



## DINÂMICA DE VEGETAÇÕES DURANTE O QUATERNÁRIO RECENTE NO SUL DO AMAZONAS, INDICADA PELOS ISÓTOPOS DO CARBONO ( $^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ , $^{14}\text{C}$ ) DO SOLO

S.E.M. Gouveia<sup>1</sup>, L.C.R. Pessenda<sup>1</sup>, R. Aravena<sup>2</sup>, R. Boulet<sup>3</sup>, R. Roveratti<sup>1</sup>, B.M. Gomes<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro de Energia Nuclear na Agricultura - USP, Av. Centenário, 303, CEP 13400-970, Piracicaba, SP

<sup>2</sup>University of Waterloo, Waterloo - N2L 3G1, Ontario, Canada

<sup>3</sup>ORSTOM, Instituto de Geociências - USP, Caixa Postal 11.348, CEP 05422-970, São Paulo, SP

<sup>4</sup>Universidade de Rondônia, CEP 78934-000, Ji-Paraná, RO

Recebido em 04/97; aprovado para publicação em 03/98

### ABSTRACT

*This paper presents soil carbon isotopes data ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$ ) along an ecosystem transect in the Amazon state, central-northern Amazon region, that includes three distinct vegetation communities: savanna (Campos de Humaitá), a savanna-forest transition and a forest. The study sites are located along of the road BR 319, between the cities of Humaitá (savanna; southern Amazon state) and Manaus (forest).*

*The  $^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  data measured on soil organic matter in the Humaitá region, show that significant vegetation changes occurred in the past, probably associated with climatic changes. At About 12000 years, BP forest vegetation expanded throughout the study region, including the areas that are presently occupied today by savanna vegetation. During the middle Holocene savanna vegetation expanded at least 2 km into the modern forest ecotone, suggesting drier conditions. The last approximately 1000 years BP indicate a expansion of forest vegetation, reflecting a return to moister climate. This study illustrate that the transition area between forest and savanna vegetation ecotone is quite sensitive to climatic changes, and should be the focus of more extensive research related to past climate and vegetation dynamics in the Amazon region.*

### RESUMO

*Este trabalho apresenta dados dos isótopos do carbono ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $^{14}\text{C}$ ) do solo do estado do Amazonas, ao longo de uma transecção envolvendo três distintas vegetações: campo de Humaitá, transição campo-floresta e floresta. Os locais de estudo encontram-se localizados ao longo da BR 319, perto da cidade de Humaitá, sul do estado do Amazonas.*

*Os dados de  $^{13}\text{C}$  e  $^{14}\text{C}$ , medidos na matéria orgânica do solo, indicam que mudanças significativas de vegetação ocorreram no passado, provavelmente associadas a mudanças climáticas. Há aproximadamente 12000 anos AP, a vegetação de floresta expandiu-se por toda a região de estudo, incluindo as áreas atualmente ocupadas pelo campo. Durante o Holoceno Médio, a vegetação de campo expandiu pelo menos 2 km no atual ecossistema de floresta, sugerindo condições mais secas. Há indicação de que, aproximadamente, nos últimos 1000 anos AP, houve uma expansão da vegetação de floresta, refletindo o retorno de um clima mais úmido. Este estudo ilustrou que a área de transição entre a vegetação de campo e floresta é muito sensível a mudanças climáticas e deve ser o foco de uma pesquisa mais extensiva relacionada à dinâmica de vegetação e a climas passados na região da Amazônia.*

## INTRODUÇÃO

Os trabalhos publicados nas últimas décadas, baseados em argumentos palinológicos (Absy & Van der Hammen, 1976; Absy, 1985; Ledru, 1992 e 1993), geomorfológicos (Servant *et al.*, 1981), sedimentológicos (Suguio *et al.*, 1993; Turcq *et al.*, 1993) e isotópicos (Victoria *et al.*, 1995; Desjardins *et al.*, 1996; Pessenda *et al.*, 1996a, b, c e 1998a) indicam a ocorrência de variações paleoclimáticas na bacia amazônica e em outras áreas do Brasil e da América do Sul, durante o Quaternário. Paleoclimas mais secos que o atual, provavelmente, dominaram algumas áreas da bacia amazônica, favorecendo a substituição da floresta tropical por vegetação do tipo cerrado.

