

ESTUDOS DE CICLAGEM DE NUTRIENTES: INSTRUMENTOS PARA A ANÁLISE FUNCIONAL DE ECOSSISTEMAS TERRESTRES

DELITTI, W.B.C.

Resumo:

A disponibilidade e o padrão de ciclagem dos nutrientes minerais constituem-se num dos principais fatores limitantes para a produção primária e, conseqüentemente para o estabelecimento e desenvolvimento dos ecossistemas.

As estimativas dos estoques de nutrientes presentes nos compartimentos dos ecossistemas e as transferências existentes entre eles podem refletir as estratégias das comunidades frente aos tensores ambientais.

Muitos parâmetros peculiares aos estudos de ciclagem de nutrientes mostram-se úteis para comparações entre ecossistemas e para avaliar as respostas dos ecossistemas sob diferentes condições.

O padrão de funcionamento dos ecossistemas é tema relevante para a pesquisa, principalmente por ser capaz de fornecer subsídios para o manejo mais adequado dos recursos da biosfera.

Abstract:

"Studies of nutrient cycling: instruments for the functional analysis of terrestrial ecosystems"

Nutrient availability and nutrient cycling processes are among the main factors controlling primary production and ecosystems development. Nutrient cycling studies are useful for comparing ecosystems and in the evaluation of ecosystems responses to environmental stresses. Such studies can furnish supporting information for improving ecosystems management strategies.

Introdução

A ciclagem de nutrientes minerais compreende a trajetória cíclica dos elementos essenciais à vida dentro dos ecossistemas. Resulta de um conjunto de processos interconectados, de forma que os mesmos recursos nutricionais são utilizados em sucessivos períodos de fixação de energia.

A ciclagem dos elementos essenciais reflete, portanto, o metabolismo integrado da comunidade e depende, também, das propriedades de cada elemento químico e de sua interação com a litosfera, com a atmosfera e com a hidrosfera. A regulação intra sistêmica dos reservatórios e dos fluxos desses elementos essenciais depende da atuação dos seres vivos, mantidos pelo fluxo de energia. Disso decorre uma íntima relação entre a circulação de materiais e o fluxo de energia nos ecossistemas (GOLLEY *et al.* 1978; CHARLEY & RICHARDS, 1983).

Além da energia que flui pelos ecossistemas, a ciclagem recebe subsídios energéticos naturais representados pelo transporte de nutrientes pelos elementos do clima. A água das precipitações e as massas de ar que atravessam os ecossistemas são importantes agentes transportadores de nutrientes, mas são modificados pela atividade biológica (LEMEE, 1974).

A ciclagem dos nutrientes constitui-se numa das funções mais importantes para a regulação do funcionamento e do desenvolvimento dos ecossistemas. Tem um papel destacado como regulador da produção primária e pode influir no estabelecimento de limites para o reservatório de energia e, desta forma, para a própria estruturação dos ecossistemas (JORGENSEN, *et al.* 1975; CHARLEY & RICHARDS, 1983).

O processo de ciclagem dos nutrientes foi otimizado durante a história da vida, juntamente com a evolução das espécies, já que a adaptação aos nichos nutricionais é um dos aspectos críticos para o estabelecimento das biotas de cada região. Como a ciclagem de elementos é um processo que integra todo o ecossistema, a adaptação de cada indivíduo e população depende das relações nutricionais com os demais componentes da comunidade (WHITMORE, 1989; COLE & RAPP, 1981).

Também no tempo ecológico ocorre o progressivo aperfeiçoamento do processo de ciclagem, levando à maior independência do sistema quanto ao suprimento nutricional. Os estoques e os fluxos de nutrientes ficam cada vez mais sob controle dos seres vivos, de modo que as variações nas taxas de entrada desses elementos desde o ambiente circundante têm impacto progressivamente menor sobre a comunidade biológica. Ao mesmo tempo as possibilidades de perda são minimizadas pelo estabelecimento de grupos de organismos capazes de filtrar, concentrar e reter os elementos em trânsito (JORDAN & KLINE, 1972). Esta estratégia tem papel fundamental, por exemplo,

no estabelecimento e manutenção de florestas sobre solos de baixa fertilidade, como ocorre na Amazônia e nas Matas Atlânticas e das Restingas.

Durante a sucessão, assim como durante a evolução, verifica-se, portanto, a tendência para a formação de reservatórios cada vez maiores dentro dos ecossistemas, para o maior controle dos seres vivos sobre as entradas e saídas dos nutrientes e para a maior eficiência na utilização desses recursos pelos diferentes componentes da comunidade biológica. A substituição por espécies mais eficientes constitui-se numa das vias mais importantes para a evolução dos ecossistemas, bem como para a otimização da ciclagem dos nutrientes.

Durante o desenvolvimento dos ecossistemas, processos funcionais importantes podem ser estabelecidos ou estabilizados antes mesmo da composição específica da comunidade ter atingido o ponto de climax, assegurando, desta forma, a continuidade do processo sucessional. Exemplo disso foi documentado por Ewel (1976), em estudos de uma série sucessional secundária de floresta tropical, onde verificou que com apenas 14 anos a floresta secundária já apresentava aspectos de seu funcionamento semelhantes ao que ocorre no estágio climácico. Neste tipo de informação apóia-se a estratégia de recuperação de áreas degradadas, onde se dá prioridade ao reestabelecimento das funções ambientais desempenhadas pela comunidade biológica, antes de se alcançar a recomposição do conjunto de espécies típicas da região. Para tal fim quaisquer espécies, mesmo exóticas, podem ser empregadas para reter nutrientes, atenuar forças erosivas, manter a integridade dos solos e fornecer condições microclimáticas adequadas ao estabelecimento de vegetais característicos de fases serais posteriores. Uma vez obtidas as condições ecológicas mínimas passa-se a enfatizar a recuperação da diversidade original da biota.

