

ABORDAGEM TEÓRICA DAS INTERAÇÕES AMBIENTAIS ENTRE NUTRIÇÃO DE PLANTAS E MICRORGANISMOS

THEORETICAL APPROACH OF ENVIRONMENTAL INTERACTIONS BETWEEN PLANT NUTRITION AND MICRO-ORGANISMS

Carlos Alberto Hirata

Licenciado e Bacharel em Geografia. Doutorando em Agronomia (UEL). Professor Assistente da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

Galdino Andrade Filho

Biólogo. Doutor em Ecologia Microbiana (Universidad de Granada). Professor Associado da Universidade Estadual de Londrina (UEL).

RESUMO: O presente trabalho constrói uma discussão teórica sobre as interações ambientais, através da influência de microrganismos na nutrição de plantas. Aspectos gerais do ecossistema, no ponto de vista da ecologia, são discutidos tentando manter a compreensão ecológica de muitos processos interativos, que são realizados entre plantas e a superfície do solo. O objetivo foi contribuir para construção do conhecimento de uma questão multidisciplinar, para conscientização da importância das potencialidades e fragilidades dessas interações, tentando manter os limites dessas relações, devido há alta complexidade e amplitude desses processos.

Palavras-chave: Ecologia de solo; ecossistema; interação microbiana; microrganismos; nutrição de plantas.

ABSTRACT: *The present paper construct a theoretical discussion about the environmental interactions, covering the influence of microorganisms on plant nutrition. General aspects of the ecosystem, in the view point of ecology, are discussed trying to keep the ecological comprehension of many interactive processes that, are realized between plant soil interface. The objective was to contribute on the construction of the knowledge a multidisciplinary question, to become aware of the importance of potentialities and fragilities of these interactions, trying to keep boundaries of these relations due to the high complexity and enlargement of these processes.*

Keywords: *Soil ecology; ecosystem; microbial interaction; micro-organisms; plant nutrition.*

INTRODUÇÃO

A cada dia se renovam as ações da humanidade na intenção de encontrar soluções para os problemas ambientais que a Terra vem enfrentando.

Dentre esses problemas, está o conflito do uso do solo agrícola para produção de alimentos e outros insumos. Atualmente 7 bilhões de pessoas dependem das matérias primas produzidas na área rural que necessitam diariamente de alimentação, o Brasil, por sua dimensão territorial e disponibilidade de recursos naturais exerce um papel fundamental nesse cenário mundial, por suas características biogeográficas, climáticas, hídricas, pedológicas, minerais e biodiversidade.

Nesse contexto, esta discussão pretendeu construir uma exposição teórica das interações ambientais na nutrição de plantas por meio de microrganismos, à luz da abordagem ecossistêmica da ecologia, numa tentativa de enraizar a compreensão ecológica

dos processos interativos que se realizam entre o solo e a planta. Tendo como objetivo contribuir na construção de uma linguagem de compreensão interdisciplinar da questão, para conscientização da importância de se conhecer melhor as potencialidades e fragilidades dessas interações, afim de que sejam respeitados os limites dessas relações, devido sua amplitude e complexidade.

O estudo da nutrição de plantas é um dos temas mais amplos e complexos no campo agrônomo e está cada vez mais presente no cotidiano da pesquisa agrônoma sobre o olhar de algumas linhas de pensamento, sendo uma delas a físico-química, por meio da agricultura convencional promovida pela chamada revolução verde, e a outra pela agricultura orgânica ou agro-ecológica. Esta discussão teórica não teve como propósito debater estes pensamentos, mas utilizar-se dos conhecimentos tangentes entre essas linhas agrônomicas para auxiliar na compreensão das relações interativas entre a planta, o solo e os microrganismos.

Neste trabalho, foi abordada a ação de microrganismos na nutrição de plantas como uma das maneiras de se compreender as interações biológicas que se processam no ambiente, através da abordagem ecossistêmica da ecologia.

ABORDAGEM TEÓRICO-METODOLÓGICA

Ecossistema

Para estabelecer uma raiz conceitual e facilitar um melhor conhecimento da complexidade das interações que se processam entre o ambiente e a nutrição de plantas, esta discussão apoiou seus argumentos na teoria de sistemas da ecologia ou ecossistema pelo fato de que:

O ecossistema é a primeira unidade na hierarquia ecológica que é completa, que tem todos os componentes (biológicos e físicos) necessários para sua sobrevivência, é a unidade básica ao redor da qual se pode organizar a teoria e a prática da ecologia, e de que o mundo orgânico e inorgânico funciona como um só sistema, de tal modo que é impossível entender cada uma das partes sem entender o todo, sendo mais que uma unidade geográfica (ou ecorregião), uma unidade funcional, com entradas e saídas, e fronteiras que podem ser tanto naturais quanto arbitrarias. (ODUM & BARRETT, 2008, p. 19).

O conhecimento do que ocorre nos estudos ecossistêmicos entre as comunidades biótica e abiótica, naturais ou arbitrarias, é extremamente adequado para a compreensão das interações de nutrição de plantas, dentre os quais a ciclagem de materiais. Pois, segundo os autores, ecossistema é também uma unidade que inclui todos

os organismos em uma dada área, interagindo com o ambiente físico, inter-relacionados de modo que um fluxo de energia leve as estruturas bióticas, claramente definidas, à ciclagem de materiais entre componentes vivos e não vivos.

Dentre as pesquisas de nutrição de planta, o estudo da relação entre o solo e a planta, é uma premissa básica para sua compreensão. Malavolta *et al.* (1989, p. 1) descreve “que o sistema solo-planta, é um sistema aberto em que os elementos (M) são constantemente removidos de um lado, na fase sólida do solo, e acumulados no outro, a planta.” Articulando “uma série de reações de transferência, geralmente reversíveis, entre vários compartimentos (fase sólida, reservatório lábil, solução do solo e planta) envolvendo elementos minerais”. (MALAVOLTA *et al.*, 1989, p. 190)

Apesar do autor argumentar esse processo de relação sistêmica entre o solo e a planta através da avaliação de fluxo de reações e transferências físico-químicas de nutrientes minerais, vale lembrar que esse processo é um conhecimento universal do comportamento nutricional da planta, servindo de comparativo na discussão nutricional sob foco ambiental, que continuamente busca, de maneira ecológica, superar os modelos de nutrição de plantas fomentada pela indústria química na produção de alimentos.

Entretanto, o conhecimento de como ocorrem as interações dos processos físicos e químicos na natureza, sempre devem ser considerados nos estudos da ecologia, onde todos os componentes (vivos e não vivos) fazem parte do todo ecossistêmico, produzindo ações e reações ao ambiente natural em busca da biostasia do sistema; a compreensão dos efeitos dessa relação é relevante para o melhor conhecimento das interações que ocorrem na natureza.

Um exemplo dessa necessária consideração entre o estudo físico-químico e o ambiente pode ser constatado observando que:

[...] ao avaliar os efeitos de um estresse agudo por inseticida sobre um mesocosmo de campo determinou não somente que a aplicação do inseticida reduziu os insetos fitófagos “alvo” em curto prazo, mas também que no tratamento houve redução na taxa de decomposição do detrito vegetal, atraso na reprodução de pequenos mamíferos (*Sigmodon hispidus*) e redução na diversidade de insetos predadores em longo prazo. (ODUM & BARRETT, 2008, p. 63).

Dessa maneira, a necessidade de se ampliar o contexto analítico com o foco no todo ecossistêmico no estudo da planta, é sempre recomendável, para se ter uma compreensão mais ordenada da natureza, através de um olhar mais amplo, onde se consiga observar as interações nutricionais da planta na relação com o solo, da forma mais abrangente possível.

E, para facilitar a compreensão ordenada do todo ecossistêmico, os autores dividiram a natureza em três níveis de análise, o Macrocosmo, o Mesocosmo e o Microcosmo:

Macrocosmo é o mundo natural ou “grande”; os sistemas naturais são usados como base de referência ou medidas de “controle”, bacias hidrográficas ou paisagens naturais; por exemplo: em ambientes terrestres, a vegetação fornece uma macro característica que “integra”, em si, a flora e a fauna com o clima, a água e as condições do solo” fornecendo a base para o reconhecimento dos principais tipos de ecossistema.

O Mesocosmo, são os “mundos de tamanho médio”, são modelos experimentais mais realistas porque estão sujeitos a fatores ambientais naturalmente pulsantes como luz e temperatura, e podem conter organismos maiores com histórias de vida mais complexas, como o exemplo de Barrett [...], onde a aplicação “recomendada” de inseticida afetou a dinâmica do sistema do mesocosmo como um todo, trazendo efeitos mais negativos do que positivos ao ambiente.

E o Microcosmo, é representado por pequenas porções auto-contidas em garrafas, aquários ou outros recipientes onde os pesquisadores podem simular em miniatura a natureza do ecossistema. (ODUM & BARRETT, 2008, p. 61 e 75)

Como pode ser observado, a organização do ambiente “cosmo” é dinamizada em função dos seres vivos que ali interagem com a natureza. O conhecimento básico dessa organização dos seres vivos amplia a compreensão dos processos interativos que envolvem a nutrição de plantas; além de propiciar um resgate conceitual da origem do conhecimento.

