



André Henrique Rosa e Julio Cesar Rocha

Este trabalho apresenta aspectos importantes da litosfera como origem e formação, composição, classificação, propriedades físico-químicas, fertilidade, manejo e degradação decorrentes de ações antrópicas. Traz uma abordagem diferenciada, contextualizando fenômenos ambientais que ocorrem no solo, utilizando conceitos de contínuos fluxos de matéria e energia entre os demais reservatórios – hidrosfera e atmosfera. Apresenta aspectos da ciência do solo, sempre com uma visão global do ponto de vista ambiental.

► litosfera, solo, química do solo, manejo, ações antrópicas ◀

7

“... pois a **chuva** voltando pra **terra** traz coisas do **ar...**” Raul Seixas / Paulo Coelho

Origem e formação da litosfera

Para melhor entender os fenômenos ambientais, é de fundamental importância raciocinar com base nos ciclos biogeoquímicos. Ou seja, as ocorrências devem ser sempre interpretadas considerando-se os importantes fluxos de matéria e energia, os quais ocorrem dinamicamente entre os três grandes compartimentos reguladores: litosfera, hidrosfera e atmosfera.

Embora para fins didáticos, muitas vezes, as questões ambientais sejam discutidas de forma compartimentalizada, não se pode esquecer que constantemente há fluxos (trocas) de energia e matéria entre esses reservatórios.

Há cerca de cinco bilhões de anos, nosso planeta era uma bola de minerais fundidos e incandescentes como a lava dos vulcões. Em seguida, ini-

Para melhor entender os fenômenos ambientais, é de fundamental importância raciocinar com base nos ciclos

ciou-se um lento processo de resfriamento dessa massa incandescente, com formação das primeiras rochas e da atmosfera, sendo esta devida à aglomeração de gases ao redor do planeta. Foi então que, submetida a uma pressão atmosférica 300 vezes maior que a atual, a água conseguiu passar para o estado líquido, acumular-se em determinadas regiões e iniciar o processo cíclico de precipitação, evaporação, formação de nuvens e novas precipitações, as quais ocorrem até hoje.

A atmosfera daquela época possuía composição química diferente da atual. Era muito mais corrosiva em consequência das contínuas erupções vulcânicas, lançando ao espaço enormes quantidades de gás carbônico, enxofre e cloro, os quais se transformaram em ácidos carbônico, sulfúrico e clorídrico, respectivamente. Estes compostos, dissolvendo-se nas águas da chu-

va, transformavam-na em um líquido extremamente corrosivo (Branco e Cavinatto, 1999).

Assim, ao mesmo tempo em que as chuvas permitiram o resfriamento das rochas superficiais, as quais se solidificavam, iniciou-se um duplo processo de desgaste e desagregação dessas: a abrasão e o ataque químico. Estes processos, aliados ao calor escaldante do dia e forte frio à noite, levaram à quebra das rochas em pedaços de diferentes granulometrias tais como pedras, cascalho, areia e argila.

Ao longo do tempo, rochas sedimentares formadas no fundo dos oceanos vieram à superfície e o contrário também ocorreu. Sedimentos que já estavam na superfície, inclusive formando solos férteis cobertos de florestas, afundaram, em consequência de movimentos tectônicos, e foram recobertos, posteriormente, por novas rochas sedimentares ou mesmo vulcânicas. Tal processo originou grandes depósitos de plantas e microrganismos fossilizados.

Estes fósseis vieram a constituir as jazidas de carvão e de petróleo, hoje utilizadas como combustíveis ou fontes de energia. Além desses materiais, retiram-se do subsolo inúmeros minerais, que constituem matéria-prima para a indústria, tais como ferro, enxofre e manganês.

Todo esse lento processo cíclico de formação dos solos e sua associação com microrganismos e plantas levou milhões de anos para se concretizar e permitiu o crescimento dos vegetais em terra firme pois, até então, devido à atmosfera altamente inóspita, viviam somente nos mares, que ocupavam a maior parte da superfície terrestre (Jardim, 2001; Rodrigues, 2001). Como consequência, surgiram, também, os primeiros animais terrestres criando, com os vegetais e o solo, estruturas e sistemas cíclicos cada vez mais complexos, os quais constituem a natureza terrestre atual.

O solo pode ser representado como um ciclo natural do qual participam fragmentos de rochas, minerais, água, ar, seres vivos e seus detritos em decom-

posição. Estes resultam de fatores climáticos no decorrer do tempo e da atividade combinada de microrganismos, decompondo restos de animais/vegetação, respectivamente. Desta forma, o solo é considerado resultado das interações entre os compartimentos litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera. Os principais processos que levaram à sua formação são apresentados na Figura 1.

Composição dos solos

Os solos possuem três fases – sólida, líquida e gasosa – cujas proporções relativas variam de solo para solo e, num mesmo solo, com as condições climáticas, a presença de plantas e manejo. Em geral, na composição volumétrica porcentual de um solo, que apresenta condições ótimas para o crescimento de plantas, verificam-se 50% de fase sólida (45% de origem mineral e 5% orgânica), 25% de fase líquida e 25% de fase gasosa. Os quatro componentes (mineral, orgânico, líquido e gasoso) es-

O solo é considerado resultado das interações entre os compartimentos litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera.

tão intimamente misturados, permitindo a ocorrência de reações e constituindo um ambiente adequado para a vida vegetal (Malavolta, 1976).

Fase sólida

A fração mineral da fase sólida é resultante da desagregação física das rochas. Portanto, possui dimensões bem menores, porém com composição química idêntica à da rocha-mãe da qual se originou.

A fração orgânica é constituída pela porção do solo formada de substâncias provenientes de plantas e animais mortos, bem como produtos intermediários da degradação biológica feita por bactérias e fungos. O material orgânico de fácil decomposição é transformado em gás carbônico, água e sais minerais.

Nos solos férteis, com densa vegetação, existe uma complexa fauna constituída de pequenos mamíferos, tais como ratos e outros roedores, e minúsculos protozoários, minhocas, insetos e vermes, os quais têm função muito importante na trituração, aeração, decomposição e mistura da matéria orgânica no solo.

