

Autor	Pinto-Coelho, R.M.	Cap. 23
Obra	Fundamentos em Ecologia	
Cap.	Ciclos biogeoquímicos (parte 2)	

Ciclo do carbono

Ciclo do nitrogênio

Ciclo do fósforo

Ciclo do enxôfre

Ciclos biogeoquímicos nos trópicos

Ciclo do Carbono

O ciclo do carbono tem uma renovação mais lenta e um tempo de residência maior do que o ciclo do água. A maior parte do carbono da biosfera encontra-se sob a forma de carbonatos dissolvidos na água dos mares profundos (Figura 23.1). Assim, para se entender o funcionamento do ciclo do carbono é necessário conhecer as principais vias desse ciclo nos oceanos. Além dos carbonatos dissolvidos, o carbono pode estar estocado em grandes quantidades nos sedimentos marinhos que formam os precursores do petróleo (querogênio). Existem ainda consideráveis quantidades de carbono orgânico (dissolvido COD) e particulado nas águas dos mares. Todo esse carbono é continuamente reciclado dentro da cadeia planctônica (fitoplâncton, zooplâncton) e também envolvendo o nécton que o devolve ao compartimento inorgânico via respiração. Os carbonatos podem ainda serem direcionados à atmosfera e vice versa.

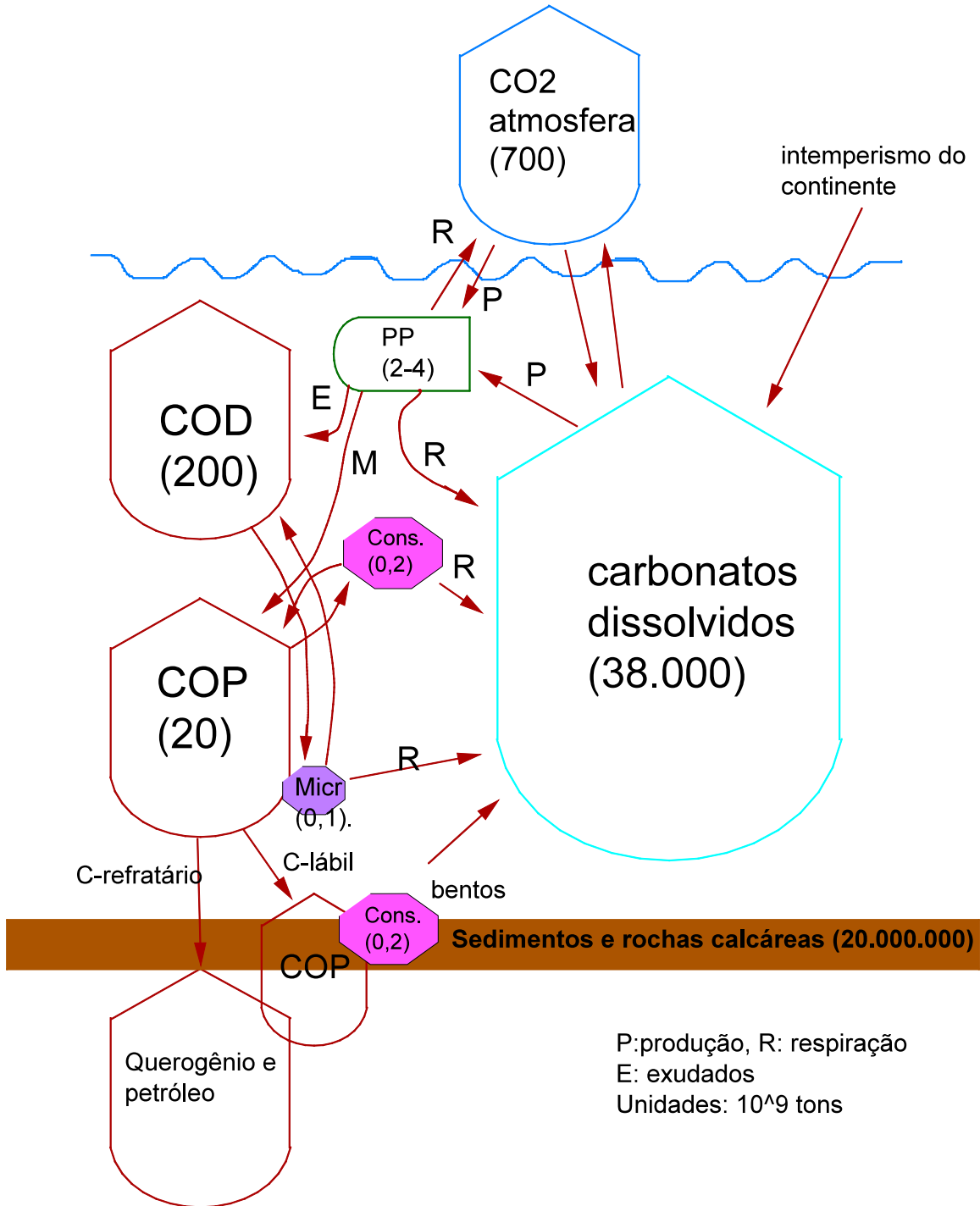


Figura 23.1 O ciclo do carbono nos oceanos (original a partir de várias fontes). Livro texto: versão preto e branco.

O ciclo do carbono é um dos ciclos mais influenciados por atividades antrópicas. As principais formas dessa interferência são através da queima de matéria orgânica: combustíveis fósseis e pela queima de florestas (Figura 23.2). Nos países de clima temperado e frio, são