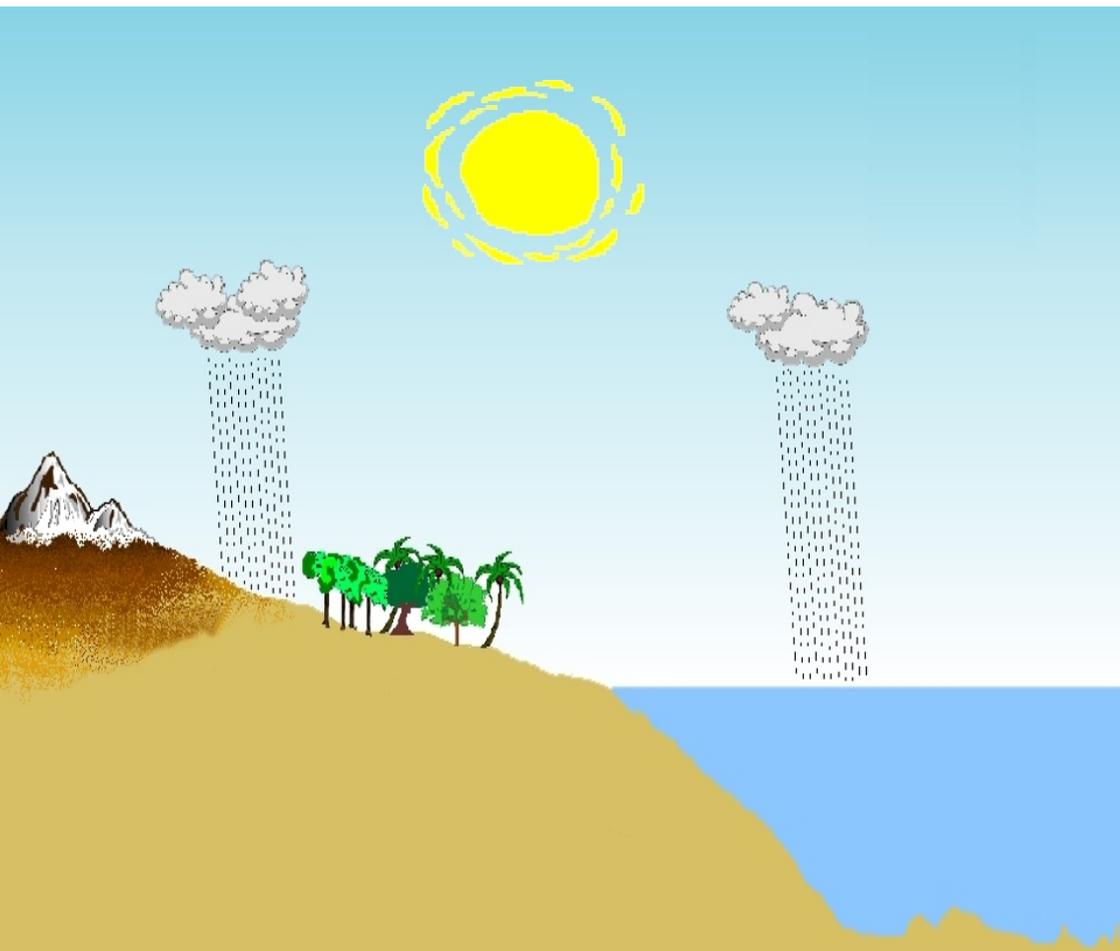


Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1517-5111

Junho, 2004

Documentos 119

Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta

Roberto Engel Aduan
Marina de Fátima Vilela
Fábio Bueno dos Reis Júnior

Planaltina, DF
2004

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina - DF

Fone: (61) 388-9898

Fax: (61) 388-9879

http\www.cpac.embrapa.br

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Dimas Vital Siqueira Resck*

Editor Técnico: *Carlos Roberto Spehar*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Normalização bibliográfica: *Rosângela Lacerda de Castro*

Desenhos: *Marina de Fátima Vilela*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Jaime Arbués Carneiro

1ª edição

1ª impressão (2004): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação na publicação.
Embrapa Cerrados.

A244g Aduan, Roberto Engel.

Os grandes ciclos biogeoquímicos do planeta / Roberto Engel Aduan, Marina de Fátima Vilela, Fábio Bueno dos Reis Júnior . – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

25 p. – (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 119)

1. Geoquímica. 2. Biosfera. 3. Ciclo global. 4. Variação climática.
I. Vilela, Marina de Fátima. II. Reis Júnior, Fábio Bueno dos. III. Título.
IV. Série.

577.14 - CDD 21

© Embrapa 2004

Autores

Roberto Engel Aduan

Biólogo, D.Sc. em Ecologia
Embrapa Cerrados
aduan@cpac.embrapa.br

Marina de Fátima Vilela

Eng. Florest., D.Sc. em Ciência Florestal
Embrapa Cerrados
marina@cpac.embrapa.br

Fábio Bueno dos Reis Júnior

Eng. Agrôn., D.Sc. em Ciência do Solo
Embrapa Cerrados
fabio@cpac.embrapa.br

Apresentação

Este documento apresenta, de maneira didática, os ciclos biogeoquímicos dos quatro elementos e substâncias mais importantes na química da Terra: a água, o carbono, o nitrogênio e o fósforo. A importância desses elementos vem do grande volume de matéria e de energia movimentado nos seus processos e na essencialidade deles na formação e na manutenção da biosfera. Neste documento, tratou-se da interdependência entre esses grandes ciclos e a biosfera e a maneira pela qual a atividade humana influencia na dinâmica química da Terra e as consequências dessas mudanças para a própria humanidade.

