

Matéria Orgânica

Tâmara Cláudia de Araújo Gomes

INTRODUÇÃO

O manejo racional da matéria orgânica do solo é um dos primeiros passos para a sustentabilidade agrícola. O conceito de agricultura sustentável, embora definido de vários modos, apresenta um objetivo fundamental: "produzir sem degradar os recursos naturais dos quais dependerão as futuras gerações".

A matéria orgânica, referida como "a vida do solo", é um componente chave naquele sistema, devido a sua importância nas principais propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A matéria orgânica do solo constitui um todo heterogêneo, onde a produção das formas mais estáveis é o resultado de um conjunto de reações físicas, químicas e biológicas. A estas formas quimicamente muito estáveis é o que geralmente se conhece com o nome de "húmus". Frequentemente, o termo matéria orgânica é usado como sinônimo de húmus, deixando de lado a coexistência dos distintos estados de organização da fração orgânica do solo, cada uma das quais exercendo uma função característica dentro do sistema (Trinca, 1999).

Investigações químicas sobre as substâncias húmicas foram iniciadas há mais de duzentos anos. A capacidade das substâncias húmicas em adsorver água e nutrientes foi uma das primeiras observações. Mesmo que muito já tenha sido publicado sobre as substâncias húmicas, ainda muito permanece para ser compreendido sobre sua origem, síntese, estrutura química e reações, bem como sobre suas funções em ambientes terrestres e aquáticos.

1. CONCEITOS BÁSICOS

- **Húmus:** "Fração relativamente resistente da matéria orgânica do solo ou compostos orgânicos, usualmente bruno-escuro a preto, formada pela decomposição biológica dos resíduos orgânicos".
- **Substâncias húmicas:** "Qualquer fração ou substâncias presente no, ou separada do, húmus. São constituídas de uma série de compostos de coloração escura, de elevado peso molecular, separadas com base em características de solubilidade".
- **Humina:** "Fração da matéria orgânica do solo que não é dissolvida na extração do solo com substâncias alcalinas diluídas".
- **Ácido húmico:** "Fração do húmus do solo de cor escura, que pode ser extraída com solução diluída de álcali e após, precipitada por acidificação".

- **Ácido fúlvico:** "Mistura de substâncias orgânicas que permanece em solução após acidificação de um extrato do solo, usando álcali diluído. Fração colorida alcalina-solúvel".

3. GENERALIDADES SOBRE A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Turenne (1988) considera a matéria orgânica do solo como uma mescla heterogênea das diferentes fases de transformação dos materiais orgânicos incorporados ao mesmo, que varia com o tipo de solo e com a profundidade.

As substâncias húmicas surgem da degradação química e biológica de resíduos de plantas e animais e de atividades de síntese de microorganismos (Figura 1). Os produtos assim formados tendem a se associar em complexas estruturas que são mais estáveis que os materiais iniciais. Uma característica importante das substâncias húmicas é a sua capacidade para formar complexos solúveis e insolúveis com íons metálicos e hidróxidos e interagir com minerais de argila e compostos orgânicos tais como alcanos, ácidos graxos, pesticidas, etc.

Nos resíduos que chegam ao solo se encontram uma série de compostos orgânicos, dentre os quais, os principais e mais abundantes se encontram proteínas, lipídios, carboidratos, ácidos nucleicos, lignina, etc.

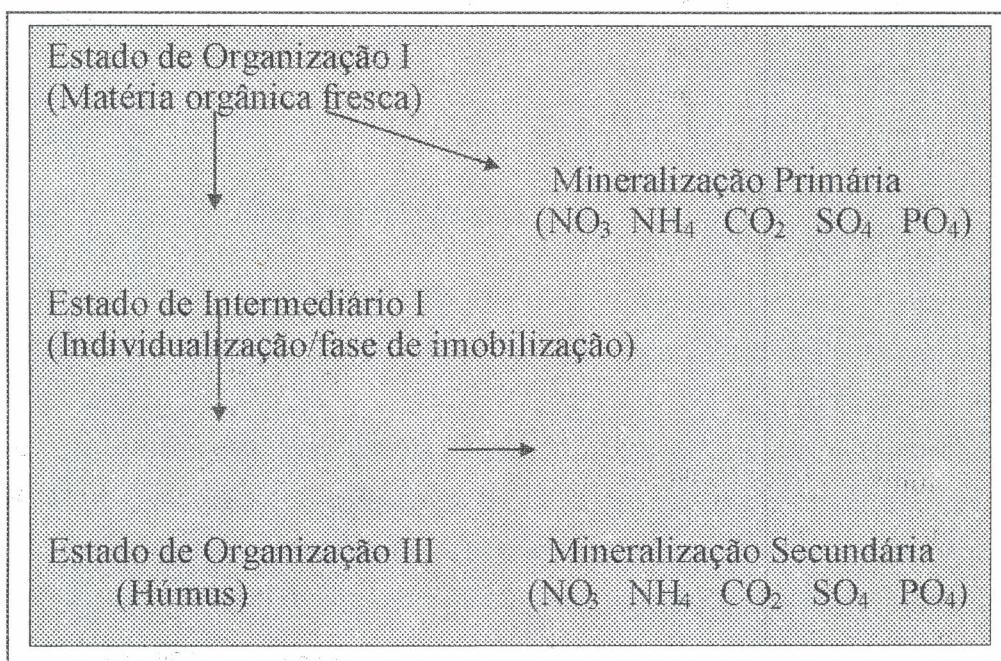


Figura 1. Estados de organização da matéria orgânica (adaptado de Turenne, 1988)

3.1. Como se forma a matéria orgânica do solo

Na atualidade existem quatro teorias que pretendem explicar o complexo processo de formação da matéria orgânica estável do solo (Felbeck, 1971, citado por Schnitzer, 1978):

- *Teoria da alteração do material vegetal*

As frações dos tecidos vegetais que são mais resistentes à degradação microbiana, tais como tecidos lignificados são alterados apenas superficialmente no solo para formar as substâncias húmicas. A natureza da substância húmica formada é fortemente influenciada pela natureza da planta original. Durante os primeiros estágios da humificação os ácidos húmicos (AH) de alto peso molecular e huminas são formados. Estes são subsequentemente degradados a ácidos fúlvicos (AF) e por último em CO_2 e H_2O .