alocadas grandes quantidades de gás natural e óleo para a produção de calor destinado ao aquecimento. Adicionalmente, os países industrializados, ao privilegiarem de forma indiscriminada o transporte individual em veículos equipados com motores à explosão, também contribuem de forma expressiva para a liberação de CO₂ para a atmosfera. Os países com grandes extensões florestais, principalmente na faixa tropical, também contribuem de forma expressiva gerando um impacto adicional nessa emissão de gás carbônico. Muitas vezes, no entanto, os países situados na região tropical tem sido injustamente acusados pela comunidades dos países industrializados como sendo os maiores responsáveis pela crescente emissão de CO₂.

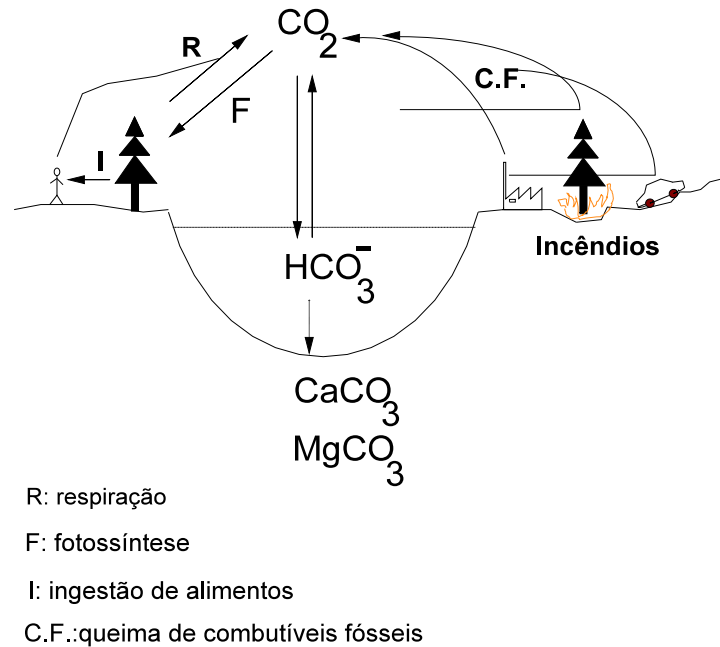


Figura 23.2 Interferências humanas no ciclo do carbono

Existem, no entanto, grandes quantidades de carbono imobilizadas sob a forma de rochas calcáreas na crosta terrestre. Eventualmente este carbono pode vir a ser remobilizado via movimentos geológicos da Terra (geossinclinais).

O ciclo do carbono é um ciclo misto, e também possui um pequeno depósito atmosférico. O CO_2 é responsável por cerca de 0.033 % da composição gasosa total da atmosfera terrestre. Em

decorrência do aumento das entradas de CO₂ na atmosfera, sua concentração tem sofrido um acréscimo notável a partir da segunda metade do século XIX, quando ainda eram registradas 260 ppm. Nas últimas três décadas, os máximos anuais passaram de pouco menos de 320 ppm, em 1959 para mais 350 ppm em 1987 (Figura 23.3).