Roberto Teixeira Alves

Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

| | |
|---|----|
| Introdução | 9 |
| O Ciclo Global da Água e o Papel da Vegetação Terrestre | 10 |
| O Ciclo Global do Carbono | 12 |
| O Ciclo Global do Nitrogênio | 16 |
| Mecanismos de disponibilização | 17 |
| Mecanismos de indisponibilização | 17 |
| O Ciclo Global do Fósforo | 18 |
| Considerações Finais | 22 |
| Referências Bibliográficas | 22 |
| Abstract | 25 |

Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta

Roberto Engel Aduan

Marina de Fátima Vilela

Fábio Bueno dos Reis Júnior

Introdução

Excluindo-se os eventos muito episódicos de queda de meteoros de grande porte, a Terra pode ser compreendida como um sistema químico fechado no qual as reações que mantêm a biosfera são alimentadas pela energia solar. Nos últimos quatro bilhões de anos, aconteceram mudanças expressivas na composição química da superfície da Terra onde toda a vida se localiza. Com a origem dos organismos fotossintetizantes e do conseqüente aparecimento do oxigênio na atmosfera terrestre, o ambiente da Terra passou por profundas mudanças, assim como a história evolutiva de todos os organismos que nela habitavam e dos quais todas as espécies atuais descendem. Ao longo da história, a interação entre a Terra e a biosfera causou profundas mudanças e, hoje, poucas reações químicas na superfície dela existem sem a intermediação ou sem a influência da biosfera.

Depois da dramática mudança na composição química da superfície terrestre, propiciando o aparecimento dos organismos fotossintetizantes, essas mudanças passaram a acontecer bem mais lentamente. Essa taxa mais suave de alterações propiciou às espécies condições para se adaptarem às alterações climáticas. No entanto, isso não quer dizer que não tenham existido, ao longo do tempo geológico, episódios de variação catastrófica do clima que levaram a extinções, em massa, de espécies.

A era moderna também trouxe muitas transformações. Depois da revolução industrial, a crescente atividade da população humana gerou uma movimentação de matéria e de energia de tal magnitude que refletiu em todos

os ecossistemas da Terra, o que afetou a composição química do planeta, acarretando mudanças no clima global de uma maneira que ainda não se pode prever as conseqüências.

Este trabalho teve como objetivo apresentar, didaticamente, os ciclos biogeoquímicos dos quatro elementos fundamentais na química da Terra: a água, o carbono, o nitrogênio e o fósforo. A importância desses elementos está no grande volume de matéria e de energia movimentado nos seus processos e na essencialidade desses elementos na formação e na manutenção da biosfera. Pretende-se mostrar, também, a interdependência entre esses grandes ciclos e a biosfera, o modo pelo qual a atividade humana influencia na dinâmica química da Terra e as conseqüências dessas mudanças para a própria humanidade.

O Ciclo Global da Água e o Papel da Vegetação Terrestre

O ciclo global de água responde pela maior movimentação de uma substância química pela superfície terrestre. A água, em estado líquido, é por excelência um dos elementos mais importantes na manutenção e na caracterização da biosfera. Apesar de a água ser a substância mais abundante sobre a crosta terrestre, cobrindo em torno de 70% dela, o déficit hídrico é o maior fator limitante da produtividade primária em escala global ([LIMA, 2003](#); [SAUTCHÚK, 2004](#)).

Aproximadamente metade das comunidades vegetais do mundo passa por extensos períodos secos. Até ecossistemas superúmidos, como a floresta amazônica, podem passar por déficits hídricos moderados durante o dia e experimentar ocasionalmente restrições de água bem mais severas ([BARBOSA; FERREIRA, 2004](#)). Se nos sistemas naturais o déficit hídrico é um limitante, em sistemas agrônômicos é fator primordial, reduzindo a produtividade e a área passível de cultivo ([REICHARDT, 1990](#); [TSUKAMOTO FILHO et al., 2001](#); [BERNARDO, 2002](#)).

Os grandes reservatórios de água, na superfície terrestre, são os oceanos. Estima-se que 1.350.000.000 km³ de água esteja contido nesses reservatórios, ou seja, 97% do total de água do planeta. O segundo maior reservatório são as geleiras, com 33.000.000 de km³. Nos continentes, o maior reservatório é representado pelas águas subterrâneas, com 15.300.000 km³. Estima-se que os solos contenham 121.800 km³ de água, mas apenas uma

porção de 58.100 km³ estaria disponível para as raízes das plantas e 13.000 km³ para a sobrevivência e para atividades econômicas humanas, provenientes do escoamento superficial.

A atmosfera, apesar de ser um reservatório de água bem limitado, de 13.000 km³, desempenha papel muito importante pela magnitude do fluxo com os oceanos e continentes de 496.000 km³ por ano.

Nos continentes, o balanço entre as perdas de água por precipitação e ganho por evaporação geralmente é desproporcional, pois 40.000 km³ das chuvas que caem anualmente nos continentes são provenientes da evaporação oceânica. Esse desequilíbrio no balanço da evaporação/precipitação continental também vai determinar a disponibilidade de água para as atividades econômicas, uma vez que parte da precipitação excedente volta para os oceanos via escoamento superficial, sendo então disponível para captação e produção de energia.

É na regulação desse fluxo solo/atmosfera que reside a importância da vegetação, uma vez que ela regula, em grande parte, as perdas de água do continente para a atmosfera por transpiração e redistribui a precipitação continental mediante interceptação pela cobertura vegetal. É principalmente por meio da modificação dessa cobertura que a atividade humana pode interferir ativamente no ciclo global de água.