Classificação dos organismos vivos

Alterthum (2005) exemplificando quando relata que, a partir da descoberta e do início de estudos dos microrganismos, a divisão da organização dos seres vivos em dois reinos (animal e vegetal) no ambiente era insuficiente, comentado que:

O zoólogo E. H. Haeckel, em 1866, sugeriu a criação de um terceiro reino denominado Protista, englobando bactérias, algas, fungos e protozoários. Esta classificação mostrou-se satisfatória até que estudos mais avançados sobre ultra-estrutura celular demonstraram duas categorias de células: as procarióticas e as eucarióticas. Em 1969, R. H. Wittaker propôs a expansão da classificação sugerida por Haeckel, baseado não só na organização celular, mas também na forma de obter energia e alimento: Reino Plantae; Reino Animalia; Reino Fungi; Reino Protista (microalgas e protozoários); e Reino Monera (bactérias e algas azul-verdes), (**figura 1**). E, em 1979, estudando as similaridades e diferenças do RNA ribossômico, C. Woese propôs uma nova classificação para os seres vivos: supra-reino Arquibactéria (incluindo bactérias metanogênicas, termófilas, bactérias acidófilas e halófilas); supra-reino Eubactéria (incluindo as demais bactérias e cianobactérias) e supra-reino Eucarioto (incluindo plantas, animais, fungos, protozoários e algas). (ALTERTHUM, 2005, p. 3)

Na **figura 2**, pode ser observada uma composição da origem dos seres vivos a partir de uma ancestral comum.

Nesse sentido, reforçando a argumentação de Alterthum (2005, p. 3), Moreira & Siqueira (2006, p. 23) complementam “que desde Linnaeus a classificação dos seres vivos tem sofrido várias modificações, procurando refletir as relações filogenéticas entre espécies, considerando suas relações evolutivas”, como pode ser observado no **quadro 1**:

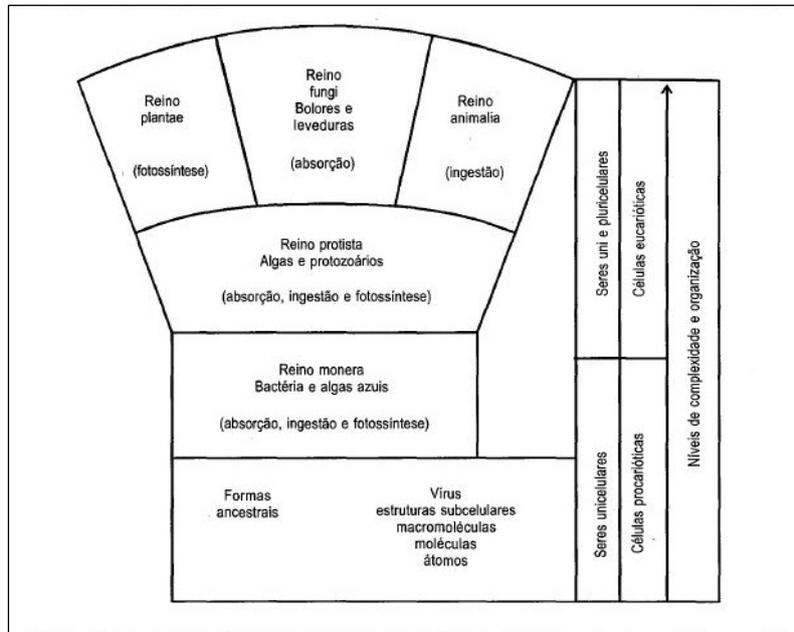


Figura 1 - Classificação e organização dos seres vivos. Fonte: Trabulsi & Alterthum (2005, p. 4).

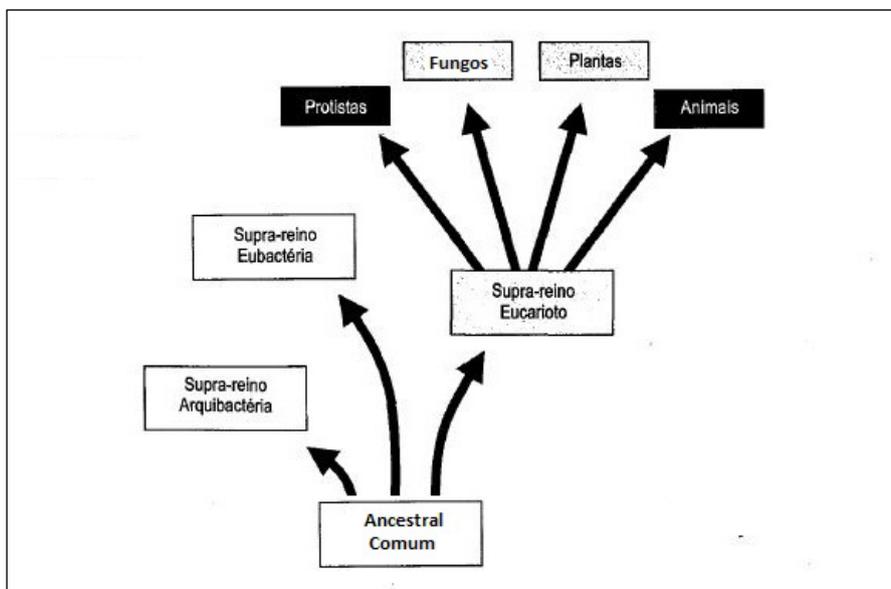


Figura 2 - Classificação e origem dos seres vivos proposta por Woese, partindo-se de um ancestral comum. Fonte: Trabulsi & Alterthum (2005, p. 4).

Sistema de classificação	Reinos	Organismos incluídos
Linnaeus (1753)	Plantae	Bactérias, fungos, algas e plantas.
	Animália	Protozoários e animais superiores.
Haeckel (1865)	Plantae	Algas multicelulares e plantas.
	Animália	Animais.
	Protista	Microrganismos, incluindo bactérias, protozoários, algas, bolores e levedura.
Whittaker (1969)	Plantae	Algas multicelulares e plantas.
	Animália	Animais.
	Protista	Protozoários e algas unicelulares.
	Fungi	Bolores e Leveduras.
	Monera	Todas as bactérias (procariotos).
Woese (1977)	Archaeobacteria	Bactérias que produzem gás metano, requerem níveis elevados de sais ou temperaturas muito altas.
	Eubactéria	Todas as outras bactérias, incluindo as mais familiares aos microbiologistas, tais como as causadoras de doenças, as do solo e as da água e fotossintéticas.
	Eucaryotas	Protozoários, algas, fungos, plantas e animais.

Quadro 1 - Histórico dos sistemas de classificação dos seres vivos. Fonte: Moreira & Siqueira (2006, p. 23).

Demonstrando, assim, como os novos conhecimentos dos estudos disciplinares e interdisciplinares trazem de maneira técnica e científica, novas possibilidades de análise nos processos interativos ambientais, quando observados sob o foco da sociedade com a natureza Zanoni *et al.* (2002, p. 11) comentam que a colaboração múltipla entre as “[...] ciências físico-naturais, disciplinas técnicas e ciências sociais torna-se absolutamente imprescindível, uma vez que se trata de analisar não somente a complexidade dos sistemas físico-naturais, mas também aquela, ainda maior, da interação entre a sociedade e a natureza”. Esse olhar interativo das relações entre a sociedade e a natureza possuiu uma força intrínseca como também extrínseca, servindo este exemplo neste momento, como um registro das possibilidades de análises que se abrem na discussão da interação ambiental, na qual os estudos de nutrição de plantas se situam.

Estrutura trófica da planta

Os estudos de nutrição de plantas puderam beneficiar dos avanços técnicos e científicos, evoluindo, principalmente, no campo de pesquisa da nutrição de plantas por

microrganismos. O aprimoramento dos instrumentos e métodos de pesquisa melhorou a compreensão do sistema de produção de alimento e energia para a planta.

O conhecimento de que a estrutura trófica é dividida em duas camadas produtoras de energia e alimento, uma superior, chamada de estrato autotrófico (que se auto-alimenta), ou cinturão verde, composto por plantas que contém clorofila, que fixa energia a luminosa; e outra, na camada inferior, ou cinturão marrom, chamada de estrutura heterotrófica, onde o material orgânico como raízes, sedimentos e outros componentes é acumulado no solo, predominando o uso, o rearranjo e a decomposição dos materiais complexos, segundo Odum & Barrett (2008), facilitou a compreensão da dinâmica das relações interativas da planta com o solo.