Apesar da ciclagem de nutrientes ser um processo comum a todos os ecossistemas, as quantidades de elementos estocadas nos diferentes compartimentos e os fluxos que ocorrem entre esses compartimentos são particulares a cada ecossistema. O padrão de ciclagem resultante é, portanto, peculiar a cada unidade funcional e reflete a somatória das respostas adaptativas da biocenose frente aos tensores ambientais presentes em cada região.

Por estas razões a ciclagem dos nutrientes constitui-se em primoroso tema de investigações científicas e num valioso instrumento para estudos de diagnose ambiental e avaliação de impactos naturais ou decorrentes das atividades humanas.

Modelos de Compartimentos

Os estudos de ciclagem de nutrientes adotam modelos nos quais cada sistema pode ser subdividido em compartimentos cujo número é variável de acordo com os objetivos e as conveniências de cada pesquisa. A definição do

modelo resultará da compartimentação de espaços que reúnam componentes similares, da determinação das características desses compartimentos e das relações funcionais existentes entre os mesmos. Esta abordagem evita a complexidade de descrever os muitos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem, simultaneamente, dentro de cada compartimento e analisa satisfatoriamente a resultante de todos esses processos. Analisam-se as quantidades e o tempo de residência dos nutrientes contidos em cada compartimento, bem como os fluxos desses elementos entre eles (ERICKSSON, 1971).

As características dos diferentes compartimentos não são igualmente acessíveis. A quantidade de matéria orgânica e de nutrientes presentes no folheto acumulado sobre o solo, sua produção mensal e anual e a cinética de sua decomposição, por exemplo, são rotineiramente avaliados ao passo que o compartimento da biomassa e mineralomassa são determinados menos freqüentemente, devido às limitações inerentes às metodologias necessárias. Métodos alternativos têm sido propostos visando diminuir o impacto deste tipo de análise sobre a estrutura da comunidade (DELITTI & MEGURO, 1984).

A maioria dos modelos são, por estes motivos, parciais, descrevendo apenas uma parte da ciclagem de nutrientes que ocorre dentro do ecossistema. A via de absorção dos nutrientes pelos produtores e o seu transporte dentro deles, por exemplo, é estimada quase sempre de forma indireta, através da queda de folheto. Sabe-se que, quando os ecossistemas estão em equilíbrio, há equivalência entre as quantidades transferidas por esta via e as absorvidas pelos produtores. O poder de diagnose desses modelos fica reduzido pela abordagem parcial que se verifica na maioria dos estudos, em todo o mundo (PROCTOR, 1989). Além disso, poucos estudos são conduzidos por longo tempo, de modo a permitir a observação de flutuações que ocorrem de ano a ano nos ecossistemas ou a detecção de padrões pluri-anuais.

Para um ecossistema de Campo Cerrado de Mogi-Guaçu, SP, foram construídos os modelos presentes nas figuras 1 e 2, onde algumas características estruturais e funcionais puderam ser representadas, considerando os resultados de diversas pesquisas (DELITTI, 1984; DELITTI & MEGURO, 1984; POMPEIA, 1989). O tempo médio estimado para a renovação de cada compartimento deste Campo Cerrado, está indicado nos círculos e baseia-se na relação entre a quantidade acumulada e a taxa anual de saída (ROCHOW, 1975).

A estrutura e dinâmica de mineralomassa, representada na figura 2, é representada com a simplificação decorrente da ausência dos fluxos resultantes da água de precipitação que atravessa o ecossistema. Sabe-se que em alguns casos, por exemplo, no fluxo de potássio, esta via de transferência pode ser a mais significativa, em termos quantitativos (PARKER, 1983).