Análises palinológicas e sedimentológicas de depósitos lacustres na Serra de Carajás, no Pará, registraram períodos secos, há cerca de 60000, 40000, entre 23000-11000 e 7000-4000 anos AP, indicados pela regressão da floresta tropical. Por outro lado, um aumento considerável no percentual de pólen arbóreo foi observado entre 9500 e 8000 anos AP (Absy *et al.*, 1991; Sifeddine *et al.*, 1994).

A composição dos isótopos do carbono ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ou  $\delta^{13}\text{C}$ ) do solo fornece informação com relação à ocorrência de espécies de plantas  $\text{C}_3$  e/ou  $\text{C}_4$ , nas comunidades de plantas no passado. Tal informação tem sido usada para estimar taxas de *turnover* da matéria orgânica do solo (MOS) (Cerri *et al.*, 1985), registrar mudanças de vegetação e inferir mudanças climáticas (Hendy *et al.*, 1972; Desjardins *et al.*, 1996; Martinelli *et al.*, 1996; Pessenda *et al.*, 1996a, b e c).

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  das

espécies de plantas do tipo  $\text{C}_3$  variam entre -20‰ e -32‰, com média de -27‰, enquanto os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  das espécies  $\text{C}_4$  variam entre -9‰ e -17‰, com média de -13‰. Assim, plantas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  possuem valores de  $\delta^{13}\text{C}$  distintos que diferem de, aproximadamente, 14‰ entre si (Boutton, 1991).

Através de estudos isotópicos da matéria orgânica do solo de três áreas localizadas na região Sul (Londrina), Sudeste (Piracicaba) e Norte do Brasil (Altamira/Pará), Valencia (1993) e Pessenda *et al.* (1996a) encontraram variações de  $\delta^{13}\text{C}$ , indicativo de trocas de vegetação e provável ocorrência de um clima mais seco para as duas primeiras regiões, no Holoceno Médio (6000 anos AP). Na região Norte, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  mantiveram-se constantes, o que, provavelmente, indicou que algumas áreas da região amazônica não sofreram influência das variações climáticas ocorridas no período e/ou que, durante o início do Holoceno até o Holoceno Médio, a região subtropical do Brasil foi mais seca do que a região tropical (Pessenda *et al.*, 1996b).

Dados de  $^{13}\text{C}$  de solos coletados ao longo do transecto Vilhena-Pimenta Bueno-Ariquemes, no estado de Rondônia, não indicaram mudanças significativas no tipo de vegetação nas áreas de florestas localizadas nas regiões norte (Ariquemes) e centro-norte (Pimenta Bueno), durante o Holoceno Médio. Nos ecossistemas onde predominam, atualmente, as vegetações de cerrado (sul de Pimenta Bueno) e cerrado (Vilhena, sul do estado), observou-se a influência de plantas  $\text{C}_4$  durante parte do Holoceno. Estas mudanças foram associadas a períodos

mais secos do que o atual, que, provavelmente, atingiram o sul daquela região da Amazônia (Gomes, 1995; Pessenda *et al.*, 1996c; Pessenda *et al.*, 1998b).

Análises de  $\delta^{13}\text{C}$  da MOS e datação radiocarbônica de fragmentos de carvão foram realizadas nas amostras coletadas ao longo de uma transecção perpendicular ao contato floresta-cerrado, no norte da Amazônia brasileira (Roraima). Os resultados mostraram que os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  da MOS, nos horizontes mais superficiais do solo, caracterizaram as vegetações de cobertura e não indicaram movimentos recentes no contato entre as vegetações. Entretanto, valores de  $\delta^{13}\text{C}$ , obtidos de camadas mais profundas de solos sob cerrado e floresta, indicaram que mudanças do tipo de vegetação ocorreram no passado, sugerindo que o limite floresta-cerrado mudou, significativamente, no período do Holoceno Médio-Holoceno Recente, sendo, a floresta, mais expandida durante o início do Holoceno. Esta hipótese foi reforçada pela presença de carvões de espécies de floresta em perfis de solo no cerrado. Durante o Holoceno Médio, a floresta deve ter regredido fortemente e as queimadas apareceram com o desenvolvimento máximo da vegetação de cerrado. Mais recentemente, a floresta deve ter invadido uma parte desse cerrado e queimadas ocorreram novamente (Desjardins *et al.*, 1996).