É importante também destacar que apesar dos processos autótrofos e heterótrofos estarem parcialmente separados no espaço (cinturão verde e cinturão marrom) e no tempo, a separação das funções básicas no tempo pode provocar uma defasagem considerável no uso heterotrófico dos produtos dos organismos autotróficos:

Porque o processo de fotossíntese predomina na copa do ecossistema florestal, somente uma parte, quase sempre pequena, do fotossintato é imediatamente e diretamente usada pela planta e pelos herbívoros e parasitas que se alimentam das folhagens e de outros tecidos da planta em crescimento ativo. Muito do material sintetizado (folhas, madeira e alimento armazenado nas sementes e raízes) escapa do consumo imediato e pode atingir a serapilheira e o solo (ou os sedimentos equivalentes dos ecossistemas aquáticos), que juntos constituem um sistema heterotrófico bem definido. (ODUM & BARRETT, 2008, p. 22)

É interessante a importância dada, neste momento, ao tempo cronológico e ao tipo de ambiente ecossistêmico. No tocante ao tempo do uso dos produtos oriundos dos processos autótrofos e heterótrofos, que ocorrem ao redor da planta, na concepção desses autores, podem passar semanas, meses ou anos (ou muitos milênios, no caso dos combustíveis fósseis, que as sociedades humanas consomem com rapidez) antes que seja usada toda a matéria orgânica acumulada.

E, prosseguindo nas suas explanações, os autores observam “que o ponto em um gradiente de luminosidade na qual as plantas mostram o exato equilíbrio entre produção e uso do alimento é chamado de profundidade de compensação e marca um limite funcional entre o estrato autotrófico e o heterotrófico” (ODUM & BARRETT, 2008, p. 22).

Outra característica dos microrganismos, segundo os autores acima citados, é que muitas espécies e variedades de bactérias que não são tão especializadas, são adaptadas para serem intermediárias ou para se deslocarem entre autotrofia e a heterotrofia, com ou sem oxigênio, sendo uma condição universal de que a distinção entre autótrofos e heterótrofos seja nítida entre as formas de vida multicelulares. Sendo que em

todos os ecossistemas: terrestre, de água doce, marinho ou fabricado pelos humanos (por exemplo, agrícolas), a interação dos componentes autotróficos e heterotróficos esta presente.

Portanto, pode-se concluir que a dinâmica do ambiente cosmo, onde se processam as relações interativas da nutrição de plantas, exige do observador uma infinidade de considerações que estão vinculadas na ambientação da planta, ficando o seu desenvolvimento permanentemente dependente dos componentes antrópicos e ambientais como também do tempo e de um determinado espaço.

A relação tempo e espaço tem uma dimensão muitas vezes incomensurável no contexto ecossistêmico da nutrição de plantas, admitindo múltiplas relações, que escapam ao observador não atento às várias possibilidades de interações que ali se processam, como a sua amplitude de análise.

Este fato justifica esta discussão, na procura de estabelecer uma base para compreensão da interação ambiental, através dos processos que ocorrem na nutrição de plantas por microrganismos; pois é necessário que seja estabelecida no contexto da pesquisa agrônômica, uma análise mais ampla e interdisciplinar em seus objetos de estudos, a fim de que as pesquisas não fiquem de fora das discussões ambientais que sociedade propõe.

Dessa maneira, um outro pesquisador, Raynaut (2004) comentando sobre a questão de um olhar mais amplo através dos estudos interdisciplinares, ao abordar o tema sobre a questão ambiental assinala que:

Os processos abrangidos pela noção de meio ambiente se desenvolvem por meio de múltiplas escalas de espaço e tempo e movimentam uma enorme diversidade de níveis de organização. Da molécula até o ecossistema, do local até a paisagem na sua globalidade, muitos são os níveis de organização a levar em conta na elaboração de um modelo explicativo relativo a uma situação ambiental. O ritmo das dinâmicas observadas muda segundo as escalas de observação adotadas, passando do instantâneo ao longo tempo geológico. Isso é evidente, quando se tratar de sistemas físicos e biológicos. (RAYNAUT, 2004, p. 27)

Fatos que, com certeza, são vivenciados pelos pesquisadores; entretanto, pouco relatados por força do modelo de análise cartesiano que a ciência adota.

Raynaut (2004) retrata com precisão em seu enunciado sobre a interdisciplinaridade, o foco desta abordagem, que, de maneira intrínseca, busca chamar a atenção sobre o envolvente debate ambiental, travado pela agricultura com a sociedade, sob a ótica do problema da perda da biodiversidade, visto e vivido no contexto mundial.

Por isso é necessário nesta argumentação, que não se deixe de registrar que a discussão ambiental, em especial da biodiversidade, segundo Becker (2001):

Está no centro dos debates mundiais quanto à reestruturação do padrão de desenvolvimento, da mercantilização da natureza e da sobrevivência humana, e se expressa em conflitos de uso e de escolha pelas sociedades. A biodiversidade diz respeito tanto a genes, espécies, ecossistemas, quanto a funções, e coloca problemas de gestão muito diferenciados. É carregada de normas de valor, e pode significar proteger populações, cujos sistemas de produção e cultura repousam num dado ecossistema, e pode significar, igualmente, defender os interesses comerciais de firmas que se utilizam como matéria-prima para produzir mercadorias (BECKER, 2001, p. 93).

Não havendo como a pesquisa agrônômica desconsiderar essas questões, pois, como relata Costa (2008):

O desenvolvimento sustentável é, atualmente, o paradigma dominante que guia o planejamento do desenvolvimento. A agricultura, como atividade fornecedora de alimentação, fibra e abrigo para a população humana, apresenta um papel maior, relativamente aos demais setores de atividade, no caminho em direção ao desenvolvimento sustentável. A determinação de definições e metodologias operacionais, que permitam a aplicação de conceitos no processo de tomada de decisão, tem apresentado sérias dificuldades, revelando-se uma clara necessidade de aprofundamento da noção dos mesmos. (COSTA, 2008, p. 61)

Não é intenção, neste trabalho, aprofundar a discussão sobre a sustentabilidade, mas registrar que é de suma importância a questão dos conceitos e metodologias pertinentes à questão da sustentabilidade.

Ao que tudo indica, para alguns, a biodiversidade ainda está no caminho de passagem do desenvolvimento agrícola, mas a sociedade olha este fato de maneira diferente, e a academia repensa a questão ambiental, correndo a passos largos em favor de uma nova maneira de produzir, com a clara certeza de ampliar os olhares e os valores sobre o assunto, visto que a:

A avaliação da biodiversidade de ecossistemas e paisagens é, possivelmente, a mais polêmica, causada talvez pelas diversas abordagens disciplinares que enfocam o mesmo objeto de estudo. A reflexão metodológica abarca aqui não somente as novas técnicas, mas também o quadro conceitual das pesquisas que utilizam técnicas: Ecologia, Pedologia, Agronomia, Geografia podem convergir na resolução do problema, sob condição de delimitar objetivos comuns e de resolver as mudanças de escala espaço-temporais, possibilitadas pelas novas tecnologias. (GARAY & DIAS, 2001, p. 13)

Neste particular, é importante reafirmar a necessidade da convergência do conhecimento de várias disciplinas, que se preocupam com as escalas e dimensões do espaço-tempo para o aprimoramento de técnicas e métodos de abordagem conceitual e metodológica, na ampliação dos horizontes, repensando a questão ambiental. Não só com as novas tecnologias, mas com novos valores, que possibilitem, através da ética e da justiça

ambiental, o encontro saudável de novas idéias para solução dos impasses técnicos, metodológicos, conceituais e de interesses múltiplos, que envolvem a problemática ambiental.

A biodiversidade pode ser vista como um recurso e/ou como uma propriedade de vida. Conforme observa Younés (2001) “os microrganismos constituem um recurso genético de grande potencial para o desenvolvimento sustentável no planeta, assim como para a manutenção da saúde do homem, de animais e de plantas” (YOUNÉS, 2001, p. 38).

Dessa maneira, pode-se confirmar que, trabalhar com a abrangência do uso do conhecimento ecossistêmico na nutrição de plantas, é uma forma de se conhecer melhor os processos que compõem a biodiversidade, fato que possibilita buscar a compatibilização dos modos produtivos com conservação da natureza na produção agrícola.

O Solo e a interação dos microrganismos na nutrição da planta

Dentre os elementos que compõem o cenário das interações ambientais para o desenvolvimento da planta, um importante destaque deve ser dado ao solo. Numa referência especial sobre a sua complexidade, amplitude e importância para as plantas, Wrightson & Newshan (1919), comentam que:

Quando consideramos a extrema antiguidade, o caráter complexo, a perpétua renovação, a evolução constante da matéria gasosa e os aportes de matéria vegetal procedentes das plantas, que ocorrem em todos os solos férteis, nada pode deixar de ser “tocado” por seu encanto e admiração. O solo é uma “sepultura” no mais amplo sentido desta palavra, roda mestra da vida que se renova. Se algum ente pode demonstrar a possibilidade de ressurreição, este ente é o solo, sobre o qual caminhamos. Igualmente fascinante, é que o solo não é uma massa inerte, senão o cenário de infinitas reações e transformações, que ocorrem, não somente por ação química, senão também pela intervenção dos organismos vivos. (WRIGHTSON & NEWSHAN, 1919 *apud* ANDRADE, 1995, p. 3)

Com relação a esse assunto, Carson (1964) comenta sobre a importância da natureza e os seres vivos numa perspectiva histórica:

Se é exato que a nossa vida, baseada na Agricultura, é dependente do solo, também é verdade que o solo depende de nossa vida, uma vez que as suas próprias origens e a manutenção da sua verdadeira natureza se encontram intimamente relacionadas às plantas e aos animais, que são seres vivos. Porque o solo é, em parte, uma criação da vida, desde infinitas idades passadas. (CARSON, 1964, p. 63).

