

Acta Limnol. Brasil.	Vol. II	859-882	1988
----------------------	---------	---------	------

UTILIZAÇÃO DAS VARIAÇÕES NATURAIS DE $\delta^{13}\text{C}$ NO ESTUDO DE
CADEIAS ALIMENTARES EM AMBIENTES AQUÁTICOS:
PRINCÍPIOS E PERSPECTIVAS

MARTINELLI, L.A.*; VICTÓRIA, R.L.**; MATSUI, E.***; FORSBERG,
B.R.**** e NOZETO, A.A.*****

RESUMO

Neste trabalho são abordadas as aplicações da variação natural dos isótopos de carbono em estudos ambientais. São discutidos os princípios básicos para o uso desta metodologia, a composição isotópica das principais fontes de carbono na natureza e as causas para suas variações. São revistas as utilizações destas variações como traçadoras do destino da matéria orgânica em sedimentos costeiros, lacustres, ribeirinhos e em cadeias alimentares. Finalmente, são também revistos os primeiros trabalhos realizados no Brasil que se utilizaram desta metodologia.

* CENA/USP - SP

** ESALQ/CENA/USP - SP

*** CNEN/CENA - SP

**** University of Washington-USA/INPA-AM

***** UFSCar

ABSTRACT - USE OF $\delta^{13}\text{C}$ NATURAL VARIATIONS TO STUDY AQUATIC
FOOD CHAINS: PRINCIPLES AND PERSPECTIVES.

The use of natural variations in ^{13}C to study aquatic food chains is reviewed, including the basic assumptions for use of the methodology, isotopic composition of the main carbon sources and the causes for its variations. The use of such variation as a tracer for the fate of organic matter in costal, riverine and lake sediments and food chains is also discussed. The status of Brazilian research in this field is also reviewed.

INTRODUÇÃO

O clássico trabalho de UREY (1947) sobre as propriedades termodinâmicas dos isótopos estáveis, juntamente com o aperfeiçoamento do espectrômetro de massa (NIER, 1947 e McKINNEY et al., 1950), alicerçaram a moderna biogeoquímica isotópica.

Os isótopos estáveis mais utilizados em estudos biológicos são ^{13}C e ^{15}N . A utilização destes isótopos baseia-se na determinação da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ no material em estudo, nas suas possíveis fontes e no seu produto. A forma de expressão mais utilizada da relação acima é a notação δ , definida como:

$$\delta = \frac{R_{(\text{amostra})} - R_{(\text{padrão})}}{R_{(\text{padrão})}}$$

onde R é a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$.

Como as variações naturais dos isótopos ^{13}C e ^{15}N são pequenas, a notação δ é expressa por mil.

$$\delta (‰) = \delta \times 1000$$

Assim, uma amostra com valor igual a $-10^0/100$ significa que é empobrecida em 10 frente ao padrão. Portanto, o sinal negativo indica que a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra é menor que a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão. Normalmente, amostras enriquecidas em ^{13}C são denominadas "mais pesadas" ou "menos negativas"; por outro lado, amostras empobrecidas em ^{13}C são denominadas "mais leves" ou "mais negativas". Os padrões comumente utilizados são: rocha calcárea (PDB) da formação Peedee do Grand Canyon nos Estados Unidos para carbono e N_2 atmosférico para nitrogênio.

O uso dos valores de δ como traçador em estudos ambientais deve ter como premissa a existência de diferenças na composição isotópica dos compostos que porventura participem do processo em estudo, suficientemente grandes frente a sensibilidade analítica dos modernos espectrômetros de massa. Felizmente, tais diferenças ocorrem na natureza, e são fruto de reações físicas, físico-químicas e/ou biológicas que promovem a discriminação de um dos isótopos. Ao processo de discriminação dá-se o nome de fracionamento, que pode ser simplifcadamente definido por:

$$E(p/s) = \delta(p) - \delta(s)$$

onde:

- E - fator de enriquecimento por mil
- $\delta(p)$ - valor de delta por mil do produto
- $\delta(s)$ - valor de delta por mil do substrato

Tão importante quanto ao conhecimento da existência do fracionamento isotópico, é o fato de que, em sua grande maioria, os processos fracionantes para os compostos de carbono são hoje conhecidos, conseguindo-se prever, com certa precisão, a composição isotópica do produto e substrato, em função das variáveis envolvidas. Igualmente importante é o fato de que a composição isotópica da principal fonte que controla o ciclo do carbono na natureza, isto é, o CO_2 atmos

fêrico, tem composição isotópica praticamente constante. Na hidrosfera a principal fonte de carbono é o bicarbonato, que apesar de não ter composição isotópica constante, assume valores previsíveis e distintos do CO_2 atmosférico (DEUSER et al., 1968).

Os primeiros trabalhos utilizando valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram de reconhecimento, nos quais foi identificada a composição isotópica de vários produtos naturais (WICKMAN, 1952; CRAIG, 1953).

Dentro deste contexto, CRAIG (1953) observou que, devido ao fracionamento isotópico, diversos compostos naturais tinham composição isotópica distintas. O mesmo autor também observou que o CO_2 atmosférico era empobrecido em ^{13}C em relação ao carbono dissolvido nos oceanos. Conseqüentemente, o ambiente terrestre seria empobrecido em ^{13}C em comparação ao ambiente marinho, pois, a composição isotópica dos produtores primários seria determinada pela composição isotópica da fonte de carbono.

Posteriormente, SMITH & EPSTEIN (1971) notaram que a composição isotópica das plantas dependia da forma pela qual o CO_2 atmosférico era fixado. Assim, quando submetidas a uma mesma fonte de CO_2 , as plantas que fixavam o carbono pelo ciclo C-3 (CALVIN) eram mais empobrecidas em ^{13}C que as plantas que fixavam carbono através do ciclo C-4 (HATCH-SLACK).