- *Teoria da polimerização química*

Os materiais vegetais são degradados por microorganismos em moléculas pequenas os quais são então usados pela microbiota do solo como fonte de carbono e energia. Os microorganismos sintetizam fenóis e aminoácidos que são secretados no ambiente onde são oxidados e polimerizados em substâncias húmicas. A natureza do material vegetal original não possui nenhum efeito sobre o tipo de substância húmica que é formada.

- *Teoria da autólise das células*

As substâncias húmicas são produtos da autólise de células vegetais e de microorganismos após a sua morte. Os fragmentos celulares resultantes (açúcares, aminoácidos, fenóis e outros compostos aromáticos) se condensam e se polimerizam via radicais livres.

- *Teoria da síntese microbiana*

Os microorganismos usam os tecidos vegetais como fonte de carbono e energia para sintetizar materiais húmicos intercelulares de alto peso molecular. Após a morte dos microorganismos, essas substâncias são liberadas no solo. Consequentemente, substâncias de alto peso molecular representam o primeiro estágio da humificação, seguido pela degradação extra-celular microbiana a AH, AF e, por último, a CO_2 e H_2O .

Até o momento não existe consenso sobre qual das hipóteses é a mais válida. Acredita-se que, provavelmente, todos os processos ocorram simultaneamente, embora sob certas condições, um ou outro processo possa dominar. Contudo, o que todas as hipóteses sugerem é que os materiais húmicos mais complexos e de alto peso molecular são formados primeiro e que são, então, degradados, provavelmente de forma oxidativa, em materiais de baixo peso molecular. Conseqüentemente, a seqüência de eventos parece ser $AH \rightarrow AF$.

No entanto, independentemente de qual das vias propostas será aceita em definitivo, o produto final terá características que serão um reflexo do tipo de material orgânico inicial e a ação de fatores edafoclimáticos e antrópicos, onde a importância relativa de cada um depende de condições particulares, de caráter local. Quanto a este fato, nos cultivos irrigados do Vale do São Francisco, tem-se observado que o efeito da irrigação é muito mais marcante que qualquer outro caráter antrópico, edafoclimático, ou biótico presente.

3.2. Características da matéria orgânica

3.2.1. Estrutura Molecular

Solos e sedimentos contêm grande variedade de materiais orgânicos que podem ser agrupados em substâncias húmicas e não-húmicas. As últimas incluem aquelas cujas características químicas e físicas são, todavia, reconhecíveis, tais como carboidratos, proteínas, peptídeos, aminoácidos, gorduras e ácidos orgânicos de baixo peso molecular. A maioria destes compostos é rapidamente atacada pelos microorganismos e têm, normalmente, curta permanência no solo. Contrariamente, as substâncias húmicas não exibem nenhuma característica química e física específica. As substâncias húmicas são escuras, acídicas, predominantemente aromáticas, hidrofílicas, quimicamente complexas, variam em peso molecular de poucas centenas a vários milhares. Estes materiais são normalmente divididos nas três seguintes e principais frações: (a) ácidos húmicos (AH), o qual é solúvel em álcali diluído, mas é precipitado pela acidificação do extrato alcalino; (b) ácidos fúlvicos (AF), a qual é aquela fração húmica a qual permanece em solução quando o extrato alcalino é acidificado, ou seja, é solúvel em ambas soluções alcalinas e ácidas; (c) humina, que é a fração húmica que não pode ser extraída do solo ou sedimentos por soluções ácidas ou básicas. Estruturalmente, as três frações húmicas são similares, mas diferem em peso molecular e conteúdo de grupos funcionais, com os AF possuindo o menor peso molecular, contendo mais oxigênio, menos carbono e nitrogênio e tendo o

mais alto conteúdo de grupos funcionais possuidores de oxigênio (CO_2H , OH , C=O) por unidade de peso que as outras duas frações húmicas. A estrutura química e propriedades da fração humina parecem ser similares àquelas dos AH. A insolubilidade da humina parece ser proveniente dela ter sido firmemente adsorvida ou ligada a constituintes inorgânicos do solo. A resistência à degradação microbiana dos materiais húmicos parece também ser em grande parte devido à formação de complexos metálicos e/ou argilo-orgânicos estáveis Schnitzer (1978).

Os valores de peso do AH diferem grandemente, dependendo do método utilizado para sua determinação, podendo variar entre 20.000 a 100.000 unidades. Os pesos dos ácidos fúlvicos oscilam numa faixa de 500 a 2.000 unidades. Os novos conceitos sobre a estrutura molecular das substâncias húmicas, as visualiza como blocos de compostos aromáticos unidos por pontes de hidrogênio, o qual permite ramificações em duas ou três dimensões. Schnitzer (1978) e Schulten e Schnitzer (1993) citados por Trinca (1999) propõem os esquemas seguintes (Figuras 2 e 3) respectivamente, para AF e AH, os quais contêm uma grande quantidade de grupos funcionais tais como: carboxílico, fenólicos, alcoólicos, cetônicos e hidroxiquinonas.