Nas proximidades da cidade de Humaitá, sul do estado do Amazonas, encontra-se uma parte da vegetação denominada campos de Humaitá, que se modifica, gradativamente, para floresta de terra-firme no sentido de Humaitá para Manaus.

Para avaliar a evolução da vegetação existente naquela re-

gião, associou-se a datação radiocarbônica com a composição isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) da matéria orgânica do solo (MOS). A datação por  $^{14}\text{C}$  da MOS fornece elementos de cronologia, enquanto o  $\delta^{13}\text{C}$  é usado como um indicador dos tipos de vegetação do ambiente local.

Este trabalho apresentou como principais objetivos o estudo de prováveis mudanças de vegetação e clima, ocorridas, no passado, no sul do estado do Amazonas, e a avaliação da dinâmica da transecção floresta-transição-campo, encontrada, naturalmente, naquela região.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

As amostras de solo foram coletadas na Área da Reserva do Exército - 54° BIS - Batalhão de Infantaria da Selva, cuja sede localiza-se na BR 319, a 8 km do município de Humaitá (7°31'S, 63°2'O Gr), sul do estado do Amazonas (Fig. 1).

O clima dominante nesta área pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) do sistema Köppen de classificação, apresentando temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C e com uma estação seca prolongada (3 a 4 meses com precipitações pluviométricas inferiores aos 50 mm por mês). Os índices de precipitação anuais oscilam entre 1800 mm e 3500 mm e, a umidade relativa do ar anual, entre 80% e 85% (Brasil, 1978).

Os solos dessa região possuem baixa fertilidade natural e situam-se em áreas de relevo plano e suave ondulado. Caracterizam-se pela presença de plintita e/ou concreções, são

imperfeitamente drenados e apresentam excesso de água durante um período do ano, o que ocorre, em geral, na época de maior precipitação pluviométrica na região (Brasil, 1978).

A vegetação predominante da região é da floresta tropical densa e/ou aberta (Brasil, 1978), ocorrendo os campos de Humaitá, quando a vegetação florestal se interrompe.

Ao longo da BR 319, encontra-se um dos campos de Humaitá, que se modifica, gradativamente, para floresta de terra-firme no sentido de Humaitá para Manaus. Os termos campo de Humaitá e floresta de terra-firme, para simplificação da redação, serão descritos como campo e floresta.

O primeiro ponto de coleta na região de campo (C1) encontra-se, aproximadamente, a 5 quilômetros de Humaitá na BR 319, sentido Humaitá-Manaus. O segundo ponto na região de campo (C2) e os pontos sob vegetação característica de transição campo-floresta (Tr) e floresta (F1 e F2) encontram-se na BR 319 a 17, 18, 20 e 50 quilômetros de Humaitá, respectivamente (Fig. 1). Para simplificar o texto e as figuras, considerou-se que os pontos de coleta encontram-se nos quilômetros 5, 17, 18, 20 e 50 do ecossistema estudado, respectivamente.

Os solos sob vegetação de campo foram classificados como Hidromórfico Gleyzado (km 5) e Litossolo (km 17). Os solos sob a transição (km 18) e sob a floresta, no km 20, foram classificados como Cambissolo Álico e o da floresta, no km 50, como Podzólico Vermelho-Amarelo. O primeiro perfil sob campo denominou-se de Gley C1; o seguinte, igualmente sob campo, de Litossolo C2; o solo na transição floresta-campo, de

Cambissolo Tr; o primeiro, solo sob floresta de Cambissolo F1, e o segundo, solo sob floresta de Podzólico F2.