Do ponto de vista biológico, considerando-se que os vegetais fotossintetizantes são os principais produtores primários no ecossistema terrestre, as informações acima são fundamentais. Elas formam, na verdade, o alicerce para a aplicação das variações naturais de $\delta^{13}\text{C}$ em estudos ambientais. Basicamente, valendo-se das diferenças entre as plantas do tipo C-3 ($\delta^{13}\text{C} = -27^\circ/\text{oo}$) e C-4 ($\delta^{13}\text{C} = -12^\circ/\text{oo}$) e entre o ambiente marinho ($\delta^{13}\text{C} = -21^\circ/\text{oo}$) e ambiente terrestre ($\delta^{13}\text{C} = -27^\circ/\text{oo}$), vários autores aprimoraram o entendimento da dinâmica do carbono em vários ecossistemas.

Este trabalho se propõe a realizar uma breve rev

são destes estudos como base para aplicação da razão isotópica do carbono em nossas condições.

METODOLOGIA DE USO

Na utilização de valores de $\delta^{13}\text{C}$ como indicadores de fontes de carbono, a metodologia de uso baseia-se na comparação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ das fontes com o valor de $\delta^{13}\text{C}$ do produto (Fig. 1). Assim, quando existem somente duas fontes isotopicamente distintas, o valor do $\delta^{13}\text{C}$ do produto refletirá a quantidade das duas fontes presentes no produto (Fig. 1a). Esta quantidade pode ser estimada pelo método da diluição isotópica, definido pelas equações:

$$A + B = 1 \quad (1)$$

$$\delta^{13}\text{C}_a \times A + \delta^{13}\text{C}_b \times B = \delta^{13}\text{C}_p \quad (2)$$

onde:

A é a proporção da fonte A no produto P

B é a proporção da fonte B no produto P

$\delta^{13}\text{C}_a$ é a composição isotópica da fonte A

$\delta^{13}\text{C}_b$ é a composição isotópica da fonte B

$\delta^{13}\text{C}_p$ é a composição isotópica do produto P

Substituindo-se (1) em (2) e desenvolvendo tem-se:

$$A(\%) = (\delta^{13}\text{C}_p - \delta^{13}\text{C}_b / \delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_b) \times 100$$

Em um caso mais complexo, onde existem mais que duas fontes de carbono (Fig. 1b), não se pode precisar a proporção relativa de cada uma das fontes no produto somente com o uso do $\delta^{13}\text{C}$. Será preciso o uso de um segundo isótopo ou

algum outro traçador que possa distinguir uma fonte da outra e identificá-las no produto.

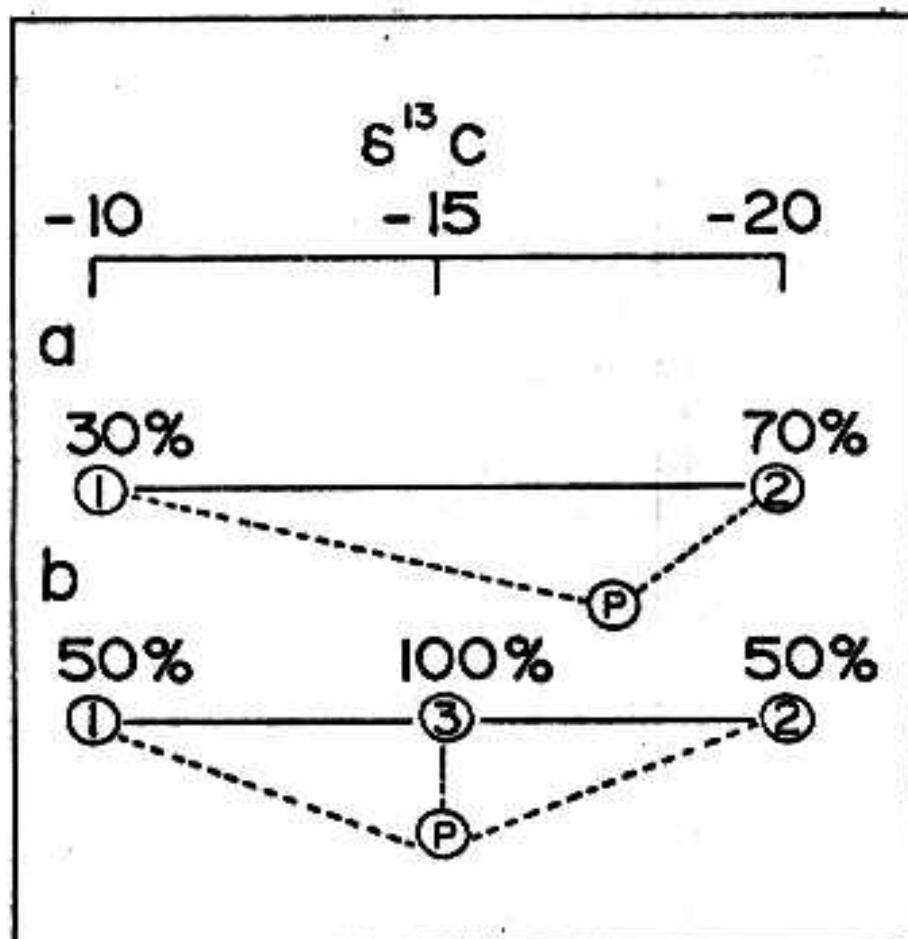


Figura 1 - Contribuição relativa de fontes com diferentes valores de $\delta^{13}\text{C}$. a) Duas fontes (1 e 2) com $\delta^{13}\text{C}$ igual a $-10^\circ/\text{oo}$ e $-20^\circ/\text{oo}$, dando origem a um produto (P) com $\delta^{13}\text{C}$ igual a $-17^\circ/\text{oo}$. Pela equação da diluição isotópica (ver texto) estimou-se a contribuição da fonte 1 em 30% e da fonte 2 em 70%. b) Três fontes (1, 2 e 3) com $\delta^{13}\text{C}$ iguais a $-10^\circ/\text{oo}$, $-15^\circ/\text{oo}$ e $-20^\circ/\text{oo}$, respectivamente, originando um produto (P) com um valor igual a $-15^\circ/\text{oo}$. Portanto, não foi possível quantificar a contribuição de cada uma das fontes, pois, este produto pode ter sido formado com uma contribuição de 50% da fonte 1 e 50% da fonte 2 ou, por outro lado, o mesmo pode ter sido formado por uma contribuição de 100% da fonte 3. Adaptado de FRY & SHERR (1984).

A COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DAS FONTES DE CARBONO NOS ECOSISTEMAS E SUAS VARIAÇÕES

Plantas vasculares

A matéria orgânica viva é diretamente ou indiretamente dependente da fotossíntese. As plantas assimilam carbono atmosférico (CO_2), e molecular (CO_2 e HCO_3) da hidrosfera, assim a composição isotópica de uma planta e, conseqüentemente, dos organismos em geral irá depender da composição isotópica de sua fonte de carbono (DEGENS, 1969).

WICKMAN (1952) e CRAIG (1953) observaram que as plantas eram empobrecidas em ^{13}C em comparação a sua fonte de carbono. PARKER & EPSTEIN (1960) apresentaram um modelo onde o fracionamento existente entre a fonte de carbono e a planta foi dividido em duas etapas: a primeira envolvendo a absorção de CO_2 atmosférico pelos estômatos e a segunda a conversão enzimática do CO_2 dissolvido no citoplasma a carboidratos. A somatória dos fracionamentos ocorridos em cada etapa totalizaria o fracionamento observado na natureza. BENDER (1968), citado por DEINES (1980), foi o primeiro a observar uma diferença consistente na composição isotópica do carbono entre certos grupos de plantas. Este autor notou que milho e outras gramíneas tropicais mostravam-se enriquecidos em ^{13}C em relação a outras plantas. Como anteriormente citado, SMITH & EPSTEIN (1971) dividiram as plantas em duas categorias quanto a composição isotópica: plantas do tipo C-3 e plantas do tipo C-4.

No entanto, mesmo conhecendo-se previamente o ciclo determinante da fixação do carbono pela planta, é aconselhável a determinação de sua composição isotópica. Pois, dentro de um certo intervalo, a composição isotópica dos grupos de plantas do tipo C-3 e C-4 mostram variações geográficas e sazonais (GEARING et al., 1984 e MARTINELLI, 1986).

Por outro lado, as plantas aquáticas foram menos

caracterizadas que as plantas terrestres (LAZERTE & SZALADOS, 1982). Todavia, os dados existentes mostram uma grande variabilidade (diferenças maiores que $10^{\circ}/\text{oo}$) no conteúdo isotópico destas plantas (FRY & SHERR, 1984). Provavelmente, este fato seja devido a maior variação tanto no conteúdo isotópico como na concentração que o CO_2 dissolvido apresenta em relação ao CO_2 atmosférico. Nas regiões estuarinas, onde ocorre uma mistura de CO_2 dissolvido de origem terrestre e marinha, esta variabilidade é mais acentuada.

Fitoplâncton

As cadeias alimentares que se desenvolvem no meio hídrico apoiam-se em larga escala na produção de fitoplâncton. Portanto, é fundamental uma completa caracterização isotópica destes produtores primários.

Embora, FRY & SHERR (1984), ressaltem que as medidas de $\delta^{13}\text{C}$ são na grande maioria dos casos feitas sobre o carbono orgânico particulado (POC), que pode ser constituído de fitoplâncton vivo e morto e de detritos de diversas origens, TAN & STRAIN (1983) e ARAÚJO-LIMA et al. (1986) não encontraram diferença significativa no valor de $\delta^{13}\text{C}$ entre amostras puras de fitoplâncton e POC.

SACKETT et al. (1965) constataram que fitoplâncton coletado em ambiente marinho, onde dominava condições de baixa temperatura, eram empobrecidos em ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = -28^{\circ}/\text{oo}$) quando comparados a populações coletadas em ambientes mais aquecidos ($\delta^{13}\text{C} = -21,7^{\circ}/\text{oo}$).

DEUSER & DEGENS (1967) notaram a ocorrência de fracionamento isotópico no sistema CO_2 (gás) - CO_2 (aquoso) - HCO_3 (aquoso). O valor do fracionamento era dependente da temperatura (cerca de $9,2^{\circ}/\text{oo}$ a 0°C e $6,8^{\circ}/\text{oo}$ a 25°C) e ocorre na fase de hidratação do CO_2 (aquoso), tornando-o mais empobrecido em ^{13}C . Como exemplo, caso seja assumido um valor de $0^{\circ}/\text{oo}$ para o $\delta^{13}\text{C}$ do bicarbonato, o CO_2 (aquoso) disponível para assimilação pelo plâncton terá um valor de

-9,2‰ (a 0°C) e de -6,8‰ (a 25°C). Assumindo-se um fracionamento constante com a temperatura de 19‰ entre o CO₂ (aquoso) e o fitoplâncton (DEUSER et al., 1968), o valor do $\delta^{13}\text{C}$ do fitoplâncton será de -28,2‰ (a 0°C) e de -25,8‰ (a 25°C). Todavia, um fracionamento de 19‰ é típico para condições onde ocorre excesso de CO₂ (aquoso), em condições onde ocorre déficit de CO₂ (aquoso) para a célula, o fracionamento decresce para um valor máximo de 6‰. Portanto, em águas onde predominam baixas temperaturas e concentrações elevadas de CO₂ (aquoso), ocorrerá um maior fracionamento entre o CO₂ (aquoso) e o fitoplâncton. Nestas condições, serão gerados valores mais negativos, como de -28‰ encontrado por SACKETT et al. (1965). Por outro lado, em águas onde predominam temperaturas mais elevadas, o fracionamento HCO₃ (aquoso) será menor e a solubilidade do CO₂ também. Conseqüentemente, ocorrerá um menor fracionamento entre o carbono inorgânico dissolvido e o carbono orgânico (DEUSER et al., 1968), gerando valores menos negativos. Por exemplo -22‰ encontrado por SACKETT et al. (1965).

No entanto, WONG & SACKETT (1978), observaram que 17 espécies de fitoplâncton desenvolvidas nas mesmas condições tiveram valores distintos de $\delta^{13}\text{C}$. Portanto, a composição isotópica destes organismos também depende da espécie.