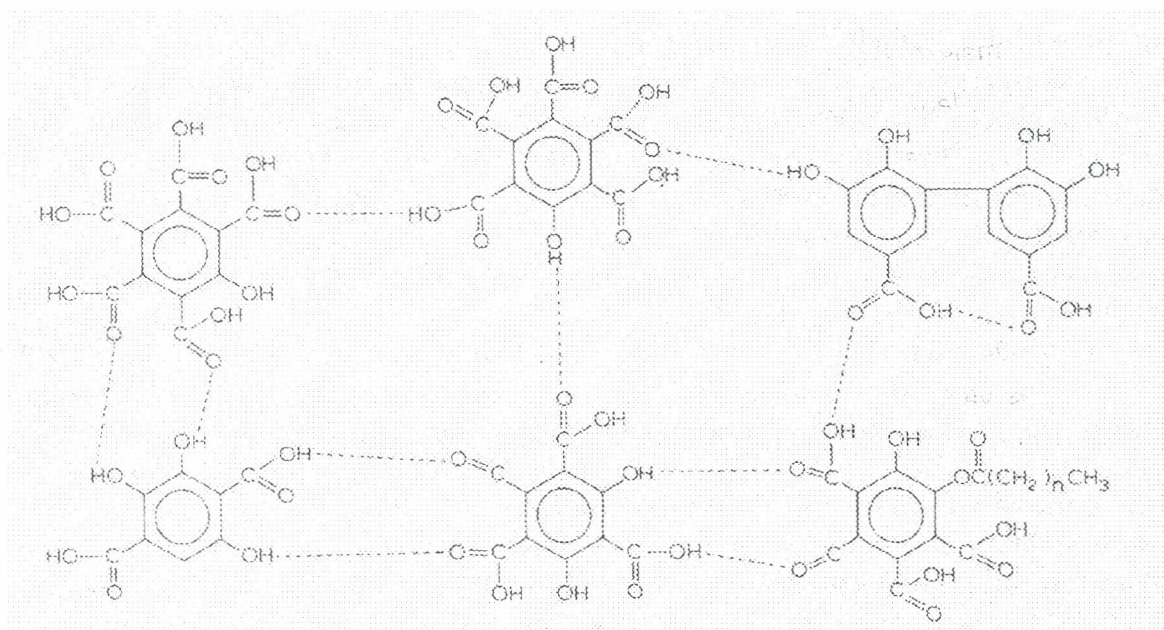


Figura 2. Estrutura hipotética dos ácidos fúlvicos (Schnitzer, 1978)

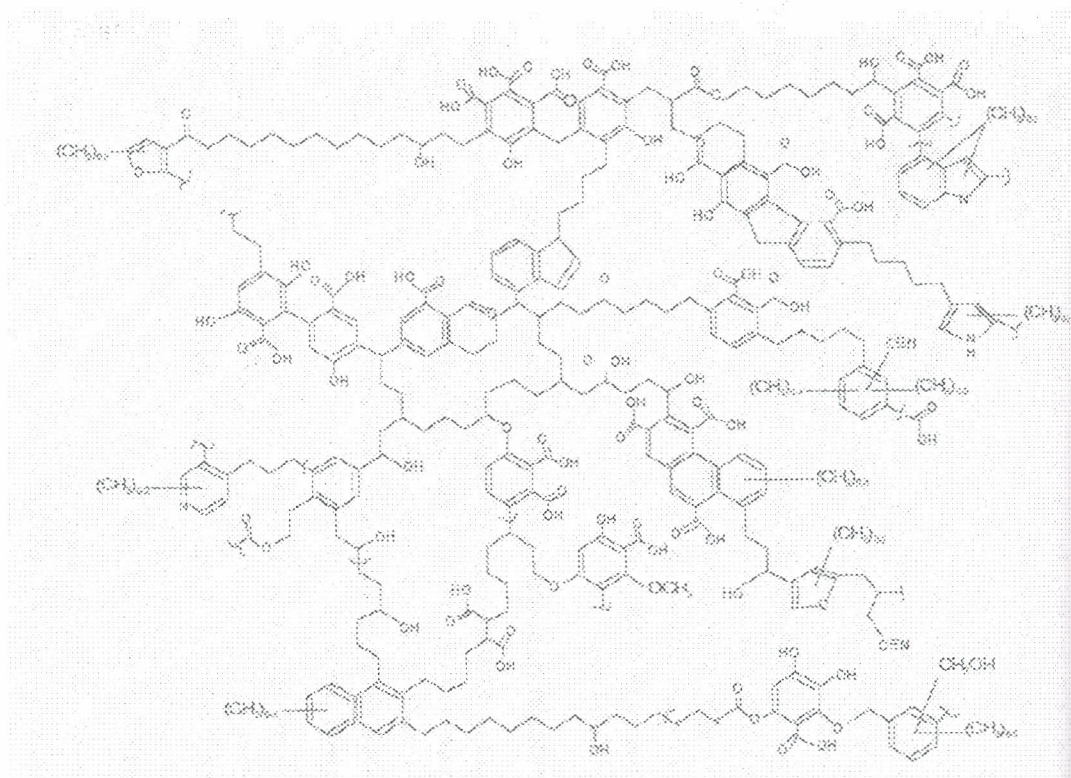


Figura 3. Estrutura bidimensional proposta para os ácidos húmicos (Schulten e Schnitzer, 1993, citados por Trinca, 1999).

