

3. Os Ciclos Biogeoquímicos

3.1. Introdução

Os ciclos biogeoquímicos são processos naturais que por diversos meios reciclam vários elementos em diferentes formas químicas do meio ambiente para os organismos, e depois, fazem o processo contrário, ou seja, trazem esses elementos dos organismos para o meio ambiente. Dessa forma, a água, o carbono, o oxigênio, o nitrogênio, o fósforo, o cálcio, entre outros elementos, percorrem esses ciclos, unindo todos os componentes vivos e não-vivos da Terra.

Sendo a Terra um sistema dinâmico, e em constante evolução, o movimento e a estocagem de seus materiais afetam todos os processos físicos, químicos e biológicos. As substâncias são continuamente transformadas durante a composição e a decomposição da matéria orgânica, sem escapar da biosfera, sendo, portanto recicláveis.

Um ciclo biogeoquímico pode ser entendido como sendo o movimento ou o ciclo de um determinado elemento ou elementos químicos através da atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera da Terra.

Os ciclos estão intimamente relacionados com processos geológicos, hidrológicos e biológicos. Como exemplo, pode-se lembrar que um modesto conhecimento sobre o ciclo geológico (aqui referido como um conjunto dos processos responsáveis pela formação e destruição dos materiais da Terra, subdividido em ciclo hidrológico e ciclo das rochas) é valioso para o conhecimento e compreensão de nosso ambiente, que está intimamente relacionado aos processos físicos, químicos e biológicos.

Os caminhos percorridos ciclicamente entre o meio abiótico e o biótico pela água e por elementos químicos conhecidos, como C, S, O, P, Ca e N, constituem os chamados ciclos biogeoquímicos.

O estudo desses ciclos se torna cada vez mais importante, como, por exemplo, para avaliar o impacto ambiental que um material potencialmente perigoso, possa vir a causar no meio ambiente e nos seres vivos que dependem direta ou indiretamente desse meio para garantir a sua sobrevivência.

Como já fora visto anteriormente, a matéria pode ser constantemente reaproveitada na natureza, ou seja, quando uma planta ou um animal morre, as bactérias e fungos que estão presentes nos solos dão início ao processo de decomposição desses seres, e nesse processo de decomposição são trazidos de volta ao solo sais minerais, água e outros elementos, como Na, K, P, N.

Uma vez que esses elementos estão disponíveis novamente no solo, ar ou no ambiente de maneira geral, o processo todo se reinicia, como se fosse uma grande engrenagem, ou seja, o nitrogênio que está no ar atmosférico é utilizado por algumas bactérias que se encontram nas raízes de algumas plantas, o fósforo é novamente incorporado pelos seres vivos para compor os fosfolípidios e assim sucessivamente.

Os ciclos biogeoquímicos estão intimamente relacionados com os processos geológicos, de tal forma que é praticamente impossível tentar entender um ciclo biogeoquímico sem antes saber o que se passou com o planeta, as transformações que ele sofreu e que ainda hoje continua a sofrer, visto que a Terra é um sistema que prima pelo equilíbrio dinâmico que possui.

3.1.1. O Ciclo da Água

A água na natureza pode ser encontrada nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. Os oceanos e mares constituem cerca de 97% de toda água; dos 3% restantes, 2,25% estão em forma de gelo nas geleiras e nos pólos, e apenas 0,75% estão nos rios, lagos e lençóis freáticos.

A quantidade de água na forma de vapor na atmosfera é reduzidíssima quando comparada às grandes quantidades que são encontradas nos outros estados, mas apesar dessa pequena quantidade, ela é fundamental na determinação das condições climáticas e de vital importância para os seres vivos. A água encontrada na atmosfera é proveniente da evapotranspiração que compreende a transpiração dos seres vivos e a evaporação da água líquida. A evapotranspiração exige energia para ser realizada. Em última análise, pode-se afirmar que essa energia provém do sol, atuando diretamente na evaporação e indiretamente na transpiração, afinal a transpiração dissipa calor do organismo para o ambiente. A água gasosa da atmosfera se condensa e pode precipitar na forma de chuva (líquida), ou por um resfriamento excessivo na forma sólida (neve ou granizo).

Nos continentes e ilhas, a evapotranspiração é menor do que a precipitação, o que possibilita a formação de rios, lagos e lençóis freáticos. O processo inverso ocorre nos oceanos e mares, onde a precipitação é menor que a evapotranspiração. Isso

poderia sugerir que um dia os oceanos iriam secar, mas, então, por que isso não ocorre?