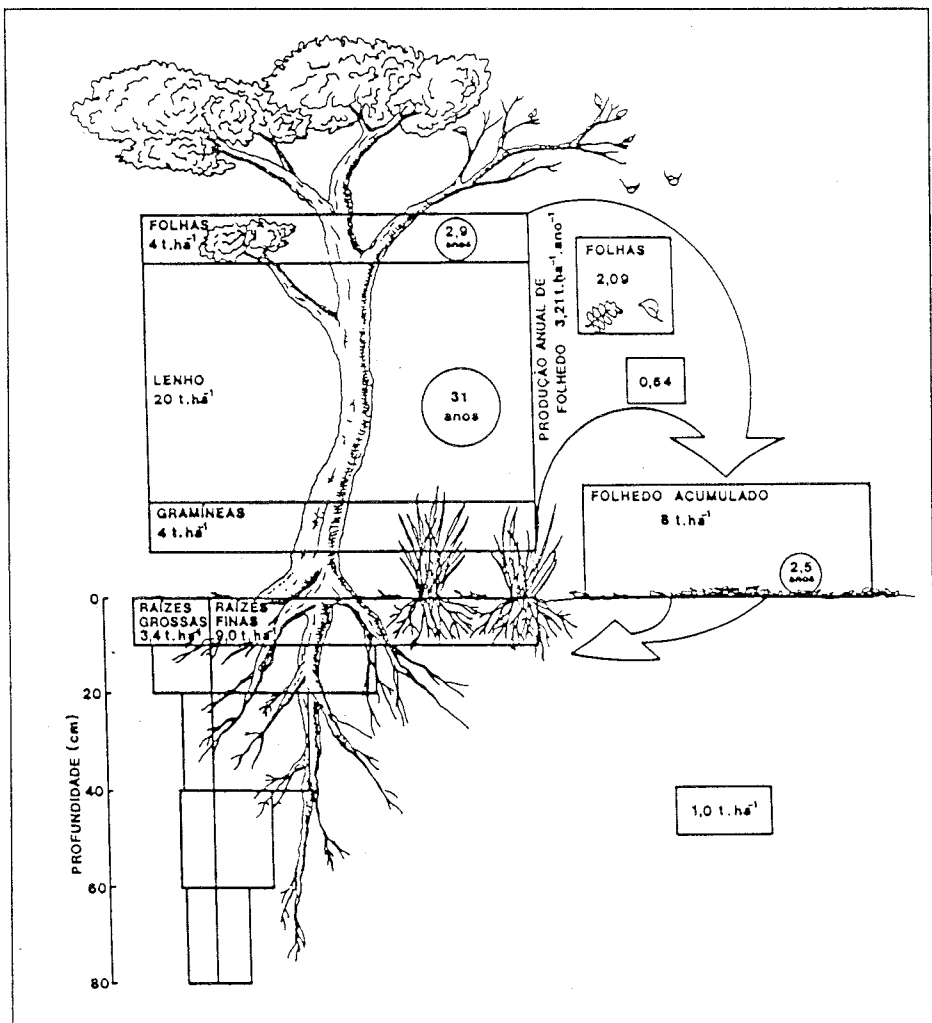


Figura 1 - Estrutura e dinâmica da biomassa do Campo Cerrado de Mogi-Guaçu, S.P.

A biomassa epigéia é o maior reservatório de nutrientes, seguido pelo do folheto acumulado que se assemelha ou mesmo supera o compartimento das raízes. Na biomassa ocorrem os maiores tempos de residência dos nutrientes e o material lenhoso representa a porção de renovação mais demorada. Uma pequena parcela dos nutrientes circula via queda de folheto, provavelmente devido ao processo de translocação, que diminuem as concentrações nos órgãos senescentes. A retenção dos nutrientes é indicada pelos tempos de renovação mostrados nos círculos (Fig. 2). Fica evidente a necessidade de cautela para o manejo deste tipo

de ecossistema, pois o solo é antigo e não apresenta reserva potencial de nutrientes. A sua recuperação pode ser muito demorada, ou mesmo impossibilitada, de acordo com o tipo de perturbação a que for submetido. Atividades humanas costumam resultar na diminuição ou mesmo na destruição desses reservatórios bióticos de nutrientes, acumulados durante longos períodos de tempo (LIKENS *et al.* 1970; BORMANN *et al.* 1974).

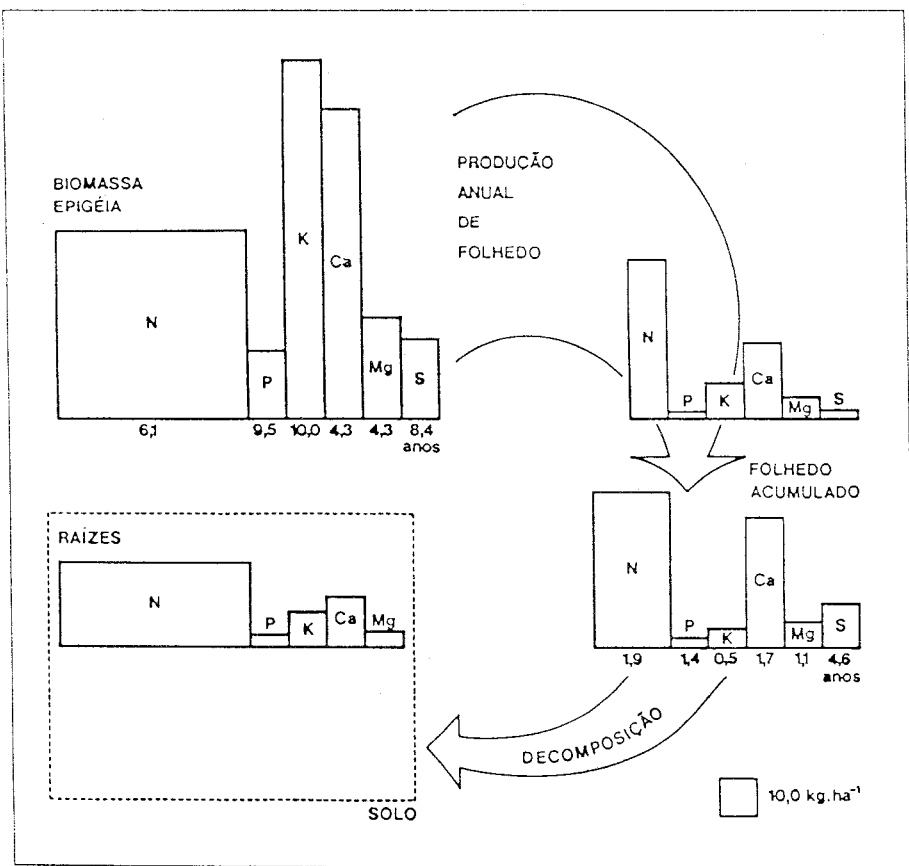


Figura 2 - Estrutura e dinâmica da mineralomassa do Campo Cerrado de Mogi-Guaçu, S.P.

Estudos de ciclagem de nutrientes podem subsidiar o manejo de sistemas agrícolas, propondo técnicas economicamente mais apropriadas. No Brasil este tipo de pesquisa tem sido desenvolvida, por exemplo, em florestas implantadas de espécies exóticas, como as dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Foi demonstrada a

economia de nutrientes que adviria da permanência no solo dessas plantações das folhas, galhos e cascas das árvores derrubadas, que não têm outro interesse comercial (POGGIANI *et al.* 1983 a e b.; DELITTI, 1984)

Na Amazônia, foi demonstrado que o estabelecimento de agro-ecossistemas implica na diminuição do estoque total de nutrientes, porque os reservatórios bióticos das florestas são transferidos para o solo e para as novas plantas introduzidas. Além disso ocorre a perda de importantes mecanismos de atenuação de forças erosivas e de exploração otimizada do solo (JORDAN, 1985).

