

2. ANDERSON, G. Assessing organic phosphorus. In: KWASANCH, F. SAMPLE, E. & KAMPRATH, E.J. eds. The Role of Phosphorus in agriculture, Am. Soc. Agron., 1980. p.411-431.
3. BAVER, L.D.; GARDNER, W.H & GARDNER, W.R. Soil physics, New York, John Wiley & Sons, 1972. 498p.
4. BUCKMAN, H.O. & BRADY, N.C. Natureza e propriedades dos solos. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos S.A., 1976. 594p.
5. DOMMERGUES, Y. & MANGENOT, F. Écologie microbienne du sol, Paris, Masson et Cia., 1970. 766p.
6. ESTEY, R.H. Roots, rhizomes and rhizophaga. In: LOHN PERSSON ed., Soil organisms as components of ecosystems. 1976. 614p.
7. FLOWERS, T.J.; TROKE, P.F. & YEO, A.R. The mechanism of salt tolerance in halophytes. Annu. Rev. Pl. Physiol., 28:21-24, 1977.
8. GREENWOOD, D.J. In: GRAY, T. & PARKINSON, D., eds. The Ecology of soil bacteria. Liverpool Univ. Press, 1968. p.138-157.
9. HEPPEL, C.M. Extracellular polysaccharides of soil bacteria. In: WALKER, N., ed. Soil Microbiology. A Critical review. London, Butterworth, 1976. 262:93-111.
10. MONIZ, A.C. Elementos de pedologia. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1975. 459p.
11. PARKER, C.A.; TRINICK, M.R. & CHATEL, D.L. Rhizobia as soil and rhizosphere inhabitants. In: HARDY, R.W.F. & GIBSON, A.H. eds. A Treatise on dinitrogen fixation, New York, John Wiley & Sons, 1977. v.4. p.311-352.
12. PARKINSON, D. Soil microorganisms and plant root. In: BURGESS, A. & RAW, F. eds. Soil biology, London, Academic Press, 1967.
13. SINGLETON, P.W.; EL-SWAIFY, S.A. & BOHLOOL, B.B. Effect of salinity on *rhizobium* growth and survival. Appl. Env. Microbiol., Baltimore, 44:884-890, 1982.
14. SPRENT, J.I. The effects of water stress on nitrogen-fixing root nodules. III. Effects of osmotically applied stress. New Phytol., Oxford, 21:451-460, 1972.
15. SPRENT, J.I. The effects of water stress on nitrogen-fixing root nodules. IV. Effects on whole plants of *Vicia faba* and *Glycine max*. New Phytol., Oxford, 21:603-611, 1972.
16. TABATABAI, M.A. Sulfur in agriculture. Madison, Wisconsin, Am. Soc. of Agronomy Inc., Crop Sci. Soc. of Am., Soil Sci. Soc. of Am. Publisher, 1986. 758p.
17. WALKER, N. Nitrification and nitrifying bacteria. In: WALKER, N. ed. Soil microbiology. A Critical review. London, Butterworths, 1975. 262p.
18. WATANABE, I. & CHOLITKUL, W. Nitrogen fixation in acid sulphate paddy soils. Tropical Agric. Res. Ser., Trinidad, 5:219-226, 1982.

O CICLO DO CARBONO NO SOLO

Carlos C. Cerri⁽¹⁾, Francis Andreux⁽²⁾ & Brigitte P. Eduardo⁽¹⁾

INTRODUÇÃO

O carbono mineral na forma de gás carbônico é fixado através da fotossíntese pelas plantas verdes na forma de carboidratos, lignina, proteínas, lipídeos e outros compostos orgânicos. Com a senescência e morte dos órgãos vegetais aéreos, principalmente folhas e galhos, e a produção racinar, esse carbono orgânico é colocado em contato com o solo. Esses resíduos vegetais, assim como os de origem animal, não se acumulam indefinidamente no solo; com o tempo, todos se decompõem em gás carbônico e água. Se isto não ocorresse, uma fração resistente poderia agora estar cobrindo a superfície da Terra.

Os principais responsáveis por essa decomposição são os microorganismos do solo, cuja massa ou biomassa microbiana está permanentemente em renovação. Em áreas geologicamente estáveis, com superfícies cobertas por longo tempo com um mesmo tipo de vegetação, o solo apresenta uma condição de equilíbrio dinâmico onde as perdas anuais de matéria orgânica são balanceadas pelas entradas anuais. Esse processo é descrito como reciclagem ou "turnover", e para o carbono é definido como o fluxo através do conteúdo total de carbono de uma dada amostra de solo (9). O tempo de reciclagem é portanto a quantidade de carbono no solo ou parte dele, relativo a entrada anual deste elemento no sistema.

CONSTITUINTES ORGÂNICOS DO SOLO

Nos ecossistemas naturais, o carbono orgânico é incorporado ao solo por duas vias principais. A primeira é a via epígea e refere-se aos aportes

⁽¹⁾ CENA/USP, Caixa Postal 96, CEP 13400 Piracicaba, SP.

⁽²⁾ Convênio ORSTOM/CNPq - CENA/USP, Caixa Postal 96, CEP 13400 Piracicaba, SP.

originários dos restos vegetais e animais que se depositam na superfície do solo para formar serapilheiras ou folhedos, e ainda por compostos orgânicos liberados pelas folhas vivas e que são arrastados pela água da chuva, constituindo os pluviolixiviados. A outra via de entrada é endógena, onde os aportes são devidos à exsudação da raiz viva (rizodepósitos) ou aos produtos de decomposição quando a planta morre. Parte destas incorporações é utilizada para a manutenção e crescimento da biomassa microbiana (imobilização), parte se estabiliza na forma de substâncias humificadas (humificação) e parte é transformada em substâncias minerais solúveis ou gasosas, como o gás carbônico (mineralização). O esquema geral das transformações encontra-se na figura 1.