Um exemplo dessa modificação, em áreas tropicais, refere-se à floresta amazônica onde as espécies arbóreas que extraem água do solo a uma profundidade em torno de oito metros, mantendo a evapotranspiração mesmo nos períodos de seca, estão sendo substituídas por pastagens, ocupadas por gramíneas com um sistema de raiz superficial que não lhes permite manter a transpiração na estiagem, aumentando a incidência de queimadas nessas áreas ([BRASIL, 1999](#)). Essas mudanças, na Amazônia, podem levar a profundas modificações nas condições climáticas regionais, principalmente, no que se refere aos regimes de precipitação ([ANDREAE et al., 2004](#); [AMOS, 2004](#); [BRASIL, 2004](#); [DIAS, 2004](#)). Em sistemas savânicos, como o Cerrado brasileiro, espera-se que essas mudanças se reproduzam, talvez, de forma até mais acentuada, causando prejuízos severos no setor agrônomo da região ([ADUAN, 1998](#)). O conhecimento da vulnerabilidade dos sistemas agrônomo, em decorrência das mudanças climáticas regionais e globais, principalmente, em relação aos padrões de precipitação, ainda é incipiente para

a grande maioria do território nacional e espera-se que esse tema canalize boa parte do esforço de pesquisa nos próximos anos.

Na Figura 1, representam-se os principais estoques e fluxos do ciclo global de água em km^3 e km^3/ano .

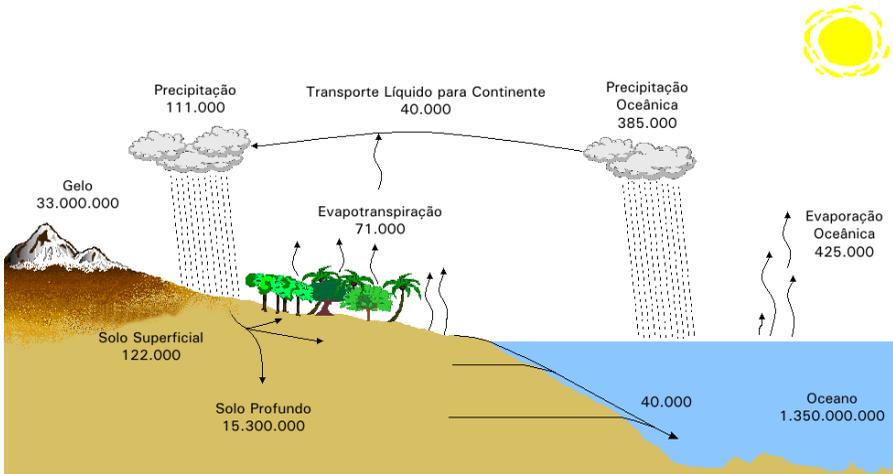


Figura 1. Representação dos principais estoques e fluxos do ciclo global da água em km^3 e km^3/ano . Baseado em [Schlesinger \(1997\)](#).

O Ciclo Global do Carbono

O carbono é um elemento presente na grande maioria do material que compõe nosso planeta seja nas suas massas fluidas (atmosfera e oceano), seja nas sólidas (rochas e solos). O carbono também é o elemento-base do qual se constituem todas as moléculas orgânicas. Um átomo de carbono pode realizar quatro ligações químicas ao mesmo tempo com outros átomos de carbono ou outros elementos, permitindo, assim, a formação de moléculas bastante complexas em combinações virtualmente infinitas. Na atmosfera terrestre, o carbono se encontra, sobretudo, em uma de suas formas mais simples, o CO_2 .

O carbono, na forma de CO_2 , é movimentado por processos naturais entre a atmosfera e os continentes e entre a atmosfera e o oceano. Os processos naturais envolvidos são: a fotossíntese, realizada por organismos autotróficos

como as plantas terrestres; e o plâncton oceânico, a respiração realizada por todos os seres vivos e pelo material morto em decomposição e a dissolução oceânica. Essa movimentação pode ser vista como um processo cíclico, sendo geralmente denominada de o ciclo global de carbono.

Como em muitos períodos da história do planeta, este ciclo não se encontra em equilíbrio. Como resultado da queima de combustíveis fósseis (principalmente petróleo e carvão) e das mudanças do uso da Terra, existe atualmente um incremento antropogênico de carbono para a atmosfera da ordem de 5,5 Pg anuais [1 peta grama (Pg) = 1 bilhão de toneladas]. Dessas, apenas 3,5 Pg de C permanecem na atmosfera e passam a contribuir efetivamente para o efeito estufa, sendo o restante dissolvido no oceano ou seqüestrado pela atividade fotossintética, ficando retido como biomassa viva ou como matéria orgânica do solo ([SCHLESINGER, 1997](#), [GRACE, 2001](#)).

Há um consenso, tanto entre os cientistas quanto entre governos, sobre o fato de as emissões antropogênicas de CO₂ e outros gases-traço estarem aumentando o efeito estufa e causando o aquecimento global. Conseqüentemente, existe interesse crescente na ciclagem global de carbono e no manejo dos fluxos entre a atmosfera, o oceano e os ecossistemas terrestres, com o intuito de minimizar o aumento de CO₂ atmosférico.

Apesar de o CO₂ ser mais estudado em relação ao seu possível papel na regulação do clima global, outros gases, como o metano e o óxido nitroso, também possuem propriedades de retenção de calor e também têm tido sua concentração alterada na atmosfera ao longo das últimas décadas. Várias investigações científicas, realizadas por grande número de equipes independentes e em várias partes do mundo ([WOODWELL et al., 1998](#)), constataram que, nos últimos milhares de anos, tem havido estreita relação entre a temperatura média global e a concentração atmosférica desses gases.