Não ocorre porque o excesso de água dos continentes de alguma forma é levado aos mares e oceanos por ação dos rios, que sempre desembocam nos mares e oceanos.

O esquema da figura 4 ilustra a maneira como a água sai do ambiente e como ela retorna a esse ambiente. Mais uma vez é conveniente observar que todo o movimento que a água realiza é cíclico, ou seja, ela sai do ambiente, percorre o seu caminho, seja ele na terra, ou na atmosfera, cumpre todas as suas funções, e depois disso, quando ocorre a precipitação, ela volta ao seu ponto inicial, ficando disponível para novamente recomeçar o seu ciclo na natureza.

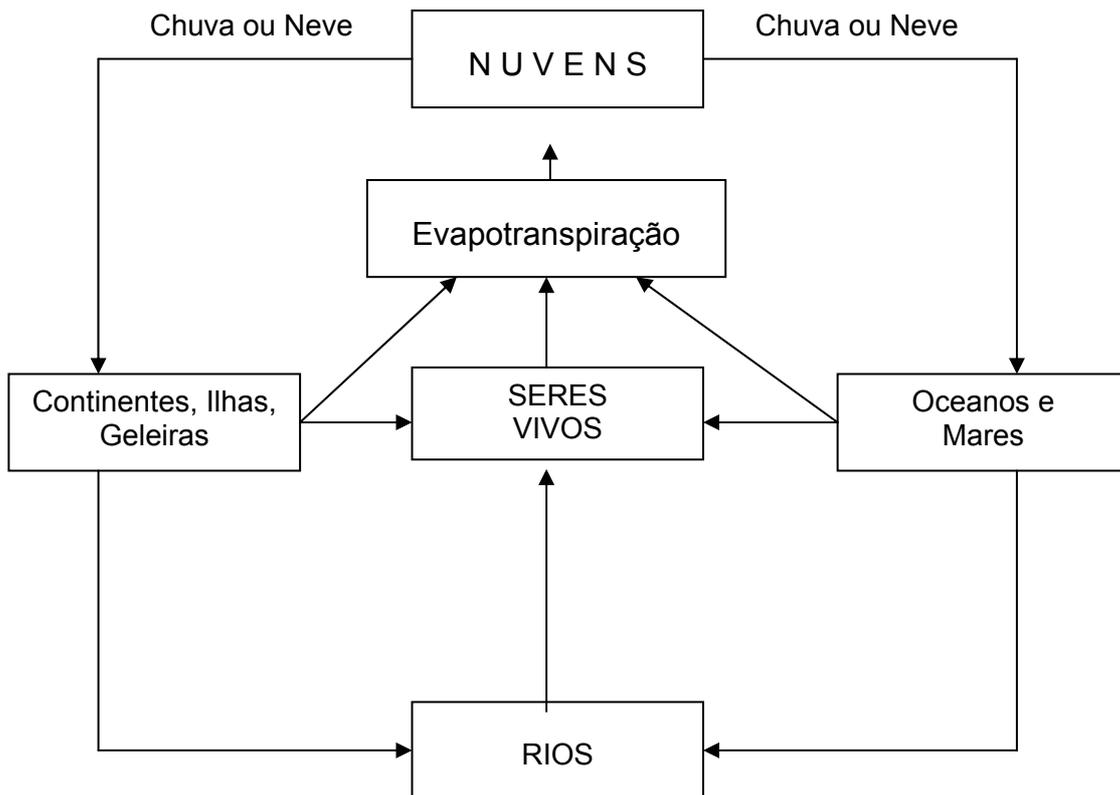


Figura 4. Diagrama do ciclo da água no planeta.

3.1.2. O Ciclo das Rochas

O ciclo das rochas consiste de vários processos que produzem rochas e solos. Esse ciclo depende do ciclo tectônico para energia e do ciclo hidrológico para água.

O calor gerado pelo ciclo tectônico produz materiais fundidos, como a lava vulcânica, que ao se solidificarem na superfície ou em camadas mais finas dão origem às rochas ígneas. Essas rochas, ao se congelarem e descongelarem, quebram-se devido à expansão e contração. Podem também se desagregar devido a processos químicos, pela ação de ácidos fracos formados na presença de CO_2 , matéria orgânica e água, além de processos físicos, como o vento.

O ciclo das rochas inicia-se com a destruição das rochas que estão na superfície, pela ação de agentes externos, sejam eles físicos ou químicos, ação essa conhecida como **intemperismo**.