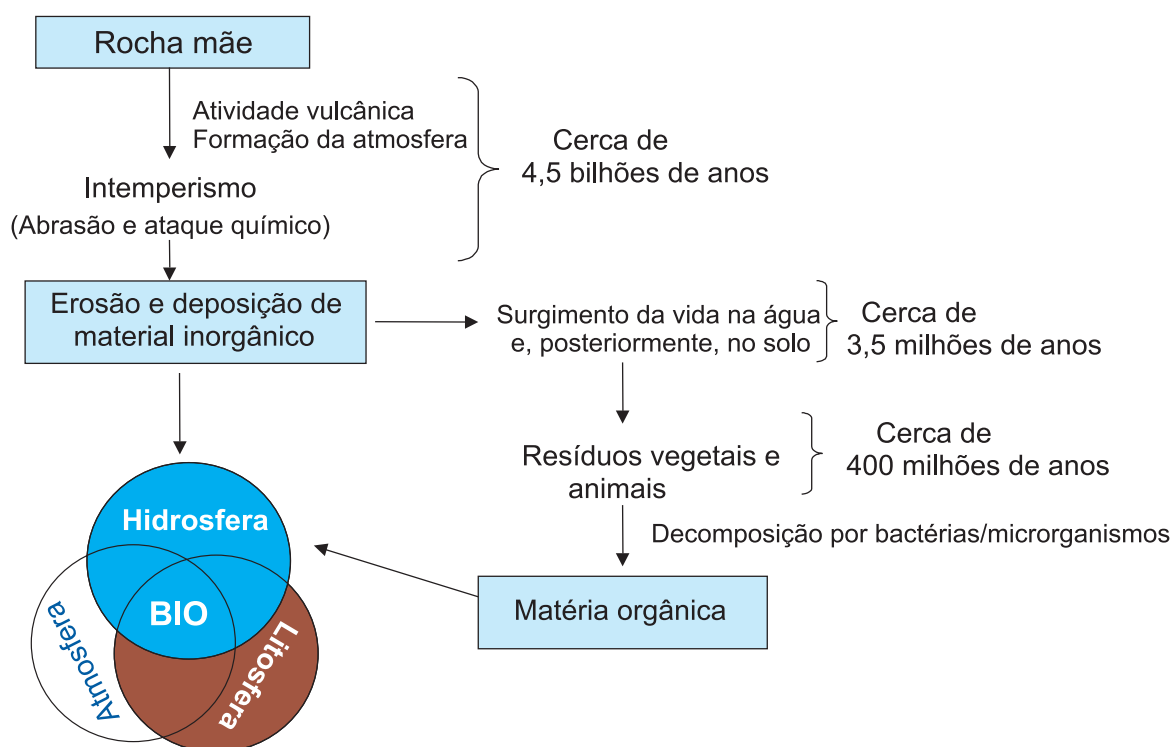


Figura 1: Processo de formação do solo.

Fase líquida

Representa a chamada solução do solo: “uma solução de eletrólitos quase em equilíbrio, que ocorre no solo em condições de não-saturação de umidade”. E isto é assim porque a água do solo contém numerosos materiais orgânicos e inorgânicos, que foram dissolvidos da fase sólida.

As principais características do conceito de solução do solo são:

- constitui uma parte maior do fator de intensidade no fornecimento de nutrientes para as plantas;
- é o meio para a maioria dos processos químicos e biológicos que ocorrem no solo;
- é o principal meio para o movimento de materiais no solo.

Sempre que chove, ou quando se pratica a irrigação, as águas se infiltram, preenchendo os espaços existentes entre as partículas de solo. A quantidade de água absorvida depende da permeabilidade do solo, pois quando esta é pequena, a maior parte da água escorre pela superfície em direção aos vales e rios, carregando consigo grandes quantidades de sedimentos e elementos nutritivos. Este fenômeno natural é chamado de erosão e está ilustrado na Figura 2.

O fluxo de matéria e energia e as importantes inter-relações entre os três



Figura 2: Foto ilustrativa do processo de erosão em solos (http://www.vidagua.org.br/bauru_ambiental/solobauru.shtm).

grandes reservatórios (atmosfera, hidrosfera e litosfera) podem ser exemplificadas pela água da chuva. Esta, ao se formar na atmosfera, já constitui uma solução de várias substâncias absorvidas do ar. Quando há precipitação, além das diversas espécies trazidas da atmosfera, ao atravessar as camadas de solo, a água da chuva passa a transportar outras substâncias antes de chegar às raízes. No solo, a capacidade da água para também dissolver diferentes substâncias é ainda bastante aumentada pela presença do gás carbônico, resultante da respiração das raízes e dos microrganismos.

A Tabela 1 resume dados compilados sobre a composição da solução do solo. Vê-se que todos os macronutrientes, exceto o fósforo, geralmente estão presentes em concentrações da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} mol L⁻¹. Em geral, o fósforo tem menor concentração, de 10^{-5} a 10^{-6} mol L⁻¹.

Todos esses elementos químicos existem em quantidades limitadas no solo. Nos ambientes naturais, tais elementos são continuamente reciclados. Isto é, à medida que são absorvidos pelas raízes, são novamente depositados na superfície por meio da queda contínua de folhas, frutos, ramos e outras partes vegetais. Ou, participam de um ciclo biogeoquímico maior, transferindo-se para outros compartimentos como a hidrosfera e/ou a atmosfera.

Tabela 1: Concentração típica da solução do solo*.

Elementos	Solos em geral / 10^{-3} mol L ⁻¹	Solos ácidos / 10^{-3} mol L ⁻¹
Nitrogênio (N)	0,16 - 55	12,1
Fósforo (P)	0,001 - 1	0,007
Potássio (K)	0,2 - 10	0,7
Magnésio (Mg)	0,7 - 100	1,9
Cálcio (Ca)	0,5 - 38	3,4
Enxofre (S)	0,1 - 150	0,5
Cloro (Cl)	0,2 - 230	1,1
Sódio (Na)	0,4 - 150	1,0

Fonte: (MALAVOLTA, 1976).

*Nota: os elementos encontram-se no solo como componentes de substâncias, ou espécies químicas, tais como nitratos, fosfatos, íons Mg⁺², íons Ca²⁺ etc.

Fase gasosa

Outra caracterização da dinâmica de fluxos entre os compartimentos (litosfera, atmosfera e hidrosfera) é a constatação de que a fase gasosa do solo apresenta, qualitativamente, os mesmos componentes principais presentes no ar atmosférico. Entretanto, do ponto de vista quantitativo, pode haver grandes diferenças, conforme se verifica na Tabela 2. Ou seja, devido à respiração das raízes e dos microrganismos e à decomposição da matéria

O ar circulante no interior do solo é a fonte de oxigênio para a respiração das células das raízes, dos microrganismos e pequenos animais produtores de húmus.

orgânica e de reações ocorridas no solo, há consumo de O₂ e liberação de CO₂ com constantes alterações nos fluxos entre os compartimentos e, conseqüentemente, a composição do ar do solo não é fixa.

