasi biologica che probabilmente esiste ed è in equilibrio da milioni di anni. Ed è proprio questa omeostasi che l'uomo cerca di attentare costantemente alterando per il suo beneficio le caratteristiche chimico, fisiche e biologiche del suolo. Queste ultime hanno riguardato anche l'inoculo del suolo con microrganismi considerati "utili" (es. con *Rhizobium* sp. per incrementare la fissazione biologica dell'azoto, con funghi micorrizici per incrementare l'assunzione di fosforo da parte della pianta, con *Phanerochaete* sp. per aumentare la degradazione di xenobiotici tossici e persistenti, con una varietà di cosiddetti "plant growth promoting rhizobacteria" antagonisti di fitopatogeni del suolo). Sono stati pubblicati migliaia di lavori scientifici sui risultati di inoculi di batteri nel suolo. Molti inoculi tuttavia hanno avuto successo nel suolo solo nel breve periodo proprio perché il suolo tende sempre a tornare in omeostasi e quindi a riportare l'equilibrio anche a livello di biodiversità microbica.

Il suolo è un ambiente molto eterogeneo dove la fase gassosa e quella liquida esistono e coesistono in piccole percentuali e dove la cosiddetta fase biologica, pur rappresentando una piccola percentuale, ha un ruolo fondamentale nel mantenimento della fertilità biologica del suolo. Non a caso il suolo deve essere considerato un'entità vivente molto complessa in quanto respira (fissa O_2 ed emette CO_2), assimila (sintetizza carbonio e fissa azoto molecolare) degrada e mineralizza la sostanza organica, accumula sostanze di riserva sotto forma di humus e ha bisogno di acqua come tutti gli esseri viventi, possiede quindi tutte le funzioni di un sistema biologico vivente. Questo può essere dimostrato sottoponendo il terreno ad una sterilizzazione: le funzioni sopra indicate non si verificano più.

Pertanto il suolo deve essere considerato come un ecosistema dove le interazioni fra i sub-sistemi ipogei (radici, sostanze minerali, sostanze organiche e organismi viventi ed epigei (pianta) si integrano a vicenda conferendo ad esso l'autosufficienza e la sua omeostasi.

Per comprendere e studiare questo "organismo" le cui proprietà variano in funzione di moltissimi fattori abiotici, occorre un approccio scientifico diverso da quello utilizzato per lo studio di habitat più semplici ed omogenei. Fu il Winogradsky (1924) che applicò il "principio ecologico" nello studio della Microbiologia del suolo, comprendendo che l'approccio da adottare per comprendere il ruolo dei microrganismi nel suolo era basato fondamentalmente su 3 punti cardine:

1. Abbandono dei metodi di studio della microbiologia generale: in pratica la conoscenza del comportamento dei microrganismi in vitro non sempre fornisce informazioni utili a comprendere come essi agiscono nel suolo. Quindi l'isolamento di microbi in coltura pura non sempre chiarisce il loro ruolo nel terreno.
2. Conoscenza delle diverse funzioni che svolgono i microrganismi nel terreno (gruppi fisiologici). In pratica la loro capacità a svolgere importanti funzioni quali la fissazione dell'azoto, la degradazione della sostanza

organica, la nitrificazione (cioè la capacità di ossidare l'ammoniaca a nitrato) ed altre diventa il fattore primario di classificazione, mentre va in secondo ruolo l'appartenenza ad una determinata specie.

3. Interconnessione tra le attività microbiche e le condizioni chimico-fisiche del suolo. Quindi la necessità di studiare le attività microbiche come realmente si svolgono nel terreno e cercando di riprodurle in microcosmi, cioè in ambienti di laboratorio che mimano le condizioni ecologiche.

Applicando tali principi è possibile comprendere perché sono così importanti i microrganismi del suolo e qual è il reale ruolo della vita microbica nel terreno che riassumendo si può ricondurre a 7 funzioni fondamentali:

1. mineralizzazione della sostanza organica;
2. partecipazione alla sintesi dell'humus;
3. sintesi di azoto per fissazione biologica;
4. mobilitazione degli elementi minerali;
5. Partecipazione ai cicli biogeochimici;
6. Partecipazione allo stato di aggregazione del suolo
7. rapporti diretti ed indiretti con le radici delle piante e con altri macrobiota del suolo (acari, collemboli, nematodi ect)

L'habitat rizosferico

Il termine "Rizosfera" fu introdotto nel 1904 da Hiltner che la definì come "quel volume di suolo che circonda le radici dove vi è uno stimolo della crescita microbica". In questo particolare ambiente si realizzano intime relazioni tra piante e microrganismi che influenzano lo sviluppo vegetale, poiché il complesso delle attività microbiche regola la disponibilità di elementi nutritivi. Questa definizione è stata modificata per incorporare parti dei tessuti radicali, quali lo strato corticale e la superficie radicale stessa giacché molti microrganismi invadono il tessuto superficiale della radice causando malattie alla pianta stessa, mentre altri rappresentano un importante legame per il trasporto di nutrienti tra la pianta ed il suolo.

Il termine endorizosfera introdotto da Belandreau & Knowles (1978) descrive i microambienti multistratificati della rizosfera che includono:

- *Strato mucoide o mucigel*: comprendente polisaccaridi di origine vegetale e microbica.
- *Strato epidermico con i peli radicali*;
- *Strato corticale*.

Lo strato mucoide e lo strato epidermico rappresentano il cosiddetto "Rizopiano":

Infine troviamo l'*ectorizosfera* che comprende la rizosfera che si estende fino a 7mm dalla superficie radicale.

Una buona separazione della rizosfera dal suolo nudo (cosiddetto bulk soil) può essere ottenuta scuotendo il sistema radicale manualmente: il suolo che aderisce alle radici è definito rizosfera. Sebbene sia difficile separare i vari strati prima descritti, altre operazioni, come i lavaggi delle radici, consentono queste successive compartimentazioni. La difficoltà di separare i diversi strati è complicata dal fatto che le radici sono spesso avvolte da una densa rizoguaina, in particolare nella zona del colletto, che è fortemente aderente allo strato epidermico, al materiale mucoide, ai microrganismi e alle particelle di suolo.