Em adição, FRY & SHERR (1984), observaram uma variação de -18 a -24‰ em organismos marinhos habitantes de águas temperadas. Por outro lado, em águas doces e salgadas foi observada uma variação de -24 a -34‰, consistentemente mais leves que os valores encontrados em ambiente marinho. Possivelmente, este fato seja devido a influência do dióxido de carbono empobrecido em ^{13}C produzido biologicamente pela respiração do carbono orgânico de origem terrestre, que tem um valor médio de -26‰.

Em resumo, os principais fatores que determinam o valor do $\delta^{13}\text{C}$ de fitoplâncton são: a composição isotópica, a concentração e a origem da forma inorgânica de carbono fixado e a espécie em estudo. Portanto, devem ser evitadas as

generalizações, pois cada ecossistema aquático terá sua própria característica físico-química que determinará a concentração relativa e absoluta das espécies inorgânicas carbonatadas.

A UTILIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA COMO TRAÇADORA DA ORIGEM DA MATÉRIA ORGÂNICA DEPOSITADA NO SEDIMENTO

A maioria dos estudos nesta área concentraram-se em regiões costeiras (NEWMAN et al., 1973; HEDGES & PARKER, 1976; FRY et al., 1977; BOTELLO et al., 1980; SHERR, 1982). Nestas regiões as principais fontes de carbono são: 1) a matéria orgânica de origem terrestre, que é empobrecida em ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = -27\text{‰}$) e 2) a matéria orgânica de origem marinha, que é mais enriquecida em ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = -21\text{‰}$).

NEWMAN et al. (1973) concluíram, pela análise da composição isotópica de testemunhos de sedimento do Golfo do México, que a composição isotópica do sedimento marinho era determinada pela proporção relativa de material terrestre presente no sedimento. Já, NISSINBAUM & KAPLAN (1972) observaram que apesar de haver a influência do material terrestre na composição do sedimento, a extensão desta influência era restrita a regiões próximas a costa.

HEDGES & PARKER (1976), trabalhando no mesmo estuário, observaram que a extensão alcançada pelo material terrestre no ambiente marinho era função da largura do escudo continental e da magnitude do fluxo de material orgânico lançado pelo rio no oceano. Para este local, foi estimado que o alcance do material terrestre lançado pelo rio era de aproximadamente 65 km a partir da foz, sendo considerada bastante modesta face a grande vazão do rio Mississippi (SHULTZ & CALDER, 1976). NISSEBAUM & KAPLAN (1972) procederam a mesma estimativa para o rio Amazonas, concluindo que, a cerca de 100 km ao norte de Paramaribo não era mais detectada a influência de material terrestre no sedimento marinho. Con-

tudo, ressalta-se que este resultado foi baseado em um número bastante reduzido de amostras.

Geralmente, o $\delta^{13}\text{C}$ em ambientes costeiros varia entre $-26^{\circ}/\text{oo}$ a $-20^{\circ}/\text{oo}$, o primeiro indicando maior influência de material terrestre e o segundo predominância de material orgânico marinho. FRY et al. (1977) observaram valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$, em torno de $-12^{\circ}/\text{oo}$. Segundo estes autores, o enriquecimento de ^{13}C nas amostras de sedimento se deu pela influência da gramínea *Spartina alterniflora*, ressaltando a importância destas plantas no sistema. BOTELLO et al. (1980), obtiveram valores mais negativos que $-26^{\circ}/\text{oo}$, que foram justificados como sendo carbono de origem antropogênica introduzidos no sistema (poluição industrial).

Todavia, existem casos em que o uso de um único traçador não é suficiente para identificar as possíveis fontes de materiais orgânicos que estão incorporados ao sedimento de regiões costeiras. Esta dificuldade foi encontrada por SHERR (1982), que identificou cinco possíveis fontes de carbono com valores semelhantes de $\delta^{13}\text{C}$. Neste caso somente foi possível identificar a fonte enriquecida em ^{13}C , a gramínea *Spartina alterniflora*.

Os estudos empregando-se a composição isotópica em ambientes lacustres são mais escassos. O sedimento destes ecossistemas tem duas principais fontes de carbono, uma autóctone - fitoplâncton produzido fotossinteticamente - e outra alóctone - material terrestre que circunda o lago. STILLER (1977) não encontrou diferença na composição isotópica de ambas as fontes de carbono. Segundo este autor, devido a ocorrência de "blooms" de fitoplâncton durante certos períodos do ano, a composição isotópica do carbono sofre variações sazonais que dificultam sua utilização como traçador da matéria orgânica. Por outro lado, LAZERTE (1983) observou diferença consistente e constante na composição isotópica do carbono entre o material orgânico de origem terrestre e o fitoplâncton. Este autor concluiu que na zona pelágica 40% a 50% do material incorporado ao sedimento era

de origem terrestre e que nas regiões próximas as margens, aproximadamente 100% do material no sedimento era de origem terrestre.

Apesar da utilidade do uso da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ como traçadora da matéria orgânica, FRY & SHERR (1984) destacam algumas críticas a esta técnica: 1) pode haver alteração da composição isotópica de plantas durante sua degradação, embora esta tendência não tenha sido notada por vários autores (NISSEMBAUM & KAPLAN, 1972; HEDGES & PARKER, 1976; GEARING et al., 1984); 2) a porcentagem que cada material fonte de carbono contribui para um determinado produto é extremamente dependente do seu valor de $\delta^{13}\text{C}$ e 3) a perda de poder que esta metodologia apresenta quando existem mais de duas fontes primárias de carbono.

A UTILIZAÇÃO DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS NO ESTUDO DO FLUXO DE CARBONO AO LONGO DE CADEIAS ALIMENTARES

A utilização de isótopos estáveis como traçador do carbono ao longo da cadeia alimentar baseia-se na suposição que o consumidor refletiria isotopicamente sua dieta. DENIRO & EPSTEIN (1978) e FRY & SHERR (1984) observaram que o fracionamento existente entre o produtor e o consumidor era relativamente baixo, cerca de $1,0\text{‰}$. Portanto, enquanto a composição isotópica das plantas é determinada pelo caminho seguido pelo carbono durante a fotossíntese e do fitoplâncton pela concentração de dióxido de carbono dissolvido, a composição isotópica dos consumidores é determinada pela composição isotópica de sua dieta (FRY et al., 1978).