A determinação da biomassa e da mineralomassa e das suas velocidades de decomposição têm se mostrado, também, importantes para a previsão dos impactos decorrentes da construção de barragens e formação de reservatórios sobre ecossistemas originalmente terrestres.

A energia e os elementos armazenados nesses ecossistemas submersos são fonte potencial de eutrofização das águas do lago em formação. Esses estudos resultaram na recomendação geral de um tratamento prévio das áreas por alagar, que compreende a retirada de todos os materiais potencialmente prejudiciais à qualidade do lago que se pretende manejar (MOUCHET, 1984).

Comparação de Ecossistemas

Uma das principais aplicações dos estudos de ciclagem de nutrientes foi a possibilidade de comparação de ecossistemas através de parâmetros quantitativos de seu funcionamento. Já em 1964, Bray e Gorham apresentaram uma revisão onde foram analisados os dados disponíveis a respeito da produção de folheto em florestas de todo o mundo. Foi discutida a validade de utilizarem-se as estimativas de produção de folheto como um indicador da produção primária líquida mínima dos ecossistemas. Além disso, foi possível estabelecer uma correlação entre a latitude e a quantidade de material depositado anualmente sobre o solo.

Estudos posteriores demonstraram, porém, que pode haver grande variação dentro de uma mesma latitude, em virtude das mudanças locais do clima, solo e das comunidades biológicas.

No Brasil, por exemplo, muitas florestas foram estudadas e apresentaram ampla variação em relação ao valor previsto. Esta observação não invalida a correlação proposta anteriormente, mas esclarece o grau de complexidade dos fatores envolvidos nesse processo. Foi demonstrado, por exemplo que dentro de um mesmo ecossistema podem haver regiões com diferentes taxas de produção de folheto. Na Mata mesófila do Morro do Diabo, por exemplo, ocorre variação de acordo com a altitude, que determina diferenças edáficas com reflexo

na estrutura e no funcionamento da floresta (SCHLITTLER, 1990). Florestas amazônicas, por sua vez, mostraram valores abaixo do previsto, devido, provavelmente, à baixa fertilidade dos solos (KLINGE & RODRIGUES, 1968; FRANKEN, 1979)

Eficiência na Utilização de Nutrientes

Espécies e comunidades vegetais diferem quanto às necessidades nutricionais. Florestas tropicais são muito mais exigentes, por exemplo, que as florestas de gimnospermas (DUVIGNEAUD, 1976). A exigência nutricional é parte do nicho ecológico e constitui importante fator para a seleção dos componentes de cada comunidade. Há, portanto, um custo nutricional sem o qual a espécie ou comunidade não poderá se estabelecer.

A queda de folhas e de outros órgãos constituem-se em drenos de energia e de nutrientes que a vegetação sofre devido aos fatores de tensão ambiental. A otimização da resposta da comunidade a essas forças envolve a minimização progressiva dessas perdas.

O custo energético e o nutricional são muito diferentes, pois o suprimento de radiação solar é previsível e praticamente inesgotável, enquanto os reservatórios de nutrientes são, freqüentemente, muito limitados.

A eficiência de uma espécie ou comunidade é representada pela proporção entre a quantidade de matéria orgânica produzida em relação a quantidade de nutrientes consumida no processo. VITOUSEK (1982, 1984) propôs um índice de eficiência na utilização de nutrientes, determinado pela relação entre a quantidade de detritos produzidos anualmente e a quantidade de nutrientes que se perdem neste processo. Este índice se justifica porque ecossistemas em clímax não têm acumulação líquida de nutrientes, de forma que o custo nutricional para sua manutenção se limita ao necessário para a reposição dos componentes perdidos. Relaciona-se o custo em nutrientes à produção primária líquida mínima e leva em conta a soma das adaptações dos vegetais para a economia nutricional. Esta economia pode resultar da maior longevidade das folhas (MONK, 1966) ou da translocação de nutrientes de órgãos por cair para aqueles não senescentes, de modo que um mesmo estoque de nutrientes é utilizado em vários períodos de produção, sem que esses elementos passem pela parte mais susceptível do ciclo.

Este índice permitiu que um grande número de ecossistemas de todo o planeta fossem comparados, através dos dados existentes a respeito de sua produção de folheto e do transporte de nutrientes a ele associado. Foram então evidenciados grupos de ecossistemas com diferentes graus de eficiência na utilização dos recursos nutricionais, especialmente o de nitrogênio (VITOUSEK, 1982).

No Brasil este índice já foi utilizado por alguns autores, por exemplo, DELITTI (1984), PAGANO (1989) e SCHLITTLER (1990) o modificaram ao considerar a soma de todos os nutrientes em oposição à proposta original que os considerava isoladamente. O índice tem se mostrado útil tanto para a comparação de ecossistemas entre si, quanto para avaliar a eficiência dos ecossistemas sob diferentes condições ambientais. Em Mogi-Guaçu, por exemplo, esta abordagem indicou que a Mata Ciliar é menos eficiente que o Campo Cerrado adjacente, que por sua vez, é muito menos eficiente que o Pinhal implantado em sua substituição. A frugalidade do *Pinus elliottii* explicaria, pelo menos parcialmente, o sucesso da sua introdução na região dos cerrados, onde o solo apresenta fertilidade reduzida.