In ogni modo, in questo particolare ambiente si realizzano relazioni tra pianta e microrganismi che con le loro attività regolano la disponibilità di elementi nutritivi mentre le radici a loro volta influenzano le popolazioni microbiche attraverso l'escrezione di sostanze energetiche e stimolanti dette "essudati radicali". Il complesso delle attività che si svolgono in questa particolare area del terreno è detto "effetto rizosferico" ed è tanto più marcato quanto più vicina alle radici è la zona considerata. L'effetto rizosferico è espresso anche dal rapporto tra la densità microbica della rizosfera e quella del bulk soil, anche se questo indice è molto statico perché non tiene conto della dinamica della crescita microbica sulle radici. Infatti la rizosfera deve essere considerato un ambiente dinamico che dipende dallo sviluppo delle radici, dall'abbondanza di peli radicali e delle radici avventizie. Essa dipende ancora da differenti stadi di maturazione e senescenza della pianta e dallo stadio fenologico e fisiologico della pianta stessa. In questo ambiente dinamico i microrganismi colonizzano tale biotopo superando rapporti di antagonismo con altri colonizzatori e creando sinergie e commensalismi con altri biota, fino a formare delle comunità microbiche tipiche di quella rizosfera. Pertanto gli essudati radicali giocano un ruolo fondamentale nel determinare lo sviluppo, la crescita e la biodiversità dei microrganismi legati alla rizosfera.

In condizioni ambientali naturali lo sviluppo delle piante e le alte rese del raccolto dipendono dalla costituzione genetica della specie coltivata, dalla disponibilità di nutrienti, dalla presenza nella rizosfera di certi microrganismi ad azione benefica e dall'assenza di quelli patogeni. Tra i batteri e i funghi indigeni del suolo che esplicano azione benefica si annoverano alcuni microrganismi denominati PGPR (batteri promotori la crescita

delle piante) che agiscono direttamente, fornendo alla pianta un fattore di crescita, ed altri che agiscono, invece, in maniera indiretta. Questi ultimi organismi inibiscono la crescita dei microrganismi patogeni del suolo, impedendo indirettamente il loro attacco verso la pianta.

I PGPR hanno la capacità di colonizzare velocemente la radice della pianta e in seguito stimolano la crescita delle radici e dell'intera pianta attraverso una serie di meccanismi utilizzati singolarmente o in combinazione. Sono stati evidenziati PGPR anche all'interno delle foglie di vite con attività antimicotica (figura 4) (Lo Piccolo et al., 2010).

I meccanismi di azione benefica si dividono in:

Azioni indirette:

La promozione indiretta della crescita della pianta si verifica quando i PGPR attenuano o impediscono gli effetti deleteri di uno o più organismi fitopatogeni. Tale azione è definita Biocontrollo e può essere esplicata tramite:

- *Sintesi di siderofori;*
- *Sintesi di enzimi;*
- *Sintesi di sostanze antagonistiche;*
- *Efficiente colonizzazione radicale*

L'impiego di tali PGPR per limitare i danni da fitopatogeni è ancora agli albori e, sebbene il metodo sembri possedere un grande potenziale, la maggior parte delle ricerche effettuate finora è stata compiuta in condizioni controllate di laboratorio, nelle camere di crescita o nelle serre.

Azioni dirette:

- *Azotofissazione;*
- *Sintesi di ormoni vegetali:*

Lo sviluppo di una pianta è organizzato a livello cellulare mediante una fitta rete di reazioni biochimiche mediate da molecole denominate ormoni vegetali. Questi ultimi vengono prodotti in varie parti delle piante a partire da sostanze di base come aminoacidi ed elementi nutritivi. Gli ormoni vegetali sono costituiti da molecole organiche a basso peso molecolare, che possono essere sintetizzati in più siti ed esplicare più funzioni su organi vegetali. Esistono diverse classi di ormoni ciascuna adibita ad un diverso ruolo nello sviluppo di una pianta. Di seguito sono elencate le diverse classi

Le Giberelline (GA), di cui attualmente si conoscono più di 60 strutture sono prodotte soprattutto nei meristemi, mentre sono localizzate pressoché ovunque nella pianta. Oltre a promuovere la distensione e la divisione cellulare, esplicano un importante ruolo nella regolazione della fioritura e nella fine del periodo di quiescenza dei semi.

Le Citochinine sono sintetizzate nell'apice radicale e sono presenti in tutti i tessuti in via di divisione. Ritardano la senescenza dei tessuti e svolgono spesso un'azione complementare a quella delle auxine.

L'acido abscissico è sintetizzato nei cloroplasti, promuove l'abscissione della foglia e del frutto, regola il passaggio da fase quiescente a fase vegetativa, e regola il bilancio idrico nella pianta.

L'etilene è prodotto in più siti, stimola la sintesi di diversi enzimi, promuovendo i fenomeni di maturazione dei frutti e la loro abscissione. Ostacola l'accrescimento per distensione, quindi l'azione delle auxine.

Le Auxine sono prodotte nei meristemi apicali, ma anche nelle radici, nelle foglie, negli ovai, e nei semi. La funzione principale è quella dell'accrescimento per distensione (geotropismo e fototropismo) e per divisione (attività del cambio, crescita dei frutti e delle radici laterali).

Non tutti sanno che i cosiddetti "fitormoni" non vengono prodotti solo dalle piante, ma anche da microrganismi. Quelli rizosferici sintetizzano fitoregolatori utilizzando come precursori composti essudati dalla pianta (ad es triptofano) e vengono stimolati nella loro crescita e produzione dalle stesse radici delle piante. Pertanto si tratta di vera e propria protocollaborazione fra batterio e pianta. Tuttavia ci sono batteri quali *Nocardia*, *Arthrobacter*, alcune specie di *Flavobacterium*, *Brevibacterium* che producono fitoregolatori, pur non essendo stimolati dalle radici.