PARKER (1964) e SMITH & EPSTEIN (1971) foram os primeiros a observarem a semelhança isotópica entre consumidor e sua dieta.

MINSON & LUDLOW (1975) notaram que esta semelhança também ocorria entre mamíferos. Bovinos que consumiam forrageiras do tipo C-4 apresentavam a composição isotópica de

pelos e leite enriquecidas em ^{13}C em comparação a animais que se alimentavam exclusivamente de plantas do tipo C-3.

O estudo realizado por DENIRO & EPSTEIN (1978) veio esclarecer uma série de dúvidas nas relações entre consumidores e produtores e suas respectivas composições isotópicas. Assim, estes autores concluíram que: 1) o carbono assimilado pelo animal era na maioria dos casos enriquecidos em ^{13}C em relação a sua dieta, sendo o fracionamento médio de $0,8 + 1,1\text{‰}$; 2) a diferença entre indivíduos da mesma espécie consumindo a mesma dieta variou entre $0,2$ a $1,8\text{‰}$; 3) duas espécies consumindo a mesma dieta apresentaram fracionamento similar entre indivíduos e dieta; 4) a diferença entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da dieta e o $\delta^{13}\text{C}$ do animal era semelhante para indivíduos da mesma espécie consumindo diferentes dietas; 5) o valor de $\delta^{13}\text{C}$ dos diversos tecidos de um animal diferiram entre si; 6) a análise de $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica total de um animal foi mais representativa do valor de $\delta^{13}\text{C}$ da dieta em comparação ao valor de $\delta^{13}\text{C}$ de algumas frações bioquímicas. FRY & SHERR (1984) sugeriram que a similaridade intra e extra específica permitem uma menor amostragem na caracterização isotópica dos consumidores.

FRY et al. (1978) identificaram a preferência alimentar entre plantas do tipo C-3 e C-4 em pequenos animais habitantes de dunas de areia. Os mesmos autores ressaltaram que a análise do $\delta^{13}\text{C}$ na composição da dieta dos animais foi mais exata que a análise estomacal. Pois, pode ocorrer uma digestão diferenciada dos diversos tipos de alimentos que porventura o animal tenha ingerido.

Em ambientes estuarinos, as principais fontes de carbono são gramíneas do tipo C-4 (*Spartina* sp) e várias outras plantas do tipo C-3. As algas de uma maneira geral, mostram valores intermediários entre as plantas do tipo C-3 e C-4. HAINES & MONTAGUE (1979), valendo-se destas diferenças, realizaram um estudo detalhado do fluxo de carbono ao longo do sistema. Estes autores observaram uma grande semelhança entre os produtores de matéria orgânica e seus consu

midores. Os mesmos autores alimentaram, em condições de laboratório, poliquetos (*Capitella capitata*) com três diferentes dietas de composição isotópica distintas entre si. Nas três situações o conteúdo isotópico da dieta foi passado ao consumidor sem haver um fracionamento significativo. Em condições de campo, as mesmas tendências foram observadas. Paralelamente, estes autores também observaram que, sob condições controladas, não houve alteração no conteúdo isotópico de *Spartina alterniflora* após seis meses de decomposição.

GEARING et al. (1984), com um número significativo de amostras observaram, contrariamente a DENIRO & EPSTEIN (1978), uma variabilidade intraespecífica acentuada para consumidores bentônicos. Estes autores enfatizaram ainda, que esta variabilidade não podia ser atribuída ao tamanho dos indivíduos ou à mudança no conteúdo isotópico da fonte de alimento. Finalmente, os mesmos sugerem que o máximo de informação sobre as características dos animais coletados seja fornecida, visando-se facilitar o entendimento das causas que levam a uma variabilidade intraespecífica.

A UTILIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA EM ESTUDOS AMBIENTAIS NO BRASIL

Possivelmente, o primeiro trabalho empregando isótopos estáveis ambientais no Brasil foi realizado por LOURENÇO & MATSUI (1981). O estudo destes autores foi semelhante a aquele realizado por LUDLOW et al. (1976), onde foi determinada a importância relativa de forrageiras do tipo C-3 e C-4 na alimentação de bovinos. Dentro desta mesma linha seguiram-se outros trabalhos dos mesmos autores (LOURENÇO et al., 1982a e LOURENÇO et al., 1982b), demonstrando que a utilização desta metodologia apresenta uma série de vantagens sobre as técnicas convencionalmente utilizadas em estudos de nutrição animal. MATSUI (1981) descreveu, em linhas gerais, os princípios de utilização dos isótopos estáveis em estudos ambientais.

Mais recentemente foram feitos vários estudos utilizando-se esta técnica na dinâmica do carbono na bacia Amazônica.

HEDGES et al. (1986) identificaram a origem do material orgânico particulado fino e grosso transportado pelo rio Amazonas. A origem do particulado fino foi identificada como sendo partículas de solo, enquanto que o material mais grosso teve sua origem em folhas de plantas e árvores do tipo C-3. ERTEL et al. (1986) chegaram a resultados semelhantes analisando a composição isotópica de tecidos fúlvicos e húmicos dissolvidos no rio Amazonas. MARTINELLI (1986) utilizou a composição isotópica do carbono visando estabelecer a origem da matéria orgânica presente no sedimento de várzea do rio Amazonas. Neste estudo foi verificado que a fonte mais importante de matéria orgânica para este sedimento é o material transportado em suspensão pelo rio (Fig. 2). Na região do Baixo Amazonas a proporção de matéria orgânica oriunda de gramíneas no sedimento de várzea foi maior em comparação ao sedimento depositado na região do Alto Amazonas.

MOZETO et al. (este volume) caracterizaram isotopicamente as fontes potenciais de matéria orgânica para o sedimento de fundo da represa do Lobo (SP), onde várias espécies de macrófitas e gramíneas do brejo adjacente e os detritos da vegetação da bacia de drenagem constituem-se respectivamente em fontes autóctones e alóctones.