A importância dada por Carson à agricultura, dependendo diretamente do solo na sustentação e continuidade da vida neste planeta, nos encaminha para busca de uma compreensão maior do solo. Recorrendo, Carneiro (2008) caracteriza o solo em três fases:

A fase sólida do solo apresenta:

Um conjunto de propriedades como textura, estrutura, conteúdo e tipo de minerais de argila e tipo de matéria orgânica muito importante para o entendimento dos fenômenos físico-químicos que ocorrem no solo, em função dos diferentes tamanhos das partículas minerais e da quantidade de sua superfície de contato. Quanto menor a partícula, maior a quantidade de superfícies e de partículas para reação e atração, entre si, e da sua agregação. Esse arranjo afeta a fertilidade e a disponibilidade dos nutrientes no solo para a planta (CARNEIRO, 2008, p. 12).

A fase gasosa é encontrada nos espaços entre os minerais, armazenando composto de O₂, CO₂, N₂, dentre outros gases fundamentais nas relações aeróbias. São espaços onde insetos, como formigas, cupins e minhocas, participam dando grande contribuição na formação de canais de aeração no solo.

E a fase líquida, que, segundo Carneiro (2008, p. 15):

[...] é constituída pela solução do solo, contendo espécies dissociadas, partículas coloidais minerais e orgânicas resultado das reações de dissociação e ionização das moléculas de seus minerais, que ocorrem entre as fases sólida e a gasosa do solo. O estudo da solução do solo propiciou o conhecimento dos processos químicos (sorção, dissolução e precipitação), que produzem de 100 a 200 complexos solúveis diferentes e sua composição é indicadora da biodisponibilidade e da força iônica da solução.

A solução do solo é fundamental na interação solo-planta. Nesta questão Andrade (1995, p. 28) observou que, para a planta se valer da condição nutricional do solo plenamente “os nutrientes minerais devem estar na forma solúvel, para que possam ser captados pela raiz da planta”. e “a absorção de nutrientes pela planta afeta diretamente o equilíbrio da solução do solo, que é responsável pela biodisponibilidade. Quando os nutrientes presentes na solução do solo não são aproveitados pelas plantas, eles rapidamente são lixiviados deixando um solo pobre, incapacitando o uso agrícola” segundo (CARNEIRO, 2008, p. 13).

A incapacidade do uso agrícola geralmente é provocada pela maneira incorreta do seu uso como também por processos naturais, isto deve ser uma preocupação agronômica e ecossistêmica constante.

A incapacidade decorrente da degradação do solo é o resultado de várias interferências no ecossistema, que causam a perda de funções e desequilibram seu funcionamento. Caracterizam-se pela redução da capacidade do solo em sustentar a vida dos organismos produtores e consumidores, assim como das funções ecológicas, ocasionando declínios sobre a estrutura e a funcionalidade dos ecossistemas. As interferências podem ocorrer tanto nos ecossistemas naturais, quanto nos agrossistemas, através da remoção ou substituição da vegetação, da camada superior do solo; da matéria orgânica do solo; da biodiversidade; da atividade de biota e da própria fertilidade do solo;

tendo como consequência, a perda de processos e funções-chave na sustentabilidade do solo, (SIQUEIRA *et al.*, 2007).

A perda da capacidade produtiva do solo leva a um debate, envolvendo a abertura de novas áreas de fronteira para produção agrícola e os investimentos para recuperação de solos em áreas já agricultadas que perderam sua capacidade produtiva, principalmente, por falta de manejo adequado. Nesse sentido, visando estabelecer o equilíbrio para uso agrícola do solo e “[...] para que a planta não sofra de carência nutricional, é necessário que seja cultivado em solo fértil, quimicamente equilibrado” (CARNEIRO, 2008, p. 16). Segundo a visão química da Agronomia:

Entende-se por um sistema em equilíbrio quando o balanço de cargas positivas e negativas está satisfeito e que na medida em que se realizam as trocas, este seja capaz de estabelecer o mesmo equilíbrio anterior. Em um solo, este equilíbrio precisa ser constantemente restabelecido, pois as trocas são feitas entre as plantas e as perdas por lixiviação ou processos ambientais naturais. Em condições definidas de temperatura, pressão e força iônica do ambiente, todos os processos químicos tendem a alcançar o estado de equilíbrio. Como o solo é um sistema dinâmico, espécies do sistema inicial continuam passando para o sistema final e assim por diante. Quando uma força atua sobre o sistema em equilíbrio, ele tende a modificar-se sempre no sentido da estabilização do sistema (CARNEIRO, 2008, p. 15).

Para a viabilidade do efetivo processo de nutrição de planta seja viável “é necessário na prática agrícola que o sistema seja induzido”, segundo Veloso *et al.* (1992, p. 124), quando necessário.

Na concepção de Carneiro (2008), os solos menos intemperizados são mais férteis, pois ainda contem elevados teores de cálcio, magnésio ou potássio e, desta forma, alta capacidade de troca catiônica (CTC). Os solos mais intemperizados adquirem propriedades ácidas, devido às perdas dos cátions e substituição destes por alumínio (Al^{3+}) e hidrogênio (H^+) na superfície do colóide, exigindo a aplicação de corretivos e adubos, os quais elevam o potencial hidrogeniônico (pH), neutralizando o efeito dos elementos tóxicos, e fornecem cálcio, magnésio, potássio e fósforo.

Dentre as práticas agrícolas de correção do solo “a calagem é a mais utilizada no controle da acidez do solo, pois aumenta o pH e promove a neutralização de Al^{3+} e H^+ , resultando em aumentos na CTC e na energia de ligação pelos cátions de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+})” (CARNEIRO, 2008, p. 14). A co-aplicação de calcário + fósforo (P) + potássio (K^+) + silicatos (Si), possibilita o restabelecimento do equilíbrio químico do solo. “o comportamento e a eficiência dos corretivos dependem de suas características, como a natureza química, o poder de neutralização, a solubilidade, a granulometria e etc. (VELOSO *et al.*, 1992 p. 124)

É importante de se considerar que, em função do dinamismo demonstrado na relação entre elementos físicos e químicos na nutrição de plantas, quando um plantio é realizado, este requer nutrientes para seu desenvolvimento, assim um novo equilíbrio terá que ser restabelecido:

Na falta dos elementos químicos necessários para a sua nutrição, a planta absorverá o que estiver sendo oferecido pelo solo; entretanto, este suprimento poderá causar toxicidade e mau desenvolvimento, pois, certamente, a maior oferta será alumínio (Al^{+3}) e hidrogênio (H^+), se o solo não estiver em equilíbrio. (CARNEIRO, 2008, p. 16)

Tomando como exemplo a preocupação da atividade agrícola com o equilíbrio do solo, no cenário mundial, a ONU (Organização das Nações Unidas) também vem procurando implantar ações globais para viabilizar o equilíbrio entre as relações dos setores produtivos da sociedade com o ambiente. Ao avaliar a perda da biodiversidade provocada pelo impacto da ação antrópica, tomando como pressuposto de que a biodiversidade é a base da produção agrícola, concluiu que, se algo não for feito pela sociedade para mudar o modelo atual de produção, a sustentabilidade da vida no planeta estará gravemente comprometida.

Este alerta foi renovado na abertura da décima edição da Conferência das Partes sobre Biodiversidade (COP-10) que ocorreu no ano de 2010 no Japão, pelo diretor do programa para meio ambiente das Nações Unidas. Achim Steiner enfatizou a importância da biodiversidade ao afirmar enfaticamente que o homem está acabando com a vida na Terra: "Este é o único planeta no Universo em que sabemos que existe vida como a nossa e estamos destruindo as bases que a sustentam", alertou Steiner.

É importante registrar que a ação antrópica vem alterando, aceleradamente, o cenário de sustentabilidade do meio natural, com redução da biodiversidade, pelo uso excessivo de agroquímicos, em consequência, dos cultivos agrícolas intensivos; fato que reduz de modo significativo e diferenciado a presença de microrganismo no solo, provocado pela seletividade e uniformidade das espécies cultivadas de plantas no sistema agrícola. Ressaltando, dessa maneira, a importância dos microrganismos nas atividades agrícolas com maior volume e intensidade.

Outra questão a ser lembrada, conforme dados da própria ONU em 2010 o Brasil possui 15% de toda biodiversidade do Planeta Terra, que deve ser preservada, daí a importância do seu exemplo na discussão do seu quadro ambiental perante a agricultura:

Enquanto que as práticas agrícolas ancestrais contribuíram para o aumento da biodiversidade ao longo dos séculos, a intensificação da agricultura no século XX, nomeadamente a mecanização e o uso de pesticidas de síntese, em especial após a segunda guerra mundial, provocou uma diminuição das áreas naturais e semi-naturais e, conseqüentemente, da biodiversidade associada aos ecossistemas agrários. (AMARO *et al.*, 2008, p. 44)

Entretanto, não se deve considerar o referido aumento citado por Amaro como um indicador quantitativo da biodiversidade, mas certamente pela manutenção e seu fortalecimento.