Le auxine e in particolare l'Acido 3-indolacetico (IAA) è sintetizzato da molti procarioti del suolo, in particolare dai PGPR.

Diversi studi hanno dimostrato che la maggiore crescita delle piante, osservata in seguito all'inoculazione dei suoli con *Azospirillum brasilense*, è dovuta alla produzione di auxine da parte del batterio stesso. È stato provato che anche altri batteri come *Sinorhizobium meliloti*, un batterio simbiote dell'erba medica, ed *Enterobacter cloacae*, un batterio enterico, producono auxine tipo IAA.

La produzione di ormoni non si concentra solo sulle auxine ma anche su Citochinine (*Bacillus megatherium* e *Rhizobium leguminosarum*) e Giberelline (Funghi, batteri ed Attinomiceti).

Importanza dell'azotofissazione biologica per il mantenimento della fertilità del suolo

La fertilità del suolo è altamente dipendente dalla presenza di particolari elementi nutritivi che sono assunti dalle piante per poter svolgere, in modo ottimale, il loro ciclo biologico. Tali elementi possono essere suddivisi, in base alle quantità adsorbite necessarie alla pianta per il proprio sviluppo, in: elementi essenziali (azoto, potassio e fosforo); elementi secondari (zolfo, calcio e magnesio); microelementi (ferro, manganese, zinco, rame, boro e molibdeno). Di tutti questi l'azoto è uno dei fattori indispensabili per la crescita e lo sviluppo delle piante.

L'atmosfera fornisce la principale riserva di azoto, infatti circa l'80% (in volume) dell'aria che respiriamo è costituita da azoto gassoso (N_2), ma questo non può essere utilizzato direttamente dalle piante o dagli altri organismi superiori per sintetizzare i composti biologici azotati essenziali elencati in precedenza (proteine ed acidi nucleici), perché mancano dell'energia necessaria per rompere il triplo legame della molecola biatomica di azoto (N_2). Pertanto l' N_2 deve essere trasformato, o più precisamente "fissato", in ammoniaca (NH_3) e in seguito attraverso il ciclo dell'azoto, ione ammonio (NH_4^+) e/o ione nitrato (NO_3^-) per poter essere assimilato dalle piante.

La fissazione dell' N_2 può essere naturale, industriale e biologica.

Tra le trasformazioni naturali ricordiamo i fulmini, che apportano circa il 10% di N_2 fissato nel mondo, mentre la fissazione industriale ed il processo biologico ne apportano circa il 25% ed il 60%, rispettivamente.

La fissazione industriale si basa sull'uso di fertilizzanti azotati di sintesi. Tale pratica, però, oggi viene limitata per problemi di diverso carattere: economico, perché bisogna contenere i costi di produzione delle colture che sono maggiorati dalla spesa per l'acquisto dei concimi, per la loro distribuzione e la loro produzione; energetico, perché l'azotofissazione industriale utilizza circa il 2-5% degli idrocarburi bruciati al mondo per produrre fertilizzanti azotati; ecologico, poiché i problemi dell'inquinamento da nitrati delle acque di falda stanno diventando sempre più rilevanti e perché l'uso indiscriminato di concimi chimici ha provocato problemi di eutrofizzazione dei corpi idrici superficiali (laghi e riserve) dovuta allo scolo di acque di scarico, alla percolazione dei nitrati da appezzamenti agricoli e allo squilibrio nelle fasi biologiche del ciclo dell'azoto. La fissazione biologica dell'azoto rappresenta la maggiore risorsa di azoto nel suolo agricolo incluso quello nelle regioni aride. I maggiori sistemi di fissazione di azoto sono quelli simbiotici, che possono giocare un ruolo nell'aumento della fertilità e della produttività nei suoli carenti di azoto.

L'agricoltura sostenibile ha posto l'attenzione sul ruolo potenziale della fissazione biologica dell'azoto (BNF). La BNF può ridurre l'uso dei combustibili fossili e può essere di aiuto nella riforestazione e nella ristorazione delle terre marginali con scarsa produttività.

L'azoto è fissato biologicamente ad opera di specifici microrganismi (circa 80 specie di 2 generi di Archea, 38 generi di batteri e 20 generi di cianobatteri) capaci di rendere disponibile l' N_2 alle piante e, di conseguenza, agli altri organismi viventi. Tali microrganismi possono essere liberi (come ad esempio cianobatteri e batteri del genere *Azotobacter*) o simbiotici (*Rhizobium*), ossia possono essere capaci di fissare l'azoto vivendo liberi nel terreno oppure sono capaci di azotofissazione solo stringendo una stretta interazione con le radici delle piante.

I microrganismi del suolo, attraverso una serie di reazioni che costituiscono il ciclo dell'azoto, trasformano l' N_2 in forma utilizzabile dalle piante (Figura 2). Quando animali e vegetali muoiono, i composti organici di cui sono costituiti, sono attaccati da batteri decompositori, ossia microrganismi capaci di degradare la sostanza organica e liberare, così, nell'ambiente molecole semplici che possono essere utilizzate dagli altri esseri viventi. La degradazione delle proteine da parte della microflora terricola inizia con l'idrolisi (scissione di molecole per aggiunta di acqua) di una proteina negli aminoacidi che la compongono, ad opera di enzimi (proteine capaci di catalizzare reazioni chimiche) e successivamente gli aminoacidi rilasciati vengono ulteriormente metabolizzati. In seguito a tali reazioni, il gruppo amminico degli aminoacidi è rilasciato sotto forma di ammoniaca (NH_3) o ione ammonio (NH_4^+) attraverso un processo chiamato ammonificazione. In seguito alcuni gruppi batterici sono in grado di ossidare l'ammoniaca e lo ione ammonio in nitriti (NO_2^-) ed altri di ossidare quest'ultimo in nitrati (NO_3^-) attraverso un processo chiamato nitrificazione.