## MÉTODOS

### Amostragem e preparo do solo

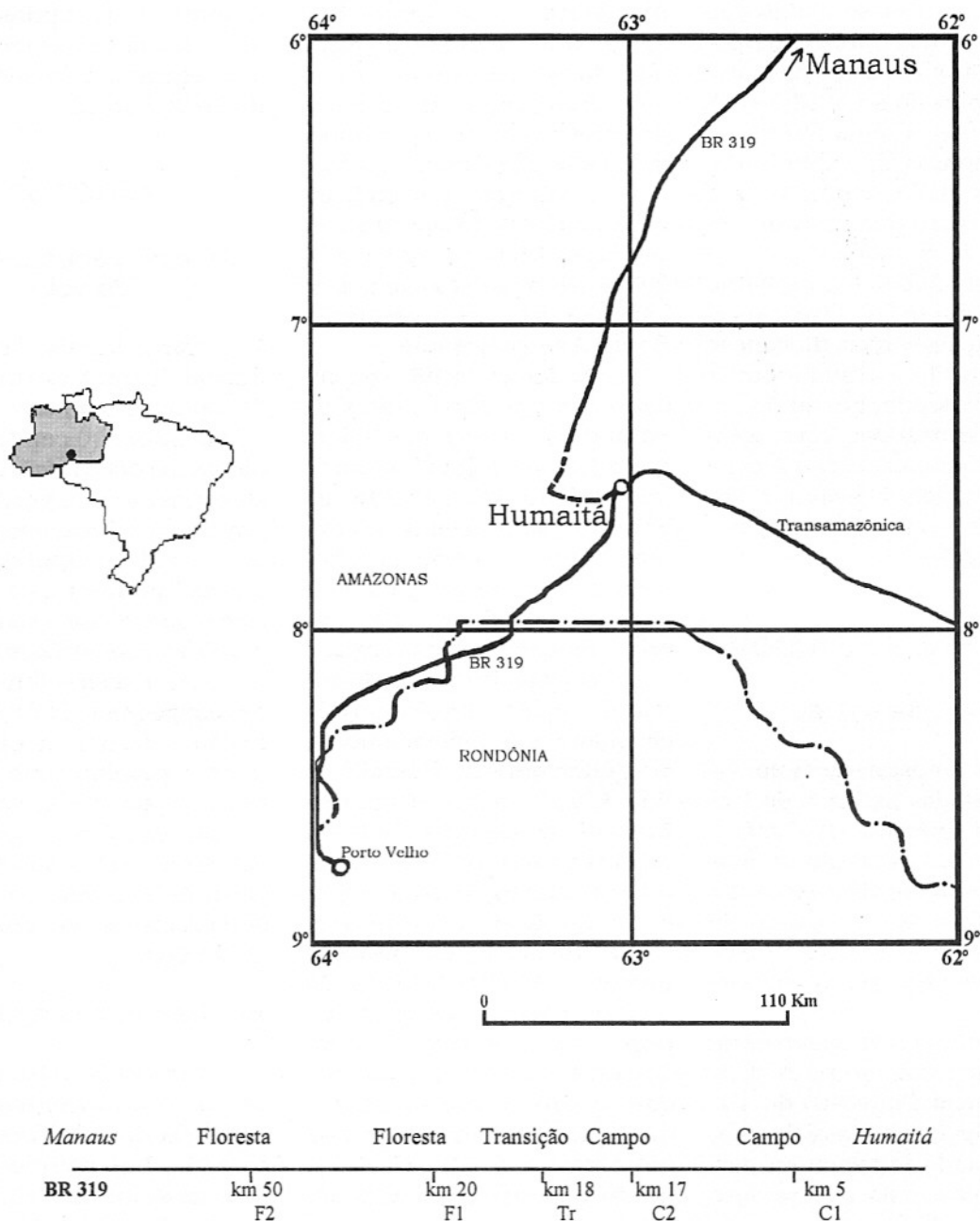
Nos locais de amostragem, foram feitas trincheiras de, aproximadamente, 100 cm x 200 cm x 200 cm de profundidade, de onde foram coletadas amostras de solo, a cada 10 cm, sendo, aproximadamente, 10kg por camada, no sentido das camadas inferiores para as superiores, acondicionadas em sacos plásticos e identificadas.

As amostras foram passadas em peneiras de malha grossa para o destorroamento e, durante o peneiramento, retirou-se restos de raízes, vegetação, insetos, etc. Após secagem, as amostras foram passadas em peneiras de 2 mm, obtendo-se, desta forma, a terra fina seca ao ar (TFSA).

### Análises físicas e químicas

As análises físico-químicas e granulométricas das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos do Departamento de Ciência do Solo - ESALQ/USP. Os métodos analíticos empregados pelo Laboratório foram: pH em  $\text{CaCl}_2$  0.01M; P, K, Ca e Mg, com extração pela resina trocadora de íons (relação solo: resina:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.8N em  $\text{HCl}$  0.2N = 1:1:20) e Al, com  $\text{KCl}$  1N (relação solo: extrator = 1:10) (Raij & Quaggio, 1983).

As análises granulométricas do solo foram realizadas através do método do densímetro (Kiehl, 1979).