Em 1970, foram liberados por essa via cerca de 8 bilhões de toneladas de CO₂. Esta

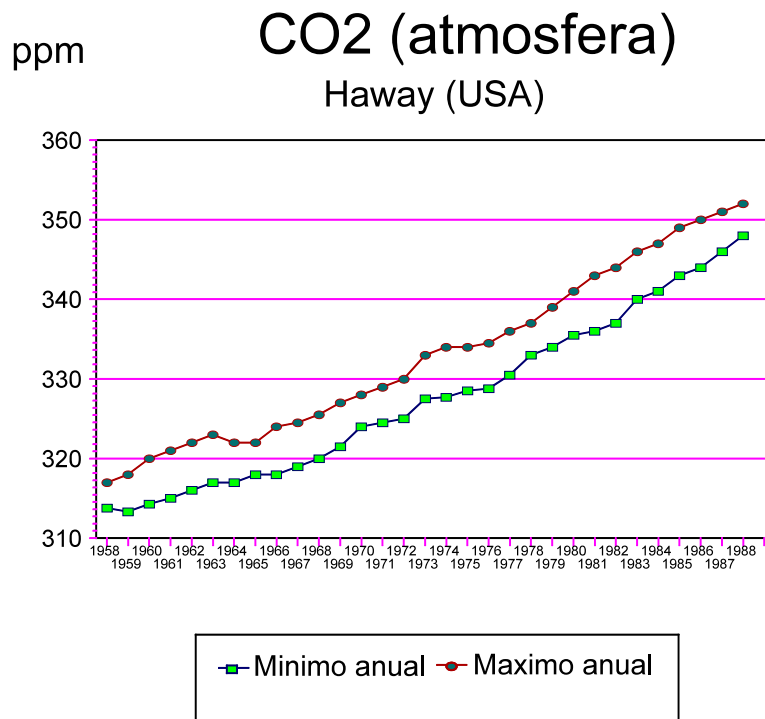


Figura 23.3 Concentrações de CO₂ atmosférico no Havaí nas duas últimas décadas (modif. de Krebs, 1994).

molécula é capaz de absorver relativamente mais radiação infravermelho proveniente do sol do que as moléculas de nitrogênio e oxigênio. Deste modo, apesar de sua pequena dimensão, o depósito atmosférico do carbono tem a capacidade de influenciar o clima da terra, pois um pequeno aumento nas concentrações de CO₂ atmosférico pode estar associado a um aumento da temperatura média da Terra. A este fenômeno dá-se o nome de "efeito estufa". Outras moléculas gasosas monocarbônicas, tais como o metano (CH₄), também podem contribuir para o agravamento deste fenômeno. O metano é originário nas zonas da biosfera onde predomina o metabolismo anaeróbico. Nessa região, irão proliferar várias bactérias anaeróbicas e, dentre elas, as bactérias metanogênicas que produzem o metano. Salinas de evaporação da água do mar, arrozais e demais áreas alagadas rasas com elevados teores de matéria orgânica em geral são os ambientes onde existem as maiores emissões de metano.