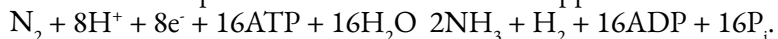
Una parte dei nitrati formati durante il ciclo può essere adsorbita dalle piante; quindi, all'interno delle cellule vegetali, sono trasformati in ioni ammonio, utilizzati per la sintesi di aminoacidi ed altri composti organici azotati necessari alla vita della pianta. Successivamente gli animali, nutrendosi delle piante, utilizzano gli aminoacidi vegetali per sintetizzare essi stessi proteine ed altri costituenti cellulari.

Purtroppo gran parte dei nitrati viene persa e non utilizzata dalle piante in quanto nel suolo sono presenti particolari microrganismi capaci di ridurre i nitriti ad azoto gassoso, il quale viene liberato nell'atmosfera attraverso un processo definito denitrificazione. Tale fenomeno è causa di infertilità del terreno in quanto le

piante, come abbiamo detto in precedenza, non possono assimilare l'azoto in forma biatomica; sicché la carenza di tale elemento nel suolo costituisce la principale causa di uno sviluppo stentato delle piante con conseguente scarso raccolto di cereali ed altri prodotti agricoli.

I microrganismi del suolo capaci di azotofissazione, che prendono il nome di azotofissatori, possono essere divisi in tre categorie: liberi; associati, non nodulanti; simbiotici. Le tre tipologie di microrganismi sono accomunate dal fatto che posseggono un sistema enzimatico chiamato complesso della nitrogenasi, costituito da una serie di enzimi che catalizzano particolari reazioni metaboliche le quali portano ad un risultato comune: la fissazione dell'azoto.

La reazione complessiva dell'azotofissazione è rappresentata dalla formula:



Le reazioni enzimatiche coinvolte nel processo dell'azotofissazione sono molto dispendiose da un punto di vista energetico e richiedono una notevole fonte energetica sotto forma di carbonio, costituita da essudati vegetali (carboidrati semplici, aminoacidi, acidi organici) o sostanza organica in decomposizione. Pertanto la sintesi e l'attività della nitrogenasi e degli altri enzimi coinvolti in tale processo sono attivati dai microrganismi solo in condizioni di carenza di azoto nel terreno e sono finemente regolati da un insieme di geni che prendono il nome di geni *nif*. L'ammoniaca prodotta in seguito all'azotofissazione viene utilizzata per le biosintesi ed incorporata nei composti organici, ma se presente in eccesso, la sua sintesi ad opera della nitrogenasi viene immediatamente bloccata per evitare spreco di energia.

Gli azotofissatori liberi, come per esempio *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Clostridium*, *Rhodospirillum*, sono microrganismi presenti nel suolo e capaci di trasformare i composti azotati complessi del terreno, in condizioni di aerobiosi o anaerobiosi, nella forma di azoto minerale assimilabile dalle piante. Per poter svolgere l'azotofissazione essi utilizzano come fonte di carbonio la sostanza organica in decomposizione presente nel terreno. Generalmente gli azotofissatori liberi hanno un basso rendimento, espresso in quantità di azoto fissato in rapporto al carbonio consumato. I più efficienti sono i Cianobatteri, in quanto sono capaci di soddisfare le proprie esigenze nutritive a partire dall'energia solare; inoltre sono capaci di fissare l'azoto sia in condizioni di anaerobiosi che in condizioni di aerobiosi confinando la nitrogenasi in cellule specializzate denominate eterocisti.

Gli azotofissatori associati, non nodulanti, come ad esempio *Azospirillum*, sono extracellulari ma in stretta relazione con la pianta ospite, per cui in questo caso si parla di ectosimbiosi. L'energia necessaria all'azotofissazione è ricavata dagli essudati radicali della pianta ospite. *Azospirillum* recentemente è stato utilizzato per incrementare la produttività delle colture soprattutto nei paesi tropicali attraverso il suo inoculo nel suolo e sulle radici di graminacee. L'inoculazione di tale batterio ha determinato, oltre che un aumento dell'azotofissazione, effetti favorevoli sulla crescita delle piante attraverso lo stimolo alla produzione di particolari ormoni vegetali come gibberelline, citochinine ed auxine.

Gli azotofissatori simbiotici che formano noduli radicali, come *Rhizobium*, sono in grado di fissare l'azoto solo quando si trovano in stretta relazione con la pianta ospite, dalla quale ricavano l'energia necessaria per tale processo. L'interazione tra le leguminose ed i rizobi è una delle più importanti in quanto le leguminose comprendono piante economicamente importanti, come la soia e l'erba medica, molto utilizzate nell'industria e nell'alimentazione degli animali domestici, oppure fagioli e piselli, di largo uso e fondamentali nell'alimentazione umana; infine la produzione di legumi da parte di molte industrie agricole è molto vantaggiosa sia da un punto di vista economico che ecologico poiché grazie alla presenza di batteri azotofissatori è possibile evitare l'uso di fertilizzanti chimici azotati.

L'azotofissazione avviene solo all'interno di strutture specializzate formatesi in seguito all'interazione pianta-batterio e che prendono il nome di noduli.

E' stato calcolato che le piante leguminose ricevono il 70-80% dell'azoto di cui necessitano mediante la simbiosi. La manifestazione macroscopica di tale associazione è rappresentata dalla formazione di un nuovo organo sulle radici delle piante: il nodulo.

L'azotofissazione avviene solo all'interno del nodulo, in seguito alla formazione del batteroide, dove è presente la nitrogenasi ed è regolata geneticamente ad opera dei geni *nif*.

La regolazione dell'azotofissazione è molto complessa e dipende da svariati fattori quali ad esempio la *disponibilità di nutrienti* e la *percentuale di ammoniaca* nel terreno; infatti in presenza di un'elevata concentrazione di NH_3 la fissazione dell'azoto è bloccata per evitare inutile dispendio di energia per produrre una sostanza già presente.