O intemperismo é o processo de degradação das rochas e acontece quando as rochas expostas à atmosfera sofrem um ataque erosivo, provocado pelo clima (vento, chuvas, etc), que pode modificar o seu aspecto físico ou a sua composição mineralógica. O intemperismo é um processo de desgaste mecânico, operado pelas águas correntes, pelo vento, pelo movimento das geleiras e pelos mares.

Os sedimentos, que são os produtos resultantes da ação do intemperismo, são transportados por diversos fluidos, passando a circular sobre a superfície terrestre por ação do calor solar ou da gravidade.

Quando cessa a energia que os fazem circular, eles se depositam nas regiões mais baixas, formando-se então as rochas sedimentares.

Com o passar do tempo, as rochas sedimentares são sepultadas a grandes profundidades, sofrendo então constantemente o efeito do calor terrestre e se tornando cada vez mais duras. Nos níveis mais profundos da Terra, cerca de 10 a 30 km, a temperatura e a pressão são cada vez maiores, acontecendo então a transformação das rochas sedimentares em rochas metamórficas. A temperatura aumenta de tal forma que essas rochas são levadas à fusão, transformando-se novamente em rocha ígnea.

Devido à intensa atividade que ocorre no interior do planeta, ocorre o processo de levantamento dessa rocha. Isso acontece cada vez mais até o momento em que a rocha começa a chegar aos níveis superiores, e após algumas dezenas de milhares de anos essa rocha chega novamente à superfície, onde estará sujeita a ação dos agentes externos, reiniciando, assim, o ciclo.

A vida desempenha um papel fundamental nesse ciclo, por meio da incorporação do carbono nas rochas. Processos de biossedimentação produzem as chamadas rochas calcárias (CaCO_3 , principalmente), além de substâncias húmicas e petróleo.

Fica evidente nesse ciclo a ação da água, pois ela é o principal agente responsável pelo deslocamento dos sedimentos obtidos por meio do intemperismo, sendo que ela também é um dos agentes capazes de causar esse intemperismo. Ela assume esse papel principal, pelo fato de ser capaz de dissolver materiais inorgânicos contidos nos sedimentos, bem como é capaz de arrastar partículas de maior massa, o que seria impossível apenas pela ação do vento.

3.1.3. O Ciclo do Carbono

O carbono é um elemento químico de grande importância para os seres vivos, pois participa da composição química de todos os componentes orgânicos e de uma grande parcela dos inorgânicos também.

O gás carbônico se encontra na atmosfera numa concentração bem baixa, aproximadamente 0,03% e, em proporções semelhantes, dissolvido na parte superficial dos mares, oceanos, rios e lagos.

Removido da atmosfera pela fotossíntese, o carbono do CO_2 incorpora-se aos seres vivos quando os vegetais, utilizando o CO_2 do ar, ou os carbonatos e bicarbonatos dissolvidos na água, realizam a fotossíntese. Dessa maneira, o carbono desses compostos é utilizado na síntese de compostos orgânicos, que vão suprir os seres vivos.

Da mesma maneira, as bactérias que realizam quimiossíntese fabricam suas substâncias orgânicas a partir do CO_2 . Os compostos orgânicos mais comumente formados são os açúcares (carboidratos), mas, além deles, as plantas são capazes de produzir proteínas, lipídeos e ceras em geral.

O carbono das plantas pode seguir três caminhos (figura 5):

- pela respiração é devolvido na forma de CO_2 ;
- passa para os animais superiores via cadeia alimentar;
- pela morte e decomposição dos vegetais, volta a ser CO_2 .

O carbono é adquirido pelos animais, de forma direta ou indireta, do reino vegetal durante a sua alimentação. Assim, os animais herbívoros recebem dos vegetais os compostos orgânicos e, através do seu metabolismo, são capazes de sintetizar e até transformá-los em novos tipos de produtos. O mesmo ocorre com os animais carnívoros, que se alimentam dos herbívoros e assim sucessivamente. O carbono dos animais pode seguir, assim como as plantas, três caminhos (figura 5):

- pela respiração é devolvido na forma de CO_2 ;
- passagem para outro animal, via nutrição;
- pela morte e decomposição dos animais, volta a ser CO_2 ;

Um outro mecanismo de retorno do carbono ao ambiente é por intermédio da combustão de combustíveis fósseis (gasolina, óleo diesel, gás natural). Além desse, a queima de florestas é uma outra forma de devolução, mas vale ressaltar que esse método pode acarretar sérios danos ao ambiente, ocasionando grandes variações no ecossistema global do planeta.