Decomposição

A atividade do subsistema de decomposição constitui-se em outro importante indicador do padrão funcional dos ecossistemas, pois é regido pelos mesmos fatores que controlam os demais processos ecológicos. SWIFT *et al.* (1979) apresentam uma revisão detalhada a respeito desses estudos em diferentes tipos de ecossistemas terrestres, onde se discute, entre outros, o papel dos elementos do clima sobre o processo de decomposição. Os estresses naturais como as temperaturas extremas e a seca tem efeito depressor sobre a decomposição, resultando na relação entre a latitude e a velocidade com que se dá a remineralização da matéria orgânica. De um modo geral os ecossistemas tropicais, sob climas mais quentes e mais úmidos apresentam as maiores taxas de decomposição. Nas latitudes maiores o período frio interrompe ou deprime a decomposição, que pode se prolongar por muitos anos. Desvios dessa tendência geral ocorrem devido às variações locais dos elementos do clima, como aquelas ocasionadas pela altitude ou às ocasionadas por outros fatores fisiográficos e biológicos, que também podem afetar o processo, direta ou indiretamente. Sabe-se que, dentro dos ecossistemas, o processo de decomposição varia de acordo com as condições microambientais, como as condições microclimáticas e as características da comunidade de detritívoros presentes (ANDERSON & MACFADYEN, 1976). A atividade destes organismos pode também ser modificada de acordo com as propriedades dos materiais em decomposição, pois parece que seu conteúdo de nutrientes e de energia seria um importante componente da sua palatabilidade, resultando em maior eficiência do processo. A remineralização final dos elementos, avaliada pela sua liberação para o ambiente circundante, estaria ainda na dependência da relação entre a concentração de nutrientes nos materiais em decomposição e nos tecidos constituintes dos corpos dos decompositores. Os elementos seriam retidos até que as necessidades nutricionais dos detritívoros fossem satisfeitas (SWIFT *et al.* 1979). A composição química de cada material é igualmente influente na taxa de sua decomposição, pois a composição

relativa de moléculas mais ou menos facilmente degradáveis é um dos condicionantes da velocidade final do processo (MINDERMAN, 1968).

OLSON (1963) introduziu o uso do coeficiente k , para expressar a cinética de perda de peso dos materiais em decomposição e, através deste índice, comparou ecossistemas de muitas regiões. O modelo exponencial proposto descreve, na maior parte dos casos, o processo de decomposição de forma satisfatória, assim, outros parâmetros relativos ao funcionamento dos ecossistemas podem ser previstos com facilidade. O modelo não se aplica a algumas situações, devendo sempre ser testada a aderência dos dados ao modelo proposto (WEIDER & LANG, 1982).

A previsão inicial de altas velocidades de decomposição nos trópicos mostrou-se limitada pela ocorrência de secas e de limitações nutricionais, de forma que as expectativas atuais são inferiores aos valores inicialmente esperados. Valores de k acima de 1 são raros, mesmo na região tropical, mas já foram verificados na Amazônia.

Sincronismo de Ciclagem

O sincronismo entre as diversas etapas do processo global de circulação de nutrientes dentro dos ecossistemas constitui-se num aspecto de grande importância para o estabelecimento e para a manutenção da produtividade auto sustentada dos ecossistemas (WITKAMP & AUSMUS, 1976). Este acoplamento resulta no tempo total de ciclagem dentro dos ecossistemas e compreende aspecto fundamental da sua eficiência na utilização dos recursos nutricionais.

Há uma nítida diferença no sincronismo de atividade de produção primária, produção de folheto e decomposição entre os diversos ecossistemas, determinada pelas variações climáticas. Nota-se que a presença de fatores climáticos de tensão ambiental, como o congelamento ou a seca, impõe um aumento do tempo de ciclagem dos nutrientes na trajetória - **biomassa viva** → **produção de folheto** → **acumulação de folheto** → **decomposição** → **absorção pelos produtores**.

Numa situação extrema, sob clima temperado típico, o inverno impõe a necessidade de um período de preparação, onde ocorre diminuição da fitomassa foliar, da produção primária e o folheto e os nutrientes são estocados sobre o solo, desde o outono. Este compartimento fica com baixíssima atividade até o próximo período favorável, o que pode significar muitos meses de ciclagem muito lenta. Uma situação intermediária, sob os climas tropicais, com seca estacional, como ocorre na região dos cerrados e Matas do Planalto central do Brasil, do interior dos Estados do Sudeste, por exemplo, a estiagem provoca um fenômeno semelhante, mas de menor magnitude, pois a queda da produção primária e de folheto coincide com a ocorrência do estresse e não o antecede, como na região

temperada. O lapso de tempo até a retomada das atividades máximas de produção, decomposição e absorção é muito menor, de forma que a ciclagem é retardada em apenas poucos meses. Além disso não há uma parada de atividades, apenas uma diminuição de sua magnitude, pois o tensor tem potência muito inferior ao congelamento. O menor tempo de ciclagem se verifica em ecossistemas como as Florestas Atlânticas e das Restingas, onde a maior parte do folhedo é produzida no início da estação mais favorável para a decomposição e para a produção primária (REBELO *et al.* 1992a e b). O tempo de ciclagem é limitado ao mínimo necessário para a mineralização dos detritos, sem lapso decorrente de tensor climático. Da mesma forma, florestas sob clima equatorial típico mantêm alta velocidade de ciclagem pela contínua produção e decomposição de detritos associadas a produção primária constantemente alta. A Mata de Terra Firme de Manaus (KLINGE & RODRIGUES, 1968), contudo apresentou um máximo, de produção de folhedo no período menos chuvoso, de modo que pode haver diminuição do sincronismo de seus processos de ciclagem interna.

O sincronismo de processos verificado em florestas pluviais tropicais otimiza a ciclagem dos nutrientes e confere maior adaptação, pois permite que o mesmo estoque de elementos seja utilizado com maior frequência, já que não ocorre limitação climática para a produção primária. Além disso, este sincronismo pode diminuir as perdas de nutrientes devidas ao intenso fluxo hídrico a que estão submetidos estes ecossistemas.

Respostas aos Fatores de Estresse

Perturbações induzem alterações nos ciclos de nutrientes dos ecossistemas, resultando em danos de intensidades variáveis de acordo com as características do tensor e do ecossistema impactado.