L'interazione *Rhizobium*-leguminose è vantaggiosa per entrambi i partner poiché il batterio viene a trovarsi in un ambiente fisicamente protetto e ricco di nutrienti (nodulo, figura 3) e la pianta ospite usufruisce dell'azoto

fissato per la sintesi di composti organici azotati, godendo di un vantaggio selettivo per l'acquisizione della capacità di crescere anche in terreni poveri di azoto e quindi poco adatti alla crescita di altre piante.

In condizioni ottimali la simbiosi *Rhizobium*-leguminose può produrre una quantità di azoto fissato molto elevata. Le piante della famiglia *Fabaceae* largamente diffuse in natura, da un punto di vista agronomico rivestono un ruolo importante per l'arricchimento in azoto del suolo, infatti vengono utilizzate in successione a colture che impoveriscono il terreno, rappresentando il modo più economico ed ecologico per la produzione di proteine necessarie all'alimentazione umana ed animale. In uno studio effettuato su terreni vesuviani, Ventorino et al. (2007), analizzando la distribuzione spaziale e temporale di una popolazione naturale di *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* nodulante piante di *Vicia faba*, hanno dimostrato che anche la monocultura di fava ripetuta per tre anni diminuiva la biodiversità intraspecifica dei Rizobi e selezionava ceppi selvaggi che si adattavano alle condizioni ambientali dei terreni vulcanici.

Per più di cento anni la fissazione biologica dell'azoto (BNF = Biological Nitrogen Fixation) è stata eseguita estensivamente in pratica agricola ed ora è tornata in auge con l'enfasi internazionale sullo sviluppo ambientale sostenibile e sull'uso di risorse rinnovabili e con la constatazione che la fissazione biologica dell'azoto gioca un ruolo chiave nella "land remediation". Infatti, come abbiamo detto in precedenza, l'uso di fertilizzanti azotati di sintesi ha provocato un esaurimento delle risorse nutritive del suolo e la depressione della microflora autoctona poiché, come ad esempio avviene nell'interazione rizobio-leguminosa, la pianta trova abbastanza azoto nel suolo da non necessitare né di spendere energia per formare il nodulo radicale, che costituisce la nicchia protettiva del batterio all'interno del quale avviene l'azotofissazione, né di produrre carboidrati per la nutrizione del batterio simbiote. L'insieme di questi fattori e le problematiche legate all'inquinamento in seguito all'uso indiscriminato dei fertilizzanti azotati di sintesi ha incrementato la ricerca e lo studio di fonti alternative di azoto fissato, in particolare lo sviluppo di microrganismi azototrofi da utilizzare come "fertilizzanti batterici".

I microrganismi del suolo come fonte di biodecontaminazione

E' oramai ampiamente risaputo che l'intera area vesuviana negli anni '70 e '80 è stata oggetto di discariche "private" poi statalizzate in cui, indisturbati, è stato riversato rifiuti organici ed inorganici inerti. Si calcola che nell'area vesuviana tra discariche di Stato e non, siano stati versati oltre 4 milioni di tonnellate di rifiuto di ogni tipo. La stessa Relazione della Commissione parlamentare d'inchiesta sul ciclo dei rifiuti e sulle attività illecite a esso connesse (11 marzo 1996 al Cap. III I Traffici Abusivi Di Rifiuti - Rifiuti urbani e industriali tossico-nocivi) evidenzia che "in base alla documentazione acquisita dalla Commissione risulta evidente come fino al 1993 non sia stata posta in essere alcuna attività significativa di contrasto dei traffici illeciti di rifiuti, con particolare riferimento a quelli dal centro-nord verso il Sud del Paese.

In molte aree vesuviane sono presenti infatti profili pedologici definiti "Technosoil" (IUSS Working Group WRB, 2015) in quanto naturalmente contaminati da strati profondi di rifiuti organici ed inorganici frutto di sversamenti avvenuti nel passato.

A parte il monitoraggio puntuale dell'area per evitare ulteriori smaltimenti di rifiuti tossici e nocivi, fortunatamente i terreni contaminati possono essere "ripuliti" attraverso molte tecniche di decontaminazione. Tra le tecniche eco-sostenibili da poter utilizzare, quelle che utilizzano batteri e funghi detossicanti sono sicuramente all'avanguardia.

Uno dei principali problemi ambientali causati dalle attività di raffinazione e stoccaggio degli idrocarburi consiste nella contaminazione dei suoli su cui insistono gli impianti e nell'inquinamento della falda sottostante. A causa della loro natura prevalentemente idrofobica e della loro bassa solubilità in acqua, i contaminanti vengono prontamente adsorbiti alle particelle di suolo (in particolare dalle frazioni umiche ed argillose) mentre una frazione di essi va a inquinare le falde freatiche. Nei suoli contaminati da idrocarburi si osservano alterazioni nello stato di aggregazione delle particelle del suolo con ripercussioni negative sulle proprietà idrogeologiche oltre che profonde modificazioni ecologiche nelle comunità microbiche. Negli animali gli inquinanti idrocarburici subiscono processi metabolici che determinano la generazione di composti reattivi come, ad esempio, epossidi, chinoni, fenoli che reagiscono con i componenti cellulari alterandone profondamente la funzionalità. In particolare, molti dei contaminanti idrocarburici sono altamente genotossici poiché provocano errori nella sintesi del DNA con conseguenti mutazioni di varia natura oltre che aberrazioni cromosomiche che possono risultare in fenomeni teratogenici e carcinogenici. È stata inoltre ampiamente documentata la nocività degli inquinanti idrocarburici per il sistema immunitario dell'uomo e degli animali con conseguente maggiore rischio di malattie immunodepressive. L'inquinante idrocarburico a più alto tasso di carcinogenicità è il benzopirene. In appositi sistemi sperimentali (es. cellule epatiche di varie specie animali) è stato visto che il

benzopirene va incontro ad un metabolismo che conduce alla formazione di intermedi altamente reattivi con gli enzimi presenti nel nucleo cellulare che risulta in un elevato tasso di mutagenicità.