Figura 1. Representação esquemática da degradação de restos orgânicos.

Admite-se que os restos vegetais constituem a entrada primária de material orgânico para as populações faunísticas e microbianas do solo e que os corpos destas populações formam as entradas secundárias (21).

NATUREZA DOS RESÍDUOS VEGETAIS E ANIMAIS

Nesta seção poderá ser feita somente uma ampla generalização sobre os principais constituintes dos animais e plantas.

A composição química elementar (C, N, P, S e K) de algumas plantas, organismos e resíduos está apresentada no quadro 1. O carbono é o elemento predominante, com teores de até 60%, enquanto que o nitrogênio varia entre 0,13 e 15%. O fósforo, enxofre e potássio raras vezes ultrapassam 1%.

Quadro 1. Análise elementar expressa em matéria seca (adaptado de Jenkinson (8))

Material orgânico	Carbono	Nitrogênio	Fósforo	Enxofre	Potássio
	%				
Bactéria	50	15	3,2	1,1	...
Actinomiceto	50	11	1,5	0,4	1,8
Fungo	44	3,4	0,6	0,4	0,6
Minhoca	46	10	0,9	0,8	1,1
Milho	44	1,4	0,2	0,17	0,9
Alfafa	45	3,3	0,28	0,44	0,9
Madeira	...	0,13	0,006	0,005	0,03
Esterco	37	2,8	0,54	0,7	5,1

A fonte de energia disponível nos resíduos vegetais e animais, usada pelos organismos do solo (decompositores), está contida numa ampla variedade de compostos orgânicos tais como carboidratos (polissacarídeos, oligossacarídeos e monossacarídeos), lignina, proteínas, lipídeos e pigmentos, entre outros compostos orgânicos.

O substrato orgânico mais abundante incorporado ao solo é um polissacarídeo denominado celulose, o qual constitui 30 a 60% dos resíduos vegetais. A celulose é um polímero não ramificado (β 1,4) de glicose (Figura 2) presente nas paredes das células das plantas superiores, algas e em alguns fungos. Poucas bactérias sintetizam celulose como um polissacarídeo exocelular.

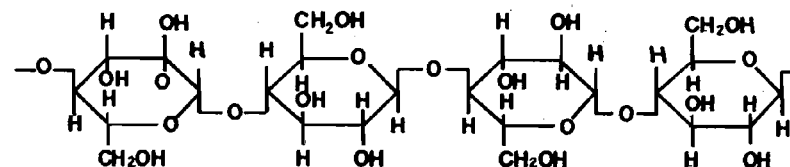


Figura 2. Estrutura da celulose.

As hemiceluloses (Figura 3) e componentes pécicos são polissacarídeos formados por heteropolímeros altamente ramificados. Alguns desses polissacarídeos servem como reserva de energia e outros como o xiloglican, arabinogalactan e rhamnogalacturonan formam a estrutura da parede celular dos vegetais.

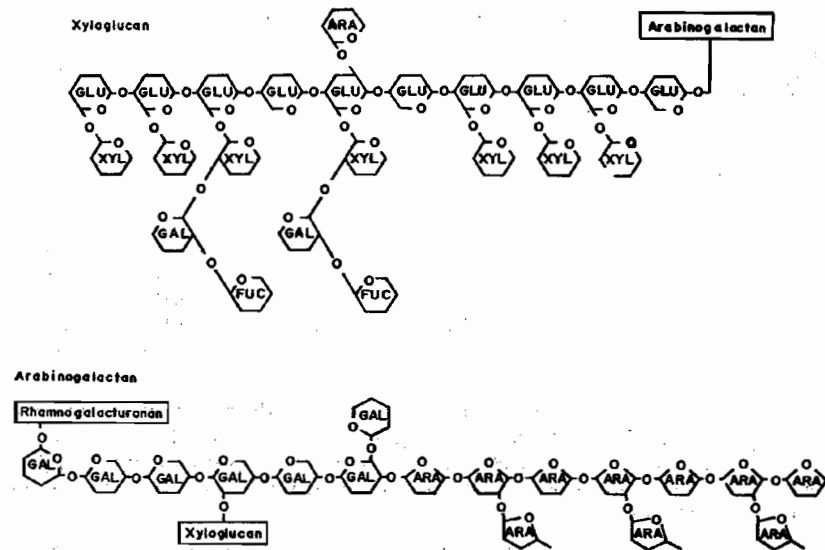


Figura 3. Hemicelulose - Xiloglucan, Heteropolímero da Xilose (XYL) Glicose (GLU) e Galactose (GAL); Arabinogalactan.

A figura 4, elaborada por Albersheim (1), representa a possível arquitetura da parede celular das plantas e mostra a relação das fibras de celulose entre si e suas ligações com vários glicans na matriz de hemicelulose.

A lignina é um polímero muito complexo formado por uma combinação de unidades fenilpropano (álcoois betaconiferílico, cumárico e sinápico), arranjados em três dimensões (Figura 5).