A bióloga Rachel Carson, na década de 1960, em relação ao controle de insetos e redução da biodiversidade em função do uso intensivo e seletivo de plantas na agricultura fez a seguinte avaliação:

Sob as condições agrícolas primitivas, o fazendeiro enfrentava poucos problemas relativos a insetos. Tais problemas surgiram com a intensificação da agricultura – com a entrega de imensas quilometragens quadradas a um único gênero de colheita. Este sistema preparou o terreno para aumentos explosivos das populações de insetos específicos. O cultivo da terra com um único gênero de plantação não tira vantagem dos princípios pelos quais a natureza opera; a agricultura, dessa maneira, é a agricultura como o engenheiro concebe. A natureza introduziu grande variedade na paisagem; mas o homem vem acusando inclinação para simplificá-la. Assim, o homem desfaz os controles e equilíbrio intrínsecos, por meio dos quais a natureza mantém as espécies dentro de determinados limites. Um controle natural, muito importante, é o que impõe um limite a quantidade de área habitável adequada a cada espécie. (CARSON, 1964, p. 20)

Portanto justifica-se o aumento da cobrança pela sociedade sobre a reutilização de práticas de cultivo conservacionista, iniciando com a adequação das condições físicas do solo, visando a convivência sustentável da planta, que garantem o retorno do funcionamento dos processos fundamentais do novo ecossistema e seu equilíbrio, principalmente relacionado ao ciclo do carbono (C) e do nitrogênio (N)”, (SIQUEIRA, *et al.*, 2008).

Há também outras importantes interações relatadas por Odum & Barrett (2008), que resultam na produção de vários elementos e substâncias:

- (1) substâncias inorgânicas (C), (N), oxigênio (O₂), água (H₂O) e outros envolvidos em ciclos de materiais;
- (2) compostos orgânicos (proteínas, carboidratos, lipídeos, substâncias húmicas e outros) que conectam os componentes bióticos e abióticos;
- (3) ambiente de ar, água e substrato, incluindo regime climático e outros fatores físicos;
- (4) produtores (organismos autotróficos), na sua maioria plantas verdes, que podem produzir alimento de substâncias inorgânicas simples;
- (5) fagótrofos (de *sapro* = “decompor”) ou decompositores, também organismos heterotróficos, principalmente bactérias e fungos, que obtêm energia degradando tecidos mortos ou absorvendo matéria orgânica dissolvida exudada, extraída de plantas ou outros organismos. Os saprófagos são organismos que se alimentam de matéria orgânica morta. As atividades decompositoras dos saprótrofos liberam nutrientes inorgânicos, que são usados pelos produtores, que também fornecem alimento para os macro-consumidores e, freqüentemente, excretam substâncias que inibem ou estimulam outros componentes bióticos do ecossistema. (ODUM & BARRETT, 2008, p. 23)

Neste contexto, a ação dos microrganismos na decomposição e na ciclagem de nutrientes entre o solo e a planta apresenta-se de maneira fundamental, por viabilizar

inúmeras interações nos processos estruturais e funcionais, servindo de exemplo para compreensão da sua dinâmica interativa, desde o processo de intemperismo da rocha para formação do solo.

Younés (2001, p. 37) apresenta as seguintes relações dos microrganismos com outros organismos, abaixo relatados:

Os microrganismos exibem a maior amplitude de diversidade genética na Terra. Menos de 5% dos microrganismos mundiais foram descritos até hoje e é possível que seu número real exceda até mesmo o de insetos. Inúmeros microrganismos, tais como: algas, bactérias (incluindo cianobactérias e micoplasmas), fungos (bem como líquens e leveduras), protozoários, viróides e vírus, são essenciais para a sobrevivência de todos os organismos, como componentes básicos de cadeias alimentares e desempenham papéis cruciais e únicos nos ciclos biogeoquímicos do planeta. Eles são vitais para o funcionamento e manutenção dos ecossistemas e, em geral, da biosfera. Como contribuintes principais nos ciclos biogeoquímicos, desempenham atividades únicas e indispensáveis na circulação geral da matéria, da qual dependem todos os demais organismos, inclusive o homem.

Carson (1964, p. 64) ao caracterizar o papel dos microrganismos no solo, aponta que:

As bactérias, os fungos ou cogumelos e as algas, são os agentes principais da deteriorização; reduzem os resíduos das plantas e de animais aos seus componentes minerais. Os vastos movimentos cíclicos dos elementos químicos, tais como o carbono e o nitrogênio, através do solo e do ar, bem como os tecidos vivos, não poderiam efetuar-se sem essas micro-plantas. Sem as bactérias fixadoras de nitrogênio, por exemplo, as plantas morreriam de fome, por falta de nitrogênio, embora circundadas por um interminável oceano de ar atmosférico que contém nitrogênio. Outros organismos formam dióxido de carbono, que, como o ácido carbônico, concorre para a dissolução das rochas. Outros micróbios, ainda, do solo, levam a termo vários tipos de oxidação e de redução, por via dos quais certos minerais, tais como o ferro, o manganês e o enxofre, são transformados e tornados disponíveis para as plantas.

E, neste contexto, Andrade (1995) comenta que o solo é considerado um habitat favorável à proliferação de microrganismos, que formam micro-colônias nas partículas do solo, podendo ser considerado um conjunto de micro-habitats, pois as bactérias encontradas no solo podem ser aeróbias, anaeróbias, facultativas e micro-aerófilas, permitindo, assim, a existência de diversos micro-habitats em vários gêneros de microrganismos.

Os microrganismos, em seu habitat, participam ativamente em inúmeros processos interativos entre o solo e a planta, e podem auxiliar a sociedade no processo de recuperação de áreas degradadas, através dos fungos *micorrízicos arbusculares* (FMA), que representam um componente quantitativo e qualitativo significativo nos ecossistemas, pois exercem grande influência no crescimento e na adaptação das plantas aos estresses bióticos e abióticos no solo, beneficiando-se disso, como pode ser observado no **quadro 2**.

Segundo Moreira & Siqueira (2006), o processo de re-vegetação de uma área degradada pode ser apontado como uma modalidade de proteção do solo por garantir a proteção e a recuperação por meio da alocação e incorporação de C e ciclagem dos nutrientes, permitindo o restabelecimento da cadeia trófica, e a regularização térmica e hídrica, criando um novo hábitat para os microrganismos.

Efeito sobre as plantas	Processos reabilitadores
Melhoria nutricional	Favorece o estabelecimento da vegetação.
Tolerância a estresses abióticos	Aumenta a produção de material orgânico.
Menor estresse do transplante	Favorece o acúmulo de nutrientes na fitomassa.
Favorecimento das relações hídricas	Aumenta a produção de raízes.
Efeitos Fisiológicos (CO ₂ , N ₂)	Confere maior proteção ao solo (estabilização).
Efeitos indiretos	Favorece as relações tróficas.
Raízes e micélio (agregação)	Favorece indiretamente o fluxo hídrico (erosão).
Relações entre plantas	Estimula a transformação e ciclagem dos nutrientes.
Competição	Favorece a estruturação e sucessão vegetal
Espécies coexistentes	

Quadro 2 - Efeitos das micorrizas arbusculares sobre as plantas e favorecimento de processos reabilitadores de áreas degradadas. Fonte: Soares & Carneiro (2010, p. 442).

Prosseguindo nesse sentido, Soares & Carneiro (2010, p. 442) assinalam que:

Os benefícios dos FMA para o crescimento e a sobrevivência das plantas resultam de vários efeitos e mecanismos nutricionais e não nutricionais, os quais possibilitam o seu uso em programas de recuperação de áreas degradadas. Os efeitos nutricionais são os mais evidentes e consistentes, e determinam o caráter biofertilizante dos FMA que resulta, principalmente, da ação direta do fungo na absorção e na utilização de nutrientes, e na ação indireta na fixação biológica de N, mineralização e/ou solubilização de nutrientes da rizosfera e na nutrição balanceada na planta.

Segundo Andrade (1995), os microrganismos participam na captação de nutrientes através do sistema rizosférico, fato que viabiliza a mobilização e a solubilidade de minerais insolúveis, disponibilizando para a planta pela ação de microrganismos, influenciando na disponibilidade de minerais às plantas, sendo capazes de captar nutrientes em sítios de forma moleculares que as raízes não conseguem. Alguns grupos de microorganismos aumentam a disponibilidade do fósforo através da sua solubilização.

Em condições de solo estéril, o autor relata que as plantas inoculadas com microrganismos solubilizadores de fósforo apresentam níveis maiores de fósforo em seus

tecidos que as plantas controle. A produção de ácidos orgânicos é o principal mecanismo da solubilização de fosfato, estes dissolvem os fosfatos da rocha liberando o fósforo em formas solúveis. Ainda segundo o autor, em solos ácidos ricos em ferro (Fe) e com alto conteúdo de alumínio (Al), e em solos alcalinos, ricos em cálcio (Ca), alguns nutrientes essenciais como o fósforo podem estar imobilizados pela formação de complexos insolúveis. (ANDRADE, 1995, p. 28).