3.2.2. Composição química das substâncias húmicas

Estudos realizados sobre a fração orgânica do solo incluem a determinação de possíveis estruturas químicas para estes compostos. Schinitzer (1978) propõe os seguintes valores: (Tabela 1)

Tabela 1. Estruturas químicas presentes em ácidos húmicos e fúlvicos

Compostos	Ácidos húmicos (%)	Ácidos fúlvicos (%)
Compostos alifáticos	24,0	22,2
Compostos fenólicos	20,3	30,2
Compostos benzenocarboxílicos	30,2	23,0
Relação benzenocarboxílicos/Fenólicos	1,6	0,8

A presença destes grupos funcionais faz com que a matéria orgânica seja de alta reatividade e com que tenha propriedades fortemente dependentes do pH do solo, razão pela qual constituem, dentre outras coisas, uma fonte de cargas variável de grande influência sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos.

Para os solos de zonas tropicais, Schnitzer (1978) propôs as seguintes faixas de composição elementar de ácidos húmicos e fúlvicos de solos tropicais:

Tabela 2. Análise elementar de ácidos húmicos e fúlvicos para solos tropicais

Elemento (%)	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos
Carbono	54,4 - 54,9	42,8 - 50,6
Hidrogênio	4,8 - 5,6	3,8 - 5,3
Nitrogênio	4,1 - 5,5	2,0 - 3,3
Enxofre	0,6 - 0,8	1,3 - 3,6
Oxigênio	34,1 - 35,2	39,7 - 47,8

Comparado aos AH, os AF contêm mais O e S e menos C, H e N que os AH. Em média, os AH contêm 10% mais C e 10% menos O que os AF. Em ambos materiais, o C e O são os principais elementos.

3.2.3. Propriedades coloidais das substâncias húmicas

As substâncias húmicas do solo possuem um tamanho que permite incluí-las na faixa dos colóides, exibindo características próprias destes, destacando-se sua elevada superfície específica, a qual lhe confere alta reatividade tanto física quanto química. Esta característica faz com que a fração orgânica do solo, ainda que em baixos conteúdos, seja responsável por uma elevada porcentagem da CTC do mesmo. Ademais, as substâncias húmicas são colóides hidrófilos, ou seja, com alta afinidade pela água, chegando a reter entre 4 a 6 vezes seu peso em água.

4. A IMPORTÂNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO NOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

A matéria orgânica do solo tem papel vital na manutenção/aumento da produtividade e sustentabilidade do ecossistema natural e agrícola. No ecossistema natural, o fluxo de energia e matéria é cíclico e sustentável (Figura 4). Neste caso, a M.O. tem uma importante participação no processo de suprimento e armazenamento de água e nutrientes. No ecossistema agrícola o fluxo de matéria e energia não é cíclico nem auto sustentável, caracterizando-se por entradas externas (fertilizantes, corretivos, pesticidas, sementes, etc.) e saídas ou perdas através da colheita, erosão, lixiviação, volatilização, fixação, imobilização, etc. Inclui-se também, perdas de biodiversidade, tais como espécies de plantas, insetos e outros organismos benéficos (Pavan e Chaves, 1998).

Na natureza, o solo comporta-se como um sistema aberto, trocando energia e matéria com o meio. O sistema atinge o estado estável quando as taxas de adição e de perdas se equivalem (Addiscot, 1992, citado por Mielniczuk, 1999). Dentro desse conceito, a adição de matéria orgânica acontece via adição de carbono pela síntese de compostos orgânicos no processo da fotossíntese. A quantidade adicionada de carbono em determinadas condições edafoclimáticas depende das espécies e dos sistemas de cultura utilizados. Já as perdas, ocorrem principalmente pela liberação de CO₂ na respiração, pela decomposição microbiana dos resíduos e da matéria orgânica do solo e pelas perdas de compostos orgânicos por lixiviação e erosão. A magnitude desses processos, em dadas condições edafoclimáticas, dependem direta ou indiretamente do manejo do solo.