**Figura 1** - Localização da área de estudo na região de Humaitá (linha tracejada) e dos pontos de amostragem no ecossistema campo-transição-floresta.

#### Determinação do carbono orgânico total

Partindo-se de 1 a 5 g de TFSA moída e peneirada a 0,149 mm, foi determinado o carbono orgânico total, que será reportado como carbono total, no Laboratório de Isótopos Ambientais, Universidade de

Waterloo - Canadá. Os resultados apresentados referem-se à média de três determinações, com precisão de 1 a 2%.

#### Análises isotópicas

*Determinação da Razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ )* - Foram enviados, aproximadamente, 20 g de

TFSA, peneirada a 0,149 mm, ao Laboratório de Isótopos Ambientais, Universidade de Waterloo - Canadá, para a determinação das razões isotópicas ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ). Os resultados estão expressos pela unidade relativa " $\delta$ ", determinada em relação ao padrão internacional PDB:



$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left[ \frac{{}^{13}\text{R}_{\text{amostra}} - {}^{13}\text{R}_{\text{PDB}}}{{}^{13}\text{R}_{\text{PDB}}} \right] \times 1000$$

onde  ${}^{13}\text{R} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  para a razão isotópica do carbono. Os resultados apresentados referem-se à média de três determinações, com precisão de 0,2‰.

### Análise do ${}^{14}\text{C}$

*Fracionamento granulométrico - solo total (Pessenda et al., 1996a e b)* - Partindo-se de, aproximadamente, 2000 g de TFSA, submeteu-se a amostra a um fracionamento granulométrico, utilizando-se um agitador automático, contendo, sucessivamente, peneiras de 1 mm, 0,50 mm e 0,200 mm, durante 30 minutos, obtendo-se quatro frações, onde foram realizadas catações de resíduos orgânicos, como raízes e insetos, com ajuda de uma pinça.

Em seguida, realizou-se a flotação das respectivas frações para a eliminação de resíduos orgânicos vegetais, constituídos, principalmente, por pequenas raízes, em recipientes contendo 2 litros de solução de HCl 0.01M (Martel & Paul, 1974). Repetiu-se o processo até a ausência de qualquer resíduo no sobrenadante.

Fez-se a desagregação das frações maiores que 0,200 mm em frascos plásticos de 1 litro contendo água destilada na proporção de 1:3, efetuando-se uma agitação rotativa com auxílio de esferas de vidro, por 2 horas. Obteve-se a fração menor que 0,200 mm por peneiramento úmido com água destilada. Submeteu-se a fração maior que 0,200 mm ao ultra-som durante 15 minutos para desagregação e novamente peneiramento.

Após a sedimentação, descartou-se o sobrenadante e colocou-se o resíduo em bandejas de alumínio para secar em

estufa a 40°C durante 48 horas. Após a secagem, as amostras foram desagregadas em almofariz de porcelana e acondicionadas em sacos plásticos.

Este procedimento baseia-se em trabalhos realizados por Feller (1979) e Bruckert & Kilbertus (1980), com algumas adaptações para maior praticidade no processo.

Posteriormente, efetuou-se a síntese benzênica e a análise do  ${}^{14}\text{C}$  (Pessenda & Camargo, 1991) no Laboratório de  ${}^{14}\text{C}$  do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), através da técnica de espectrometria de cintilação líquida.

*Extração química da humina (Pessenda et al., 1996a e b)* - A partir de 1500 g de solo na fração menor do que 0,200 mm, obtida pelo fracionamento granulométrico, iniciou-se o pré-tratamento com 4 litros de HCl 0.5M, a 80°C, por 4 horas, onde foram eliminados materiais leves em via de humificação. Em seguida, procedeu-se a lavagem do solo com água destilada, em recipientes de 10 litros, para eliminar-se o ácido do tratamento e compostos não humificados, até atingir um pH em torno de 4. Tratou-se o resíduo, sucessivamente, com uma mistura de 10 litros de solução de pirofosfato e hidróxido de sódio 0.1N, pH 13, com o objetivo de solubilização dos ácidos fúlvico e húmico. As extrações foram feitas até a obtenção de soluções sobrenadantes de cor clara, que foram descartadas por sifonação.

Submeteu-se o resíduo obtido após as extrações a repetidas lavagens com água destilada até atingir o pH 4. Em seguida, realizou-se a hidrólise ácida com 4 litros de solução HCl 3M por um período de 12 horas a 100°C, com o objetivo de eliminar-se resíduos orgânicos

(açúcares, proteínas, gorduras e contaminação com  $\text{CO}_2$  atmosférico).