Os três constituintes vitais das substâncias celulares, proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos, estão presentes em todos os resíduos vegetais e animais que entram no solo. A quantidade de proteína varia desde menos de 1% na madeira, até mais de 50% nas bactérias (8). A maior parte do nitrogênio orgânico entra no solo através dos restos vegetais e animais. Fazem parte ainda da composição dos seres vivos quantidades significativas de monossacarídeos, aminoácidos livres e peptídeos, além de quantidades reduzidas de clorofila, pigmentos, resinas, terpenos, alcalóides e taninos que são também incorporados naturalmente ao solo.

PRINCIPAIS COMPLEXOS ENZIMÁTICOS

Enzimas são proteínas que catalisam reações químicas específicas. Elas se ligam à molécula do substrato para formar um complexo enzima-substrato transitório, o qual se degrada e origina a enzima livre e os produtos de degradação (13).

Os processos de humificação e mineralização ocorrem sob ação de enzimas específicas. Os grupos mais importantes encontrados no solo estão no quadro 2.

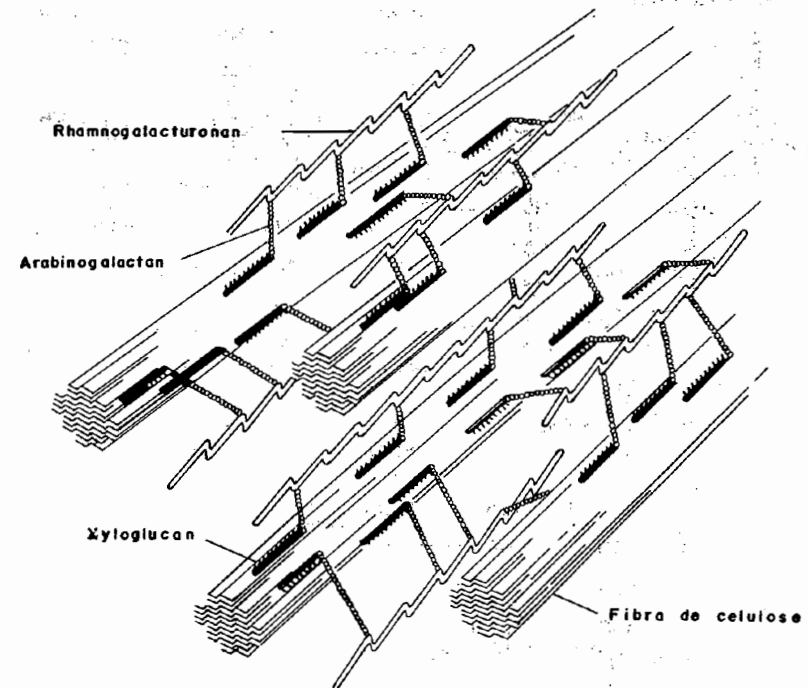


Figura 4. Modelo tridimensional de uma parede celular vegetal. Esquema inicial elaborado por Keegstra modificado por Albersheim (1).

De acordo com Ladd (12) as enzimas podem ser classificadas através de sua origem ou seu modo de ação. As exoenzimas ("abiotic enzymes") ou "enzimas cumuladas" são definidas como aquelas que agem extracelularmente, quer na solução do solo, ou então acopladas a componentes inorgânicos ou orgânicos do solo. Elas são liberadas por animais, plantas (sobretudo pela raiz) e microrganismos ou, ainda, estão presentes nas células mortas de restos orgânicos. As endoenzimas agem nas células microbianas em proliferação. Admite-se que espécies diferentes têm complexos enzimáticos diferentes e é devido a isso que se explica a diversidade de nichos ecológicos.

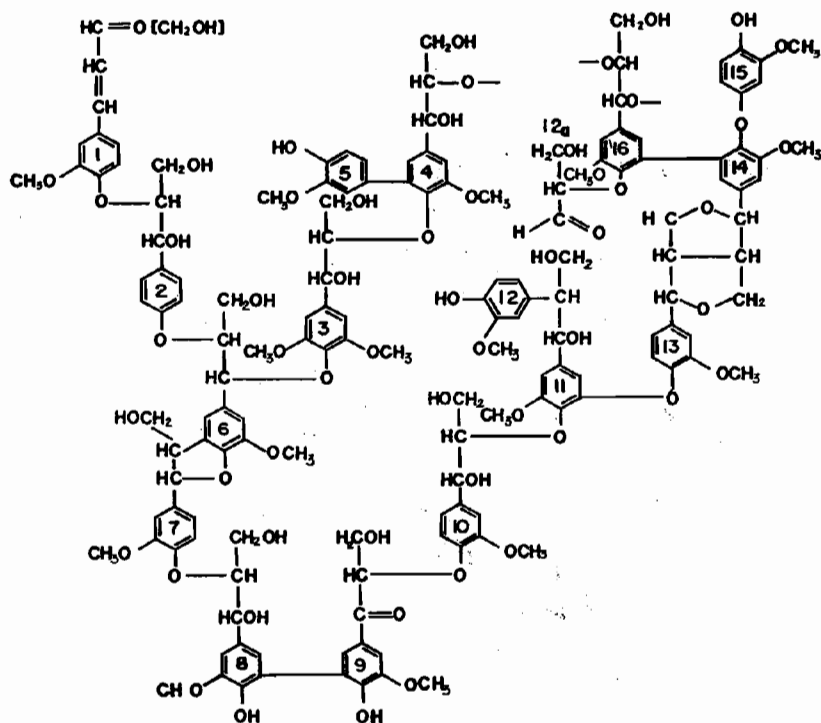


Figura 5. Estrutura da lignina.