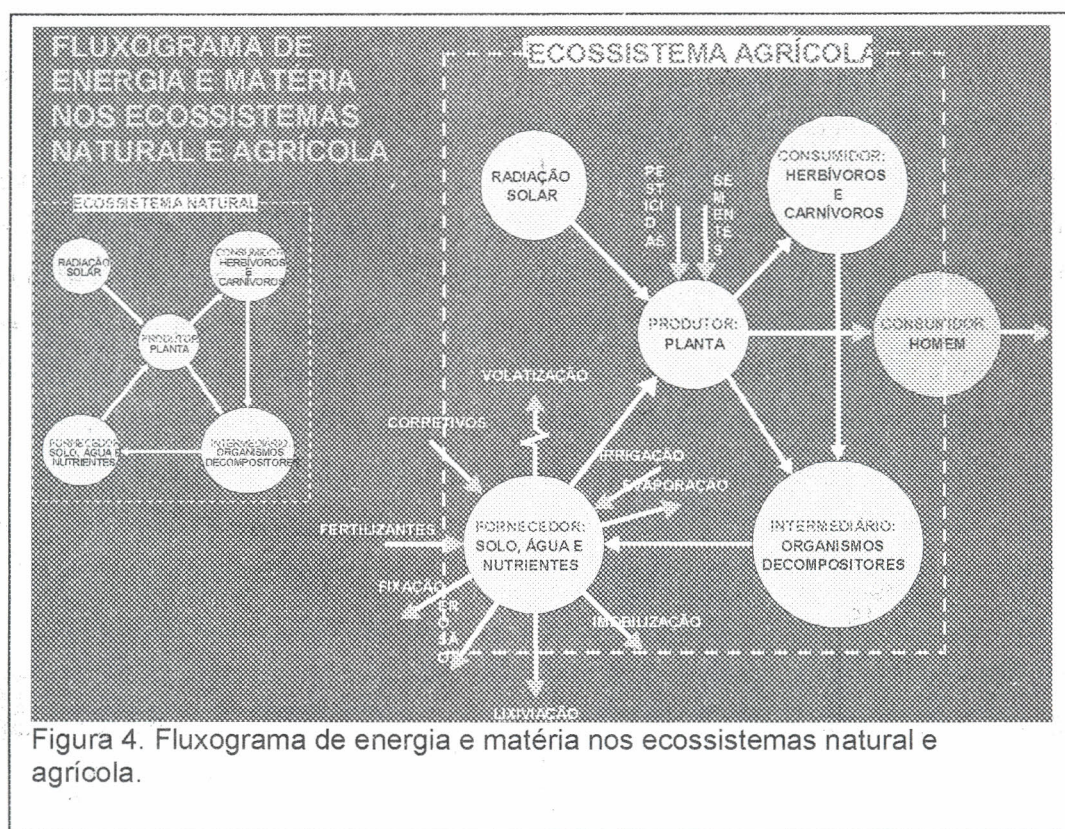


Figura 4. Fluxograma de energia e matéria nos ecossistemas natural e agrícola.

A perturbação antrópica do sistema estável (solo + cobertura vegetal) normalmente causa mais perdas do que ganhos de carbono, implicando a redução do seu teor ao longo do tempo e a degradação da qualidade do solo no desempenho de suas funções básicas (Doran, 1997, citado por Mielniczuk, 1999). Para melhor entendimento do resultado dessa intervenção, o carbono contido no sistema pode ser dividido em compartimentos que são dinâmicos, mutuamente dependentes e controlados por fatores climáticos, edáficos e antrópicos (Tabela 3). Os compartimentos A e B são as adições primárias de carbono ao solo, verificando-se que a magnitude do compartimento B é diretamente dependente do A e do manejo que for dado aos resíduos (queima, remoção ou retorno ao solo). O compartimento B é muito dinâmico, pois cerca de 80% do carbono desse compartimento será liberado como CO_2 pela ação dos microorganismos em curto espaço de tempo (3-4 meses), e apenas 20% farão parte de compostos orgânicos mais estáveis nos compartimentos C e D (Cerri, 1986, citado por Mielniczuk, 1999). Em um sistema estável pressupõe-se que as adições líquidas de carbono ao solo pelos compartimentos A e B sejam iguais às perdas dos compartimentos C e D, e a quantidade total de carbono não se altere significativamente ao longo do tempo. Porém, quando um sistema natural estável é perturbado pela exploração agrícola convencional, os compartimentos A e B são reduzidos e aumenta a decomposição da matéria orgânica nos compartimentos C e D,

com drástica redução do carbono orgânico total do solo, muitas vezes superior a 50% nos primeiros anos de cultivo.

As funções de cada compartimento são diferenciadas e importantes na definição das práticas agrícolas para a elaboração de um sistema sustentável. Como exemplo, a ausência ou a redução do compartimento A (pousio, solo descoberto, remoção ou queima dos resíduos, etc.) comprometem o compartimento B, que, além de repor as perdas de carbono que ocorrem nos compartimentos C e D, tem o papel fundamental na manutenção da biota do solo e na proteção da superfície do solo contra a erosão.

Tabela 3. Distribuição em compartimentos do carbono em um sistema agrícola constituído pelo solo e cobertura vegetal, principais funções e fatores de controle da magnitude de cada compartimento (Mielniczuk, 1999, adaptado de Duxbury et al., 1989)

Compartimentos	Residência (anos)	Função principal	Fatores principais de controle
A – Biomassa vegetal viva	0,25	▪ Reciclagem de nutrientes ▪ Proteção do solo contra a erosão ▪ Produção de fibras e alimentos	▪ Sistemas de cultura ▪ Fertilidade e acidez do solo ▪ Disponibilidade de água ▪ Temperatura e radiação solar
B – Resíduos vegetais, raízes e exudatos	0,25	▪ Fonte de alimento p/ biota do solo ▪ Proteção do solo contra a erosão ▪ Fonte de nutrientes às plantas	▪ Magnitude do compartimento A ▪ Tipo de resíduo (relação C/N) ▪ Grau de trituração e de incorporação dos resíduos ▪ Temperatura e umidade
C – MO não protegida			
C1 – Biomassa microbiana	0,25	▪ Decomposição dos resíduos ▪ Agregação temporária ▪ Fontes de nutrientes	▪ Tipo e magnitude do compartimento B ▪ Fertilidade e acidez do solo ▪ Temperatura e umidade ▪ Grau de revolvimento do solo
C2 – Lábil (> 50µm)	2-5	▪ Fonte de energia aos microorganismos ▪ Agregação temporária ▪ CTC ▪ Fonte de nutrientes p/ as plantas	▪ Magnitude do compartimento A e B ▪ Temperatura e umidade ▪ Grau de revolvimento do solo
D – MO protegida			
D1 – Proteção estrutural	-----	▪ Agregação permanente ▪ CTC	▪ Magnitude dos compartimentos A, B e C ▪ Grau de revolvimento do solo ▪ Destruição dos agregados ▪ Textura
D2 – Proteção coloidal	1000	▪ Agregação permanente ▪ CTC	▪ Magnitude dos compartimentos A, B e C ▪ Grau de revolvimento do solo ▪ Mineralogia e textura

Desacelerar a degradação da matéria orgânica inclui:

- reduzir o revolvimento do solo;
- melhorar a reciclagem dos resíduos;
- aumentar a quantidade de carbono orgânico fixado e incorporado no solo;
- manter os nutrientes no ciclo biológico;
- diminuir as perdas de solo, água e nutrientes do sistema;
- introduzir plantas no programa de rotação com maiores capacidades produtivas de biomassa, ou seja, com maiores produções de resíduos,
- manter a superfície do solo sempre coberta, etc.