Lavou-se o resíduo com água destilada até atingir o pH 4, recolhendo-o em bandejas de alumínio para secagem a 40°C. O resíduo foi desagregado em almofariz de porcelana e acondicionado em sacos plásticos para posterior combustão e obtenção do  $\text{CO}_2$ . As amostras gasosas foram enviadas ao Isotracer Laboratory da Universidade de Toronto, Canadá, para análise de  ${}^{14}\text{C}$  por AMS (Accelerator Mass Spectrometry).

*Idade Radiocarbônica* - A concentração do  ${}^{14}\text{C}$  é, geralmente, expressa em termos de atividade específica, número de desintegrações de átomos de  ${}^{14}\text{C}$ , por minuto, por grama de carbono. A relação entre a atividade específica de uma amostra com a atividade do padrão (ácido oxálico) é definida como porcentagem de carbono moderno (pcm) e representada por:

$$\text{pcm} = \left( \frac{A_{\text{amostra}}}{A_{\text{padrão}}} \right) \times 100$$

Valores de porcentagem de carbono moderno superiores a 100% indicam a presença de carbono proveniente de explosões nucleares (carbono de *fallout*), ou seja, de material orgânico recente, que foi incorporado após os testes nucleares iniciados na década de 1950.

A determinação da idade de uma amostra é uma estimativa relativa à atividade residual de  ${}^{14}\text{C}$  medida de uma amostra ( $A_{\text{amostra}}$ ), em equilíbrio original com a atividade de  ${}^{14}\text{C}$  de um reservatório de carbono ( $A_{\text{padrão}}$ ). Isto é feito usando-se a equação do decaimento radioativo, apresentada na seguinte expressão:

$$T = -8033 \times \ln \left( \frac{A_{\text{amostra}}}{A_{\text{padrão}}} \right)$$

onde T representa os anos decorridos desde que a amostra foi removida da condição de equilíbrio com o reservatório de  $^{14}\text{C}$  e

$$1/\lambda = t_{1/2} / \ln 2 = 8033$$

para  $t_{1/2}$  de 5568 anos.

Por convenção, as datações obtidas pelo método de  $^{14}\text{C}$  natural são referenciadas como idade  $^{14}\text{C}$  convencional em anos AP (Antes do Presente), sendo presente o ano de 1950 e o valor de  $A_{\text{padrão}}$ , determinado pela contagem líquida do padrão ácido oxálico proveniente da National Bureau of Standards, normalizado para  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-25\text{‰}$ . Os valores de  $A_{\text{amostra}}$  foram determinados através da contagem das amostras de benzeno, obtidas a partir dos átomos de carbono das amostras de solo total, em espectrômetro de cintilação líquida.

Os dados foram submetidos a procedimento matemático específico (Pessenda & Camargo, 1991), corrigindo-se a idade radiocarbônica convencional para o fracionamento isotópico.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos estudados apresentaram textura média-argilosa e, principalmente, argilosa, com pouca variação em seus teores ao longo dos perfis (Gouveia, 1996).

Os valores de pH dos solos estão na faixa de 3,4 a 5,5, sendo considerados solos ácidos. Os valores para o alumínio trocável apresentaram-se altos para todos os solos, destacando, principalmente, o Litossolo C2, cujos teores variaram de 108 a 202  $\text{mmol.dcm}^{-3}$ . Os teores de macronutrientes foram considerados baixos para

todos os solos estudados. Considerando-se que os teores mínimos de macronutrientes para a classificação do solo em fértil não foram encontrados, estes foram considerados solos de baixa fertilidade (Gouveia, 1996).

Observou-se um decréscimo na concentração do carbono total com o aumento da profundidade em todos os solos estudados e uma maior concentração de carbono nos solos sob vegetação de floresta (Fig. 2). Tais tendências também foram observadas em Latossolos e Podzólicos de outras regiões da Amazônia (Gomes, 1995; Desjardins *et al.*, 1996).

### Análise isotópica dos solos

A composição isotópica ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) da MO dos solos estudados encontra-se na Tabela 1 e Figura 3, onde a distribuição dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  é apresentada em relação à profundidade dos solos.