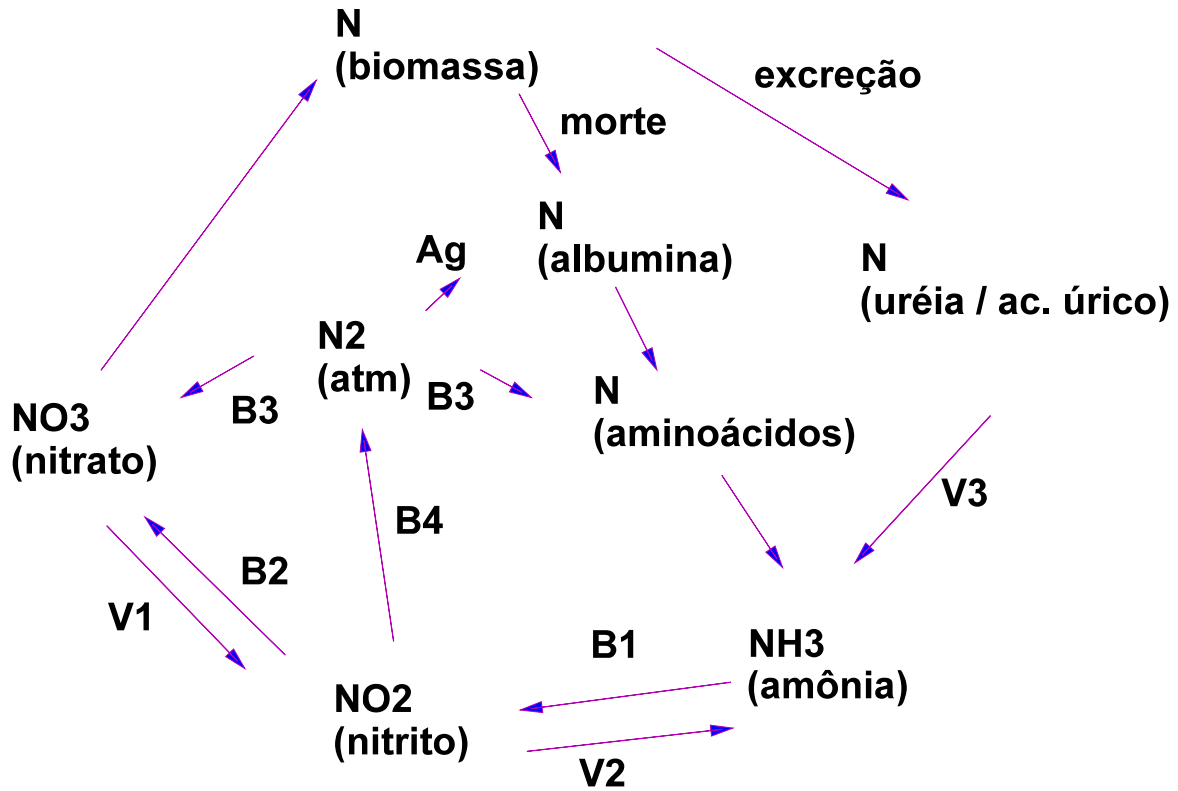
Ciclo do Nitrogênio

É um ciclo tipicamente gasoso. O depósito abiótico encontra-se sob a forma de N₂ gasoso. As quantidades desse gás na atmosfera terrestre é bem superior à quantidade de nitrogênio gasoso existente na atmosfera de planetas vizinhos (Tabela 23.1).

Tabela 23.1 Composição percentual da atmosfera da Terra e dos planetas vizinhos.

Gás	Planeta		
	Vênus	Terra	Marte
CO ₂	98	0,03	95
N ₂	1,9	79	2,7
O ₂	traços	21	0,13
Argônio (Ar)	0,1	1	2

A forma usual de incorporação do nitrogênio pelas plantas é sob a forma de nitrato ou de amônia. Na biomassa, o nitrogênio desempenha um papel fundamental como elemento estrutural de praticamente todas as classes de compostos bioquímicos (proteínas, ácidos nucleicos, lipídeos, etc). O nitrogênio volta ao reservatório (*pool*) abiótico via excreção de uréia, amônia ou ácido úrico ou então por decomposição bacteriana e fúngica de cadáveres. Por ação bacteriana, ele é rapidamente oxidado de nitrogênio albuminóide a amônia, nitrito e nitrato (Figura 23.4).



B1: *Nitrosomonas* sp.

B2: *Nitrobacter* sp.

B4: Bact. desnitrificantes

B3: Bact. nitrificantes (ex: *Rhizobium* sp.)

Ag: Algas nitrificantes (ex: *Nostoc* sp.)

V1: Varias bacterias

V2: Varias bacterias (ex: *Clostridium* sp.)

V3: Varios organismos (ex: *Urobacilus* sp.)

Figura 23.4 Ciclo do nitrogênio.

A fixação biológica do nitrogênio atmosférico é muito importante sob o aspecto ecológico e ocorre graças à ação de certas bactérias e algas, em meio anaeróbico requerendo aporte de energia. Ambas as condições estão presentes nos nódulos das raízes de leguminosas e nos heterocistos das algas azuis. O cobalto e o molibdênio são importantes uma vez que estão nas enzimas que catalizam do processo. Várias bactérias, sejam de vida livre ou não, são capazes de fixar o nitrogênio (Tabela 23.2).