Em ambientes costeiros, os primeiros estudos foram desenvolvidos por LACERDA et al. (1987) e MOZETO et al. (1986). Estes estudos foram realizados em manguezais localizados na baía de Sepetiba, que está contaminada por metais pesados. Estes metais encontram-se na sua maioria adsorvidos a matéria orgânica particulada. O uso da composição isotópica deste material permitiu identificar uma maior concentração de metais no material particulado de origem marinha. Posteriormente, na mesma região, foi determinada a contribuição de detritos de *Spartina alterniflora* com metais pesados na composição do sedimento marinho ao seu redor (LI

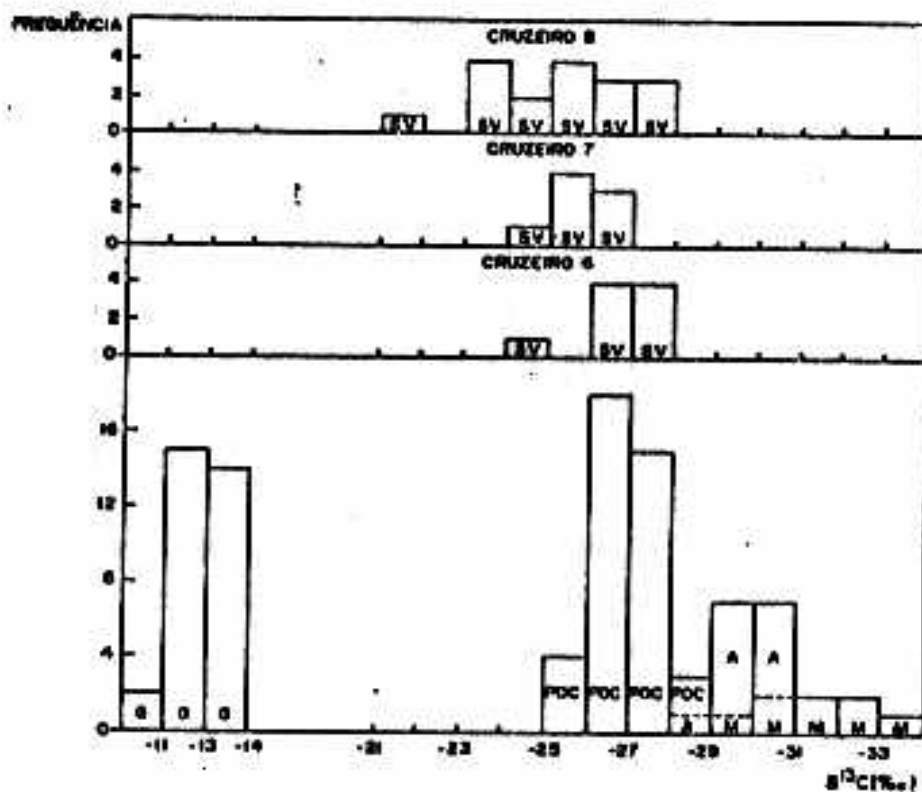


Figura 2 - Histograma dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) em vários compartimentos: G - gramíneas (*E. polystachya*); POCf - carbono orgânico particulado fino (< 63 μm) transportado pelo rio Amazonas; A - folhas de árvores de ocorrência na várzea e terra firme; M - macrófitas aquáticas do tipo C-3 e SV - sedimento de várzea. Adaptado de MARTINELLI (1986)

MA et al., em prep.). Neste estudo foi determinado que cerca de 50% da matéria orgânica do sedimento era oriunda da decomposição de *Spartina alterniflora*. Paralelamente, foi observado que o valor de $\delta^{13}\text{C}$ não variou com o estado de decomposição das plantas.

Especificamente sobre a utilização da composição isotópica no estudo de cadeias alimentares aquáticas, ARAÚJO-LIMA et al. (1986) determinaram que a fonte primária de energia para peixes detritívoros (*Characiformes*) da bacia Amazônica é constituída principalmente de fitoplâncton (Fig. 3)