Dentre as práticas de manejo que aceleram a mineralização da matéria orgânica, destacam-se:

- preparo convencional;
- uso de enxada rotativa;
- baixa densidade de plantas por unidade de área;
- solo descoberto, etc.

Por outro lado, por melhorarem a reciclagem dos resíduos vegetais e protegerem o solo contra a erosão, as seguintes práticas amenizam a degradação da matéria orgânica:

- plantio direto;
- rotação de culturas;
- adubação verde;
- compostagem;
- roçada de ervas invasoras;
- alta densidade de plantas;

Em síntese, na avaliação de qualquer técnica agrônoma tem que se considerar a eficiência dos fatores “entrada e saída” do sistema agrícola. O manejo adequado da matéria orgânica reduz a intensidade dos fatores “entrada e saída” através da reciclagem dos resíduos vegetais e de outros materiais orgânicos, manutenção dos nutrientes no ciclo biológico, proteção da superfície do solo contra erosão e evaporação, síntese de N_2 , efeito tampão (CTC, pH, etc.), redução dos processos de acidificação aumento na disponibilidade de nutrientes e favorecimento químico, físico e biológico para a maior

exploração do solo pelo sistema radicular, melhorando a eficiência no uso dos nutrientes e água (Pavan e Chaves, 1998).

5. BENEFÍCIOS DO MANEJO DE MATÉRIA ORGÂNICA NA QUÍMICA DO SOLO

Os benefícios advindos do manejo de matéria orgânica serão aqui tratados segundo (Pavan e Chaves, 1998).

5.1. Reação do solo

Referida em unidades de pH, determina a concentração do íon hidrogênio (H^+) livre na solução do solo, ou seja, refere-se à acidez ativa do solo, a qual diminui a disponibilidade de muitos nutrientes e aumenta a do Mn^{2+} e Al^{3+} e vários metais pesados.

O manejo apropriado de resíduos orgânicos pode causar o aumento do pH e, conseqüentemente, amenizar os efeitos negativos da acidez na produtividade do solo. Relatos na literatura atestam aumentos de pH em solos sob plantio direto, com cafeeiro adensado, com cobertura de solo, com roçada de plantas invasoras, com aplicação de esterco, com adubos verdes, etc. Todos mostram que as técnicas de manejo que maximizam a produção de biomassa e retornam os resíduos na superfície do solo, melhoram a fertilidade dos solos ácidos através do aumento de pH das camadas superficiais em contato com o material orgânico. Miyazawa et al (1993b), identificaram vários resíduos vegetais com capacidade de adsorção de H^+ da solução do solo, sendo o feijão bravo do ceará (*Canavalia brasiliensis*) e a ervilhaca comum (*Vicia sativa*) as espécies com maiores capacidades de adsorção e a serragem de madeira e capim colônio (*Panicum maximum*) com menores capacidades. Os resíduos vegetais têm, então, capacidade diferenciada de adsorção de H^+ da solução do solo, a qual varia em função da sua capacidade de produzir ligantes orgânicos durante o seu processo de decomposição.

Durante a decomposição dos resíduos vegetais, além do fornecimento de nutrientes também ocorre a produção de ligantes orgânicos com capacidade de adsorção de H^+ , de acordo com a reação: $-COO^{-}\frac{1}{2}Ca^{2+} + H^+ \rightarrow COOH + \frac{1}{2}Ca^{2+}$.

Essa reação aumenta o pH e o teor de Ca da solução do solo. Os ligantes orgânicos são solúveis em água, podendo mover-se no fluxo de massa e causar alterações na fertilidade das camadas subsuperficiais do solo, tais como diminuição na saturação de Al e aumento na saturação de bases (Leal et al., 1993 e 1996, citados por Pavan e Chaves, 1998).

5.2. Capacidade de Troca de Cátions (CTC)

A CTC total do solo (CTC_T) é constituída pelas cargas permanentes (CTC_P) associadas à substituição isomórfica no interior da argila (Si^{4+} por Al^{3+} e Al^{3+} por Mg^{2+}) e cargas variáveis (CTC_V) ou dependentes de pH, associadas aos grupos expostos da argila ($SiOH \rightarrow SiO^- + H^+$ e $AlOH \rightarrow AlO^- + H^+$) e os grupos funcionais da matéria orgânica, tais como carboxílicos ($COOH^+ \rightarrow COO^- + H^+$) e fenólicos ($C_6H_4OH^+ \rightarrow C_6H_4O^- + H^+$). O aumento do pH neutraliza os íons H^+ , aumentando a disponibilidade de cargas negativas nas superfícies das moléculas orgânicas e inorgânicas. A CTC_V constitui-se na mais importante componente de cargas negativas dos solos tropicais, cuja magnitude aumenta com o teor de matéria orgânica. Considerando apenas a CTC_V do solo, as contribuições da argila e matéria orgânica representam em média 10 e 90%, respectivamente (Pavan et al., 1985).

As práticas conservacionistas da matéria orgânica caracterizadas pelo melhor manejo dos resíduos, incorporação dos nutrientes no ciclo biológico e diminuição das perdas por erosão e lixiviação, apresentam como maior consequência a diminuição da acidez e o aumento da CTC, constituindo-se no caminho mais curto para o alcance da sustentabilidade agrícola.