Tabela 23.2 Bactérias fixadoras de nitrogênio gasoso (N₂).

Tipo de bactéria fixadora de N ₂	Exemplos
Vida livre	<i>Azotobacter sp.</i> (aeróbica) <i>Clostridium sp.</i> (anaeróbica) <i>Pseudomonas sp.</i>
Simbiontes	<i>Rhizobium sp.</i> <i>Spirillum lipoferum</i>
Purpúreas	<i>Rhodospirillum sp.</i>
Cianobactérias	<i>Nostoc sp.</i> <i>Anabaena sp.</i>

Várias plantas possuem simbioses com bactérias fixadoras. Dentre elas podemos citar: várias leguminosas (soja e feijão), *Araucaria*, *Casuarina* e algumas gramíneas. As gramíneas *Digitaria decumbens* e *Zea mays* apresentam simbioses com a bactéria *Spirillum lipoferum* sendo que no caso do milho estas bactérias são encontradas no córtex.

Ciclo do Fósforo

É um ciclo tipicamente sedimentar (Figura 23.5). O fósforo inorgânico é absorvido pelos vegetais sob a forma de ortofosfato (PO_4^{3-}). Na maioria dos ecossistemas, as quantidades disponíveis de ortofosfato seja no solo seja na água são muito baixas e este elemento é o fator limitante da produção biológica. A eutrofização de corpos d'água, caracterizada por aumento desequilibrado da produção primária, é muitas vezes causada pelo aporte externo de fósforo. Deste modo, o entendimento dos mecanismos que contribuam para aumentar a taxa de circulação do fósforo entre o *pool* inorgânico e a biomassa são fundamentais em Ecologia.

A determinação destas taxas é tão importante quanto a delimitação das quantidades presentes nos diversos compartimentos do ecossistema (*pool* inorgânico, biomassa vegetal, animal, detritos, etc.). As principais taxas metabólicas que afetam a ciclagem de fósforo nos diversos ecossistemas seriam as seguintes:

- a) taxa de absorção de fósforo pelos vegetais;
- b) taxa de consumo de vegetais pelos herbívoros;
- c) taxas de excreção de fósforo pelos heterótrofos mais abundantes e
- d) taxa de remineralização de fósforo pelos microorganismos decompositores (bactérias, fungos e leveduras).