Um dos efeitos mais rápidos e marcantes provocados por estresses é a alteração na taxa de produção de folhedo. São abundantes os relatos do efeito da seca sobre a quantidade de folhedo depositado, sendo inclusive um comportamento sazonalmente esperado a maior queda de folhas e de outros detritos durante os meses mais secos do ano. Resposta semelhante é encontrada em ecossistemas sujeitos a resfriamento ou congelamento sazonal, onde a deciduidade é um caráter típico de muitos biomas. Nestes ecossistemas da região temperada, a queda das folhas dá-se no outono, sendo parte de um processo que prepara a vegetação para o inverno rigoroso, pois reduz a superfície exposta ao congelamento.

Nas latitudes mais altas predominam gimnospermas, que também apresentam deciduidade outonal, mas não ficam totalmente desprovidas dos órgãos fotossintetizantes, pois suas folhas apresentam adaptações morfológicas e anatômicas, que lhes confere resistência ao congelamento.

Poucos ecossistemas apresentam alteração neste padrão geral, como se verifica em Florestas Atlânticas e em Matas de Restingas. Na ausência de um período seco e/ou frio parece ser mais vantajoso renovar as folhas durante o verão, quando a abundância de água e radiação permite que esta troca se dê com menor custo para o ecossistema (JACKSON, 1978; DELITTI, 1987; MORAES *et al.*, 1992).

Em algumas Matas de Galeria, a alternância de períodos de seca e de inundação leva à ocorrência de dois períodos com grande transferência de material da biomassa para o solo ou para o sistema aquático adjacente (PINTO, 1992). A inundação é um potente agente de importação e de exportação de nutrientes dessas Matas, mas, no Brasil, o balanço final de sua ação não foi estabelecido de modo conclusivo, para nenhum ecossistema.

Na Amazônia, os resultados de FRANKEN (1979) mostram que as florestas inundadas, têm menor produção de folheto do que as Matas de Terra Firme, indicando menor potencial de produção primária, devido à coincidência entre os períodos de inundação e os de maior deficiência hídrica atmosférica (FRANKEN, 1979).

Como resposta comum aos diferentes estresses verifica-se, inicialmente, um aumento na quantidade de material transferido para o solo, qualquer que seja o tensor: geada (DELITTI, 1984), granizo (SILVA, 1983), radiação (WEIGERT & MURPHY, 1970) e inundação (Pinto, 1992), além da seca e do congelamento já mencionados.

Poluentes parecem ter efeito semelhante, mas os casos estudados no Brasil relatam apenas uma diferença, para menor nas taxas de produção de uma área de floresta Atlântica sob impacto dos poluentes atmosféricos provenientes de Cubatão (DOMINGOS, 1987). O monitoramento ocorreu muito após o início da perturbação, quando o sistema já estava modificado. O aumento na queda de folheto ocorre no período imediatamente seguinte à perturbação, havendo uma subsequente diminuição nas taxas de produção devido aos danos causados ao sistema fotossintetizante. A recuperação do padrão normal de funcionamento do ecossistema será dependente da intensidade e da frequência da força estressora. Em Paranapiacaba, a ação dos poluentes perdurou por muitos anos, levando a um acentuado comprometimento da floresta, que se refletiu em menores quantidades de material em circulação.

No caso das florestas de Paranapiacaba, a menor produtividade seria resultado da menor fitomassa foliar, da ação direta dos poluentes ou, mais provavelmente, de ambos, pois as baixíssimas intercepções da precipitação incidente (2% e 29 % nas áreas menos e mais afetadas) refletem o comprometimento estrutural dessas florestas.

Em outros casos, os ecossistemas tendem a voltar ao estado inicial após a ocorrência da perturbação, como foi documentado no Campo Cerrado e na

Mata Ciliar de Mogi-Guaçu sob efeito da geadas, pois no segundo ano após o evento, a produção de folheto já indicava retorno aos valores semelhantes aos do período considerado normal (DELITTI, 1984).

Em casos mais extremos ocorre o declínio progressivo do ecossistema sob a ação um estressor poderoso. Além de Paranapiacaba, outro exemplo claro desta situação foi relatado por WEIGERT (1970), que monitorou a ciclagem de nutrientes de uma floresta tropical de El Verde, Porto Rico exposta a radiação ionizante, durante três anos. Verificou-se um nítido aumento da queda de folhas logo após o início da exposição, tendo este efeito perdurado por 10 meses, quando a quantidade se assemelhava à da área controle, mas no ano seguinte já haviam numerosas árvores mortas e o sistema todo encontrava-se em degradação.

O aumento na queda de folheto pode resultar em um aumento desproporcional na quantidade de nutrientes transferida para a superfície do solo, como foi verificado em Campo Cerrado e na Mata Ciliar de Mogi-Guaçu, atingidos por geadas. O resfriamento incomum ocasionou a queda prematura das folhas antes de se completar a translocação dos nutrientes para órgãos não senescentes, resultando em grande perda de elementos essenciais pela biomassa viva (DELITTI, 1984). Neste episódio, foi evidenciada uma característica geral dos impactos, de que a imprevisibilidade do tensor aumenta seu poder de perturbação. Desta forma, a perturbação resulta, além dos danos ao sistema de fixação de energia, em diminuição do reservatório biótico de nutrientes dos ecossistemas, comprometendo sua resiliência. Ocorre acumulação de nutrientes sobre o solo, onde a possibilidade de controle dos fluxos de elementos é muito menor do que nos tecidos vivos, de modo que a exportação de nutrientes é facilitada. A magnitude da perda dependerá então do grau de comprometimento do subsistema de decomposição e de absorção.