5.3. Alumínio (Al)

A matéria orgânica ameniza os efeitos tóxicos do Al através de dois mecanismos principais:

- Efeito indireto pelo aumento do pH e conseqüente diminuição da solubilidade de Al. A colza (*Brassica napus*), ervilhaca comum, feijão bravo do ceará, guandu, e tremoço branco (*Lupinus albus*) foram os que mais contribuíram para o efeito "pH", dentre os resíduos testados por Miyazawa (1993b).
- Efeito direto pela complexação orgânica. A serragem de madeira, capim colônia, palhas de trigo e milho, espérgula (*Spergula arvensis*) e azevém (*Lolium multiflorum*) os que mais contribuíram para o efeito de complexação orgânica dentre os resíduos testados por Miyazawa (1993b). Em outro trabalho, a Leucena, a palha de café e a folha de café também apresentaram efeito positivo.

Independentemente do mecanismo, os resíduos de materiais vegetais apresentam um grande potencial na diminuição dos efeitos tóxicos de Al^{3+} em solos ácidos.

Devido à mobilidade de certos ácidos carboxílicos produzidos naturalmente durante a mineralização dos resíduos vegetais, é possível a neutralização do Al^{3+} tóxico e aumento de Ca^{2+} nas camadas subsuperficiais do solo de acordo com a reação:



Isso indica que o manejo de matéria orgânica ameniza os efeitos tóxicos de Al^{3+} através da precipitação ou formação de Al-complexos orgânicos, com implicação na melhoria da capacidade produtiva de solos ácidos degradados.

5.4. Manganês (Mn)

A solubilidade do Mn no solo é controlada principalmente pelo pH, pE (potencial elétrico), minerais inorgânicos, aeração e matéria orgânica. Considerando os dois principais componentes do solo (mineral e matéria orgânica), a matéria orgânica é responsável pelo controle da solubilidade do Mn^{2+} nos solos (Miyazawa et al., 1993a). O provável mecanismo de liberação do Mn^{2+} no solo apresenta a seguinte reação de equilíbrio:



Logo, a baixa solubilidade de Mn^{2+} em condições naturais é mantida pela produção de ligantes orgânicos. Assim, não é esperado a toxidez de Mn^{2+} , mesmo em condições de solo ácido, desde que o manejo possibilite a produção constante de ácidos orgânicos, devido à formação de Mn (II)-complexo orgânico.

5.5. Cobre (Cu)

Aplicações contínuas de fungicidas a base de cobre, durante vários anos, têm causado o acúmulo do metal no solo podendo atingir níveis tóxicos para as plantas cultivadas, macro e micro floras. O manejo de M.O. constitui-se o meio mais eficiente para a amenização da toxidez de cobre através da complexação orgânica [Cu(II)-complexo orgânico, além, naturalmente do efeito do aumento do pH na redução da disponibilidade de Cu^{2+} para as plantas.

5.6. Fósforo (P)

A importância do fósforo orgânico (P_o) na fertilidade do solo está na menor adsorção e maior mobilidade no solo, entretanto, o seu efeito na nutrição das plantas permanece obscuro, pois o aumento do P_o no solo sempre é acompanhado pelo concomitante aumento de P_i (fósforo inorgânico). O mais importante é que as técnicas que aumentam a

matéria orgânica também aumentam a disponibilidade de P para as plantas, independente se é P_i ou P_o .

5.7. Nitrogênio (N)

Um grande número de leguminosas utilizadas como adubo verde apresentam boa capacidade de fixação de N_2 . Em condições favoráveis de manejo, o N_2 fixado pelo adubo verde torna-se disponível para a cultura não leguminosa utilizada simultaneamente, como é o caso das culturas perenes, ou em seqüência podendo suprir total ou parcialmente a necessidade de N.

A pronta liberação do N fixado pelo adubo verde, depende da relação C/N. Em geral, a relação C/N dos adubos verdes varia de 15 a 38. Nas raízes, esta relação é mais larga. Resultados de pesquisa mostram que no primeiro cultivo de milho plantado após o corte do adubo verde, a produção aumenta com a diminuição da relação C/N do material vegetal, indicando os benefícios da rápida mineralização do N orgânico. Por outro lado, no segundo ano, a produção de milho é maior com o aumento da relação C/N do adubo verde, indicando o aproveitamento do N orgânico residual (Heinzmann, 1985, citado por Pavan e Chaves, 1998).

Uso de coberturas vegetais (adubos verdes) nos sistemas agrícolas contribui para diminuir a lixiviação de NO_3^- , um dos mais importantes processos de perda de N do ciclo biológico.

6. BENEFÍCIOS DO MANEJO DE MATÉRIA ORGÂNICA NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO

6.1. Agregação

É definida como sendo a união das partículas do solo (argila-íon-matéria orgânica-areia e silte) em unidades secundárias, sendo a estabilidade de agregados caracterizada como a resistência a uma ação degradante, particularmente a água.

A agregação do solo controla os movimentos internos de água, ar e calor e a proliferação de raízes. Práticas como o cultivo adensado, cobertura de solo, rotação com adubos verdes, composto orgânico e roçada de ervas nativas aumentam a agregação das partículas do solo.

Sistemas de manejo que maximizam a reciclagem de resíduos e os mantêm na superfície do solo, aumentam a agregação de partículas, melhoram a qualidade dos colóides húmicos do solo, alterando a superfície de cargas e o equilíbrio de troca de cátions do solo. O provável mecanismo responsável pela maior agregação do solo nos sistemas conservacionistas é o aumento de cargas variáveis na superfície da matéria orgânica, associada à forte coordenação com os cátions bivalentes, principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , formando pontes de ligação com a argila.