O papel da vegetação terrestre em relação à troca de material entre a crosta e a atmosfera vem ganhando atenção crescente por parte da comunidade científica, devido à importância potencial desses ecossistemas como fontes ou captadores de carbono atmosférico. Além disso, a perda de vapor pela superfície desses ecossistemas afeta grande número de processos terrestres do ciclo biogeoquímico de outros elementos e até o desenvolvimento e a mudança dos próprios padrões climáticos globais.

Ao contrário do ciclo de água em que o impacto da atividade humana se dá principalmente pela alteração nos fluxos já existentes, no ciclo global de carbono, a atividade humana gera novos fluxos anteriormente inexistentes ou insignificantes antes da revolução industrial, como é o caso da adição de carbono atmosférico pela queima de combustíveis fósseis.

A superfície terrestre contém em torno de 10^{23} g de carbono ou cem quatrilhões de toneladas. Desse, a maior parte (8.06×10^{22} g) está contida em rochas sedimentares, como carbonato e compostos orgânicos. Esse reservatório, contudo, é de ciclagem extremamente lenta, e, em geral, não é levado em conta no estudo do ciclo global de carbono, sobretudo, quando se está interessado nas mudanças climáticas globais de origem antrópica. O conteúdo de combustíveis fósseis disponíveis para a captação humana é estimado em 4.000 PgC. O carbono dissolvido nos oceanos é estimado em 38.000 PgC. Esse reservatório possui importante propriedade de amortecer as mudanças na concentração de CO_2 atmosférico. Nos continentes, o maior reservatório de carbono está nos solos que contêm estimados 40.000 PgC. A atmosfera contém aproximadamente 750 PgC e estima-se que 560 PgC estejam estocados na cobertura vegetal ([SCHLESINGER, 1997](#); [GRACE, 2001](#)).

Essa cobertura, apesar de constituir um reservatório bastante limitado de carbono, é a responsável pelo fluxo mais intenso de carbono no ciclo global. Através da fotossíntese estima-se que a produção primária retira cerca de 120 PgC na forma de CO_2 anualmente da atmosfera, sendo que 60 PgC retornam à atmosfera como respiração dos tecidos vivos. Acredita-se que 60 PgC também retornem à atmosfera por meio da decomposição da matéria orgânica na superfície do solo ([SCHLESINGER, 1997](#)).

Outro grande fluxo no ciclo global de carbono é o que se dá entre a atmosfera e o oceano que movimenta aproximadamente 90 PgC anualmente. Esse fluxo, bidirecional, é regulado tanto pela atividade fotossintética e de respiração dos seres vivos marinhos como pelo processo de dissolução e de liberação de CO_2 na água. Os seres que habitam o oceano, apesar de constituir estoque bastante modesto, podem assumir papel muito importante como reguladores do fluxo entre o oceano superficial e o profundo ([SCHLESINGER, 1997](#)).

Dois tipos de atividade humana são, fundamentalmente, os maiores responsáveis pela liberação de dióxido de carbono para a atmosfera: o uso de combustíveis

fósseis e o desflorestamento e queimada de florestas, em sua maioria tropicais, para o uso agrícola e pastoril. Atualmente, não existem dúvidas de que a queima de combustíveis fósseis seja a principal responsável pelo incremento de CO_2 para a atmosfera (aproximadamente 6 PgC/ano). Já as emissões de carbono provenientes de mudanças de uso da terra são de menor magnitude (estimados 0,9 PgC/ano) ([VITOUSEK, 1992](#)), porém sujeitas a consideráveis incertezas e divergências ([KREILEMAN; BOUWMAN, 1994](#)).

Quando se somam todos os fluxos de entrada e de saída de carbono entre a atmosfera e outros reservatórios, percebe-se um desequilíbrio que seria responsável pela acumulação de carbono na atmosfera da ordem de 4,5 PgC anuais. Contudo, quando se mede a variação anual na concentração de carbono na atmosfera, observa-se uma acumulação da ordem de 3,2 PgC/ano. Acredita-se que a diferença entre a acumulação total estimada e a observada seja fruto de um fluxo ainda não muito bem definido que já foi denominado de “misterioso reservatório de carbono”. A procura do responsável por esse fluxo e pelo reservatório onde esse carbono está sendo estocado tem sido tema de grande parte da literatura recente sobre o ciclo global de carbono. Atualmente, acredita-se que esse efeito seja fruto da fertilização de CO_2 e de compostos nitrogenados sobre ecossistemas florestais, principalmente, nas regiões temperadas ([GRACE, 2001](#)).

À medida que, em decorrência da atividade humana, continua-se a emitir CO_2 na atmosfera, surge a questão da capacidade de os ecossistemas terrestres e marinhos absorverem uma quantidade tão grande de carbono das emissões presentes e futuras. A biosfera terrestre parece ter “funcionado” como um dreno de CO_2 , à taxa de aproximadamente 1,4 PgC.a⁻¹ na década de 1990, absorvendo cerca de 22% das emissões de CO_2 realizadas pelo homem (FOLEY et al., 2003). As mudanças climáticas e a alteração da concentração atmosférica do CO_2 , provavelmente, alterarão, em muitos aspectos, o balanço de carbono dos ecossistemas terrestres, afetando as taxas de fotossíntese, respiração, mortalidade da vegetação e de distúrbios como o fogo.

As previsões sobre as mudanças climáticas globais, em decorrência da ação humana, requerem a criação de outro nível hierárquico nos estudos em ecologia que transcende indivíduos, populações, comunidades e ecossistemas. Essas mudanças só podem ser compreendidas em uma escala que é hoje chamada de ecologia global.