O ar circulante no interior do solo é a fonte de oxigênio para a respiração das células das raízes, bem como dos microrganismos e pequenos animais produtores de húmus. A maioria das plantas cultivadas requer solos bem arejados para atingir máximo desenvolvimento radicular. De modo geral, os sintomas de falta de oxigênio (amarelecimento das folhas, por exemplo) aparecem quando a concentração de O₂ nos espaços porosos está muito abaixo de 15%. Por outro lado, parece não haver benefício em se aumentar tal concentração acima de 21% (Branco e Cavinatto, 1999).



Tabela 2: Composição média dos principais componentes presentes no ar atmosférico e no ar do solo.

Ar	Componentes / (%)		
	O ₂	CO ₂	N ₂
Atmosférico	21	0,03	72
No solo	19	0,9	79

Fonte: Malavolta (1976)

CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Atualmente, na maior parte do mundo é utilizado o sistema de classificação denominado genético-natural, o qual é baseado nas características e fatores que levaram à formação do solo. A Tabela 3 mostra as diferentes caracte-

terísticas dos principais tipos de solos encontrados no Estado de São Paulo.

Os *latossolos* foram formados sob ação de lavagens alcalinas, em regiões quentes e úmidas florestadas. Isto determinou a perda de parte de sílica (eluviação) do material original, permanecendo os óxidos de ferro e de alumínio. A argila silicatada presente é a caolinita.

Litossolos são solos jovens, pouco desenvolvidos e de pequena espessura, assentados diretamente sobre as rochas consolidadas ou, às vezes, aflorendo a superfície.

Os *regossolos* caracterizam-se por serem solos profundos, porém em início de formação arenosa e, portanto, com drenagem excessiva. Apresentam

camada superficial mais escurecida, devido à presença de matéria orgânica.

Solos formados sob excesso de água, em condições de aeração deficiente, são denominados *hidromórficos*. Estes solos de coloração acinzentada são geralmente ácidos, pobres em cálcio e magnésio e possuem acúmulo de matéria orgânica nas camadas superficiais.

Solos *podzólicos* e *podzolizados* são formados por processo de lavagens ácidas sobre material de origem arenosa, em regiões úmidas e florestadas. Como consequência das lavagens, as argilas são arrastadas para o interior do solo, ficando as camadas superficiais mais arenosas como, ilustrado na Figura 3.

Tabela 3: Limites de variação dos constituintes de alguns solos do Estado de São Paulo*.

Solos	pH	C (%)	N (%)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺	Al ³⁺
Latossolos	4,00-6,10	0,42-4,08	0,03-0,38	0,04-0,77	0,17- 6,25	0,10-2,42	2,58-9,49	0,25-3,40
Podzólicos	4,10-7,60	0,28-2,51	0,03-0,21	0,03-0,50	0,63-22,19	0,11-2,46	1,05-5,16	0,00-4,89
Hidromórficos	3,80-5,60	0,82-3,31	0,06-0,29	0,04-0,07	0,76- 1,16	0,60-0,77	4,61-6,23	2,08-3,40
Litossolos	4,30-5,10	1,15-3,12	0,18-0,41	0,20-0,78	0,79-27,17	1,18-8,42	0,00-6,27	0,00-7,06
Regossolos	4,50-5,30	0,33-0,93	0,03-0,07	0,02-0,06	0,14-1,56	0,02-0,44	1,25-1,42	0,54-1,86

*Adaptada de Malavolta (1976)

10



Figura 3: Características de perfil de solos podzólicos da bacia do Rio Negro-AM. Foto feita durante coleta de amostras de solo. (Projeto FAPESP 00/13517-1)

Perfil do solo

O solo não é formado apenas pela camada superficial de alguns centímetros a qual o agricultor cultiva, mas também por outras camadas abaixo dessa. Em geral, as características do solo variam com a profundidade por causa da maneira pela qual ele se formou ou depositou, devido às diferenças de temperatura, teor de água, concentração de gases (particularmente CO_2 e O_2) e movimento descendente de solutos e de partículas. Ou seja, os fluxos de material formam diferentes camadas (denominadas horizontes), que podem ser identificadas a partir do exame de uma secção vertical do solo, que é chamada perfil do solo (Figura 4). Os horizontes diferenciam-se pela espessura, cor, distribuição e pelos arranjos das partículas sólidas e poros, distribuição de raízes e outras características, que resultam da interação de fatores influenciadores na formação do solo. A caracterização mais detalhada dos horizontes permite identificar, classificar e planejar o uso mais adequado do solo.

Características das camadas no perfil do solo

(O) Horizonte orgânico com matéria orgânica recente e/ou em decomposição.

(A1, A2 e A3) Camadas onde estão se decompondo galhos, frutos, folhas, sementes, além de fezes, urina, ossos e restos de animais. Todo esse material em decomposição libera minerais, os quais são absorvidos pelas raízes ou levados pela água para a camada inferior.

(B) Camada rica em argila, carbonatos e outros materiais trazidos pela água das camadas superiores.

(C) Pedras e cascalho que fazem parte da rocha localizada abaixo do solo, ou que foram trazidos por algum rio de tempos passados.

Rocha: Dela provêm os sedimentos do solo acima.

Os horizontes são designados por letras maiúsculas. Assim, as letras A, B, e C representam os principais horizontes do solo. As letras O e R são também utilizadas, para identificar um horizonte orgânico em solos minerais e a rocha inalterada, respectivamente. De acordo com Malavolta (1976), as principais características dos horizontes que um solo pode conter são:

- Horizonte O** – horizonte orgânico com matéria orgânica fresca ou em decomposição. Em condições de má drenagem esse horizonte é denominado H.
- Horizonte A** – resultante do acúmulo de material orgânico misturado com material mineral. Geralmente apresenta coloração mais escura, devido ao material orgânico humificado. Em solos onde há eluviação (perda de parte da argila) muito intensa, forma-se uma camada de cores claras com menor concentra-

ção de argila abaixo do horizonte A. Essa camada caracteriza o horizonte denominado E.

- Horizonte B** – caracterizado pelo acúmulo de argila, ferro, alumínio e pouca matéria orgânica. É denominado de horizonte de acúmulo ou iluvial. O conjunto dos horizontes A e B caracteriza a parte do solo que sofre influência das plantas e dos animais.
- Horizonte C** – camada de material não consolidado, com pouca influência de organismos, geralmente apresentando composição química, física e mineralógica similar à do material onde se desenvolve o solo.

- Rocha R** – rocha inalterada, que poderá ser, ou não, a rocha matriz a partir da qual o solo se desenvolveu.