No contexto simbiótico, a sobrevivência dos microrganismos e da planta ocorre pela reciprocidade de oferta de nutrientes para ambas as partes, pois:

A atividade microbiana tem como principal fonte de nutrientes os compostos orgânicos excretados, principalmente, pelas raízes na forma de exsudatos. Os exsudatos são formados, principalmente, por açúcares, aminoácidos, carboidratos, ácidos orgânicos, vitaminas, enzimas, compostos voláteis de baixo peso molecular como álcoois, ácidos graxos, compostos sulfurados, etc. A composição dos exsudatos varia com a espécie e estágio de crescimento da planta, que, em suas diferentes fases, altera qualitativamente e quantitativamente a composição da comunidade microbiana. (REIS *et al.*, 2010, p. 363)

A atividade microbiana “depende e se beneficia dos componentes orgânicos sintetizados pela planta, que são liberados pelo sistema rizosférico, fundamentalmente mediante a produção dos denominados exudados radicais” (ANDRADE, 1995, p. 4).

A captação de nutrientes pela planta vai depender tanto da velocidade com que os nutrientes chegam à superfície da raiz, quanto da captação da própria raiz (TINKER, 1980; TINKER & GILDON, 1983). Dado que a velocidade de captação de nutrientes é superior ao do movimento deste, fazendo a planta formar uma zona de deficiência, ao redor da raiz. Esta zona é mais acentuada em solos de baixa fertilidade. (ANDRADE, 1995, p. 28)

Demonstrando dessa maneira, que ação dos microrganismos na remediação de solos transpõe a discussão sobre nutrição de plantas, através de outros processos interativos com o solo:

Estudos realizados nas mais diversas situações de degradação no mundo todo – como solos agrícolas; áreas desmatadas; áreas mineradas; áreas de construção civil; solos contaminados por metais e produtos químicos; e áreas desertificadas – têm demonstrado a importância e o potencial das micorrizas como agentes recuperadores de área impactadas. (SOARES & CARNEIRO, 2010, p. 442)

Pode-se concluir que, no sentido ecológico, a interação dos microrganismos com o solo e a planta é um pressuposto ecossistêmico fundamental, pois não há como dissociar a relação nutricional da plantas no solo da relação com os microrganismos.

Como se sabe, a maioria das plantas dos ecossistemas terrestres interage com fungos micorrízicos na forma de simbiose. Essas interações, embora se diferenciem quanto ao hospedeiro e estruturas formadas durante o ciclo de vida do fungo, são classificadas em alguns tipos principais. A mais freqüente e abundante é a das micorrizas arbusculares (MA). Neste caso, a

simbiose ocorre entre a planta hospedeira e o fungo pertencente à classe Glomeromycota, e esta interação é obrigatória, isto é, o fungo só completa seu ciclo de vida na presença do hospedeiro, a planta. (REIS *et al.*, 2010, p. 362).

Segundo Reis *et al.* (2010, p. 361), “as plantas são colonizadas por microrganismos benéficos e maléficos e o balanço da produção final de biomassa do hospedeiro é a somatória do ténue equilíbrio entre as partes envolvidas” e pode-se dizer segundo os autores, que as interações entre plantas e microrganismos são reguladas por mecanismos de “feed back” positivos e negativos, de acordo com as necessidades dos mesmos”.

Portanto, a dinâmica interativa que se estabelece nessa relação simbiótica, sustenta também um pressuposto ecológico que é a sustentabilidade da vida, através da sobrevivência do microrganismo com a planta no solo.

De maneira geral, os microrganismos presentes nas interações, desde as formas mais simples às mais complexas no ambiente, “podem produzir no solo substâncias que estimulam ou inibem o desenvolvimento da planta hospedeira, que também podem produzir substâncias alelopáticas que inibem o desenvolvimento de outras plantas (ATLAS & BARTHA, 1987 *apud* ANDRADE, 1995, p. 16).

Para que a planta leve a efeito essa relação interativa no solo com os microrganismos, esta:

Inicialmente, emite sinais químicos que atraem especificamente determinados grupos de microrganismos. Esta seleção, determinada pelos processos de seleção natural no meio ambiente, ocorre em cada fase do desenvolvimento da planta, e está baseada na produção por diferentes moléculas orgânicas que suprem as exigências nutricionais de grupos concretos de microrganismos, que, por sua vez, aportam os compostos que a planta requer a cada momento. (ANDRADE, 2004, p. 12)

Durante a formação do FMA, ocorre um intercâmbio de sinais que é regulado pelo genoma de ambos os organismos. A integração dos simbiotes se produz no nível estrutural e, fundamentalmente, no nível fisiológico e bioquímico. O fungo, ao colonizar a raiz, transfere às células nutrientes provenientes do solo, e gera trocas nos níveis metabólicos e enzimáticos na planta Andrade (1995, p. 22), no seu estudo sobre Interações de rizobactérias fixadoras de N₂ não simbióticas com fungos micorrízicos na rizosfera de plantas de milho observa, no processo dessa associação, o fungo coloniza o córtex da raiz, a partir do qual desenvolve um micélio externo altamente efetivo na captação de nutrientes.

Prosseguindo, Andrade (1995) comenta que, na maioria dos casos, as micorrizas participam ativamente na captação de nutrientes para a planta, atuando como um complemento do sistema radical, sendo as micorrizas arbusculares (MA) o grupo mais

importante de fungos que estão relacionados com a nutrição da grande maioria das espécies vegetais de interesse agrônomo.

Segundo Strohl *et al.* (2004 p. 280), “O micélio é uma massa de filamentos e cresce por ramificações e alongação de ápice. Os filamentos, denominados hifas, são, na verdade, células tubulares que, em fungos são separadas ou denominadas por filamentos”.

Os FMA podem também promover efeitos adicionais à melhoria da qualidade nutricional da planta, considerados secundários, ou como ação biorreguladora, a qual se relaciona com a produção de substâncias estimulantes de crescimento, melhoria na relação água-planta e alterações bioquímicas fisiológicas. Os FMA também atuam como biocontroladores, quando reduzem a severidade ou por agentes bióticos e amenizam os danos causados por estresses abióticos, principalmente estresses hídricos, além de promoverem a melhoria na agregação do solo. (SOARES & CARNEIRO, 2010, p. 442).

A maioria dos estudos com microrganismos focaliza a simbiose com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) devido à sua importância agrícola, ocorrendo em culturas de interesse e cultivadas nos trópicos. Tanto a colonização, quanto a esporulação da FMA apresentam resultados diferenciados quando fatores ambientais são mensurados, devido ao fato de que, por via de regra:

As interações microbianas são expressas por fenômenos de antagonismo, competição, sinergismo, positivo e negativo, que têm lugar, tanto no solo rizosférico quanto no rizoplano, e tem uma transcendência considerável. Na realidade, constituem uma parte dos fenômenos biológicos da rizosfera. Dessas interações, são fundamentais as que podem determinar o êxito e o fracasso da introdução no solo de microrganismos, que, aplicados como inoculantes, são utilizados tanto como biofertilizantes quanto no controle biológico de patógenos da raiz (bioinseticidas). (ANDRADE, 1995, p. 3)

A efetiva interatividade microbiana com os elementos físico-químicos e biológicos, produzem esse cenário de complexidade, razão pela qual a discussão desses processos foi iniciada pelo conhecimento do solo, porque:

[...] as interações entre os microrganismos estão baseadas nas modificações interativas que ocorrem no solo. Entre estas, cabe destacar as relações hídricas, a liberação de substâncias orgânicas pelas raízes, a produção de fatores de crescimento, os fenômenos de mineralização e solubilização de nutrientes pelos microrganismos, etc.; na rizosfera, as plantas têm uma influência direta na composição e densidade da comunidade microbiana, conhecida como efeito rizosférico, este efeito está ligado ao estágio de maturidade da planta. (ANDRADE, 1995, p. 12).

Dessa maneira o conhecimento da rizosfera é fundamental para a compreensão dessas interações, pois a rizosfera é a zona do solo que é “influenciada pela presença das raízes e onde ocorre uma infinidade de interações com diferentes níveis de complexidade”, (REIS *et al.*, 2010, p. 362) e, pode ser compreendida observando que:

Os microrganismos que vivem na rizosfera são influenciados pela atividade das raízes e são fundamentais para os sistemas agrícolas e naturais, por

participarem ativamente dos ciclos biogeoquímicos e da ciclagem da matéria orgânica. Além disso, a comunidade microbiana pode influenciar o enraizamento, produzir substâncias promotoras do crescimento, facilitar a absorção de nutrientes, proteger a planta contra patógenos, etc. (REIS *et al.*, 2010, p. 362)

Segundo Andrade (1995, p. 16), os microrganismos da rizosfera “produzem compostos orgânicos que afetam o crescimento do sistema radical. Assim, podem sintetizar auxinas e giberilinas, que aumentam a porcentagem de germinação de sementes e o desenvolvimento de pelos radicais”.