A matéria orgânica dos solos sob vegetação de campo

(Gley C1 e Litossolo C2) apresentou nas camadas superficiais valores de  $\delta^{13}\text{C}$  em torno de  $-15\text{‰}$ , o que caracteriza o tipo de vegetação predominante na área, ou seja, gramíneas do tipo  $\text{C}_4$ . Entre as camadas 10-30 cm, a MOS apresentou um enriquecimento isotópico em  $^{13}\text{C}$  ( $-13\text{‰}$ ) e, a partir de 30 cm até as camadas mais profundas, observou-se um empobrecimento significativo em  $^{13}\text{C}$ , atingindo os valores de  $-24,7\text{‰}$  para o Gley C1 e  $-22,5\text{‰}$  para o Litossolo C2, caracterizando, provavelmente, a predominância de MOS proveniente de vegetação do tipo  $\text{C}_3$ .

O valor isotópico da camada 0-10 cm ( $-18,4\text{‰}$ ), encontrado para o Cambissolo Tr, caracterizou perfeitamente a vegetação da superfície onde encontra-se uma mistura de plantas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$ . Entre as camadas 10-30 cm, houve um enriquecimento isotópico, atingindo valores típicos de MOS derivada de plantas  $\text{C}_4$  ( $-15,3\text{‰}$ ). Entre as camadas 50-110 cm, os valores foram novamente carac-

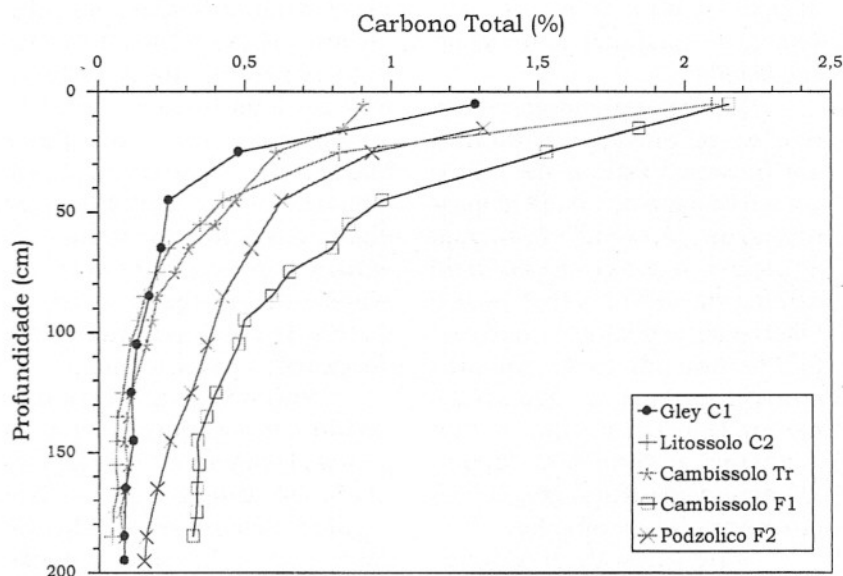


Figura 2 - Variação do carbono total em relação a profundidade dos solos de Humaitá.