Quadro 2. Principais enzimas do solo

Enzima ou sistema enzimático	Reação catalisada
Asparaginase	Asparagina + H ₂ O → Aspartato + NH ₃
Celulase	Hidrólise de ligações -1,4 glucan
Deamidase	Ácido carboxílico amido + H ₂ O → Ácido carboxílico + NH ₃
Desidrogenase e Glicosidase	XH ₂ + aceptor → X + aceptor.H ₂ Glicosídeo + H ₂ O → ROH + glucose
Lipase	Triglicéride + 3H ₂ O → glicerol + 3 Ácidos graxos
Nucleotidase	Desfosforilação de nucleotídeos
Fenoxidase	Difenol + 1/2 O ₂ → Quinona + H ₂ O
Fosfatase	Éster fosfatado + H ₂ O → ROH + PO ₄ ⁻⁻⁻
Fitase	Inositol hexafosfato + 6H ₂ O → Inositol + 6PO ₄ ⁻⁻⁻
Protease	Proteínas → Peptídeos e aminoácidos
Pirofosfatase	Pirofosfato + H ₂ O → 2PO ₄ ⁻⁻⁻
Urease	Uréia → 2NH ₃ + CO ₂

Como os polissacarídeos são os compostos orgânicos mais abundantes, a decomposição e mineralização de seus produtos tem um significado especial no ciclo do carbono no solo. Essa decomposição é catalisada pelas polisacaridases (4,11).

Outra enzima de extrema importância é a urease, a qual degrada uréia e tem como produtos finais o ácido carbônico e a amônia.

As enzimas proteolíticas são responsáveis pela degradação de aminoácidos; as exopeptidases separam os grupos livres (-COOH, -NH₂) do final das cadeias.

Conforme foi mostrado na figura 5, devido à sua complexidade, a lignina é um dos compostos mais difíceis de se decompor. Para tanto, é necessário um sistema de enzimas específicas, que só se encontra em poucas espécies de microrganismos, como os fungos basidiomicetos e bactérias lignolíticas. Após a primeira fase de degradação, os compostos aromáticos liberados podem ser metabolizados por uma população bastante diversificada de microrganismos (21).

Certas enzimas são ubíquas, ou seja, são encontradas em quase todos os solos. Exemplos típicos são a urease, catalase, e fosfatase. Outras enzimas são produzidas no solo somente sob circunstâncias especiais, como por exemplo a desidrogenase que parece estar condicionada à quantidade de matéria orgânica decomponível e intimamente relacionada à biomassa do solo (20).

Os primeiros produtos da degradação microbiana são passíveis de serem utilizados como fonte de energia para os grandes ciclos metabólicos, ou então, reciclados pelas sínteses microbianas. Podem ainda evoluir mais ou menos rapidamente por oxidação para policondensados pré-húmicos.

BIOMASSA MICROBIANA

Por definição (9), a biomassa microbiana é a parte viva da matéria orgânica do solo, excluídas as raízes e animais maiores que $5 \times 10 \mu\text{m}$. Com poucas exceções, ela representa 2 a 3% do carbono orgânico do solo, sendo que sua presença está relacionada diretamente com o teor de matéria orgânica.

Os microbiologistas fixaram o conceito da relação direta entre nível de atividade da biomassa microbiana com a fertilidade do solo, tanto em ambientes naturais, como manipulados pelo homem, tornando evidente a necessidade de desenvolvimento de métodos simples e confiáveis para a determinação da grandeza da população. Para qualquer domínio da Ciência do Solo, é interessante determinar as quantidades de C, N ou P que entram na composição do seu compartimento vivo, ou seja, a biomassa microbiana.

Diversos trabalhos de revisão sobre os métodos de quantificação da biomassa microbiana do solo já foram publicados (6;9;16).

DECOMPOSIÇÃO DE RESTOS VEGETAIS E ANIMAIS

Os processos de degradação enzimática microbiana das paredes celulares dos vegetais são conhecidos por celulólise e ligninólise.

Na celulólise, que é um processo rápido, a celulose é hidrolisada sob ação do complexo enzimático microbiano, em oligossacarídeos e glicose. As hemiceluloses são degradadas inicialmente para oligossacarídeos energéticos e posteriormente à xilose. As pectinas são transformadas em ácidos urônicos, após uma passagem por oligossacarídeos energéticos.

A lignina é considerada a principal fonte da matéria húmica do solo. Devido a sua estrutura polifenólica muito estável (Figura 5), sua degradação (ligninólise) é um processo relativamente lento. Suas etapas de transformação serão descritas posteriormente, no item **Gênese das substâncias húmicas** desse capítulo.

Outros polifenóis presentes nos vacúolos dos vegetais, sob a forma de heterosídeos, como os taninos, são também liberados por hidrólise enzimática. Como eles são muito reativos ao ar, se oxidam espontaneamente em pigmentos

marrons do tipo húmico. Entre os taninos, os chamados condensados podem constituir precursores dessas substâncias húmicas.

Os exsudatos, produzidos pela atividade das raízes das plantas vivas, são compostos hidrofílicos solúveis ou coloidais, formados por proporções de proteínas e polissacarídeos variáveis segundo a planta, seu desenvolvimento vegetativo e as características físicas e químicas do solo (ver capítulo 4). Em geral a fração de polissacarídeos predomina e contém uma alta proporção de ácidos poliurônicos (Figura 6), cujos grupos carboxílicos são responsáveis pela propriedade da troca catiônica desses compostos.

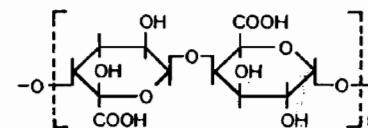


Figura 6. Exemplo de substância liberada pelas raízes (ácido poligalacturônico).