As propriedades físico-químicas dos solos são devidas principalmente à elevada superfície específica e à alta reatividade apresentada pelos componentes da fração argila.

Propriedades físico-químicas dos solos

As propriedades físico-químicas dos solos são devidas principalmente à elevada superfície específica e à alta reatividade apresentada pelos componentes da fração argila. Esta, geralmente é constituída por minerais secundários, óxidos de ferro e alumínio cristalinos ou amorfos e matéria orgânica. Têm tamanhos iguais ou inferiores a $4 \mu\text{m}$, caráter coloidal e carga líquida negativa saturada por cátions diversos. De modo geral, estas características são devidas a certas propriedades estruturais da fase dispersa, como tamanho, forma e área superficial das partículas. Portanto, devido aos diferentes mecanismos de formação admite-se que a carga total negativa dos solos seja constituída por dois componentes. Um constante, chamado de “carga permanente” e outro variável denominado de “dependente de pH”. O silte (partículas de diâmetro de $2-20 \mu\text{m}$) e a areia (partículas de diâmetro de $200-62 \mu\text{m}$), são menos eficientes nos processos químicos, pois são constituídos de partículas mais grosseiras de minerais primários e quartzos.

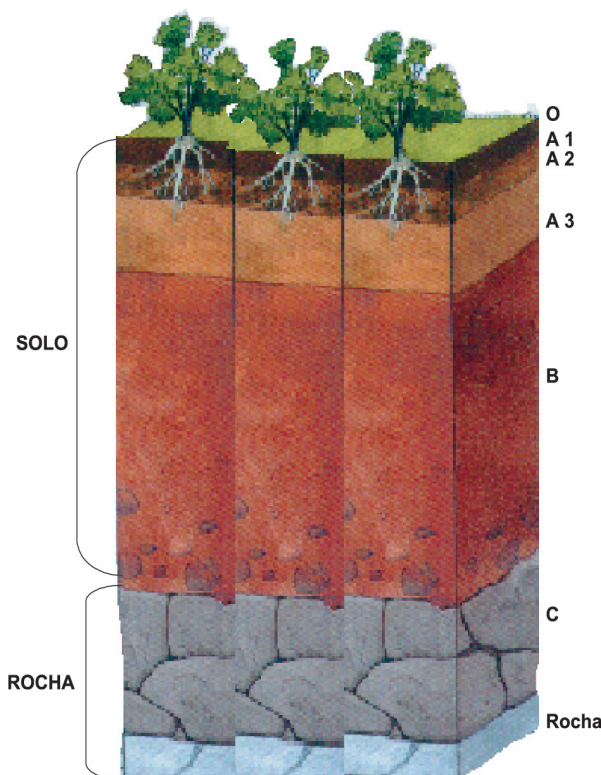


Figura 4: Camadas de um perfil genérico de solo (Adaptada de Rodrigues, 2001).



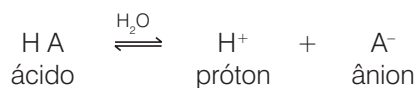
Capacidade de troca catiônica (CTC) de solos

É definida como a quantidade de cátions, que são adsorvidos reversivelmente por unidade de massa de material seco e expressa a capacidade do solo de trocar cátions. A quantidade de cátions é dada pelo número de cargas positivas (centimol ou milimol) e a massa de solo seco, geralmente 100 g ou 1 kg. Os valores encontrados para minerais argilosos variam de 1 – 150 centimol kg⁻¹, enquanto a CTC para a matéria orgânica pode atingir 400 centimol kg⁻¹, devido ao grande número de grupos oxigenados, particularmente carboxílicos (–COOH), os quais podem se ligar e trocar cátions (Baird, 2001; Rocha e Rosa, 2003).

Do ponto de vista de fertilidade dos solos, são desejados valores elevados de CTC, pois maiores quantidades de cátions podem ser armazenadas e, posteriormente, cedidas aos vegetais através de reações de troca iônica (fluxos entre reservatórios).

Acidez do solo

De acordo com o conceito de Bronsted e Lowry, ácida é uma substância que tende a ceder prótons (íons hidrogênios, H⁺) a uma outra. Base é qualquer substância que tende a aceitar prótons. Quando em solução aquosa, o ácido se ioniza gerando H⁺ e o ânion correspondente:



Diz-se que os H⁺ produzidos (segundo membro da equação) correspondem à acidez ativa, e o HA no primeiro membro indica a acidez potencial. Quanto mais a reação tende para a direita, maior a atividade em H⁺ e mais forte é o ácido. Em meio aquoso, o H⁺ está sempre hidratado e, por isso, predomina como hidrônio, H₃O⁺ (H₂O + H⁺ → H₃O⁺). É, entretanto, muito

mais comum, embora menos rigoroso, falar-se em H⁺ que em H₃O⁺.

No caso de ácidos fortes a acidez ativa aproxima-se da potencial. Porém, em se tratando de ácidos fracos, a acidez ativa é menor que a potencial. Por esse motivo, no segundo caso, a medição da acidez total não oferece indicação da acidez ativa. A noção de que os solos ácidos podiam ser neutralizados com cargas (carbonatos de cálcio e de magnésio misturados com argila) já era conhecida dos gauleses, gregos e romanos. Plínio escreveu sobre ela no primeiro século da era cristã (Branco e Cavinatto, 1999).

Admite-se hoje que a acidez do solo é constituída de duas frações:

- fração trocável – corresponde principalmente aos íons alumínio adsorvidos nos complexos de troca e
- fração titulável – corresponde principalmente a H⁺ que se encontra ligado covalentemente a compostos da matéria orgânica (grupos carboxílicos e fenólicos) e, possivelmente ao alumínio ligado aos complexos argila-matéria orgânica.

Como a fração titulável é devida aos íons Al⁺³ e H₃O⁺ fortemente retidos aos minerais da argila e matéria orgânica, evidenciando-se somente por extração em pH mais elevado, pode-se aceitar que, nas condições normais dos solos, os íons alumínio são os principais responsáveis pela acidez (Baird, 1999).

Fertilidade do solo

O conceito de fertilidade do solo também está intimamente relacionado com os vários fluxos de matéria e energia no ambiente. São várias as reações químicas que ocorrem entre as substâncias presentes no solo e na água, bem como as trocas de substâncias entre os seres vivos, as raízes, as partes aéreas das plantas e as partículas

minerais de solo. Destes processos resulta a formação de componentes secundários responsáveis por um estado de equilíbrio, seja em nível físico-químico (como por exemplo, a estabilidade do pH, ou equilíbrio ácido/base), químico ou biológico.