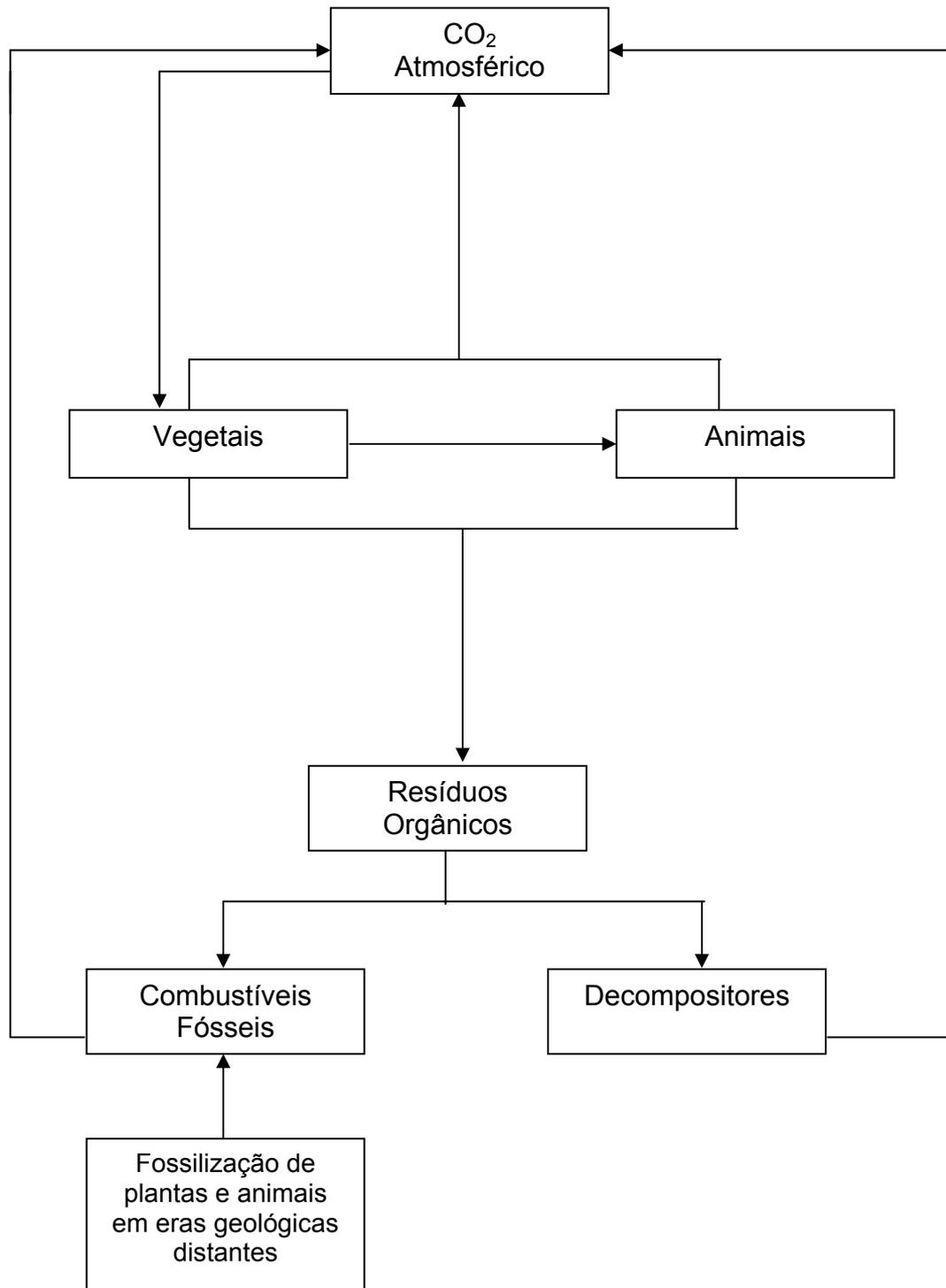


Figura 5. Esquema representativo do ciclo do carbono.

3.1.4. O Ciclo do Cálcio

O Ca é um elemento químico muito importante para os seres vivos. No vegetais, ele participa principalmente como ativador de enzimas, além de participar como componente estrutural de sais de compostos pécticos da lamela média.

A maior participação do cálcio nos animais está relacionada com a formação de esqueletos, pois ele é parte constituinte dos exoesqueletos de invertebrados e conchas. Além disso, atua em processos metabólicos: sua participação é fundamental no processo de coagulação do sangue, além de ser muito útil no processo de contração muscular.