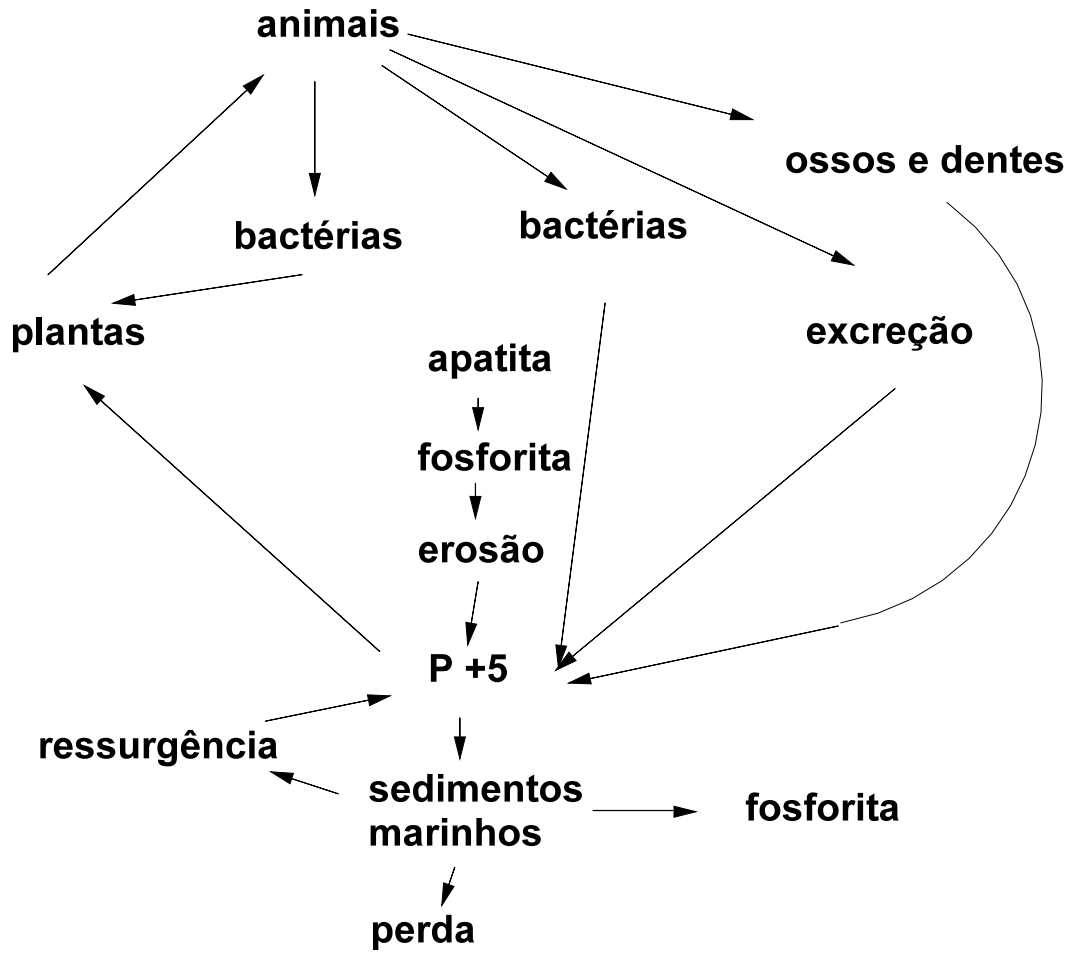


Figura 23.5 Ciclo do fósforo.

Certos organismos que passariam quase despercebidos num ecossistema tais como o molusco *Modiolus demissus*, podem ser fundamentais para a circulação de um elemento no ecossistema. Este mexilhão põe em circulação a cada 2.5 dias uma quantidade de fósforo equivalente a concentração deste elemento na água em que vive. Os organismos, por sua vez, necessitam de quantidades mínimas de fósforo bastante diferentes: *Nitzschia palea* e *Botryococcus braunii* são duas algas que necessitam de 18 e 89 g/l de fósforo para crescer em condições ótimas, respectivamente.

Ciclo do Enxofre

É um ciclo misto. A componente sedimentar é representada pelas rochas pirita e calcopirita. No meio aquoso, as formas do enxofre vão depender do estado de oxidação do meio. Em condições oxidantes (meio aeróbico) o enxofre encontra-se sob a forma de sulfatos (SO_4^{2-}) e em condições redutoras sob a forma de sulfetos (S_2^{2-}). A ciclagem do enxofre é muito influenciada pela ação bacteriana (Figura 23.6).

Muitas vezes certos processos que ocorrem em um ciclo podem influenciar a ciclagem de

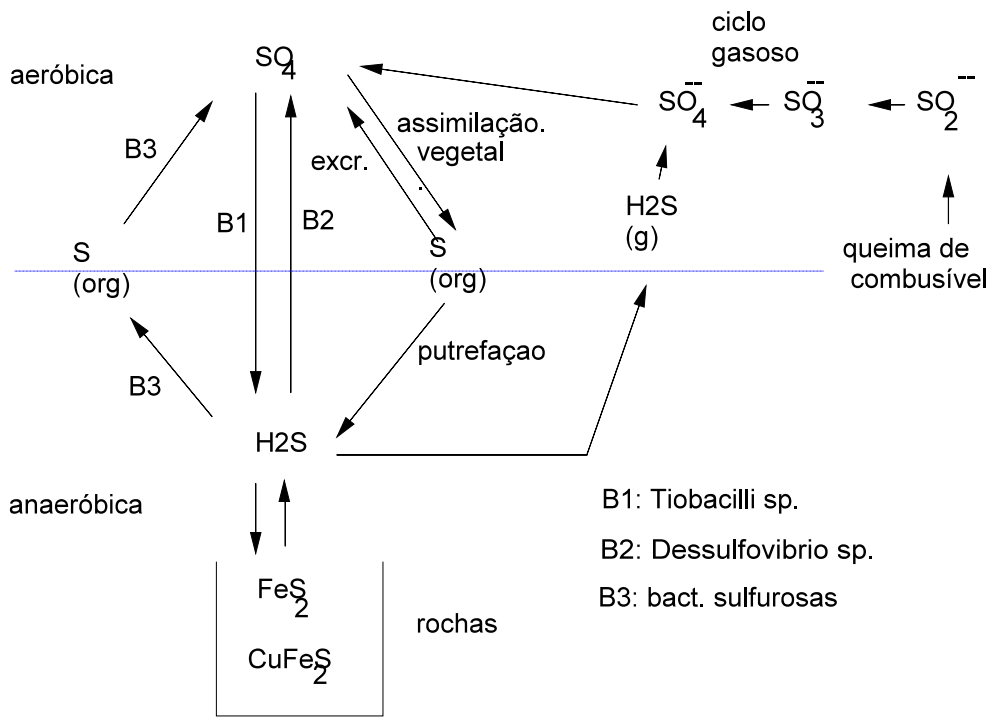
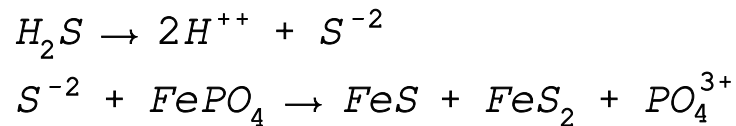