Com a morte das células, os constituintes nitrogenados são transformados por autólise; os aminoácúcares evoluem para aminas e as proteínas para aminoácidos e polipeptídeos hidrossolúveis. A degradação dos ácidos nucléicos libera as bases púricas e pirimídicas que se associam às substâncias húmicas ou então são adsorvidas às superfícies dos argilominerais.

Os constituintes hidrogenados das paredes manifestam maior remanescência nos solos, devido à sua menor velocidade de decomposição. É particularmente o caso da quitina, que constitui uma das principais moléculas estruturais dos artrópodos e dos fungos, e do ácido murâmico, seu homólogo das paredes bacterianas (Figura 7).

As clorofilas são rapidamente degradadas, mas os produtos finais, os feoforbídeos, podem permanecer no meio em quantidades muito pequenas por longo tempo, podendo ser usados como traçadores geoquímicos. Os pigmentos carotenóides, as graxas e ceras são também lentamente oxidadas.

Uma representação gráfica elaborada por Minderman (15) sobre a velocidade de decomposição dos principais constituintes vegetais em condições temperadas está representada na figura 8.

Esta figura confirma a elevada estabilidade relativa dos fenóis e das graxas, comparada com aquela dos carboidratos.

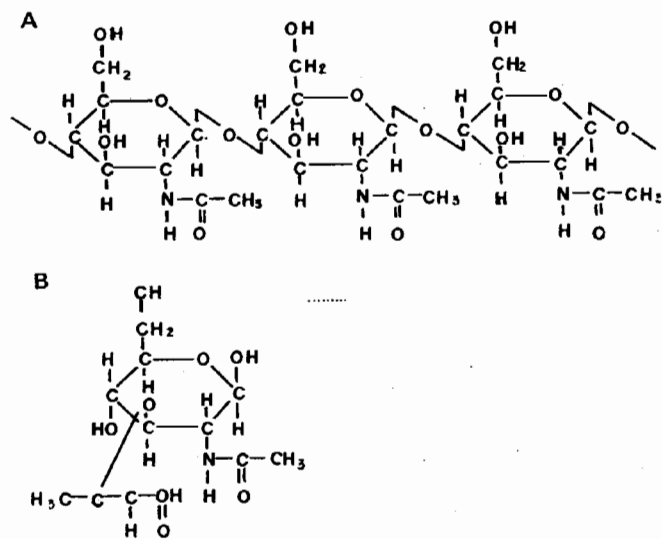


Figura 7. Constituintes das paredes celulares de microrganismos. A: Quitina: parede celular dos fungos. B: Ácido murâmico: parede celular das bactérias.

HÚMUS

GÊNESE DAS SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

A gênese das substâncias húmicas ou humificação é a parte do ciclo do carbono na qual as formas orgânicas do carbono se acumulam e se estabilizam no solo como indicado na figura 9.

Apesar dos inúmeros estudos, a determinação da estrutura das substâncias húmicas, bem como a bioquímica de sua formação constituem ainda hoje um dos aspectos pouco compreendidos da química do húmus. Várias obras de síntese já foram escritas sobre o assunto, das quais destacamos: Kononova (10), Schnitzer e Khan (18), Giesecking (5) e Stevenson (19).

Existem pelo menos quatro vias principais, esquematizadas na figura 10, de formação das substâncias húmicas durante a decomposição de resíduos no solo (19). O principal processo é a oxidação de substratos hidrolisados monoméricos, para conduzir a polímeros macromoleculares de cor mais ou menos escura e de peso molecular geralmente elevado.

Os primeiros estudos consideravam que o húmus era formado diretamente de produtos de degradação microbiana incompleta da lignina. A teoria representada pela via 4 foi proposta por Waksman (24) e resulta das principais modificações da lignina, que perde os grupos metoxil (CH_3O) com geração de hidroxifenóis e a oxidação de cadeias alifáticas para formar os grupos COOH . Transformações posteriores mal conhecidas levam até a produção de ácidos húmicos e depois os fúlvicos que, juntamente com a humina, formam o húmus do solo.

Na via 3, os aldeídos e ácidos fenólicos, liberados pela lignina durante o ataque microbiano, convergem enzimaticamente para quinonas, as quais se polimerizam na presença de compostos nitrogenados para formar macromoléculas parecidas com o húmus.

A via 2 é similar à via 3 exceto que os polifenóis são sintetizados por microrganismos a partir de fontes de carbono não lignínicas, como por exemplo, a celulose. Os polifenóis são então enzimaticamente oxidados a quinonas e convertidos para substâncias húmicas.

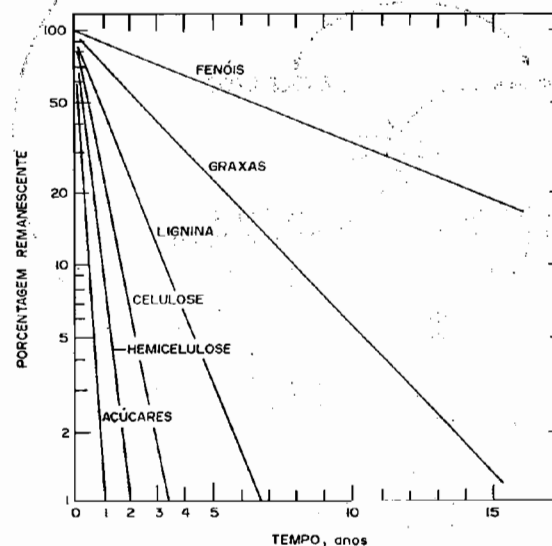


Figura 8. Curvas de decomposição de constituintes orgânicos dos vegetais (adaptado de Minderman, (15)).