Outra constatação do fluxo dinâmico de energia e matéria entre os grandes reservatórios reguladores é, por exemplo, o fato dos quatro principais elementos químicos componentes dos vegetais serem obtidos pela planta a partir do reservatório atmosfera. A água da chuva (H₂O), indispensável a qualquer processo biológico, é também fornecedora de hidrogênio. O carbono e o oxigênio são retirados do ar, o primeiro, no processo de fotossíntese e o segundo, no processo de respiração. Finalmente, o nitrogênio também é absorvido do ar por algumas bactérias fixadoras localizadas nas raízes e, posteriormente, é disponibilizado para as plantas.

Para o crescimento da planta, com exceção desses quatro elementos principais, todos os demais (macro e micronutrientes) devem encontrar-se no solo. Portanto, os vegetais conseguem desenvolver-se em cada ambiente à medida que encontram no solo os elementos que lhe são indispensáveis.

Mesmo nos solos férteis, os elementos essenciais aos vegetais não são inesgotáveis. Por isso, após utilização pelas plantas, esses elementos participam de ciclos biogeoquímicos voltando ao solo, (e/ou atmosfera e hidrosfera) para que este se mantenha fértil

e a vida vegetal tenha continuidade. Se por algum motivo (por exemplo, queimadas, erosão etc.) os ciclos forem interrompidos, o solo vai se tornando progressivamente estéril ou improdutivo.

Participam dos ciclos biogeoquímicos vários microrganismos decompositores, que habitam o solo e são essenciais para o processo de fertilização. Ao decompor vegetais e animais mortos ou seus excrementos, a população de decompositores produz uma matéria gelatinosa, de coloração amarelo-

O cultivo do solo iniciou-se há cerca de dez mil anos com os Sumérios, na Mesopotâmia, às margens dos rios Tigre e Eufrates (atualmente onde se localiza o Iraque).

Com o tempo, verificou-se que a intervenção humana na constituição e estrutura física do solo poderia aumentar a produtividade. A este processo, atualmente, dá-se o nome de manejo do solo.



castanha, denominada húmus, de importância fundamental como fornecedora dos elementos químicos ciclados.

Interações solo-planta

Durante seu desenvolvimento a partir de uma semente, a planta estende suas raízes para o interior do solo formando um aglomerado de minúsculos filamentos, distribuídos em várias direções, constituindo a rizosfera. A raiz tem formas tortuosas, adquiridas durante seu crescimento, à medida que vai penetrando no solo e desviando-se dos grãos e das partículas de terra, buscando encontrar água, oxigênio e nutrientes. Também, para absorver o máximo de minerais do solo, as raízes produzem substâncias que ajudam a solubilizar os minerais, modificando-os quimicamente e causando alterações de natureza química no solo.

Produtividade do solo e lei do mínimo

A produção de vegetais por área de solo é denominada produtividade. Num sentido ecológico, a produtividade de uma área refere-se à produção total de matéria vegetal (produção primária), seguida da produção de animais herbívoros (produção secundária) e da produção de animais predadores (produção terciária).

Na primeira metade do século XIX, o químico alemão Justus von Liebig (1803 – 1873) propôs a Lei do mínimo ou Lei de Liebig. Verificou que o elemento essencial que se encontra em menor disponibilidade no ambiente limita o crescimento do vegetal. Alguns aspectos importantes da Lei proposta por Liebig são (Branco e Cavinatto, 1999):

- 1) a limitação do crescimento do vegetal dá-se por falta, e não por excesso, de um elemento componente do ambiente;
- 2) o fator em mínimo é o elemento que se encontra em quantidades mínimas em relação às necessidades da planta;

- 3) os microelementos ou micronutrientes, os quais entram na composição das plantas em quantidades mínimas, também podem controlar seu crescimento e
- 4) atualmente, sabe-se que a Lei de Liebig não está associada apenas às substâncias químicas dissolvidas no solo, mas também aos ciclos biogeoquímicos, aos componentes químicos do ar (p.e. gás carbônico) e aos fatores físicos, como luz, temperatura, umidade, etc...

Hoje, no mundo inteiro, procura-se descobrir quanto os sistemas agrícolas contribuem para o seqüestro (fixação no solo) de carbono.

Manejo do solo e atividades antrópicas

No decorrer dos anos a população aumentou significativamente. No início, poucos homens viviam sobre a terra e eles andavam pelas savanas em pequenos grupos, como pastores e/ou caçadores. Posteriormente, o homem aprendeu a utilizar o ambiente para obter benefícios e conforto. Entre os fatores mais importantes para o desenvolvimento humano estão o aprendizado para domar e criar animais, e plantar para seu benefício. Assim, o homem passou de caçador nômade a sedentário, pois havia necessidade de esperar pelas colheitas (Rocha *et al.*, 1996).

Em 1840, o químico alemão Justus von Liebig observou a relação entre o crescimento de plantas e a utilização de fezes de animais como adubo. Desde então, para atender à demanda cada vez maior por alimentação, a adubação tem sido utilizada no manejo de solos.

O cultivo do solo iniciou-se há cerca de dez mil anos com os Sumérios, na Mesopotâmia, às margens dos rios Tigre e Eufrates (atualmente onde se localiza o Iraque). Depois, há cerca de oito mil anos iniciaram-se as plantações no vale do Rio Nilo, no Egito (Rodrigues, 2001). Ou seja, o ser humano percebeu que a agricultura nas margens férteis dos rios alcançava padrões de produtividade suficientes para sustentar população mais numerosa (Magnoli e Araújo, 1996). Essa fertilidade nos vales era devida aos constantes ciclos de cheias e vazan-

tes dos rios, que trocavam matéria orgânica e nutrientes com o solo. O ser humano primitivo também observou que as terras escuras, constituídas de um material gelatinoso e macio unindo as partículas (o húmus), associava partículas com maior diâmetro, tornando o solo mais poroso e permeável. Com o tempo, verificou-se que a intervenção humana na constituição e estrutura física do solo podia aumentar a produtividade. A este processo, atualmente, dá-se o nome de manejo do solo.

Os progressos obtidos quanto ao manejo do solo são muitos. Entretanto, atualmente, com melhor conhecimento dos ciclos biogeoquímicos e das interações entre os três grandes compartimentos, sabe-se que várias práticas agrícolas de manejo utilizadas no passado causam impactos ambientais irreversíveis aos solos, como exemplo, infertilidade, erosão e perda de produtividade. Por falta de informação ou por razões históricas, muitas vezes o agricultor se nega a mudar de uma prática agrícola aprendida com seus antepassados, para outra mais adequada ao tipo de solo da sua propriedade. Experimentos agrícolas recentes indicam que o manejo do solo deve variar de uma região para outra, de acordo com o clima e a natureza do solo (www.cnpdia.embrapa.br).