A fonte primária de cálcio na natureza são, sem dúvida, as rochas calcárias, que, devido à ação de agentes diversos, sofrem intemperismo, o qual provoca erosão, levando os sais de cálcio para o solo, de onde são carregados pelas chuvas para os rios e mares. Assim como ocorre com o fósforo, o cálcio tende a se acumular no fundo do mar.

O intemperismo pode ser entendido como o conjunto de processos mecânicos, químicos e biológicos que ocasionam a destruição física e química das rochas, formando os solos. Mais uma vez, fica muito claro a grande participação que a água exerce nos ciclos biogeoquímicos; no ciclo do cálcio, como no ciclo das rochas, sua presença é de suma importância para que os ciclos possam ser reiniciados. O mecanismo que rege o ciclo do cálcio segue mais ou menos os seguintes passos. Inicialmente o CO_2 atmosférico dissolve-se na água da chuva, produzindo H_2CO_3 . Essa solução ácida, nas águas superficiais ou subterrâneas, facilita a erosão das rochas silicatadas e provoca a liberação de Ca^{2+} e HCO_3^- , entre outros produtos, que podem ser lixiviados para o oceano. Nos oceanos, Ca^{2+} e HCO_3^- são absorvidos pelos animais que o utilizam na confecção de conchas carbonatadas, que são os principais constituintes dos seus exoesqueletos. Com a morte desses organismos, seus esqueletos se depositam no fundo do mar, associam-se a outros tipos de resíduos e originam uma rocha sedimentar, depois de um longo período de tempo. Esses sedimentos de fundo, rico em carbonato, participando do ciclo tectônico, podem migrar para uma zona de pressão e temperatura mais elevadas, fundindo parcialmente os carbonatos. As mudanças lentas e graduais da crosta terrestre podem fazer com que essas rochas sedimentares alcancem a superfície, completando o ciclo.

Os vegetais absorvem do solo os sais de cálcio, e os animais os obtêm através da cadeia alimentar. Com a decomposição dos animais e vegetais mortos, o cálcio retorna ao solo.

3.1.5. O Ciclo do Fósforo

O fósforo é um elemento químico que participa estruturalmente de moléculas fundamentais do metabolismo celular, como fosfolipídios, coenzimas e ácidos nucleicos. Além disso, é um nutriente limitante do crescimento de plantas, especialmente as de ambientes aquáticos. Por outro lado, por apresentar-se em grande abundância no meio ambiente, pode causar sérios problemas ambientais.

Os grandes reservatórios de fósforo são as rochas e outros depósitos formados durante as eras geológicas. Esses reservatórios, devido ao intemperismo, pouco a pouco fornecem o fósforo para os ecossistemas, onde é absorvido pelos vegetais e posteriormente transferido aos animais superiores e, por consequência, ao Homem, via cadeia alimentar.

O retorno do fósforo ao meio ocorre pela ação de bactérias fosfolizantes, atuando nas carcaças de animais mortos. O fósforo retorna ao meio na forma de composto solúvel, sendo portanto facilmente carregado pela chuva para os lagos e rios e destes para os mares, de forma que o fundo do mar passa a ser um grande depósito de fósforo solúvel.

As aves marinhas desempenham um papel importante na restituição do fósforo marinho para o ambiente terrestre, pois ao se alimentarem de peixes marinhos e excretarem em terra firme, trazem o fósforo de volta ao ambiente terrestre. Ilhas próximas ao Peru, cobertas de guano (excremento das aves), mostram o quanto as aves são importantes para a manutenção do ciclo.

O uso mais comum para o fósforo é como fertilizante. Ele é um dos componentes principais do tipo de fertilizante mais utilizado, o fertilizante à base de NPK.

Por ter a capacidade de formar compostos solúveis, o fósforo é facilmente carregado pela chuva para os lagos e rios, sendo justamente nessa etapa que podem ocorrer sérios danos ao meio ambiente, pois se um excesso de componentes nitrogenados e fosfatados, que são largamente utilizados como fertilizantes, entra em um lago ou rio, esses nutrientes podem causar aumento da população bacteriana e de algas verdes (fotossintéticas), originando um processo conhecido como **eutrofização**.

3.1.5.1. O Fenômeno da Eutrofização

Um lago ou um rio eutrofizado, em um primeiro momento, apresenta uma elevada proliferação de fitoplâncton, com consequente incremento na produção de matéria orgânica. As algas que compõem o fitoplâncton possuem um ciclo curto de

vida; assim, uma grande quantidade de algas morrem em um espaço de tempo muito curto.