O processo de decomposição também é sensível a impactos provocados pelo homem, como a poluição industrial ou por atividade de mineração (STRUFFALDI-DE VUONO & MARZOLLA (1984); STROJAN (1978), ou as alterações ocasionadas na estrutura dos ecossistemas, que resultam em modificações microclimáticas, edáficas e na composição das comunidades. Muitas vias podem estar envolvidas no retardamento da decomposição. Dentre elas são referidas mudanças tanto da microflora quanto da microfauna edáficas, alteração da atividade de enzimas como a urease e fosfatase, além de modificações microambientais do compartimento de decomposição.

Fatores de tensão levam, como se percebe, a uma diminuição geral da eficiência dos ecossistemas em utilizar os recursos nutricionais disponíveis, pois a biota fica deslocada de seu ótimo fisiológico. Os diversos sistemas enzimáticos reponsáveis pela retenção e circulação dos nutrientes são afetados, comprometendo o funcionamento geral do ecossistema. O índice proposto por VITOUSEK (1984) expressa a perda de eficiência dos ecossistemas. Em Mogi-Guaçu, foi observado que a ocorrência de uma geadas ocasionou no campo cerrado e

na Mata Ciliar uma queda de aproximadamente 20-25% na eficiência anual de utilização do nitrogênio. Isto é, tratando-se de evento climático raro na região dos cerrados, poucas horas de baixa temperatura resultam na perda de um quarto de sua eficiência anual de utilizar nutrientes. Parece que este comprometimento pode constituir-se em um fator limitante para o expansão dos cerrados para o Sul do Brasil.

Os processos de ciclagem de nutrientes são, como se discutiu, de fundamental importância para o estabelecimento, distribuição e manutenção auto-sustentada dos ecossistemas.

Considerações Finais

Os problema sociais representam uma pressão insustentável a favor da transformação dos ecossistemas naturais em áreas de sustento para a humanidade. Quaisquer que sejam as formas de manejo adotadas, sabe-se que resultarão em alterações dos padrões naturais de ciclagem de nutrientes. Parece que a magnitude das alterações pode variar até níveis planetários, com reflexos em toda a biosfera. Por outro lado, as pesquisas existentes apenas demonstram seu poder de diagnose, sendo ainda insuficientes para a proposição de formas de manejo adequadas para todas as situações.

Os estudos de ciclagem de nutrientes nos ecossistemas, principalmente nos tropicais, precisam ser incrementados tanto na sua distribuição geográfica, quanto no tipo de abordagem empregada.

Ante tamanha necessidade de distribuir mais eqüitativamente os recursos da terra e ao mesmo tempo garantir a manutenção desses bens para as futuras gerações, a busca do conhecimento científico a respeito do funcionamento dos ecossistemas e a busca de formas mais apropriadas de manejo ambiental constituem-se em tarefas imprescindíveis e urgentes, apesar de insuficiente por si só.

Bibliografia

- ANDERSON, J.M., MACFADYEN, A. 1976. The role of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes. Oxford, Blackwell Scientific Publications. 411p.
- BORMANN, F.H., LIKENS, G.E., SICCAM, T.G., PIERCE, R.S., EATON, J.S. 1974. The effect of deforestation on ecosystem export and steady-state condition at Hubbard Brook. Ecol. Monogr. 44(3):255-77.
- BRAY, J.R., GORHAM, E. 1964. Litter production in Forests of the world. Adv. Ecol. Res. 2:102-57.

- CHARLEY, J.L., RICHARDS, B.N. 1983. Nutrient allocation in plant communities: Mineral cycling in terrestrial ecosystems. *In*: LANGE, O.L., NOBEL, P.S., OSMOND, C.B., ZEIGLER, H. (eds.) Physiological plant ecology. Springer-Verlag. 646p.
- COLE, D.W., RAPP, M. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. *In*: REICHLE, D.E. Dynamic properties of forest ecosystems. IBP 23. Cambridge. Cambridge University Press. p.341-410.
- DELITTI, W.B.C. 1984. Aspectos comparativos da ciclagem de nutrientes minerais na Mata Ciliar, no Campo Cerrado e na Floresta implantada de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* (Mogi-Guaçu, SP). Tese de Doutorado. Instituto de Biociências, USP, 297p.
- _____. MEGURO, M. 1984. Biomassa e mineralomassa epigéica do Campo cerrado de Mogi-Guaçu, SP. Ciência e Cultura 36(7):612.
- DOMINGOS, M. 1987. Aspectos da ciclagem de nutrientes na Reserva Biológica de Paranapiacaba (São Paulo), sujeita aos poluentes aéreos do complexo industrial de Cubatão. Dissertação de Mestrado, IBUSP, 166p.
- DUVIGNEAUD, P. 1974. La synthèse écologique. Paris, Doin éditeurs, 296p.
- ERIKSSON, E. 1971. Compartment models and the reservoir theory. Rev. Ecol. Syst. 2:67-83.
- EWEL, J.J. 1976. Litter fall and leaf decomposition in a Tropical Forest succession in eastern Guatemala. J. Ecol. 64(1):293-308.
- FRANKEN, M. 1979. Major nutrient and energy contents of litterfall of a riverine forest of central amazonia. Tropical Ecology 20(2):211-24.
- GOLLEY, F.B., MCGINNIS, J.T., CLEMENTS, R.G., CHILD, G.I., DUERVER, M. 1978. Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida. Trad. Eurípidés Malavolta. São Paulo, E.P.U./EDUSP. 256p.
- JACKSON, J.F. 1978. Seasonality of flowering and leaf-fall in a Brazilian subtropical lower montane moist forest. Biotropica 10(1):38-42.
- JORDAN, C.F. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. Chichester. John Wiley & Sons Ltd. 190p.
- _____. KLINE, J.R. 1972. Relative stability of mineral cycles in forest ecosystems. Amer. Nat. 106(948):237-253.
- JORGENSEN, J.R., WELLS, C.G., METZ, L.J. 1975. The nutrient cycle: key to continuous forest production. J. Forestry 73(7):400-3.
- KLINGE, H., RODRIGUES, W.A. 1968. Litter production in an area of Amazonian Terra Firme Forest. Amazoniana 1(4):287-302.