E, no sentido trófico, a comunidade microbiana, em sua maioria, é composta por heterotróficos, ou seja, consumidores de alimentos e energia; portanto a dinâmica das interações microbianas na rizosfera depende em grande parte da capacidade competitiva dos microrganismos, pois a quantidade de carbono liberada pela planta na rizosfera é limitada. Os fungos micorrízicos têm pouca ou nenhuma capacidade saprofítica, por isso não competem diretamente com os outros microrganismos da rizosfera por nutrientes, nos primeiros estágios da colonização da raiz. No entanto, com a colonização da raiz estabelecida, pode ocorrer a imobilização de carboidratos pelo micélio interno, diminuindo, assim, sua disponibilidade na rizosfera. E, apesar de diversas e complexas, o resultado da maioria das interações na rizosfera em muitos casos, é mutuamente benéfica para as plantas e os microrganismos. Portanto, a compreensão dos mecanismos implicados poderia permitir um avanço nas práticas agrícolas menos consumidoras de fertilizantes e fitofármacos, como é o caso da agricultura sustentável. (ANDRADE, 2004).

Fixação biológica de nitrogênio

Dentre as múltiplas relações “A interação mais importante, em termos econômicos, é a que se refere a microrganismos fixadores de nitrogênio atmosférico” conforme Andrade (1995, p. 37). Complementando, o autor comenta que o FMA requer uma importante quantidade de nitrogênio para seu metabolismo e processos biossintéticos. E que o aporte de nitrogênio mediante a atividade nitrogenasa de *Rhizobium*, pode ser crítico para que a planta mantenha seu equilíbrio fisiológico, que é importante na formação e efetividade das micorrizas.

Nesse sentido, Hungria & Araújo (1994, p. 44) relatam que:

Somente algumas bactérias aeróbias, dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* e *Azorhizobium*, possuem um complexo enzimático denominado dinitrogenase, capaz de quebrar a tripla ligação entre os dois átomos de N₂ e transformá-lo em uma forma utilizável pelas plantas. Esse processo ocorre em estruturas típicas e altamente específicas, os nódulos, que são formados após o estabelecimento da simbiose entre o microssimbionte e a planta hospedeira e o processo é conhecido por fixação

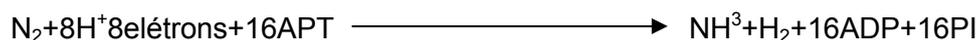
biológica do N_2 , onde as fontes fornecedoras desse N são: 1 – nitrogênio do solo, proveniente principalmente da decomposição da matéria orgânica; 2 – nitrogênio fornecido por fertilizantes; e 3 – nitrogênio fornecido pelo processo da fixação biológica de nitrogênio atmosférico N_2 ”.

E, como produtos oriundos desses processos, os autores comentam que são produzidos nitrogenados sintetizados pelos nódulos, que são transportados para a parte aérea do hospedeiro, “via xilema, pelo fluxo da transpiração, e que a análise destes compostos é importante em estudos fisiológicos, permitindo avaliar as variações metabólicas do microssimbionte e do hospedeiro, efeito de estresses ambientais, etc”. (HUNGRIA & ARAÚJO, 1994, p. 262).

O complexo nitrogenase ou complexo enzimático nitrogenase referido no processo:

É formado por uma unidade protéica contendo átomos de ferro e outra menor com ferro e molibdênio. No processo a nitrogenase rompe a tripla ligação existente entre os dois átomos do nitrogênio atmosférico e o transforma na forma utilizável pela planta, NH^3 . A ação da nitrogenase é inibida na presença de O_2 mas, os simbioses da família Rhizobiaceae, que se associam às leguminosas, e os simbioses do gênero *Frankia*, se localizam em hipertrofias especializadas denominadas nódulos, que abrigam as bactérias, modificadas em bacterióides, desenvolvem substâncias semelhantes à hemoglobina, leghemoglobina nas leguminosas, que regulam a quantidade de O_2 que chega até os bacteróides. (LOVATO, 2006, p. 17).

O processo da reação de fixação de nitrogênio atmosférico por compostos amoniacais catalisados pela enzima nitrogenase pode ser observado a seguir (FERNANDES JÚNIOR & REIS, 2008, p. 7):



Entretanto, a fixação de nitrogênio também pode ser promovida por microrganismos fixadores de nitrogênio de vida livre, como os do gênero *Azotobacter*, que incrementam a colonização do fungo e ajudam a estimular o crescimento da planta, quando se inter-relacionam com ectomicorrizas; a causa desse sinergismo parece estar associada mais com a produção de fitohormônios do que com a fixação de nitrogênio por esses microrganismos.

Os microrganismos, em suas interações, também promovem associações mutualistas entre raízes e espécies de determinados fungos, produzindo as ectomicorrizas, ectendomicorrizas (micorrizas ericóides) e endomicorrizas.

E, segundo Colozzi Filho & Balota (1994, p. 382), “as endomicorrizas podem ser de três tipos: orquidóides, ericóides e arbusculares”.

As ectomicorrizas são caracterizadas por desenvolverem “curtos ramos de raízes que se bifurcam e crescem como estruturas coraliformes com muitas hifas intercelulares no córtex ligadas ao micélio externo, formando um manto na superfície externa da raiz curta, substituindo a camada pilífera com pelos radiculares” (STEVENSON, 1974, p. 121).

Reis *et al.* (2010, p. 362), comentam, ainda, que as ectomicorrizas pertencem, principalmente, “à classe dos Basidiomicetos e Ascomicetos e formam simbioses com espécies florestais comuns em ecossistemas boreais e temperados. sofrendo interações com a comunidade microbiana do solo, que modula a interação”.

As endomicorrizas arbusculares são formadas por fungos da ordem Glomales, classe Zigomicota, de ocorrência generalizada nas plantas vasculares e possuem funções essenciais no ecossistema, como na cooperação no estabelecimento de plantas, aumento da absorção de nutrientes, proteção contra estresses ambientais, melhoramento das propriedades físicas do solo, além de estarem envolvidas na conservação, armazenagem e ciclagem de nutrientes nos ecossistemas (LOVATO, 2006, p. 13).

Sendo que, segundo Stevenson (1974, p. 123), “muitos membros dos Ericacea e famílias estreitamente relacionadas possuem micorrizas endotróficas; as hifas são bem desenvolvidas em uma região do córtex da raiz onde os pelotões são formados em muitas células”.

Outro grupo de importância nas interações com os FMA é encontrado nas bactérias denominadas Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), caracterizadas como microrganismos colonizadores “agressivos” de raízes, sendo as bactérias do gênero *Pseudomonas* e *Glomus* sp as que interagem com as MA de maneira mais comum, segundo Andrade (1995).

Essas bactérias promovem o aumento do crescimento da planta, produzindo “um incremento na colonização de ambos os microrganismos no sistema rizosférico e também um considerável aumento no desenvolvimento da parte aérea” (ANDRADE, 1995, p. 41); entretanto, no processo de interação entre a PGPR e a MA é mais seletiva, pelo fato do efeito rizosférico proveniente desta relação ser dependente da cepa que esta inoculada, devido às diferentes quantidades de fitohormônios produzidos pelas cepas.

Outro benefício produzido pela PGPR se dá “na produção de sideróforos, que são compostos extracelulares de baixo peso molecular e que estão relacionados com o incremento no crescimento da planta e com o controle biológico de enfermidades causadas por microrganismos. Os sideróforos são produzidos por muitos fungos e bactérias, incluindo

os gêneros *Pseudomonas*, *Rhizobium* e, *Azotobacter* e também por algumas cepas de ectomicorriza” (ANDRADE, 1995, p. 41).

Lovato (2006, p. 20), comentando essas interações, ratifica os benefícios que as PGPR propiciam à:

Nutrição, supressão de doenças, crescimento micelial, produção do ácido indol acético (AIA), solubilizando o fosfato, e a produção de sideróforos, propiciando maior disponibilidade de P e Fe, que acarreta no aumento da produção e do crescimento da planta pela associação com os FMA.

Portanto, pode-se concluir que os benefícios promovidos por microrganismos (fungos e bactérias) nas relações interativas de nutrição de plantas, propiciam novos caminhos de análise nas pesquisas biológica e agrônômica. Fica a expectativa que, em um futuro próximo, as práticas agrícolas da nutrição de plantas fiquem mais referenciadas metodologicamente às naturais, com a produção de plantas e alimentos mais saudáveis, e que a intervenção antrópica no solo considere com maior foco o equilíbrio ecológico do ecossistema, inclusive na busca das condições químicas ideais ao equilíbrio agrícola, necessárias à planta como aos microrganismos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como pode ser observado, o processo da nutrição da planta envolve uma diversidade de interações ambientais, com ações físicas, químicas e biológicas, como também das várias formas de interferências antrópicas vinculadas no tempo e no espaço.

A importância de se conhecer essa diversidade de interações esta na compreensão da dinâmica interativa, podendo promover relevante mudança de comportamento do observador, quando este conhecimento é apropriado ao nível de detalhes e compreendido num olhar acadêmico, multidisciplinar.