7. OUTROS BENEFÍCIOS DO MANEJO DE MATÉRIA ORGÂNICA

7.1. Temperatura do solo

É reconhecido que as práticas de manejo alteram o regime de temperatura do solo, principalmente, aquelas que propiciam o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo, devido ao efeito de isolante térmico. Dessa forma, a matéria orgânica como cobertura (mulch) propicia menores flutuações e redução da temperatura do solo, favorecendo o aumento de sua atividade biológica.

7.2. Proteção física ao solo

Ao cobrir o solo com resíduos orgânicos, evita-se o impacto direto da gota de chuva sobre a superfície do solo, mantendo as estruturas maiores, reduzindo o selamento superficial e aumentando a sua permeabilidade. O adubo verde é o fator isolado mais importante na redução da erosão porque melhora a infiltração e porque serve como barreira para a água que escorre superficialmente.

7.3. Umidade do solo

As técnicas de manejo que aumentam a reciclagem de resíduos vegetais e os mantêm na superfície do solo, aumentam a infiltração e diminuem as perdas de água por evaporação, constituindo-se em um dos mais importantes meios de conservação da água no solo.

7.4. Movimentação do calcário no solo

a) Movimentação Químico-Orgânica

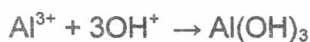
A movimentação do calcário aplicado na superfície dos solos não revolvidos (plantio direto, culturas perenes estabelecidas, etc.) é limitado às primeiras camadas (até 10 cm

de profundidade), a menos que haja suficiente resíduo vegetal para a produção de ligantes orgânicos (L_o). Nestas condições, ocorrem inicialmente a dissociação do calcário, com a produção de dois ânions alcalinos (OH^- e HCO_3^-) e um cátion (Ca^{2+}); neutralização da acidez superficial; mineralização da matéria orgânica produzindo L_o e pareamento iônico organo-metálico, de acordo com as reações:

- Reação I – Dissociação do calcário (p.e., o calcítico) com a produção de dois ânions alcalinos (OH^- e HCO_3^-) e um cátion (Ca^{2+}).



- Reação II – Neutralização da acidez superficial



- Reação III – Mineralização da matéria orgânica (MO) produzindo ligantes orgânicos (L_o).



- Reação IV – Pareamento iônico organo-metálico



As reações I, II, III e IV ocorrem na superfície do solo. Em seguida, o par iônico organo-metálico ($L_o^- \frac{1}{2}Ca^{2+}$)^o movimenta-se no fluxo de massa, satisfazendo a lei da neutralidade química.

Na subsuperfície do solo ocorrem as seguintes reações:

- Reação V – Neutralização do H^+



- Reação VI – Neutralização do Al^{3+}



As reações V e VI causam a elevação do pH, complexação de Al^{3+} e aumento de Ca^{2+} na subsuperfície do solo.

b) Movimentação Físico-Biológica

A mobilidade do calcário aplicado na superfície do solo não revolvido, pode ocorrer através de canais formados por raízes mortas de plantas utilizadas no sistema de rotação de cultivos ou como cobertura verde do solo, principalmente em culturas perenes e até, possivelmente, através de canais semelhantes formados pelas raízes de plantas nativas. O calcário move-se com a água das chuvas e/ou irrigação, através desses canalículos, dissolvendo-se nas camadas subsuperficiais do solo. Daí a importância da introdução de plantas com sistemas radiculares vigorosos no programa de rotação em culturas anuais e da manutenção da cobertura do solo pela utilização de adubos verdes em cultivos perenes.

7.5. Infestação de ervas daninhas

A cobertura do solo com resíduos vegetais contribui para diminuir o número e o desenvolvimento das espécies invasoras, bem como o tempo de capina, resultando em economia de mão de obra.

7.6. Ocorrência de nematóides

A presença de algumas espécies de plantas indicadas para adubação verde tem a virtude de evitar a multiplicação de nematóides fitoparasitas que causam grandes danos a algumas das principais culturas desenvolvidas no Vale do São Francisco. Resultados de pesquisa nas condições edafoclimáticas da região permitem concluir que as crotalárias *C. spectabilis* e *C. paulinea* têm bom controle de nematóides das galhas. Por outro lado, todas as mucunas testadas são suscetíveis a *Meloidogyne javanica*. Em solos arenosos irrigados com incidência de nematóides das galhas, principalmente *M. incognita*, não são recomendadas as espécies *Dolichos lab-lab* e *Canavalia ensiformes*, pois poderão aumentar a população desses parasitos.

8. LITERATURA CONSULTADA

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MARTIN NETO, L. Provável mecanismo de liberação de manganês do solo. *Pesq. Agrop. Bras.*, Brasília, 28(6):725-731, 1993a.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. *Ver. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 17:411-416, 1993b.

MIELNICZUK, J. **Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas**. In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F.A. de O. eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.1-8.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Chemical and mineralogical characteristics of selected acid soils of the state of Paraná, Brazil. Turrialba, SanJosepe, 35(2): 132-139, 1985.

PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D. **A importância da matéria orgânica nos sistemas agrícolas**. Londrina: IAPAR, 1998. 36p. (IAPAR. Circular, 98).

SCHNITZER, M. **Humic substances: chemistry and reactions**. In: SCHNITZER, M.; KHAN, S.U. (Ed.) **Soil organic matter**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 319p. 1-64p.

TRINCA, C.R. de. **Matéria orgânica del suelo**. Maracay: Facultad de Agronomia/ Universidad Central de Venezuela, 1999. 211p. (Facultad de Agronomia/Universidad Central de Venezuela. Alcance, 57)

TURENNE, J.F. Soil organic matter and soil fertility in tropical and subtropical soil. In: MALTBY, E.; WOLLERSER, T. (Ed.) **Soil na their management: a sino-european perspective**. London: Elsevier Applied Science, 1988. 255-272p.