Os principais estoques globais de carbono e os fluxos anuais de maior magnitude estão representados na Figura 2.

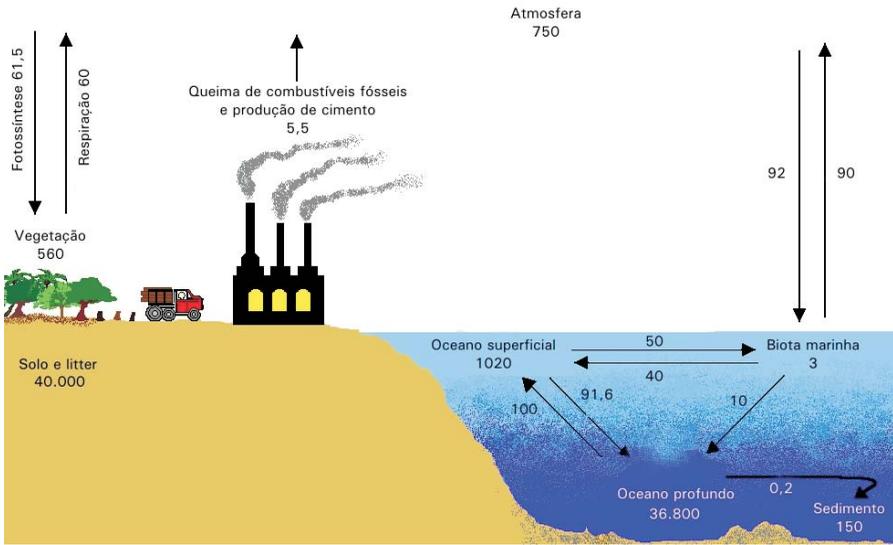


Figura 2. Principais estoques e fluxos anuais (em PgC) do ciclo global de carbono, baseado em dados coletados para o ano de 1995. Baseado em [Schlesinger \(1997\)](#).

O Ciclo Global do Nitrogênio

O nitrogênio é o elemento que constitui cerca de 78% do ar atmosférico. Contudo, mesmo com essa superabundância, a falta de nitrogênio é um dos mais importantes limitantes da produtividade na grande maioria dos ecossistemas terrestres e marinhos. Em todos os tecidos vivos, o nitrogênio é parte integrante e indispensável de todas as enzimas e demais proteínas e da molécula que define a vida, o DNA.

O maior reservatório global de nitrogênio é indiscutivelmente a atmosfera, com 3×10^{21} g N ou três quatrilhões de toneladas. Este reservatório, no entanto, contém o nitrogênio em seu estado mais inerte, na forma de N_2 que está indisponível para a esmagadora maioria de organismos da biosfera. Isso ocorre devido à grande força da tripla ligação covalente apolar existente nessa molécula. Assim, para que o nitrogênio possa ser utilizado pelos organismos, essa ligação precisa ser quebrada e o nitrogênio transformado em moléculas mais reativas

como a amônia (NH_3), amônio (NH_4^+) ou o nitrato (NHO_3^-). A transformação do N_2 para essas moléculas pode ser feita de várias maneiras que são denominadas mecanismos de fixação ou de disponibilização de nitrogênio. Já a transformação no sentido inverso é chamada de indisponibilização. Todo o nitrogênio disponível para a biosfera é originário da fixação de nitrogênio e são principalmente as taxas de disponibilização/indisponibilização que irão regular o fluxo desse elemento entre seus diferentes reservatórios.

Mecanismos de disponibilização

Até um passado geológico recente, a fixação de nitrogênio era feita principalmente pela fixação biológica (responsável atualmente por aproximadamente 140×10^{12} g N/ano). Os responsáveis por esse fluxo são alguns microrganismos que ocorrem em forma de vida livre ou simbioses com plantas. Em escala mais reduzida, a disponibilização de nitrogênio também pode ser feita pela ação dos raios.

Atualmente, como no caso do ciclo do carbono, a atividade humana não pode mais ser ignorada e constitui importante fonte alternativa de nitrogênio disponível para a biosfera, liberando anualmente em torno de 100×10^{12} g N/ano. A maior parte desse nitrogênio é depositada em áreas agrícolas na forma de fertilizantes e é produzida por processos industriais a partir de N_2 . Outra parte é liberada pela queima de combustíveis fósseis. Essa liberação não pode ser considerada um mecanismo de disponibilização clássico, uma vez que não é feita a partir da quebra do N_2 atmosférico e sim da queima de formas já disponíveis de nitrogênio. No entanto, como a queima de combustíveis fósseis libera nitrogênio de fontes anteriormente indisponíveis para a biota terrestre (bacias sedimentares profundas), esta é considerada como uma forma de fixação antropogênica de N.

A maior parte da disponibilização de nitrogênio ocorre nos ecossistemas terrestres. Nos oceanos, estima-se que a fixação biológica seja de apenas 15×10^{12} g N/ano. Além disso, os oceanos recebem 30×10^{12} g N/ano oriunda da precipitação e 36×10^{12} g N/ano dissolvidos em água proveniente do escoamento superficial (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Essa dependência de nitrogênio, originada da deposição dos rios é, em grande parte, o fator que limita a produção primária dos oceanos, áreas de estuário e plataforma continental.

Mecanismos de indisponibilização

A perda de nitrogênio para a atmosfera, mediante transformação para a forma de N_2 , é geralmente realizada por microrganismos habitantes de ambientes

anaeróbicos que, na falta do O_2 como receptor de elétrons, utilizam o nitrogênio na forma de NHO_3^- como o receptor final de elétrons de sua atividade respiratória. A esse processo, dá-se o nome de denitrificação. Ele ocorre preferencialmente em ecossistemas terrestres alagados e em oceanos mais profundos. A queima da matéria orgânica pelo fogo também é responsável por grande parte da indisponibilização do nitrogênio.