Esse material orgânico proveniente das algas mortas provoca o crescimento de organismos decompositores aeróbios, que, ao realizarem a decomposição, consomem todo o oxigênio dissolvido na água. Esse consumo provoca a morte de todos os seres aeróbios, peixes, por exemplo, contribuindo ainda mais para o aumento da quantidade de matéria orgânica a ser decomposta. Como não há mais oxigênio, os organismos decompositores que se desenvolvem são anaeróbios, que lançam uma quantidade muito grande de toxinas alterando totalmente as propriedades químicas do meio aquático, inviabilizando todas as formas de vida.

O esquema da figura 6 mostra os caminhos que o fósforo pode percorrer, desde sua retirada das rochas, pela ação do intemperismo, até a sua chegada ao mar, sua participação na cadeia alimentar e sua respectiva volta ao solo, onde novamente fica à disposição dos animais e dos seres humanos, dando continuidade ao ciclo.

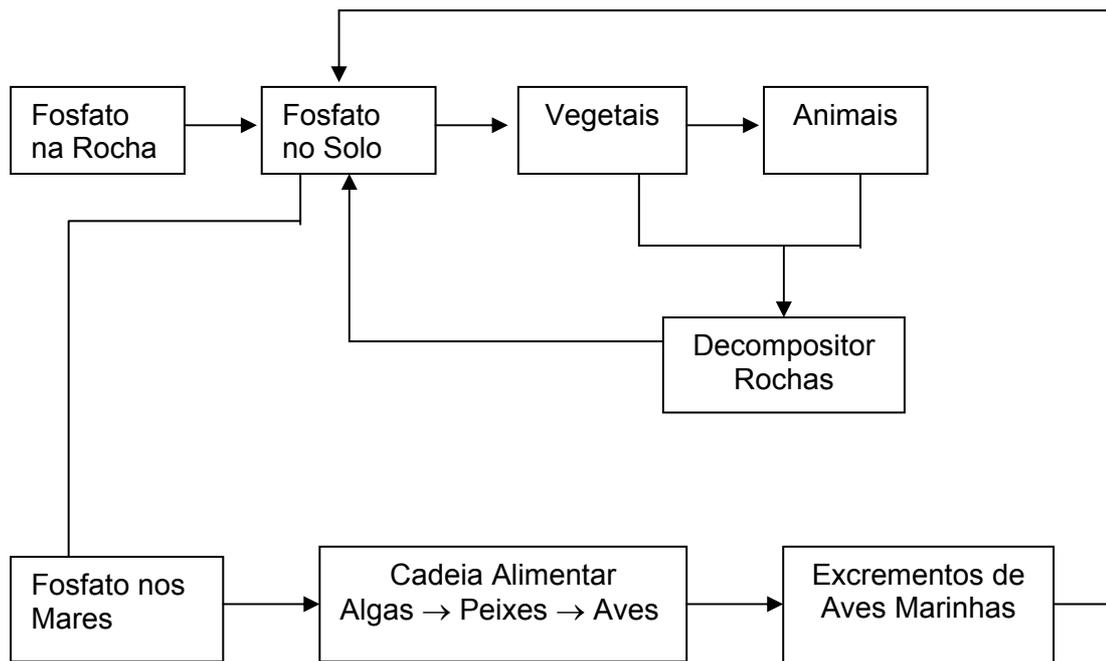


Figura 6. Esquema representativo do ciclo do fósforo.

3.1.6. O Ciclo do Nitrogênio

O nitrogênio é um elemento químico que entra na constituição de duas importantíssimas classes de moléculas orgânicas: proteínas e ácidos nucleicos. Além disso, o nitrogênio é componente de um nucleotídeo essencial a todos os seres vivos da biosfera: o ATP. Embora esteja presente em grande quantidade no ar (cerca de 79%), na forma de N_2 , poucos seres vivos o assimilam nessa forma. Apenas alguns tipos de bactérias, principalmente cianobactérias, conseguem captar o N_2 , utilizando-o na síntese de moléculas orgânicas nitrogenadas.

O nitrogênio utilizável pelos seres vivos é o combinado com o hidrogênio na forma de amônia (NH_3). A transformação do N_2 em NH_3 é chamada **fixação**. Fenômenos físicos, como os relâmpagos e faíscas elétricas, são processos fixadores de nitrogênio. A produção de amônia por esses fenômenos atmosféricos é pequeníssima, sendo praticamente negligenciável em face às necessidades dos seres vivos. A fixação do nitrogênio por esses meios é denominada fixação física.