Os exemplos enunciados através dos processos simbióticos da relação dos microrganismos entre o solo e a planta, possibilitam a construção no leitor, de uma dimensão de consciência, necessária à sustentabilidade na vida do planeta.

Olhar e compreender as interações do mundo microbiológico em sua diminuta dimensão é ficar frente a frente com uma escala de análise do microcosmo complexo e dinâmico, tão importantes como as que se processam nas escalas do macro e mesocosmo no mundo global.

Entretanto, olhar nem sempre é enxergar, surgindo, portanto, a oportunidade nesta discussão de se destacar a evolução do conhecimento dos seres vivos à luz das novas instrumentações técnicas, que permitiram enxergar a natureza sobre novos prismas,

propiciando a melhor compreensão dos processos naturais no campo microbiológico, que estão presentes no ambiente desde a origem da vida no planeta, construindo e mantendo os importantes processos interativos, dos mais simples aos mais complexos, que sustentam a vida.

Esta discussão teve como pano de fundo contribuir e oferecer aos vários ramos do saber científico que permeiam o debate ambiental do mundo agrônomo, com uma abordagem interdisciplinar sustentada na discussão das interações dos conhecimentos da ecologia, da biologia, da pedologia, da climatologia, da geografia, da física, da química, entre outras, que estão envolvidos no processo de nutrição de plantas por microrganismos, tanto do ponto de vista da macro-análise à micro-análise. Trata-se de um exemplo teórico básico que inicia a construção de uma caminhada ao encontro do saber ecológico na agronomia, dentre outros, trabalhando na perspectiva da reconstrução ecológica da vida no mundo.

Entretanto, é importante fazer uma reflexão do conteúdo trabalhado, tomando como exemplo o equilíbrio do solo, que foi explicado por Carneiro (2008), em função da ação química da correção do solo. O equilíbrio é uma das metas mais objetivas da agricultura na produção de alimentos, pois é através dele que bons resultados são obtidos nos cultivos, sendo também um grande objetivo das relações ambientais.

Como pode ser observado, esta discussão intercalou, de maneira proposital, narrativas que oscilam entre o pensamento da agricultura convencional e o ambiental, justamente para que o leitor perceba as inúmeras possibilidades interativas que são possíveis de serem realizadas, e como oscilam de formas simples às mais complexas, nos processos de nutrição de plantas por microrganismos nas dependência de inúmeros fatores (físicos, químicos, biológicos, antrópicos no tempo e em determinado espaço da terra).

Apesar de parecer incorreto, é quase certo que a agricultura e a sociedade irão se comportar de maneira ambígua nos próximos anos, em relação à produção e ao ambiente, no cultivo agrícola e na nutrição de plantas.

Assim, esta abordagem é concluída na certeza de ter iniciada uma discussão teórica, de contexto ecológico e ecossistêmico, que propiciou maior compreensão dos processos interativos no ambiente, para auxiliar na análise da compreensão de seus problemas. Os enunciados apresentados nos processos interativos foram extraídos de pensamentos contidos em trabalhos da Agronomia, Biologia, Ecologia, Geografia, Economia, Sociologia e áreas afins.

Este exercício acadêmico é um exemplo de uma abordagem interdisciplinar que busca a construção de fundamentos e possibilidades que podem ser abertos no horizonte científico.

REFERÊNCIAS

- ALTERTHUM, F. Classificação dos seres vivos. *In*: TRABULSI, L. R.; ALTERTHUM, F. (Ed.). **Microbiologia**. 4 ed. São Paulo: Atheneu, 2005.
- AMARO, A.; GONÇALVES, C.; DUARTE, S.; COSTA, C. A.; ALBANO, S.; SALVADO, E.; MEXIA, A. Tomate para indústria: Biodiversidade e infra-estruturas ecológicas. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 31, n. 2, p. 43-49, jul./dez., 2008.
- ANDRADE, G. Role Functional Groups of Microorganisms on the Rhizosphere Microcosm Dynamics. *In*: VARMA, A. (Org.). **Plant Surface Microbiology**. Berlim: Springer/Verlag, 2004. p. 51-69.
- ANDRADE, G. **Interacción de rizobacterias fijadoras de N₂ no simbióticas con hongos micorrízicos en la rizosfera de plantas de maíz crecidas en minirrizotrófon**. 1995. 117 p. Tese (Doutorado em Microbiologia) - Universidad de Granada, Granada, 1995.
- BECKER, B.K. Amazônia: Construindo o Conceito e a Conservação da Biodiversidade Prática. *In*: GARAY, I.; DIAS, B.F.S. (Ed.). **Conservação da Biodiversidade em Ecossistema Tropicais: avanços conceituais e revisão de novas metodologias de avaliação e monitoramento**. Petrópolis: Vozes, 2001. p. 92-101.
- CARNEIRO, C. E. A. **Manejo de solo fundamentado no equilíbrio químico**. 2008. 94 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.
- CARNEIRO, C. E. A.; FIORETTO, R. A.; FONSECA, I. C. de B.; CARNEIRO, G. E. S. Calcário, Fosfato, Potássio e silício na produtividade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 465-470, oct./dec., 2006.
- CARSON, R. **Primavera Silenciosa**. (Tradução de Raúl de Polillo). São Paulo: Melhoramentos, 1964.
- COLOZZI FILHO, A.; BALOTA, E. L. **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: EMBRAPA, 1994.
- COSTA, A. V. M. R. Agricultura Sustentável I: Conceitos. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 31, n. 2, p. 61-73, jul./dez., 2008.
- FERNANDES JÚNIOR, P. I.; REIS, V. M. Algumas limitações a fixação biológica de nitrogênio em leguminosas. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2008. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 252).
- GARAY, I.; DIAS, B.; **Conservação da Biodiversidade em Ecossistema Tropicais: avanços conceituais e revisão de novas metodologias de avaliação e monitoramento**. Petrópolis: Vozes, 2001.
- HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: EMBRAPA, 1994.
- LOVATO, G. M. **Interações entre micorriza arbuscular e rizobactérias em leguminosas arbóreas destinadas a reflorestamento**. 2006. 59 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação nutricional das plantas, princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989.
- MOREIRA, M. S. M.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2006.
- ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. **Fundamentos de Ecologia**. (Tradução Pégasus Sistemas e Soluções) São Paulo: Thomson Learning, 2008.

- RAYNAUT, C. Meio ambiente e desenvolvimento: construindo um novo campo do saber a partir da perspectiva interdisciplinar. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, n. 10. p. 21-32, jul./dez., 2004.
- REIS, V. M.; ANDRADE, G.; FARIA, S. M.; SILVEIRA, A. P. D. Interações de fungos micorrízicos arbusculares com outros mecanismos do solo. *In*: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Org.). **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil**. Lavras: UFLA, 2010.
- SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; SILVA, C. A. Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. *In*: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria Orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e Sub-tropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.
- SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; SANTOS, J. G. D.; SCHNEIDER, J.; CARNEIRO, M. A. C. Micorrizas e a degradação do solo: caracterização dos efeitos e ação recuperadora. *In*: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. v. 5, p. 219-306.
- SOARES, C. R. F. S.; CARNEIRO, M. A. C. Micorrizas arbusculares na recuperação de áreas degradadas. *In*: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Org.). **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil**. Lavras: UFLA, 2010.
- STEVENSON, G. B. **Biologia dos fungos, bactérias e vírus**. São Paulo: Polígono, 1974.
- STROHL, W. A.; HARRIET, R.; FISHER, B. D. **Microbiologia ilustrada**. Porto Alegre: Artmed, 2004.
- TRABULSI, L. R.; ALTERTHUM, F. **Microbiologia**. 4 ed. São Paulo: Atheneu, 2005.
- VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VEIGAS, I. A. de J. M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 49, n. 1, p. 123-128, 1992.
- YOUNÉS, T. Ciência da Biodiversidade: questões e desafios. *In*: GARAY, I.; DIAS, B. F. S. (Ed.). **Conservação da Biodiversidade em Ecossistema Tropicais: avanços conceituais e revisão de novas metodologias de avaliação e monitoramento**. Petrópolis: Vozes, 2001. p. 29-41.
- ZANONI, M.; RAYNAUT, C.; LANA, P. C.; FLORIANI, D. A construção de um curso de pós-graduação interdisciplinar em meio ambiente e desenvolvimento: princípios teóricos e metodológicos, *In*: RAYNAUT, C. (Org.). **Desenvolvimento e meio ambiente: em busca da interdisciplinaridade – pesquisas urbanas e rurais**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 9 -25.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

HIRATA, Carlos Alberto; ANDRADE FILHO, Galdino. Abordagem teórica das interações ambientais entre nutrição de plantas e microrganismos. **Geografia (Londrina)**, Londrina, v. 20, n. 3, p. 191-216, set./dez. 2011. URL: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia>>

EDITOR DE SEÇÃO:

Edison Archela.

TRAMITAÇÃO DO ARTIGO:

- ✓ Recebido em 29/09/2011.
- ✓ Aceito para publicação em 02/02/2013.