Na Figura 3, representam-se os principais estoques e fluxos anuais do ciclo global de nitrogênio, em $10^{12}g$ N/ano.

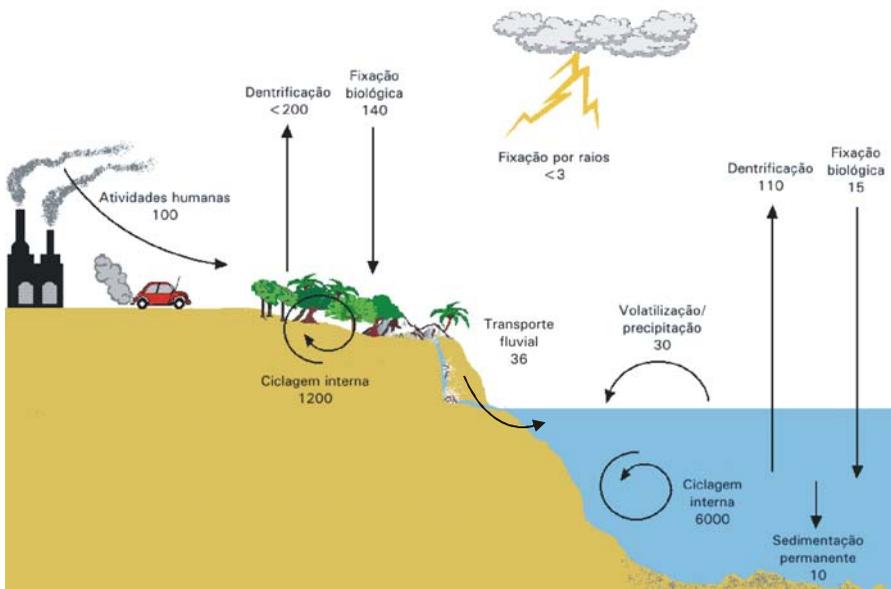


Figura 3. Ciclo do nitrogênio, baseado em [Paul e Clark \(1996\)](#)

O Ciclo Global do Fósforo

A disponibilidade do elemento fósforo (P) controla muitos aspectos do funcionamento dos ecossistemas em escala local e a química global. O fósforo, em tecidos vivos, é um componente essencial da molécula de DNA, ATP e de todos os fosfolípidios de membrana. Assim, o fósforo é condição indispensável para a presença e a manutenção da vida em qualquer ecossistema.

O ciclo global de P é peculiar entre os grandes ciclos biogeoquímicos, uma vez que esse elemento não produz, em nenhum momento, qualquer substância volátil em quantidades relevantes. O potencial redutor da maioria dos solos não permite a formação do gás fosfina (PH_3).

O fluxo de P, através da poeira na atmosfera, também é insignificante em termos de ciclo global, apesar de esse processo ser bastante importante para a manutenção de ecossistemas florestais e atividade planctônica em oceano aberto.

A ausência de uma forma atmosférica de P é o que torna esse ciclo único, uma vez que, na maioria dos outros ciclos, a atmosfera, mesmo quando não constitui reservatório importante de material, geralmente, é a responsável pela ressuspensão do elemento dos oceanos e áreas mais baixas para o continente e áreas mais altas. No caso do fósforo, isso não ocorre e, em uma escala de tempo mais curta, o que se observa é um fluxo de apenas um sentido, do continente e áreas altas dos rios para os oceanos e, finalmente, para o leito oceânico, na forma de sedimento. Esse ciclo só se completa em escala de centenas de milhões de anos.

Ao contrário do que acontece com o nitrogênio, a maior fonte global de P, nos ecossistemas naturais, não vem da atividade microbiana. A quase totalidade do P nesses ecossistemas é derivada do intemperismo de minerais à base de fosfato de cálcio, dentre os quais, a apatita tem lugar de destaque. Substâncias liberadas pelas raízes das plantas e pelos fungos associados a essas raízes podem acelerar o intemperismo em ecossistemas terrestres, mas não existe, no ciclo do fósforo, nenhum processo biológico equivalente à fixação biológica de nitrogênio capaz de produzir aumentos substanciais de fósforo em habitats carentes desse elemento.

O conteúdo de fósforo na maioria das rochas é muito baixo e, na maioria dos solos, apenas uma fração do fósforo total está disponível para a biota. Assim, tanto na terra quanto no mar, a biota persiste nos ecossistemas naturais através de um eficiente processo de reciclagem de fósforo a partir de suas formas orgânicas. Essa reciclagem biogeoquímica pode reter temporariamente e reciclar parte do fósforo do processo irrefreável de fluxo de P das rochas intemperizadas para o sedimento oceânico.

O maior fluxo anual do ciclo de fósforo é o exercido pelo transporte fluvial. Os rios transportam para os oceanos aproximadamente 21×10^{12} g P/ano (21 milhões de toneladas). Apenas cerca de 10% desse aporte fluvial vai ficar

disponível para o uso da biota marinha, o restante está ligado a partículas de solo que são pesadas e se sedimentam rapidamente logo que chegam ao mar. Do material que chega solubilizado, grande parte está na forma de fosfato (PO_4^{-3}) que possui baixa solubilidade no ambiente alcalino do oceano.