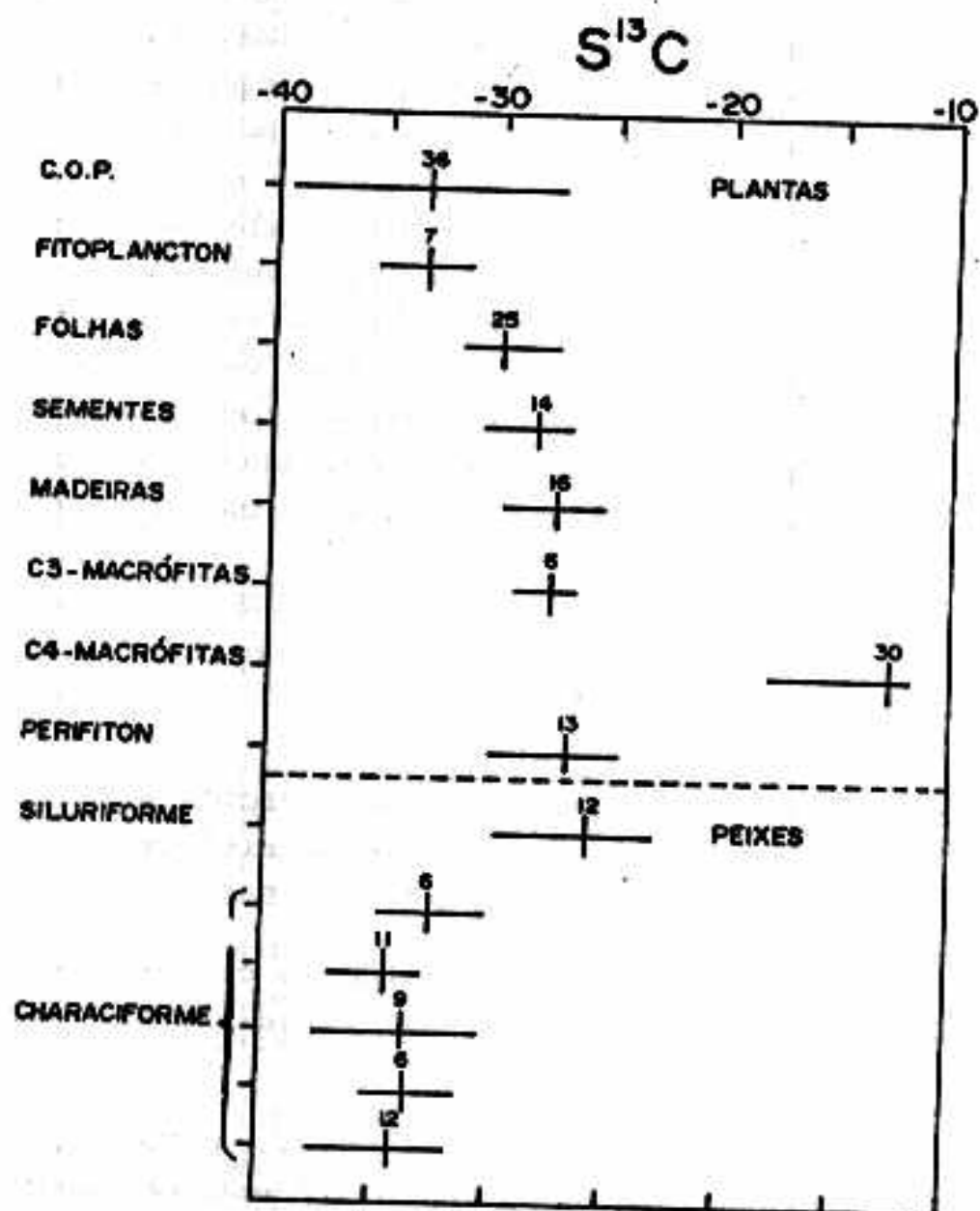


Figura 3 - Valores de $\delta^{13}\text{C}$ de 8 fontes autotróficas, carbono orgânico particulado (C.O.P.), 5 espécies de peixes Characiformes e 4 espécies de peixes Siluriformes (reunidos num só conjunto). Linhas verticais indicam médias e as linhas horizontais indicam a dispersão dos dados.

Adaptado de ARAÚJO-LIMA et al. (1986)

e não de gramíneas e frutos como anteriormente pensado.

Portanto, no Brasil, o número de estudos é ainda reduzido. Várias razões contribuem para este fato, dentre elas: o desconhecimento desta técnica por parte da comunidade científica; a falta de instituições que realizem este tipo de análise (no Brasil somente o Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo faz rotineiramente este tipo de análise) e o preço relativamente elevado destas análises. No entanto, o uso desta técnica no Brasil, pelas potencialidades que ela apresenta, vem aumentando nos últimos anos. Conseqüentemente, regiões como a Amazônia encontram-se razoavelmente bem caracterizadas, fornecendo subsídios básicos para aplicação desta técnica em nossas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO-LIMA, C.A.R.M.; FORSBERG, B.R.; VICTÓRIA, R.L.; MARTINELLI, L.A. Energy Sources for detritivorous fishes in the Amazon. *Science*, 234: 1256-8, 1986.
- BENDER, M.M. Mass spectrometric studies of carbon-13 variations in corn and other grasses. *Radioarbon*, 10 (2): 468-72, 1968.
- BOTELHO, A.V.; MANDELLI, E.F.; MACRO, S.; PATRICK, P.L. Organic carbon isotopes ratios of recent sediments from coastal lagoons of the Gulf of Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 557-60, 1980.
- CRAIG, H. The biogeochemistry of the carbon isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 3: 53-92, 1953.
- DEINEIS, P. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: FRITZ, P. & FONTES, J.C., ed. *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Amsterdam, Else-

- vier, 1980. p. 329-406.
- DeNIRO, M.J. & EPSTEIN, S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 495-506, 1978.
- DEGENS, E.T. Biogeochemistry of the stable carbon isotopes. In: EGLINTON, G. & MURPHY, M.J.T., ed. *Organic geochemistry methods and results*. Berlin, Springer-Verlag, 1969. p. 304-28.
- DEUSER, W.G. & DEGENS, E.T. Carbon isotope fractionation in the system CO_2 (aqueous) - HCO_3 (aqueous). *Nature*, 215: 1033-5, 1967.
- DEUSER, W.G.; DEGENS, E.T.; GUILLARD, R.R.L. Carbon isotope relationships between plankton and sea water. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 32: 657-60, 1968.
- ERTEL, J.R.; HEDGES, J.I.; DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E. Dissolved humic substances of the Amazon river system. *Limnol. Oceanogr.*, 31: 739-54, 1986.
- FRY, B. & SHERR, E.B. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater. *Contr. Mar. Science*, 27, 1984.
- FRY, B.; SCALAN, R.S.; PARKER, P.L. Stable carbon isotope evidence for two sources of organic matter in coastal sediments: sea grasses and plankton. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 41: 1875-7, 1977.
- FRY, B.; JENG, W.L.; SCALAN, R.S.; PARKER, P.L.; BACCUS, J. $\delta^{13}\text{C}$ food web analysis of a texas sand dune community. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 43: 1299-304, 1978.
- GEARING, J.N.; GEARING, P.J.; RUDNICK, D.T.; REQUEJO, A.G.; HUTCHINS, M.J. Isotope variability of organic carbon in a phytoplankton based temperate estuary. *Geoch. Cosmoch.*

Acta, 48: 1089-98, 1984.