Outra forma de fixação de nitrogênio é a fixação industrial, realizada por indústrias de fertilizantes, onde se consegue uma elevada taxa de fixação de nitrogênio.

A fixação do nitrogênio realizada pelas bactérias, algas azuis e fungos que vivem livres no solo ou associados às raízes de plantas é denominada de fixação biológica ou biofixação. As bactérias do gênero *Rhizobium*, algas azuis do gênero *Anabaena* e *Nostoc* e certos fungos são organismos fixadores de nitrogênio que vivem associados a plantas, principalmente a leguminosas. Esses microrganismos, conhecidos genericamente por radícolas, vivem em nódulos nas raízes das plantas, estabelecendo uma relação de mutualismo, ou seja, eles recebem proteção da planta e em troca lhe fornecem um farto suprimento de nitrogênio aproveitável (NH_3). A gimnosperma araucária é um exemplo de uma planta que não é leguminosa, mas apresenta nódulos em suas raízes com fungos capazes de fixar nitrogênio.

A amônia pode ser produzida por dois tipos de biofixadores de vida livre: bactérias dos gêneros *Azotobacter* (aeróbias) e *Clostridium* (anaeróbias).

Quando os decompositores começam a atuar sobre a matéria orgânica nitrogenada (proteínas do húmus, por exemplo), liberam diversos resíduos para o ambiente, entre eles a amônia (NH_3). Combinando-se com a água do solo, a amônia forma hidróxido de amônio que ionizando-se produz o íon amônio (NH_4^+) e hidroxila. Esse processo é denominado de **amonização**:



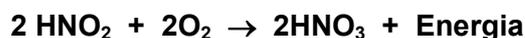
A oxidação dos íons amônio produz nitritos como resíduos nitrogenados, que por sua vez são liberados para o ambiente ou oxidados a nitrato. A conversão dos íons amônio em nitrito e nitrato é conhecida por **nitrificação**, que ocorre pela ação de bactérias nitrificantes (*Nitrosomas*, *Nitrosococcus*, *Nitrobacter*).

O processo de nitrificação pode ser dividido em duas etapas:

- **Nitrosação:** A amônia é transformada em nitrito (NO_2^-):



- **Nitração:** Ocorre a transformação do íon nitrito em íon nitrato (NO_3^-):



Os nitratos, quando liberados para o solo, podem ser absorvidos e metabolizados pelas plantas.

Assim, o ciclo do nitrogênio envolve três processos:

- **Nitrosação:** Conversão de íons amônio em nitritos;
- **Nitração:** Conversão de nitritos em nitratos;
- **Nitrificação:** Conversão de íons amônio em nitratos.

As bactérias nitrificantes são quimioautótrofas, ou seja, utilizam-se da energia liberada na nitrificação para sintetizar as suas substâncias orgânicas. Por meio de excreção ou da morte, os produtos nitrogenados dos organismos são devolvidos ao ambiente. Os excretas nitrogenados eliminados para o ambiente, como uréia e ácido úrico, são transformados em amônia pela ação de bactérias e fungos decompositores. Outros compostos nitrogenados, como proteínas, por exemplo, são degradados por ação de bactérias e fungos, transformando-os em amônia. A decomposição que se apresenta como produto final é denominada amonificação.

A amônia produzida pelos fixadores ou pela amonificação pode ser aproveitada pelas bactérias nitrificantes ou ser transformada em N_2 livre, desprendendo-se para a atmosfera. Essa devolução de nitrogênio para a atmosfera é conhecida por **desnitrificação** e é comumente realizada pelas bactérias desnitrificantes (*Pseudomonas denitrificans*). Aparentemente indesejável, a desnitrificação é necessária porque, se não ocorresse, a concentração de nitratos no solo aumentaria de maneira desastrosa.

3.1.6.1. A Rotação de Culturas

A rotação de culturas é um método que consiste na alternância de uma cultura de uma leguminosa com uma outra cultura de não leguminosas, por exemplo, a alternância de uma plantação de cana, milho, soja com uma de leguminosas (por exemplo: amendoim, feijão ou lentilha), periodicamente. Assim, em uma safra planta-se uma não leguminosa e na entressafra uma leguminosa, deixando os restos das leguminosas nas áreas onde se pretende plantar outra cultura. Os restos das leguminosas não devem ser queimados porque se assim for feito, a combustão devolve o nitrogênio para a atmosfera.