Gli idrocarburi contaminanti possono essere suddivisi in quattro classi: idrocarburi alifatici saturi, idrocarburi aromatici, asfalteni (che comprendono composti fenolici, acidi grassi, chetoni, esteri e porfirine) e resine (piridine, chinoline, carbazoli, solfossidi ed amidi).

Uno dei meccanismi principali attraverso i quali gli idrocarburi contaminanti vengono eliminati dall'ambiente consiste nella degradazione microbica.

Gli idrocarburi differiscono nella loro suscettibilità alla degradazione. Volendo tracciare una scala di sensibilità decrescente alla degradazione: normal-alcani, alcani ramificati, aromatici a basso peso molecolare e alcani ciclici. La degradabilità decresce con il peso molecolare ed il numero di anelli aromatici. Infatti, gli idrocarburi aromatici ad alto peso molecolari hanno il tasso di degradazione più lento.

A causa degli elevati rischi per la salute umana e per l'ambiente negli ultimi anni si è verificato un crescente interesse per la messa a punto di tecnologie volte alla detossificazione degli inquinanti idrocarburi e la decontaminazione dei suoli. Alcune tecniche fisico-chimiche prevedono la rimozione degli strati di suolo contaminati ed il loro trasporto in siti di stoccaggio, la lisciviazione (soil washing), l'estrazione con vapori (venting) oppure la stabilizzazione mediante inglobamento in cemento. Queste tecniche, che possono essere applicate da sole o in combinazione, in molti casi non determinano un beneficio ecologico netto di rilievo. Altre tecniche, risultate di gran lunga più efficaci e convenienti anche dal punto di vista economico sono basate sulla naturale capacità di decomposizione delle sostanze organiche da parte dei microrganismi. L'applicazione di queste ultime tecniche è conosciuta con il nome di bioremediation.

La degradazione microbica degli idrocarburi è un processo complesso i cui aspetti qualitativi e quantitativi dipendono da numerosi fattori, intrinseci ed estrinseci. Tra i primi abbiamo la natura chimica e lo stato fisico dei singoli contaminanti ed il grado di contaminazione. Tra i numerosi fattori estrinseci abbiamo parametri ambientali quali la natura chimico-fisica del suolo che influenza la disponibilità degli idrocarburi alla degradazione, la temperatura, la tensione di ossigeno, la quantità dei nutrienti disponibili e la loro natura, il grado di salinità, l'attività dell'acqua ed il pH.

La degradazione microbica degli idrocarburi dipende, in primo luogo, dalla composizione delle comunità microbiche del suolo e dalla loro risposta adattativa in presenza degli idrocarburi stessi. In questo contesto assume fondamentale importanza l'azione combinata di consorzi di specie batteriche e fungine.

E' noto che un numero rilevante di specie batteriche e fungine è in grado di degradare gli idrocarburi a basso peso molecolare e di struttura semplice, la degradazione di composti policiclici, invece, (soprattutto quelli contenenti 4-5 anelli aromatici) può essere svolto soltanto da poche specie microbiche.

In caso di contaminazione da idrocarburi si verifica un processo cosiddetto di adattamento che consiste nell'azione combinata di tre meccanismi tra loro correlati: arricchimento selettivo di organismi degradanti gli idrocarburi, trasferimento orizzontale di geni o gruppi di geni che migliorano le capacità degradative e, infine, induzione e derepressione di specifici enzimi degradativi. I processi di degradazione degli idrocarburi aromatici policiclici implica l'azione di due importanti gruppi di enzimi: le monossigenasi (generalmente prodotte da funghi filamentosi) e le diossigenasi (generalmente prodotte da batteri) che necessitano di ossigeno molecolare per catalizzare il passaggio iniziale di idrossilazione degli anelli aromatici. Numerose evidenze confermano il miglioramento delle prestazioni degradative in seguito ad arieggiamento e/o insufflazione di ossigeno. Le reazioni catalizzate dalle ossigenasi portano alla formazione di derivati fenolici (catecolo e acido protocatechico) che vengo, a loro volta, dearomatizzati tramite processi di orto o metascissione catalizzati da altre diossigenasi come la catecolo 2,3 diossigenasi. I prodotti finali della degradazione sono l'acido piruvico e vari intermedi del ciclo di Krebs tra cui l'acido succinico. Questi ultimi prodotti, non tossici sono intermedi di reazione metaboliche che fanno parte dei normali processi fisiologici cellulari. La "bioremediation", biodecontaminazione naturale nasce dallo studio di questi processi e dalla capacità che hanno questi microrganismi di rendere non tossici sostanze altamente tossiche e cancerogene.