A teoria da formação do húmus a partir de açúcares (via 1) é talvez a mais antiga. Segundo Maillard (14), os açúcares redutores e aminoácidos, formados como produtos intermediários do metabolismo microbiano, continuam o processo de polimerização não enzimática para formar polímeros nitrogenados pardos semelhantes ao húmus.

As vias 2 e 3, de acordo com Stevenson (19), formam as bases da popular teoria dos polifenóis.

As quatro vias podem operar simultaneamente no solo, porém, não com a mesma extensão ou na mesma ordem de importância. A via da lignina pode operar predominantemente em solos mal drenados e em áreas hidromórficas,

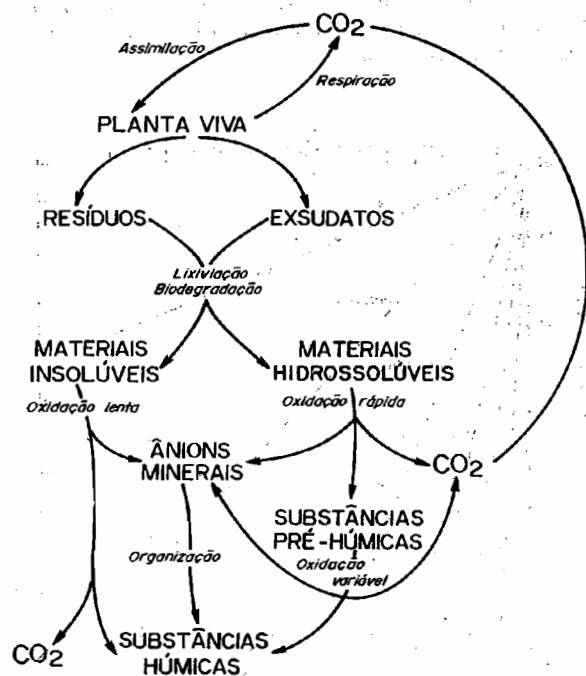


Figura 9. Ciclo do carbono no solo.

enquanto que a síntese a partir de polifenóis, nos lixiviados da serapilheira, podem ser de considerável importância para certos solos sob floresta. Devido à rápida assimilação biológica dos açúcares, a teoria da condensação de aminoaçúcares é válida principalmente para meios de baixa atividade biológica.

A estrutura hipotética dos ácidos húmicos e fúlvicos pode ser vista na figura 11.

As substâncias húmicas consistem de uma mistura heterogênea de compostos, muitos deles ligados entre si ao acaso, tornando-se praticamente impossível representar a estrutura exata de seus encadeamentos moleculares.

Pode-se observar no esquema da figura 11 que os ácidos húmicos apresentam grupos fenólicos OH livres e ligados, estruturas de quinonas, unidades de oxigênio como ponte e grupos COOH variadamente dispostos no anel aromático. Mostra também o nitrogênio como um componente estrutural, e ainda a ocorrência de carboidratos e proteínas. Os ácidos fúlvicos são constituídos basicamente por ácidos fenólicos e benzocarboxílicos, ligados entre si por pontes de hidrogênio com abundância de grupos COOH formando uma estrutura polimérica de estabilidade considerável.

Os principais componentes do húmus constam do quadro 3. Não há grandes diferenças na composição do húmus de regiões climáticas distintas do globo terrestre.

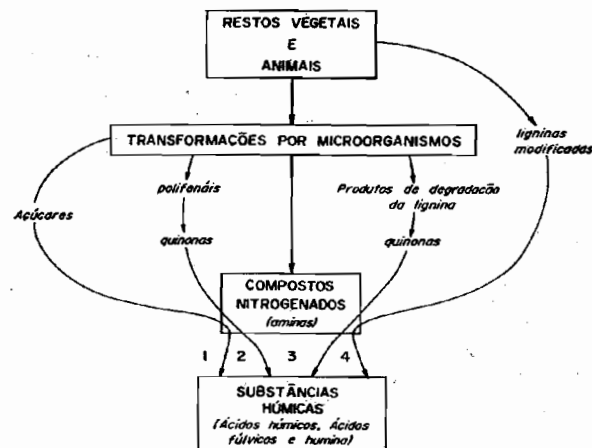


Figura 10. Mecanismos de formação das substâncias húmicas (Stevenson, 19).

FUNÇÕES DO HÚMUS NO SOLO

A matéria orgânica em geral favorece o processo de agregação das partículas do solo. O papel dos polissacarídeos nesse processo é de extrema importância (7,22).