A decomposição da leguminosa adiciona compostos nitrogenados ao solo que serão utilizados posteriormente pela cultura da não leguminosa.

Essa forma de adubação é conhecida como adubação verde, e é uma forma muito racional de se utilizar o ambiente, pois todos os indivíduos envolvidos ganham, em especial o produtor ao economizar no uso do fertilizantes.

Infelizmente, essa prática ainda não é muito difundida entre os agricultores que preferem em muitos casos simplesmente colocar fogo em sua cultura, para facilitar o corte e abreviar o tempo com que se planta entre uma safra e outra, caso muito comum em plantações de cana. Esse procedimento, porém, traz prejuízo. Em muito pouco tempo, os solos ficam completamente exauridos de sais minerais, necessitando, então, de correção, que é feita à base de fertilizante.

Mas como tudo tem um limite, chegará um ponto que, por mais que se adicione fertilizante ao solo, esse não responderá como anteriormente, ficando dessa forma improdutivo. O grande problema que também pode acontecer é o uso indiscriminado de fertilizante, geralmente o NPK, que pode ocasionar o fenômeno da eutrofização, descrito anteriormente.

Como pode ser visto também, o homem, exerce grande influência sobre os ciclos biogeoquímicos, sendo, às vezes, de modo negativo.

3.1.7. O Ciclo do Enxofre

O enxofre apresenta um ciclo que passa entre o ar e os sedimentos, sendo que existe um grande depósito na crosta terrestre e nos sedimentos e um depósito menor na atmosfera.

No reservatório terrestre, os microrganismos têm função preponderante, pois realizam a oxidação ou redução química. Dessas reações, resulta a recuperação do enxofre dos sedimentos mais profundos.

Na crosta e na atmosfera, paralelamente, ocorrem processos geoquímicos e meteorológicos, tais como erosão, ação da chuva, além de processos biológicos de produção e decomposição.

Os sulfatos (SO_4^-) constituem a forma mais oxidada, sendo incorporada pelos organismos autótrofos para fazerem parte da constituição das proteínas, pois o enxofre é constituinte de certos aminoácidos.

O ecossistema, de uma forma geral, não necessita tanto de enxofre como de nitrogênio e fósforo, mas quando se formam sulfetos de ferro nos sedimentos, o fósforo é convertido de uma forma insolúvel a uma forma solúvel, sendo que esta forma pode ser assimilada pelos organismos vivos.

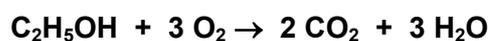
Esse fato evidencia como um ciclo pode interagir com outro e ilustra muito bem o fato que havendo um desequilíbrio em um ciclo, fatalmente esse desequilíbrio se estenderá a outros ciclos fazendo que chegue até o Homem, uma vez que o Homem depende dos ecossistemas onde vive. Se o equilíbrio desse ecossistema por algum motivo se altera, essas mudanças serão sentidas por todos os organismos.

O dióxido de enxofre (SO_2) normalmente constitui um passo transitório no ciclo. Na maioria dos ambientes aparece uma concentração relativamente baixa desse composto. Todavia, com o aumento da poluição industrial, cada vez mais são produzidos óxidos de enxofre, que, por sua vez, afetam esse ciclo. Com as emissões industriais, a concentração de automóveis e a queima de carvão nas termoelétricas, o

SO₂ tem sido encontrado cada vez em maior concentração no ambiente, principalmente em grandes centros urbanos.

O aumento da concentração de óxidos de enxofre, além de óxidos de nitrogênio, na atmosfera leva à ocorrência da chuva ácida.

O Brasil é um dos poucos países (senão o único) que conseguiu uma alternativa muito viável e econômica para de uma só vez se ver livre de dois problemas, a dependência do petróleo como fonte de combustível e o problema da poluição nos grandes centros. Em meados de 1975, criou-se o Pró-Álcool, uma iniciativa pioneira que poderia livrar o país desses dois problemas, pois o álcool é uma fonte de combustível plenamente renovável (o mesmo não ocorre com o petróleo), e muito menos poluidora que a gasolina ou o óleo diesel, pois o produto de sua queima é, principalmente, água e CO₂ de acordo com a seguinte reação:



Infelizmente, queima-se a cana-de-açúcar antes da sua colheita, liberando para o ambiente grande quantidade de CO₂ e de material particulado, tornando-se uma grande fonte de poluição.