A reciclagem de fósforo orgânico no oceano é bastante eficiente: aproximadamente 90% do fósforo absorvido pela biota é reciclado no oceano superficial. O resto é mineralizado no oceano profundo. Posteriormente, todo o fósforo acaba sedimentado no fundo oceânico que contém o maior estoque desse elemento na crosta terrestre, com aproximadamente 4×10^{21} g P ou quatro quadrilhões de toneladas. O ciclo global de P somente se completa no tempo geológico, quando os processos tectônicos da crosta terrestre ressuspendem as rochas sedimentares oceânicas para acima do nível do mar onde estas podem ser novamente intemperizadas, recomeçando o ciclo.

Em sistemas agrônômicos, o fósforo sempre foi significativo limitante da produção. Além disso, dada a sua grande importância nos processos fisiológicos de todos os seres vivos, a ingestão de alimentos ricos em fósforo é fator primordial na dieta de uma população. Assim, na grande maioria dos solos e, praticamente, em todos os sistemas de produção modernos, não se pode contar apenas com o fósforo disponível naturalmente no solo que acaba se exaurindo ao longo dos sucessivos cultivos, mediante exportação de produtos. Nas áreas agrícolas, os humanos, em geral, aumentam a quantidade de P disponível pela aplicação de rochas fosfatadas, tratadas ou apenas moídas que são usadas como fertilizante.

A atividade de mineração retira atualmente cerca de 12×10^{12} g P/ano ou doze milhões de toneladas. Do total de P utilizado atualmente na atividade agroindustrial, cerca de 85% vem de rochas sedimentares, 15% de rochas ígneas ou metamórficas ([JOHNSTON, 2001](#); [LOPES, 2004](#)). O elevado uso das rochas sedimentares sugere que a atividade humana, nos últimos séculos, vem acelerando o ciclo global de fósforo. Em muitas bacias hidrográficas, o fluxo de P pelos rios é atualmente bem mais elevado que na Pré-História, conseqüência do aumento da poluição, carregamento de fertilizantes e aceleração do processo de erosão. A única etapa do ciclo não acelerada pela ação humana é a de disponibilização do fósforo nos continentes.

As reservas mundiais de fósforo em rochas continentais estão estimadas em 10×10^{15} g P e as rochas fosfatadas, no entanto, são muito mal distribuídas

dentro do globo, estando concentradas em pequenas regiões dos Estados Unidos, Norte da África (principalmente Marrocos e Argélia), China, Rússia e Oriente Médio.

A extração do fósforo de rochas é também cada vez mais cara, uma vez que as rochas estão sendo encontradas em profundidades cada vez maiores e com quantidades relativas de fósforo cada vez mais baixa. Estima-se que as reservas de fósforo, cuja exploração econômica é atualmente viável, possam suprir a atividade agroindustrial e a população humana em crescimento por um período de 60 a 250 anos ([JOHNSTON, 2001](#)).

Se no processo natural de carreamento de fósforo (rocha/vegetação/rio/oceano/sedimento), a reciclagem a partir de formas orgânicas é surpreendentemente eficiente, no processo humano (rocha/indústria/sistema agrícola/centro urbano/sistema sanitário) a reutilização do fósforo é muito baixa. Do aumento da eficiência dessa reciclagem e da diminuição das perdas de fósforo pelo processo de erosão do solo pode depender a qualidade de vida e a segurança alimentar de gerações humanas não muito distantes da nossa. Os principais estoques e fluxos do ciclo globais de fósforo podem ser visualizados na Figura 4.

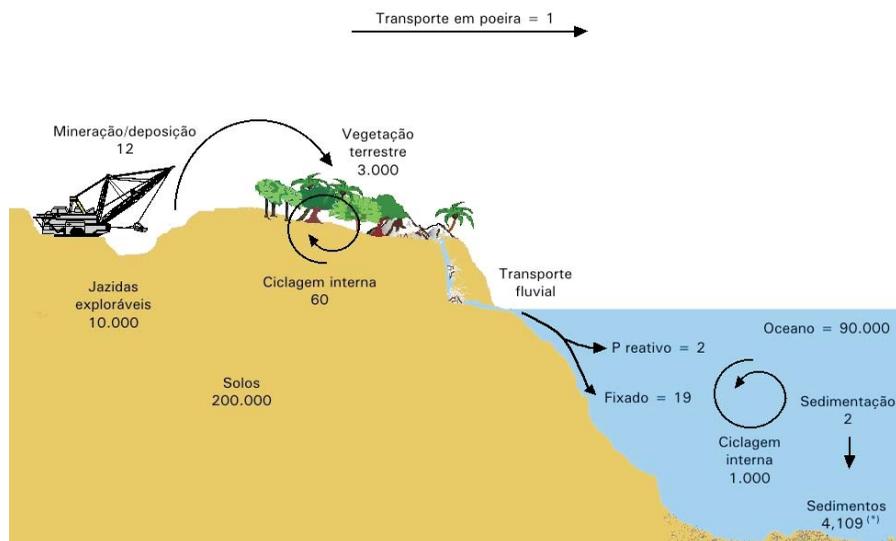


Figura 4. Principais estoques e fluxos (em 10^{12} g P e 10^{12} g P/ano) do ciclo global de fósforo. Baseado em [Schlesinger \(1997\)](#).

(*) Em 10^{21} gP

Considerações Finais

A biota da Terra não constitui, em nenhum dos grandes ciclos apresentados, um reservatório importante em termos absolutos. Sua importância na regulação desses ciclos, contudo, é absolutamente desproporcional em relação a sua capacidade de reservatório. Isso se deve ao fato de agir como o principal elo entre os ciclos, impedindo-os de atuar independentemente. Para a compreensão efetiva das mudanças climáticas globais, seria necessário levar em conta, de maneira integrada, cada um desses grandes ciclos e esse conhecimento passa necessariamente pela compreensão mais efetiva do papel da biosfera na utilização desses elementos.