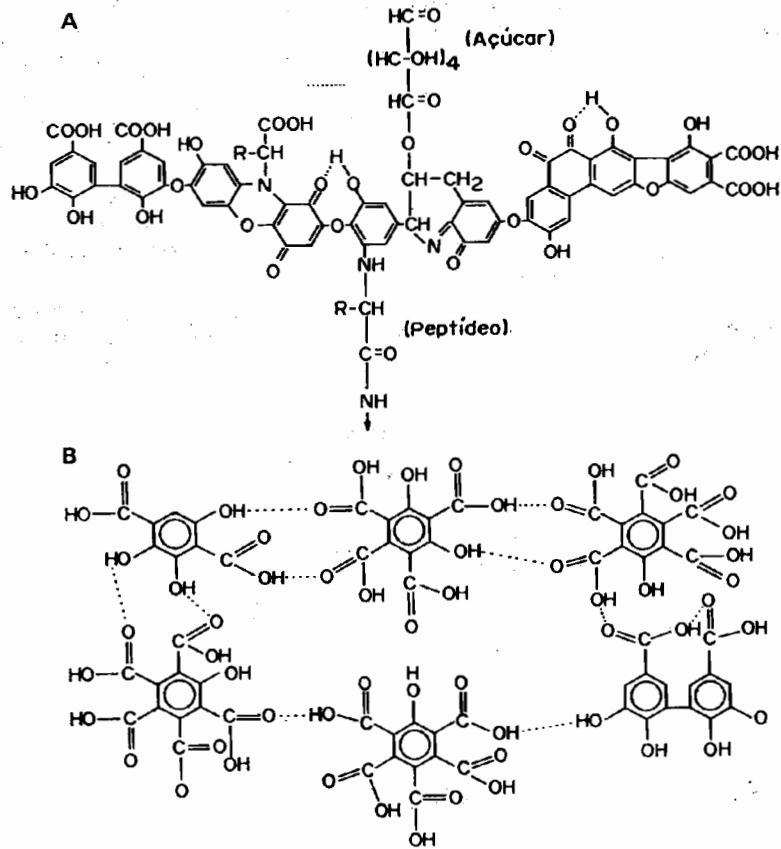


Figura 11. A: Estrutura hipotética dos ácidos húmicos (Stevenson, 20). B: Estrutura hipotética dos ácidos fúlvicos (Schnitzer & Khan, 18).

Quadro 3. Principais compostos orgânicos presentes nos solos

Compostos de enxofre	Compostos do fósforo	Compostos fenólicos	Compostos nitrogenados	Glucídeos	Lipídeos	Moléculas orgânicas simples
Aminoácidos (cisteína, metionina)	Inositolfosfatos	Ácidos e aldeídos fenólicos	Aminoácidos Bases nucleícas	Oses Ácidos urônicos	Hidrocarbonetos leves Ácidos graxos	Moléculas orgânicas simples
Ester sulfatos	Fosfolipídeos	Ácidos fenólicos	Osaminas	Ácidos silfáticos	Glicérides Clorofilas Esteróis Terpenos	
Vitamina Tiamina, biotina Coenzima A	Ácidos nucleícos	Flavonóides Pigmentos vegetais e animais diversos	Peptídeos Heteroproteínas	Polissacarídeos	Ceras, resinas	Moléculas orgânicas Policondensadas
Fósforo e enxofre orgânicos não identificados		Ligninas	Homoproteínas		Hidrocarbonetos Polinudeares	
			Melaninas animais vegetais fúngicas			Sistema Organo-Mineral

Complexidade crescente

Entre as propriedades químicas do solo que envolvem a matéria orgânica, estão aquelas relacionadas com a fixação, o armazenamento e a liberação de nutrientes. A capacidade de troca catiônica está ligada às cargas negativas de superfície distribuídas entre os argilominerais e a matéria orgânica (19). Neste último caso, os grupos ionizáveis, principalmente os carboxílicos e fenólicos, são aqueles que dão origem a cargas essencialmente dependentes do pH, ou seja, quanto menor o pH do solo, menor a dissociação e a troca de cátions. Nos solos, existe uma proporção variável de matéria orgânica persistente na forma hidrolisável, que tem como propriedade abaixar o grau de oxidação dos cátions metálicos, e portanto favorecer a sua solubilização e a migração na forma de complexos. Este fenômeno conhecido como queluviação aumenta com a acidez do solo e predomina nos podzóis (23). O húmus tem uma função nutricional, na medida em que serve como um reservatório de lenta liberação de nitrogênio, fósforo e enxofre para o crescimento das plantas.

Quando o equilíbrio de um ecossistema natural é rompido e o solo utilizado para fins agrícolas, nota-se que, apesar da incorporação dos restos da cultura, o solo se torna cada vez mais pobre em carbono (2,3,10,17).

Utilizando a técnica isotópica do ^{13}C , foi possível acompanhar os ganhos e perdas de matéria orgânica e estabelecer a sua origem, em solo desmatado cultivado com cana-de-açúcar (Figura 12).

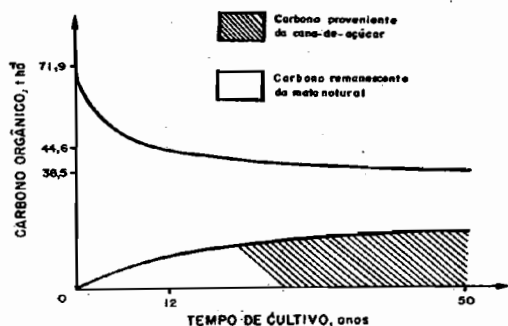


Figura 12. Curva de variação do estoque de carbono orgânico do solo total proveniente da cana-de-açúcar e remanescente da mata natural, em função do tempo de cultivo.

CONCLUSÕES

Para uma boa compreensão dos processos integrantes do ciclo do carbono, pode-se dividi-lo em três fases principais:

1. Uma fase anabólica ou de organização do dióxido de carbono atmosférico, principalmente pelos organismos fotossintetizadores;

2. Uma fase de liberação dos produtos fotossintetizados e de sua estabilização no solo.

3. Uma fase catabólica ou de mineralização de substratos orgânicos e de transferência do carbono mineral à atmosfera.

Dentre estas três fases, a segunda e a maior parte da terceira ocorrem no solo, constituindo o *CICLO INTERNO DO CARBONO*. Na maioria das reações bioquímicas envolvidas nesse ciclo, participam compostos de nitrogênio, fósforo, enxofre e outros nutrientes, através da atividade dos microrganismos do solo. A biomassa microbiana representa uma fração quase desprezível do carbono do solo, embora se possa considerar que ela controla a maior parte das reações que integram o ciclo interno do carbono, conseguindo balancear globalmente a fotossíntese através dos processos de respiração edáfica.