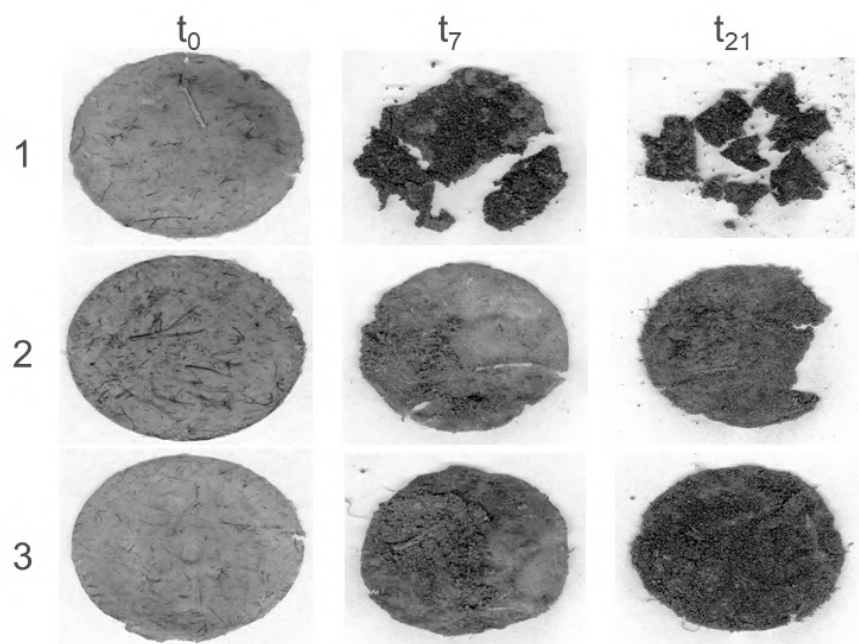


Fig. 1: Esempio di degradazione della Sostanza Organica nel suolo in funzione della sua complessità: 1: Omogeneizzato di finocchio; 2: Omogeneizzato di finocchio con faseolina; 3: Omogeneizzato di finocchio con Faseolina/Transglutaminasi; dopo 0 giorni, 7 giorni e 21 giorni.

Randy Moore, Dennis Clark, and Darrell Vodopich, Botany Visual Resource Library © 1998 The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