Em todos os ciclos considerados, observa-se que a atividade humana pode levar a transformações significativas nas taxas de fluxo e no balanço dos elementos entre os estoques. É sintomático que a maioria das mudanças provocadas pelo homem aja de maneira mais deletéria precisamente nos estoques e nos fluxos que mais interessariam ao homem que fossem mantidos. Apesar de ser impossível para a humanidade manter seu estilo de vida sem provocar impactos significativos no meio circundante e no metabolismo da Terra, seus efeitos poderiam ser bastante minimizados com a racionalização da atividade econômica, evitando a superexploração e o desperdício. É da compatibilização das necessidades de uma população humana em crescimento com a capacidade de suporte do meio ambiente (seja na escala local, regional ou global) que depende o futuro do modo de vida do homem na Terra como o conhecemos atualmente.

Referências Bibliográficas

ADUAN, R. E. **Relações hídricas de duas gramíneas nativas e uma introduzida no cerrado e sua conexão com as conseqüências da substituição do estrato herbáceo.** 1998. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade de Brasília, Brasília.

AMOS, J. **Queimadas provocam frio e seca na Amazônia.** Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/portuguese/ciencia/020218_amazoniam1.shtml>. Acesso em: 18 fev. 2004.

ANDRAE, M. O.; ARTAXO, P.; ROSENFELD, D.; DIAS, M. A. F. S.; COSTA, A. A.; OLIVEIRA, J. C. P.; MAENHAUT, W.; CLAEYS M.; FUZZI, S.; SWIETLICK, E.; MAYOL-BRACERO, O. L.; GATTI, L. V.; LONGO, K. M.; RUDICH, Y. **Smoke aerosols, clouds, rain and climate.**

Disponível em: <http://www.lbaconferencia.org/cgi-in/brasil/bsb_ab_search.pl?action=7&eng_flag=0>. Acesso em: 09 maio 2004.

BARBOSA, R. I.; FERREIRA, C. A. C. **Biomassa acima do solo de um ecossistema de "campina" em Roraima, norte da Amazônia Brasileira**. Disponível em: <http://acta.inpa.gov.br/fasciulos_base/34-4/BODY/v34n4a06.html>. Acesso em: 09 maio 2004.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2002. 656 p.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Mudanças de uso do solo da Amazônia: implicações climáticas e na ciclagem do carbono - Milênio LBA**. Disponível em: <<http://lba.cptec.inpe.br/lba/port/documentos/projetos/MILENIOp.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 Brasileira - área temática: agricultura sustentável**. [S.l.: s. n.], 1999. Disponível em: <<http://unicamp.br/fea/ortega/curso/docfinal.rtf>>. Acesso em: 09 maio 2004.

DIAS, M. A. F. S. **Deforestation and biomass burning as drivers of regional Climate Change in Amazônia**. Disponível em: <http://www.lbaconferencia.org/cgi-in/brasil/bsb_ab_search.pl?action=7&eng_flag=0>. Acesso em: 09 maio 2004.

FOLEY, J. A.; COSTA, M. H.; DELIRE, C.; ROMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect climate. **Frontiers in Ecology and Environment**, v. 1, p. 38-44, 2003.

GRACE, J. Carbon cycle. **Encyclopedia of Biodiversity**, v. 1, p. 609-629, 2001.

JOHNSTON, A. E. **Soil and plant phosphate**. Paris: International fertilizer industry Association, 2001. 46 p. Disponível em: <http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/soilplant.pdf>. Acesso em: 10 maio 2004.

KREILEMAN, G. J. J.; BOUWMAN, A. F. Computing land use emissions of greenhouse gases. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 76, p.231-250, 1994.

LIMA, O. A. L. Geosistemas e recursos hídricos: água subterrânea no estado da Bahia. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 13, p. 391-402, 2003. Número especial.

LOPES, A. S. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro, SP. **Anais...** Piracicaba, SP: POTAFOS, 2004. 1 CD-ROM.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. 625 p.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. California: Academic Press, 1996. 340 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

SAUTCHÚK, C. A. **Formulação de diretrizes para a implantação de programas de conservação de água em edificações**. 2004. 308 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SCHLESINGER, W. H. **Biogeochemistry: an analysis of global change**. 2nd. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 588 p.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; MORAIS, A. R. Aspectos fisiológicos e silviculturais do palmitheiro (*Euterpe edulis martius*) plantado em diferentes tipos de consórcios no Município de Lavras, Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 7, p. 41-53, 2001.

VITOUSEK, P. M. Global environmental change: an introduction. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 23, p. 1-14, 1992.

WOODWELL, G. M.; MACKENZIE, F. T.; HOUGHTON, R. A.; APPS, M. GORHAM, E.; DAVIDSON, E. A. Biotic feedbacks in the waring of the earth. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 40, p. 495-518, 1998.

The Greatest Biogeochemistry Cycles of the Planet

Abstract - *The aim of this work was to present in a didactic way the biogeochemical cycles of the four most important elements and substances on global chemistry: water, carbon, nitrogen and phosphorous. The importance of these elements and substances becomes from the great magnitude of mass and energy utilized in their processes, and on their essentiality on biosphere formation and maintenance. This work intends to show the interdependence between these great cycles and the biosphere, and the way that the human activity influences on the chemical dynamic of the globe, and the consequences of these shifts for the humanity itself.*

Index terms: biogeochemical cycling, phosphorus, nitrogen, carbon, weather, global climate change