- LEMMÉ, G. 1974. Recherches sur les écosystèmes des réserves biologiques de la Forêt de Fontainebleau. Oecol. Plant. 9(3):187-200.
- LIKENS, G.E., BORMANN, F.H., JOHNSON, N.M., FISHER, D.W., PIERCE, R.J. 1970. The effect of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed ecosystem. Ecol. Monogr. 40(1):23-47.
- MINDERMAN, G. 1968. Addition, decomposition and accumulation of organic matter in forests. J. Ecol. 56:355-62.
- MONK, C.D. 1966. An ecological significance of evergreenness. Ecology 47(3):504-5.
- MORAES, R.M., DELITTI, W.B.C., STRUFFALDI-De VUONO, Y. 1992. Fluxo de macronutrientes através do folheto na Mata de Restinga e na Floresta pluvial tropical do Parque Estadual da Ilha do Cardoso. Congresso sobre essências nativas, 2. IF/SMA, SP. Resumos... p.44.
- MOUCHET, P.C. 1984. Influence of recently drowned terrestrial vegetation on the quality of water stored in impounding reservoirs. Verh. Internat. Verein. Limnol. 22:1608-19.
- OLSON, J.S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology 44(2):322-31.
- PAGANO, S.N. 1989. Produção de folheto em Mata Mesófila Semidecídua no município de Rio Claro, SP. Rev. Brasil. Biol. 49(3):633-9.
- PARKER, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. Adv. Ecol. Research 58-121.
- PINTO, M.T.C. 1992. Dinâmica de nutrientes em Mata Galeria da Lagoa do Diogo (Estação Ecológica de Jataí, Luis Antonio, SP). Tese de Doutorado, UFSCar, 363p.
- POGGIANI, F., COUTO, H.T.Z., SUITER FILHO, W. 1983a. Estimativa da remoção da biomassa e dos nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* em regime de mini rotação. IPEF, 23:37-42.
- _____. COUTO, H.T.Z., CORRADINI, L., FAZZIO, E.C.M. 1983b. Exportação de biomassa e nutrientes através da exploração de troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. IPEF 25:37-39.
- POMPÉIA, S.L. 1989. Aspectos da dinâmica de nutrientes minerais em solo sob a vegetação de Campo Cerrado. Dissertação de Mestrado, IBUSP, 137p.
- PROCTOR, J. 1989 Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems. Blackwell Sci. Publications. 473p.

- REBELO, C.F., MORAES, R.M., VARJABEDIAN, R., DE VUONO, Y.S., DELITTI, W.B.C. 1992a. Dados preliminares sobre a ciclagem de nutrientes na Mata de Restinga do Parque Estadual da Ilha do Cardoso. Simpósio sobre Estrutura, Funcionamento e Manejo de Ecossistemas. UFRJ, Resumos... p.98.
- _____. MORAES, R.M., VARJABEDIAN, R., DELITTI, W.B.C., STRUFFALDI-DE VUONO, Y. 1992b. Ciclagem de nutrientes na floresta pluvial tropical do Parque Estadual da Ilha do Cardoso, SP - Dados preliminares. Congresso Latino Americano de Ecologia, 2- Caxambú. Resumos... p.493-4.
- ROCHOW, J.J. 1975. Mineral nutrient pool and cycling in Missouri forest. J. Ecol. 63:985-94.
- SCHLITTLER, F.H.M. 1990 Fitossociologia e ciclagem de nutrientes na floresta tropical do parque estadual do Morro do Diabo. Tese de doutoramento. UNESP, Rio Claro. 279p.
- SILVA, I.S. 1983. Alguns aspectos da ciclagem de nutrientes em uma área de Cerrado (Brasília, DF): Chuva, Produção e decomposição de liter. Dissertação de Mestrado, UNB. 87p.
- STROJAN, C.L. 1978. Forest litter decomposition in the vicinity of a zinc smelter. Oecologia 32:203-12.
- SWIFT, M.F., HEAL, O.W., ANDERSON, J.M. 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems. Blackwell Scientific Publ. 372.
- STRUFFALDI-De VUONO, Y., MARZOLLA, M.C. 1984. Decomposição da serapilheira nas proximidades de uma siderúrgica. Congresso da Sociedade Botânica de São Paulo, 4. p.83-86
- VITOUSEK, P. 1982. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. Am. Nat. 119(4):553-72.
- _____. 1984. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests. Ecology 65(1):285-98.
- WEIDER, R.K., LANG, E.E. 1982. A critique of analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. Ecology 63(6):1636-42.
- WIEGERT, R.G., MURPHY, P. 1970. Effect of season, species and location on the disappearance rate of leaf litter in a Puerto Rican rain forest. In: ODUM, H.T., PIGEON, R.F. (eds). A tropical rain forest: a study of irradiation and ecology at El Verde, Puerto Rico. Oak Ridge, Technical Information Center, Cap. 5, p. H 101-4.

WITKAMP, M., AUSMUS, B.S. 1976. Process in decomposition and nutrient transfer in forest systems. *In*: ANDERSON, J.M., MacFADYEN, A. (eds.) The role of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes. Oxford, Blackwell Scientific Publications. p.375-96.

WHITMORE, T.C. 1989. Tropical forest nutrients, where do we stand? A tour de horizon. *In*: PROCTOR, J. (ed). Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems. Blackwell Sci. Publ. p.1-14

Endereços:

DELITTI, W.B.C.

Depto de Ecologia Geral do Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo.

Cx.Postal 11461 CEP 05422-970 São Paulo, SP - Brasil.

Fax- 0055(0011) 8154272 ramal 7416 - INTERNET - WDELITTI@CCE.MP.BR