Figura 23.6 Ciclo do enxôfre.

outro elemento. Em condições redutoras (meio anaeróbico) o enxofre apresenta-se normalmente sob a forma de H_2S . Nestas condições, o sulfeto normalmente combina-se com o ferro liberando o fósforo:



Desta forma, a formação de zonas anóxicas em lagos eutróficos causada pela crescente decomposição anaeróbica de matéria orgânica pode levar a um ulterior agravamento da eutrofização, graças à liberação do fósforo retido nos sedimentos anaeróbicos, como visto na reação acima.

Ciclos biogeoquímicos nos trópicos

O conhecimento dos mecanismos envolvidos nos ciclos biogeoquímicos em ecossistemas tropicais é de grande relevância para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de desenvolvimento humano nessas regiões. A falta de observância desse tipo de conhecimento tem sido uma das principais causas de tentativas fracassadas de transposição de métodos agroflorestais derivados de zonas temperadas para as zonas mais quentes da biosfera. No Brasil, por exemplo, pode-se citar os cultivos intensivos da borracha na Amazônia no início do século (Fordlândia), a transformação de várias áreas florestais para a formação de pastagens para cultivo extensivo de gado (Rondônia nas décadas de setenta e oitenta), além de diversos outros projetos agroflorestais na região amazônica. Todas essas iniciativas, quando não foram um completo fracasso, geraram um grande passivo ambiental que torna difícil a justificativa a tais empreendimentos. Uma característica distintiva dos ciclos de materiais nas zonas tropicais é o fato de que uma maior porcentagem dos

elementos está assimilada na biomassa, ou seja, maiores porções do elemento estão intrabiotizadas. Isto é particularmente verdadeiro para certos nutrientes essenciais tais como o fósforo e o potássio (Figura 23.7).

Outra característica dos ciclos biogeoquímicos nas zonas tropicais é a alta taxa de renovação da biomassa, aliada a uma maior magnitude dos processos de decomposição e excreção de nutrientes de toda a biota. Adicionalmente, várias simbioses entre autótrofos e heterótrofos facilitam a volta dos elementos contidos no corpo de organismos em decomposição para a biomassa vegetal. Os micorrizos em florestas tropicais ou as associações entre corais e algas em recifes, as zooxantelas são alguns exemplos dessas simbioses. Os micorrizos fúngicos, abundantes na serapilheira de florestas tropicais podem se associar às raízes ou até mesmo nelas penetrar. Eles obtêm alimento de origem orgânica das plantas e, em troca, liberam nutrientes inorgânicos muitas vezes limitantes para o desenvolvimento dessas plantas, tais como o fósforo.