Aração/revolvimento do solo

Há tempos remotos os processos de aração e revolvimento profundo de solos duros e/ou congelados de climas temperados ou frios são utilizados para desagregar particulados, permitindo penetração de água (nutrientes) e ar necessários para o desenvolvimento da planta. Entretanto, para climas tropicais (por exemplo, no Brasil) estes processos podem não ser adequados. Com o revolvimento, os microrganismos tão importantes nos processos de troca entre solo, água e atmosfera ficam mais expostos na superfície e os efeitos da intensidade de luz e do forte calor podem diminuir suas atividades. Uma vez revolvido, o solo tam-



bém fica sujeito ao arraste maior de nutrientes por águas de chuvas (causa infertilidade) e, dependendo das condições do terreno, o perigo de erosão é eminente. Além disso, sabe-se atualmente que o revolvimento pode facilitar a transferência do carbono retido no solo para a atmosfera, na forma de dióxido de carbono (CO₂).

Adubação

Em 1840, o químico alemão Justus von Liebig observou a relação entre o crescimento de plantas e a utilização de fezes de animais como adubo. Desde então, para atender à demanda cada vez maior por alimentação, a adubação tem sido utilizada no manejo de solos. Ela tem não só a finalidade de modificar quimicamente a composição do solo de maneira a fornecer à planta os elementos necessários, mas também a de condicioná-lo fisicamente.

Entretanto, a adubação sem acompanhamento técnico agrícola, planejamento de culturas de acordo com a topografia do terreno e conhecimento prévio do tipo de solo tem causado vários impactos ambientais e prejuízos financeiros ao agricultor. Além de salinizar o solo, a aplicação de fertilizantes pode causar a eutrofização de mananciais devido à lixiviação de fertilizantes aplicados em solos revolvidos, ocorrida principalmente em época de chuvas.

Atualmente, uma das alternativas sugeridas é a utilização de adubo orgânico ou organomineral. Este, ao contrário dos fertilizantes sintéticos, contém alta porcentagem de húmus, contribuindo para a fixação de nutrientes e re-estruturação física do solo. Dentre as diversas formas de adubação orgânica com custo/benefício atrativos e ótimos resultados técnicos para solos e plantas, a *adubação verde* é de mais fácil aplicação e menor custo. Ela baseia-se praticamente no plantio rotativo de plantas leguminosas entre as safras e, até poucos anos, sugeria-se a

incorporação da biomassa verde ao solo via revolvimento. Com o melhor conhecimento dos ciclos biogeoquímicos (por exemplo, caracterização de perdas de carbono e CO₂ do solo para a atmosfera), tem-se sugerido que, após o corte, a massa verde produzida pelas leguminosas seja mantida na superfície do solo sem revolvimento, para decomposição natural por microrganismos aeróbicos (Figura 5).

Qual a importância do manejo do solo para o seqüestro de carbono?

O aumento da concentração de gases como CO₂, CH₄ e N₂O na atmosfera tem sido relacionado ao efeito estufa. A queima de combustíveis fósseis é a principal causa desse aumento, especialmente pela emissão de CO₂. A agricultura contribui para a emissão ou o seqüestro destes gases, dependendo do efeito do manejo sobre o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS). Quando o balanço entre a taxa de adição de resídu-

tribui para a emissão ou o seqüestro destes gases, dependendo do efeito do manejo sobre o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS). Quando o balanço entre a taxa de adição de resídu-

os vegetais ao solo (determinada pelo sistema de cultura) e a taxa de perda de MOS (determinada principalmente pelo manejo do solo) for positivo, ocorrerá aumento da MOS. Neste caso, o solo atuará como um dreno de CO₂ atmosférico diminuindo o efeito estufa. Ao contrário, se o balanço for negativo, ocorrerá redução da MOS e o solo contribuirá para o aumento do efeito estufa. Assim, práticas de manejo que acumulem MOS poderão contribuir para aumentar a qualidade do solo e, também, para o seqüestro de CO₂ atmosférico (Pilon *et al.*, 2001).

Hoje, no mundo inteiro, procura-se descobrir quanto os sistemas agrícolas contribuem para o seqüestro (fixação no solo) de carbono. No Brasil, a Embrapa Solos tem feito medições da quantidade de carbono no solo no perfil entre 0 e 60 cm, buscando quantificar a massa de carbono. Dessa forma, é possível medir em diferentes ecossistemas o estoque de carbono sob, por exemplo, plantio convencional, adubação verde e solo não cultivado. Estes estudos são parte de uma avaliação da contribuição dos diferentes tipos de manejo de solo para o seqüestro de carbono (www.cnps.embrapa.com.br).

A utilização de água do Rio São Francisco, para irrigar plantações frutíferas na região nordestina, pode ser considerada como uma exportação de água na forma de frutas (melão e melancia têm mais de 90% de água), de uma região há tempos comprovada com problemas de secas!

14



Figura 5: Exemplo de adubação verde. A biomassa resultante das leguminosas é deixada na superfície do solo para decomposição natural da matéria orgânica (Elo informativo, 2002).

Irrigação

Considerando-se que a quantidade de água na terra é constante e que a população tem aumentado em proporções assustadoras, a água já é considerada como um bem natural de valor incalculável. Neste aspecto, do ponto de vista ambiental, outra questão importante em relação ao manejo do solo refere-se à irrigação. Embora na antiguidade não se conhecesse o efeito dos fluxos de energia e matéria entre os reservatórios, reconhecia-se a dependência direta entre disponibilidade de água no solo e produtividade. Hoje, sabe-se que isto é devido às características da água em atuar no transporte, dissolução e disponibilidade de nutrientes para as plantas. Em solos com escassez de água como, por exemplo, no Nordeste brasileiro e alguns países árabes, tem sido utilizada a irrigação mecânica, que consiste em captar água de mananciais, utilizando bombas, e distribuí-la nas lavouras. Sem acompanhamento técnico-científico, este tipo de manejo tem causado grandes prejuízos aos mananciais, devido à sucção de excessivas quantidades de água. Com o volume bombeado não compatível com a vazão do manancial, toda vida aquática fica comprometida, devido à falta de água e conseqüente assoreamento.