How Plants Get Nitrogen from the Soil

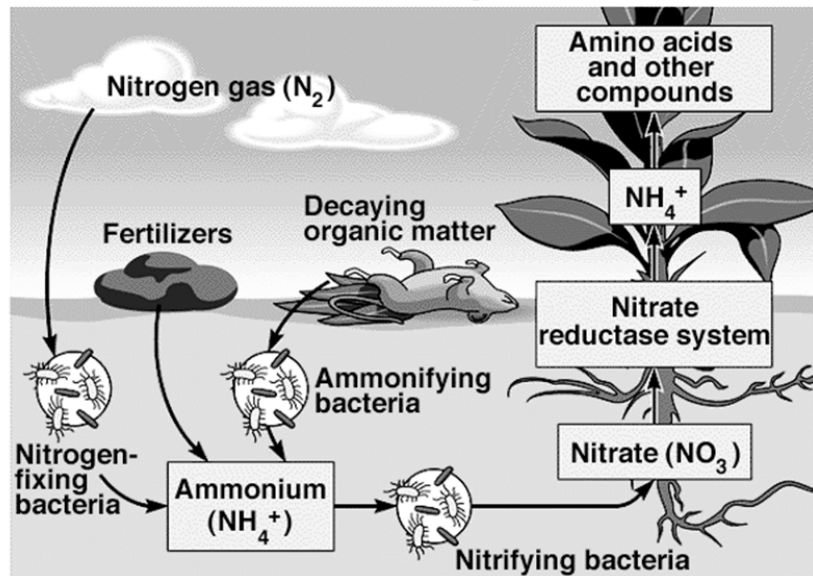


Fig. 2: Il Ciclo dell'azoto

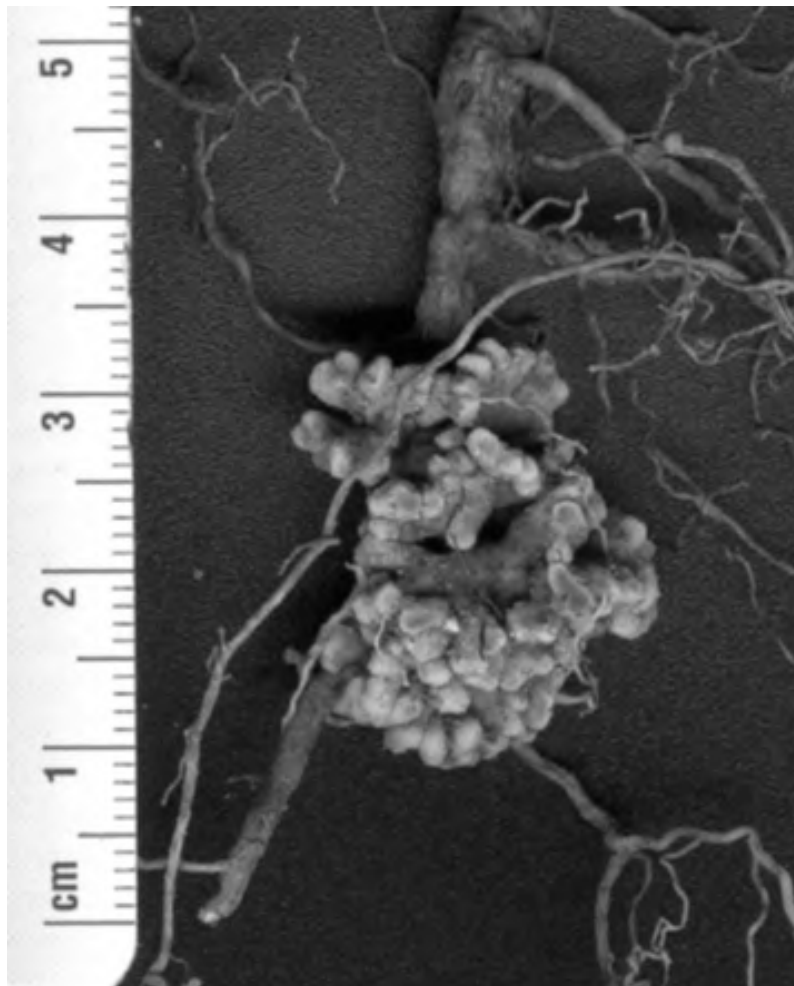


Fig. 3: Nodulo radicale a rosetta su Vicia hybrida

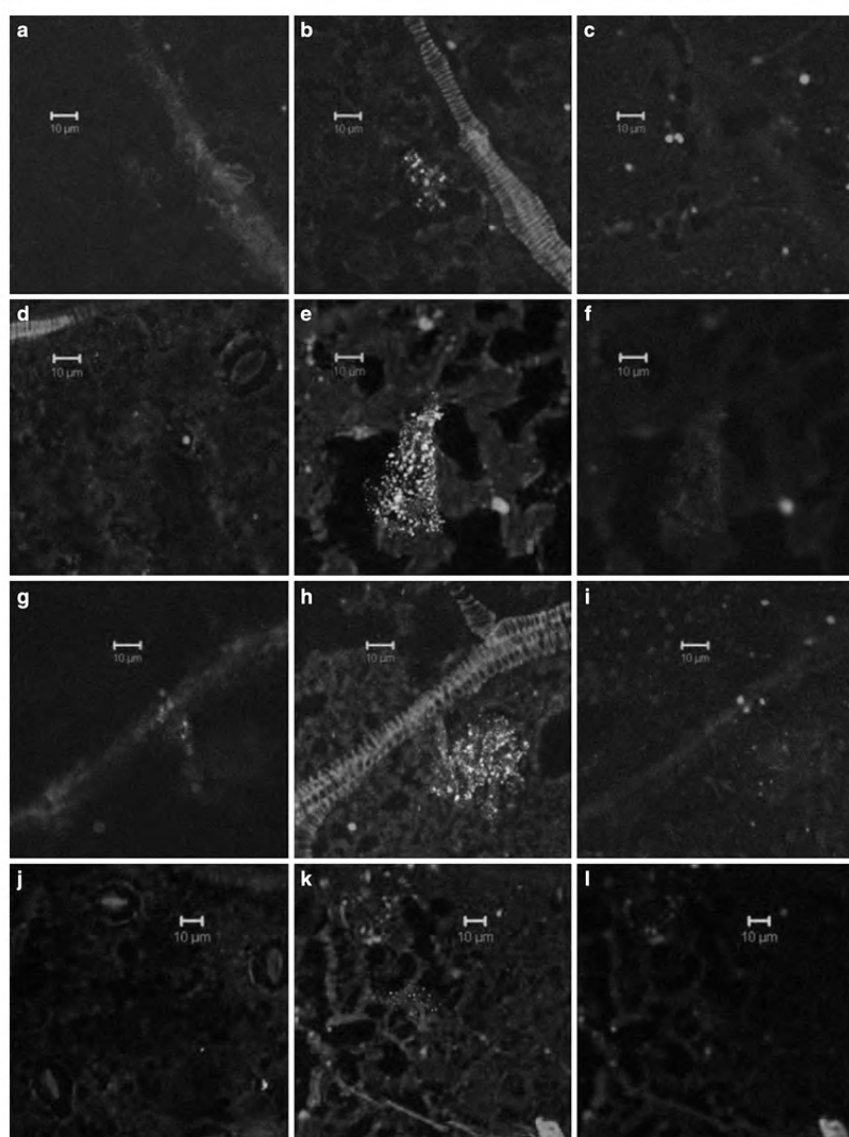


Fig. 4: Localizzazione con il metodo FISH (Fluorescent in situ hybridization) di colonie di PGPR (in verde) in una foglia di Vitis vinifera: a: superficie superiore della foglia; e: interno della foglia; l: superficie inferiore della foglia

BIBLIOGRAFIA

- BELANDREAU J., KNOWLES R.**, *Interaction between non-pathogenic soil microorganisms and plants*, Y. R. Dommergues & S. V. Krupa, Amsterdam: Elsevier, 243, 1978. **BLUM W. E. H., SCHAD P., NORTCLIFF S.**, *Essentials of Soil Science. Soil formation, functions, use and classification (World Reference Base, WRB)*, Borntraeger Science Publishers, Stoccarda, 2018.
- ESPOSITO F.**, *Soil Organic Matter and Carbon Sequestration in Forest Stands on Mount Vesuvius*, Tesi di dottorato in “Biologia applicata XXI ciclo”, Università Federico II di Napoli, 2008.
- GENTILE A.**, *Biodiversità della microflora edafica in funzione della copertura vegetale in ambiente mediterraneo mediante tecniche funzionali e molecolari*, Tesi di dottorato in “Biologia applicata XVIII ciclo, indirizzo Ecologia terrestre, piante e suolo”, Università Federico II di Napoli, 2005.
- HILTNER L.**, *Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung und Brache*, Arb. Dtsch. Landwirtsch. Gesellschaft, 98, 59–78, 1904.
- IUSS WORKING GROUP WRB**, *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports, 106 FAO, Roma, 2015.
- LO PICCOLO S., FERRARO V., ALFONZO A., SETTANNI L., ERCOLINI D., BURRUANO S., MOSCHETTI G.**, *Presence of endophytic bacteria in Vitis vinifera leaves as detected by fluorescence in situ hybridization*, Annals of Microbiology, 60, 161-167, 2010.
- MARINIELLO L., GIOSAFATTO C. V. L., MOSCHETTI G., APONTE L., MASI P., SORRENTINO A., PORTA R.**, *Fennel waste-based films suitable for protecting cultivations*, BioMacromolecules, 8, 3008-3014, 2007.
- MOSCHETTI G., VENTORINO V., CHIURAZZI M.**, *I suoli: aspetti abiotici e biotici*, in: “Il Paesaggio tra cultura e Natura”, I quaderni del Parco, Ente Parco Metropolitan delle Colline di Napoli, 51-67, 2006.
- MOSCHETTI G.**, *Elementi di Microbiologia del suolo*, in: FERRO V., BAGARELLO V., “Monitoraggio della qualità dei suoli e rischio di desertificazione”, Milano, 193-224, 2012.
- VENTORINO V., CHIURAZZI M., APONTE M., PEPE O., MOSCHETTI G.**, *Genetic diversity of a natural population of Rhizobium leguminosarum bv. viciae nodulating plants of Vicia faba in the vesuvian area*, Current Microbiology, 55, 512-517, 2007. **WINOGRADSKY S.**, *Sur la microflora autochtone de la terre arable*, Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des Sciences (Paris) D, 178, 1236-1239, 1924.