LITERATURA CITADA

- ALBERSHEIM, P. The wall of growing plant cells. *Sci. Amer.*, New York, 232(4):80-9b, 1975.
- ALLISON, F.E. Soil organic matter and its role in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1973. 637p.
- CERRI, C.C. Dinâmica da matéria orgânica no agrossistema cana-de-açúcar. 1986. 197p. (Tese de livre docência)
- FINCH, P.; HAYES, M.H.B. & STACEY, M. The biochemistry of soil polysaccharides. In: McLAREN & SKUJINS, eds., *Soil biochemistry*. New York, Marcel Decker, 1971. p.257-319, v.2.
- GIESEKING, J.E. Soil components. Organic components. Berlin, Lange Springer, 1975. 534p.
- GRISI, B.M. Metodologia da determinação de biomassa microbiana de solo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 8:167-172, 1984.
- GUCKERT, A. Rôle des polysaccharides dans les processus d'agregation du sol. Paris, Institut National Agronomique, 1985. p.115-138.
- JENKINSON, D.S. The chemistry of soil process. New York, John Wiley & Sons, 1981. p.505-555.
- JENKINSON, D.S. & LADD, J.N. Soil biochemistry. In: PAUL, E.A. & LADD, J.N., eds. New York, Marcel Dekker, 1981. p.415-471. v.5.

10. KONONOVA, M.M. Soil organic matter, its nature, its role in soil formation and in soil fertility. Oxford. Pergamon Press, 1966. 450p.
11. KISS, S.; DRAGAN-BULARDA, M. & RADULESCU, D. Soil enzymes. In: BURNS, R.G., ed. London, Academic Press, 1978. p.117-147.
12. LADD, J.N. Origin and range of enzymes in soil. In: BURNS, R.G. ed., Soil enzymes. London, Academic Press, 1978. 380p.
13. LEHNINGER, A.L. Princípios de bioquímica. São Paulo, Sarvier, 1986. 725p.
14. MAILLARD, L.C. Identité des matières humiques de synthèse avec matières humiques naturelles. Ann. Chimie, Paris, 1917. p.113-152.
15. MINDERMAN, G. Addition, decomposition and accumulation of organic matter in forests. J. Ecol., London, 56:360, 1960.
16. NICOLARDOT, B.; CHAUSSOD, R. & CATROUX, G. Revue des principales méthodes disponibles pour mesurer la biomasse microbienne et ses activités. "Science du Sol - Bulletin de l'A.F.E.S.", Versailles, 1982. p. 253-261.
17. NYE, P.H. & GREENLAND, D.J. Changes in the soil after clearing tropical forest. Pl. Soil, Hague, 21(1):101-102, 1964.
18. SCHNITZER, M. & KHAN, S.U. Soil organic matter. Amsterdam, Elsevier, 1978. 319p.
19. STEVENSON, F. J. Humus chemistry. New York, John Wiley & Sons, 1982. 443p.
20. STEVENSON, F. J. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. New York, John Wiley & Sons, 1985. 380p.
21. SWIFT, M. J.; HEAL, O.W. & ANDERSON, J.M. Decomposition in terrestrial ecosystems. Studies in ecology, Essex, Blackwell Scientific Publications, 1979. 372p.
22. TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci., London, 33:141-143, 1982.
23. TURENNE, J.F. Modes d'humification et différenciation podzolique. França, ORSTOM, 1977. 173p. (Tese)
24. WAKSMAN, S.A. Humus, origin, chemical composition and importance in nature. London, Ballieré. Tindall and Cox. 1936. 76p.

POLUIÇÃO ORGÂNICA E SEU CONTROLE

Márcio R. Lambais⁽¹⁾

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve uma grande convergência de interesses nas questões ambientais, e muito se tem debatido sobre elas. A poluição ambiente está estritamente relacionada com a atividade humana. Bockris (4) diz que o homem é o poluente básico e original, pois durante o longo período de existência do planeta e dos animais, sempre houve um desenvolvimento ecológico harmonioso, perturbado no curto período de existência do homem. Esse distúrbio era inevitável, pois de difícil controle a produção e o acúmulo de resíduos resultantes do desenvolvimento da atividade humana, visando a adequação do meio ambiente às suas necessidades de maior conforto e à produção de alimentos para uma população com taxa de crescimento muito elevada. Os complexos sistemas microbiológicos que reciclam esses resíduos desenvolveram-se ao longo de milhões de anos, principalmente no solo. No entanto, a taxa de degradação dos resíduos é extremamente inferior à sua taxa de geração, e, além disso, muitos dos resíduos não são compostos naturais, e sim sintetizados pelo homem.

POLUENTES ORGÂNICOS POLUENTES ORGÂNICOS NATURAIS

Os resíduos orgânicos têm sido utilizados há séculos para melhorar a produção agrícola, através de sua incorporação direta ao solo. No entanto, a

⁽¹⁾ Departamento de Ciência do Solo. ESALQ/USP. Caixa Postal 9, CEP 13400 Piracicaba, SP.