Recentemente tem-se discutido a viabilidade e/ou possibilidade de transportar água do Rio São Francisco para atender à demanda básica em partes da região nordeste e, ainda, utilizar essa água para irrigar culturas de frutas, como melão e melancia, para fins de exportação. Tal utilização pode ser considerada como uma exportação de água na forma de frutas (melão e melancia têm mais de 90% de água), de uma região há tempos comprovada com problemas de secas! Este é um exemplo de impacto ambiental causado pela falta de visão ambiental integrada entre os reservatórios litosfera e hidrosfera.

Outro tipo é a ferti-irrigação, que consiste no aproveitamento de efluentes de esgotos urbanos tratados como fonte de água e de húmus para a agricultura. Neste caso, embora a reutilização de água tenha sido amplamente recomendada como forma de atender às demandas cada vez maiores, é necessário ter um monitoramento constante da presença de espécies metálicas potencialmente tóxicas e de microrganismos patogênicos nesses efluentes.

Pesticidas/herbicidas

Devido ao grande crescimento populacional, para atender à demanda alimentícia tem sido necessário utilizar pesticidas/herbicidas na agricultura. Atualmente, é difícil imaginar a produção de alimentos sem o uso de pesticidas, pois estes produtos melhoram a produtividade agrícola podendo, às vezes, diminuir os preços dos alimentos e da mão de obra. Denominam-se pesticidas todas as substâncias de origem natural ou sintética utilizadas no controle e/ou eliminação/diminuição de pragas (insetos, ervas daninhas etc.), que causam prejuízos na produção de alimentos, ou transmitem enfermidades aos seres humanos e a outros organismos. Os herbicidas são substâncias químicas empregadas para controlar ou matar plantas daninhas, as quais se de-

envolvem juntamente com as culturas. Quando sintetizados pelo ser humano, os pesticidas/herbicidas são considerados substâncias estranhas ao ambiente e podem ser chamadas também de *xenobióticas*.

Embora sejam conhecidos impactos ambientais causados pela aplicação de pesticidas, parece certo que eles ainda continuarão sendo um componente indispensável às muitas atividades agrícolas (Toscano *et al.*, 2000). Após a aplicação e atuação nas culturas, o pesticida pode permanecer no solo por muito tempo, mantendo ou não seu efeito biológico. Assim, é importante conhecer seu comportamento no solo para prever se o pesticida vai causar algum dano a esse meio e aos demais reservatórios que co-existem (hidrosfera e atmosfera).

O comportamento do herbicida depende das propriedades físico-químicas e biológicas do solo, bem como de fatores climáticos. Os três processos básicos que podem ocorrer com os pesticidas no solo são retenção, transformação e transporte. A Figura 6 mostra alguns fatores envolvidos no comportamento de herbicidas no solo (Lavorenti, 1999).

O processo de *retenção* tende a “segurar” a molécula de herbicida, impedindo-a de se mover. Pode ser reversível ou irreversível e afetar os processos de transformação e transporte do herbicida no ambiente.

A *transformação* refere-se a mudanças na estrutura química das moléculas do herbicida e determina se e por

Embora sejam conhecidos os muitos impactos ambientais causados pela aplicação de pesticidas, parece certo que eles ainda continuarão sendo um componente indispensável às muitas atividades agrícolas.

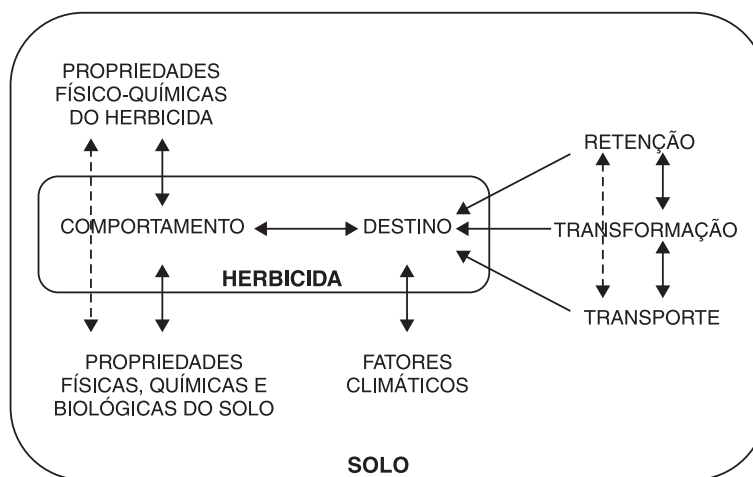


Figura 6: Esquema genérico da interação entre herbicida e solo (Fonte: Lavorenti, 1999).



quanto tempo tais moléculas podem permanecer intactas no ambiente (Lavorenti, 1999).

O processo de *transporte*, determinado pelo movimento das moléculas do herbicida no solo, é fortemente influenciado pela umidade, temperatura, densidade, características físico-químicas do solo e do herbicida.

Existem algumas tecnologias que permitem a recuperação ou remediação (do inglês, *remediation*) de solos contaminados e/ou degradados.

No caso de pesticidas, às vezes, apenas uma pequena porcentagem da quantidade aplicada atinge o objetivo desejado. Grande parte é transportada por ventos, chuvas e é aportada em outros reservatórios, como atmosfera e recursos hídricos. Para minimizar os impactos ambientais, a aplicação de pesticidas deve sempre ser feita com orientação técnica agrônômica, quanto aos cuidados durante a aplicação, dosagem necessária, época e condições climáticas favoráveis (chuvas, temperatura, umidade, evapotranspiração, irradiação solar, velocidade e direção do vento etc.).

e mais fértil do solo para os mananciais. Se o desmatamento ocorrer em áreas de recargas de aquíferos e/ou em matas ciliares, as conseqüências serão danosas e os efeitos dos impactos ambientais serão sentidos rapidamente, resultando no rebaixamento do nível do lençol freático e assoreamento dos mananciais.

permitem a recuperação ou remediação (do inglês, *remediation*) de solos contaminados e/ou degradados. Estas baseiam-se nas propriedades químicas de substâncias e/ou processos físicos que são utilizados para retenção, mobilização ou destruição de um determinado contaminante presente no solo (Moeri e Salvador, 2003; Baird, 1999). Podem ser aplicadas *in situ*, isto é, no lugar da contaminação ou *ex situ*, ou seja, primeiramente removendo a matéria contaminada para outro local.

Bioremediação é a utilização de organismos vivos, especialmente microrganismos, para degradar poluentes ambientais. Para que uma técnica de bioremediação funcione efetiva-

É possível recuperar um solo contaminado?

Existem algumas tecnologias que

16

Ocupação e mineração

O ideal seria que o solo fosse também ocupado com planejamento urbano adequado. Infelizmente, por falta de planificação, muitas metrópoles estão hoje edificadas em áreas de difícil escoamento pluvial, onde ocorre completa impermeabilização dos solos (cobertura com asfalto e cimento), provocando enchentes nos rios e freqüentes inundações de cidades (Figura 7).