Outra característica importante dos ciclos em florestas tropicais é a notável capacidade

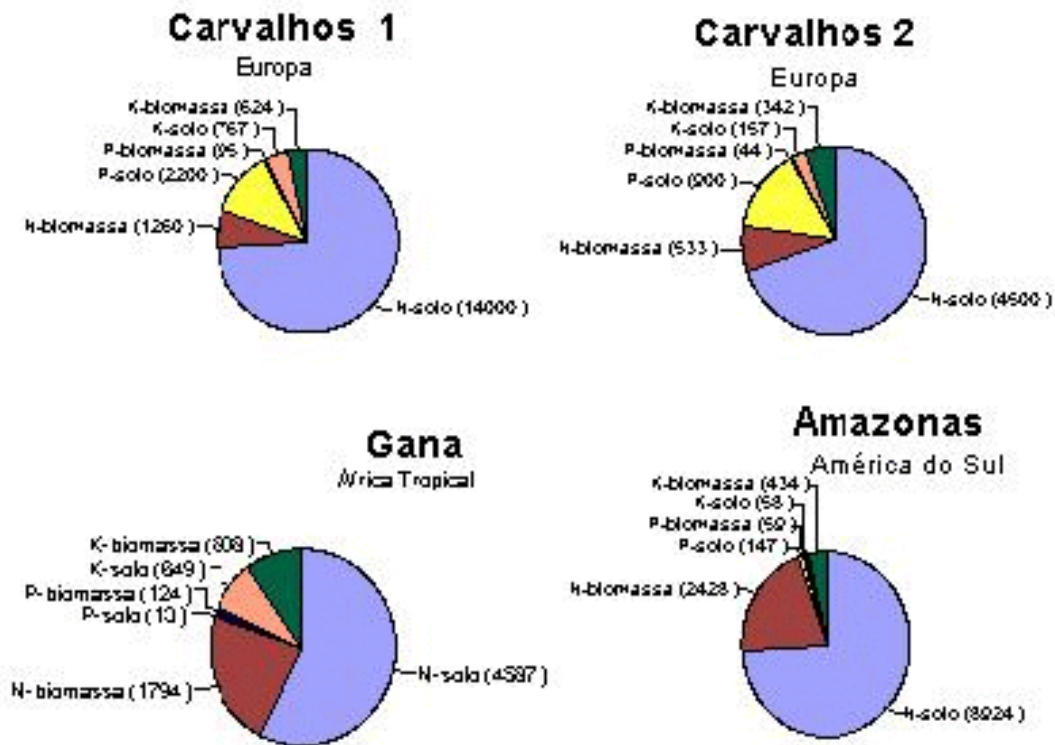


Figura 23.7 Disponibilidade de N,P e K no solo e biomassa vegetal em ecossistemas terrestres tropicais e temperados (Kg/ha). Modificado de Ricklefs (1990) e Salati & Vose (1984).

lixiviadora ali verificada. Ela é consequência do baixo pH do solo associado a uma certa ausência de argilas capazes de "segurar" o nutriente no solo. Deste modo, a única maneira de manter os elementos em contínua circulação e retê-los o maior tempo possível na biomassa seja ela vegetal ou animal.

Técnicas agrícolas de sucesso nos trópicos devem necessariamente levar em consideração estes aspectos. Um bom exemplo seria a agricultura itinerante utilizada pelos ameríndios que consiste em abandonar um campo agrícola após alguns anos de uso para que o depósito abiótico dos elementos possa se regenerar. Outra técnica consiste em associar diferentes culturas tais como o uso simultâneo de leguminosas e gramíneas (ex: milho e feijão), uma vez que muitas leguminosas em associação com bactérias fixadoras simbiotes, tais como o *Rhizobium*, são capazes de fixar nitrogênio. Nos arrozais asiáticos, o nitrogênio é usualmente fixado graças a ação de cianobactérias (*Nostoc*) capazes de fixar o nitrogênio. Recentemente, o plantio direto tem sido adotado com sucesso em muitas culturas tropicais. Trata-se de uma técnica baseada no desmate seletivo e na manutenção de uma camada de vegetação contendo, entre outros materiais, os restos vegetais da última colheita. Essa técnica vem permitindo minorar a lixiviação e concomitante redução de impactos nos cursos d água, além de proporcionar uma redução de custos com insumos tendo como benefício maior uma melhor proteção ao meio ambiente.

Observação: Graças a limitações de edição e a revisões de pré-impressão, poderão existir pequenas diferenças entre essa amostra de texto e o original do livro.