- HAINES, E.B. & MONTAGUE, C.L. Food sources of estuarine invertebrates analyzed using $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios. *Ecology*, 60: 48-56, 1979.
- HEDGES, J.I. & PARKER, P.L. Land-derived organic matter in surface sediments from the Gulf of Mexico. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 40: 1019-29, 1976.
- HEDGES, J.I.; CLARK, W.C.; QUAY, P.D.; RICHEY, J.E.; DEVOL, A.H. Composition and fluxes of particulate organic material in the Amazon river. *Limnol. Oceanogr.*, 31: 717-38, 1986.
- LACERDA, L.R.; REZENDE, C.É.; MARTINELLI, L.A.; OVALLE, A.R.; MOZETO, A.A.; NOGUEIRA, F.B.; VICTÓRIA, R.L.; ARAGON, G.T.; CUNHA, C.T.; SILVA, C.A.R. Composição isotópica de carbono em componentes de um ecossistema de manguezal na baía de Sepetiba, Rio de Janeiro. (*Ci. e Cult.* - no prelo)
- LAZERTE, B. Stable carbon isotopes ratios: implications for the source of sediment carbon and for phytoplankton carbon assimilation in lake Memphremagog, Quebec. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40: 1658-68, 1983.
- LAZERTE, B. & SZALADOS, J.E. Stable carbon isotope ratio of submerged freshwater macrophytes. *Limnol. Oceanogr.*, 27: 413-8, 1982.
- LIMA, N.R.W.; MARTINELLI, L.A.; VICTÓRIA, R.L.; MOZETO, A.A. Análise da contribuição de matéria orgânica de *Spartina alterniflora* para o sedimento do alagado marinho de Pedra de Guaratiba (RJ), utilizando-se a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ como traçadora. (*Rev. Bras. Biol.* - no prelo)
- LOURENÇO, A.J. & MATSUI, E. Avaliação da proporção de gra-

- mineira e leguminosas na dieta de bovinos por determinação de isótopos naturais estáveis nas fezes. *Zootecnia*, 19: 5-15, 1981.
- LOURENÇO, A.J.; MATSUI, E.; BOIN, C.; ALEONI, G.F. Avaliação de forragem selecionada por bovinos através da fistula de esôfago e medidas das relações $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ nas fezes. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOLOGIA, 19, Piracicaba, 1982. *Anais ...*
- LOURENÇO, A.J.; MATSUI, E.; BOIN, C. Avaliação da participação de leguminosas na dieta de bovinos sob pastejo em diferentes áreas de reserva de quando através das medidas das relações $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ nas fezes. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOLOGIA, 19, Piracicaba, 1982. *Anais ...*
- LUDLOW, M.M.; TROUGHTON, J.M.; JONES, R.A. A technique for determining the proportion of C-3 and C-4 species in plant samples using stable natural isotopes of carbon. *J. Agric. Sci.*, 87: 625-32, 1976.
- MARTINELLI, L.A. *Composição química e isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) de sedimentos de várzea e suas interações com alguns rios da bacia Amazônica*. Piracicaba, USP, 1986. 214p. (Dissertação)
- MATSUI, E. Utilização de isótopos estáveis em pesquisas. *Spectrum*, 1 (4): 73-6, 1981.
- McKINNEY, C.R.; McCREA, J.M.; EPSTEIN, S.; ALLEN, H.A.; UREY, H.C. Improvements in mass spectrometers for the measurements of small differences in isotope abundance ratios. *Rev. Sci. Instr.*, 21: 724-30, 1950.
- MINSON, D.J.; LUDLOW, M.M.; TROUGHTON, J.H. Differences in natural carbon isotopes ratios of milk and hair from cattles grazing tropical and temperate pasture. *Nature*,

256: 597-8, 1975.

MOZETO, A.A.; LACERDA, L.D.; MARTINELLI, L.A.; REZENDE, C.E.; VICTÓRIA, R.L.; SILVA, C.A.; NOGUEIRA, F.; OVALLE, R.; PRAZERES, C.M. Origem e destino da matéria orgânica particulada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE LIMNOLOGIA, 1, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1986.

NEWMAN, J.L.; PARKER, P.L.; BEHRENS, E.W. Organic carbon isotope ratios in quaternary cores from the Gulf of Mexico. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 37: 225-38, 1973.

NIER, A.O. A mass spectrometer for isotope and gas analysis. *Rev. Sci. Instr.*, 18: 398-411, 1947.

NISSEMBAUM, A. & KAPLAN, I.R. Chemical and isotope evidence for in situ origin of marine humic substances. *Limnol. Oceanogr.*, 17: 570-82, 1972.

PARKER, R. & EPSTEIN, S. Carbon dioxide fractionation during photosynthesis. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 21: 110-26, 1960.

PARKER, P.L. The biogeochemistry of the stable isotopes of carbon in a Marina bay. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 28: 1155-64, 1964.

SACKETT, W.M.; ECKELMANN, W.R.; BENDER, M.L.; BE, A.W.A. Temperature dependence of carbon isotope composition in marine plankton and sediments. *Science*, 148: 235-7, 1965.

SHERR, E.B. Carbon isotope composition of organic seston and sediments in a Georgia salt marsh estuary. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 46: 1227-32, 1982.

SHULTZ, D.J. & CALDER, J.A. Organic carbon $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in estuarine sediments. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 40: 381-5, 1976.

- SMITH, B.N. & EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Phys.*, 47: 380-4, 1971.
- STILLER, M. Origin of sedimentation components in lake Kinneret traced by their isotopic composition. In: GOLTERMAN, H.L., ed. *Interactions between sediments and freshwater*. The Hague, Netherlands, Dr. W. Junk, 1977.
- TAN, F.C. & STRAIN, P.M. Sources, sinks and distribution of organic carbon in the St. Lawrence Estuary, Canadá. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 47: 125-32, 1983.
- UREY, H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances. *J. Chem. Sci.*, 1947: 562-81, 1947.
- WICKMAN, F. Variations in the relative abundance of carbon isotope in plants. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 2: 243-54, 1952.
- WONG, W. & SACKETT, W.M. Fractionation of stable carbon isotopes by marine phytoplankton. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 42: 1809-16, 1978.

ENDEREÇO DOS AUTORES

MARTINELLI, L.A.; VICTÓRIA, R.L.; MATSUI, E.
 Centro de Energia Nuclear na Agricultura
 Av. Centenário, 303
 Caixa Postal, 96
 13400 Piracicaba - SP

FORSBERG, B.R.
 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
 Caixa Postal, 478
 69000 Manaus - AM

882

MOETTO, A.A.

Universidade Federal de São Carlos

Departamento de Química

13560 São Carlos - SP