Os problemas antrópicos causados ao solo devidos às atividades de mineração também são freqüentes (Figura 8). A exploração de minérios deve sempre ter como base fundamental o preceito do uso sustentável, ou seja, considerar também o bem estar das gerações futuras. Para tal, deve-se utilizar técnicas menos destrutivas e recuperar as áreas degradadas pelos impactos inerentes causados pelas atividades mineradoras. A vegetação atua como um importante fator de proteção aos solos, permitindo a maior infiltração das águas e evitando o arraste da camada superficial



Figura 7: Enchente ocorrida em Santo André/SP. (Registrada pelos repórteres J. B. Ferreira e K. Tamanaha, Janeiro de 1997.)

(<http://www.semasa.com.br/scripts/display.asp?idmenu=113&idnot=305>)



Figura 8: Atividade Mineradora. (Sistema de gestão ambiental da mineração Serra do Sossego, Paraúpeba, Pará <http://www.ksnet.com.br/paginas/servicos/mineracao1.htm>)



Figura 9: Exemplo de remediação de solo *ex situ*, em que o solo contaminado é transferido para outro local, onde será feito o tratamento (Fonte: Silvestre e Marchi, 2003).

mente, os resíduos deverão ser e estar susceptíveis à degradação biológica. Além disso, as condições ambientais, tais como pH, temperatura e nível de oxigênio devem ser adequadas para a atuação dos microrganismos.

Recentemente, a fitoremediação, isto é, o uso de vegetação para a descontaminação *in situ* de solos e sedimentos, eliminando metais e poluentes orgânicos, tem se tornado uma tecnologia emergente (Baird, 1999).

Considerações finais

Diferentes partes do sistema biofísico do planeta Terra estão relacionadas intrinsecamente, e em equilíbrio dinâmico, com os três grandes reservatórios litosfera, hidrosfera e atmosfera. Este conceito implica que, se esse equilíbrio for deslocado por algum impacto, o ambiente sempre reagirá de forma a atingir outro estado de equilíbrio, trocando matéria e energia entre os reservatórios.

Neste contexto, o reservatório solo sempre foi importante, tanto para a espécie humana como para grande parte dos seres vivos, quanto ao fornecimento de alimentos e extração de matérias-primas necessárias à sobrevivência. Devido ao crescimento demográfico, o

ser humano tem desenvolvido e aprimorado técnicas de reconhecimento, manejo, conservação e melhoramento dos solos (www.cnpdia.embrapa.br). Entretanto, estes precisam ser protegidos através do uso sustentado, alicerçado em planejamento adequado. Se estas ações forem praticadas de maneira equilibrada com os outros reservatórios, o recurso natural solo não será esgotado e/ou degradado, evitando o comprometimento das futuras gerações.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq e à CAPES por bolsas de estudo e suporte financeiro.

André Henrique Rosa, Bacharel em Química, Mestre e Doutor em Química Analítica pelo Instituto de Química da UNESP. Estágios Doutoral e Pós-Doutoral em Química Ambiental no Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy (ISAS), Dortmund-Alemanha. É Professor Assistente Doutor no Curso de Engenharia Ambiental da UNESP (Unidade Diferenciada de Sorocaba/Iperó), andros@hotmial.com. **Julio Cesar Rocha**, terminou Bacharelado e Licenciatura na FFCLRP-USP, em 1980 e fez Mestrado em Química Analítica no IQ-UNICAMP, em 1983. Contratado pelo Instituto de Química de Araraquara-UNESP, desde 1984, onde ministra aulas das Disciplinas de Química Analítica e Química Ambiental. Terminou o Doutorado em Química Analítica nessa instituição, em 1987. Fez 2 anos de estágio de Pós Doutorado no ISAS em Dortmund – Alemanha (1991-92). Foi Diretor da Divisão de Química Ambiental da SBQ (1996-97) e tem formado diversos mestres e doutores na especialidade Química Ambiental (jrocha@iq.unesp.br).

Referências bibliográficas

- BAIRD, C. *Química Ambiental*, 2ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 1999.
- BRANCO, S.M. e CAVINATTO, V.M. *Solos: a base da vida terrestre*, São Paulo: Editora Moderna, 1999.
- CANTO, E.L. *Minerais, minérios metais de onde vêm para onde vão?* São Paulo: Editora Moderna, 1997.
- ELO - Informativo Dow AgroScience Industrial Ltda, ano V, nº 20, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, www.cnps.embrapa.com.br
- JARDIM, W.F. Evolução da atmosfera terrestre. *Química Nova na Escola-Cadernos Temáticos de Química Ambiental*, v. 1, p. 5-8, 2001.
- LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo. *3º Encontro Brasileiro Sobre Substâncias Húmicas*, Santa Maria: resumos, p. 21, 1999.
- MAGNOLI, D. e ARAÚJO, R. *A nova geografia*, São Paulo: Editora Moderna, 1996.
- MALAVOLTA, E. *Manual de química agrícola. Nutrição de plantas e fertilidade do solo*, São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1976.
- MOERI, E. e SALVADOR, C. Áreas contaminadas: novos conceitos na avaliação e recuperação. *Saneamento Ambiental*, v. 93, p. 24-27, 2003.
- PILON, C. *et al.* Seqüestro de carbono por sistemas de manejo do solo e seus reflexos sobre o efeito estufa. *4º Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas*, Viçosa: resumos, p. 20, 2001.
- ROCHA, J.C. e ROSA, A.H. *Substâncias húmicas aquáticas: interações com espécies metálicas*, São Paulo: Editora UNESP, 2003, 120p.
- ROCHA, J.C. *et al.* Recursos hídricos: noções sobre o desenvolvimento do saneamento básico. *Saneamento Ambiental*, v. 39, p. 36-43, 1996.
- RODRIGUES, R.M. *O solo e a vida*, São Paulo: Editora Moderna, 2001.
- SILVESTRE, M. e MARCHI, R.S. Áreas contaminadas: quem responde pelo passivo de empresas falidas? *Saneamento Ambiental*, v. 93, p. 28-32, 2003.
- TOSCANO, I. A. S.; RIBEIRO, M. L.; ROCHA, J. C.; NUNES, G. S.; BARCELÓ, D. Determinação de carbaril utilizando testes ELISA (Enzyme-linked immunosorbent assay) e CLAE com detecção por arranjo de diodos. *Química Nova*, v. 23, n. 4, p. 466-471, 2000.