**Tabela 1** - Análises de  $\delta^{13}\text{C}$  das amostras de solos de Humaitá.

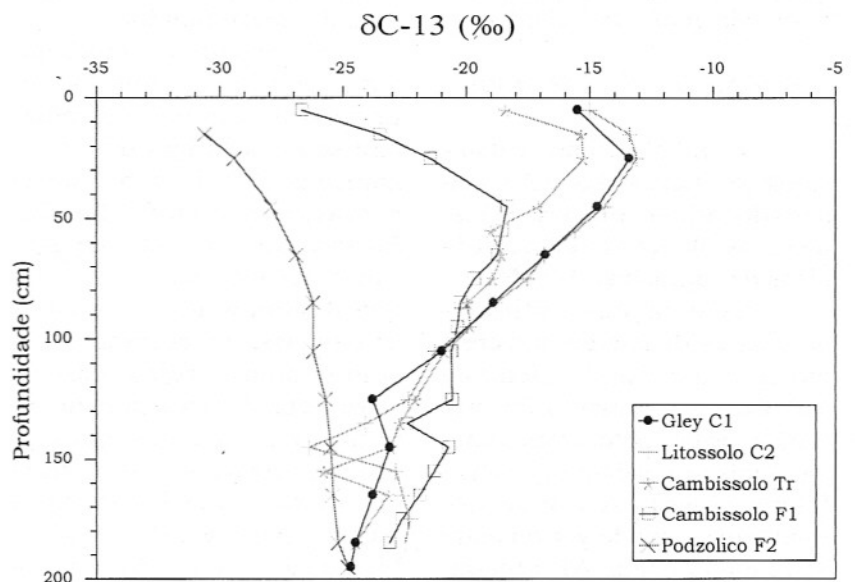
Profundidade (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)				
	C 1	C 2	Tr	F 1	F 2
0 - 10	-15,5	-15,0	-18,4	-26,7	-
10 - 20	-	-13,4	-15,4	-23,5	-30,6
20 - 30	-13,4	-13,1	-15,3	-21,5	-29,4
40 - 50	-14,7	-14,4	-17,1	-18,4	-27,9
50 - 60	-	-15,6	-19,0	-18,6	-
60 - 70	-16,8	-16,8	-18,6	-18,7	-26,9
70 - 80	-	-17,5	-18,9	-19,7	-
80 - 90	-18,9	-18,8	-20,0	-20,3	-26,2
90 - 100	-	-19,9	-19,8	-20,4	-
100 - 110	-21	-21,3	-20,6	-20,6	-26,2
120 - 130	-23,8	-22,3	-22,1	-20,6	-25,7
130 - 140	-	-24,1	-22,7	-22,4	-
140 - 150	-23,1	-26,4	-23,1	-20,7	-25,5
150 - 160	-	-22,8	-25,8	-21,3	-
160 - 170	-23,8	-22,6	-23,1	-21,9	-25,4
170 - 180	-	-22,3	-	-22,6	-
180 - 190	-24,5	-22,5	-24,5	-23,1	-25,2
190 - 200	-24,7	-	-	-	-24,8

- amostras não analisadas

C1 = campo km 5; C2 = campo km 17; Tr = transição campo - floresta km 18; F1 = floresta km 20; F2 = floresta km 50

terísticos de mistura de plantas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  (-19,0 a -20,6‰). A partir da camada 120-130 cm até as mais profundas, os valores de -22,1 a -25,8‰ caracterizaram, como no caso dos solos sob campo, a provável predominância de plantas  $\text{C}_3$ .

Nas camadas entre 0 e 20 cm do Cambissolo F1, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  foram característicos de predominância de plantas  $\text{C}_3$  (-26,7 a -23,5‰). Entre as camadas 20-130 cm e 140-170 cm, observou-se um enriquecimento isotópico com característica de uma provável mistura de plantas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  (-21,9 a -18,4‰). Na camada 130-140 cm (-22,4‰), assim como entre 170-190 cm (-22,6



**Figura 3** - Variação do  $\delta^{13}\text{C}$  da MOS em relação à profundidade dos solos de Humaitá.

a -23,1‰), os valores apresentaram-se mais empobrecidos isotopicamente, caracterizando uma maior influência de plantas  $C_3$ .

Os valores obtidos para os pontos F1 e Tr entre as camadas 100 a 40 cm apresentaram-se mais empobrecidos do que os obtidos para C1 e C2 (Fig. 4), fato que pode estar relacionado à entrada de matéria orgânica da floresta recente. Provavelmente no máximo desenvolvimento do campo, os valores destes pontos eram mais próximos.

Os valores de  $\delta^{13}C$  do solo Podzólico F2 apresentaram-se característicos de plantas  $C_3$  em todo o perfil, sendo as camadas mais profundas (-24,8‰) mais enriquecidas que as superficiais (-30,6‰). Este enriquecimento isotópico, induzido pela mineralização da MOS e processos associados com a formação do húmus nos solos (Balesdent *et al.*, 1987), foi também observado em outros solos sob floresta por Volkoff & Cerri (1987), Desjardins *et al.* (1991), Valencia (1993), Gomes (1995) e Pessenda *et al.* (1996a e b).

#### Análise do $^{14}C$ dos solos

Na Tabela 2, apresentam-se os resultados das porcentagens de carbono moderno e respectivas datações radiocarbônicas das amostras de solo.

As datações radiocarbônicas evidenciaram um crescimento regular da idade da MOS com o aumento da profundidade dos solos. Nas camadas mais superficiais, a MOS foi mais jovem. A 1 m de profundidade, a idade variou entre 3500 e 6500 anos AP, atingindo 12080 anos AP a cerca de 2 m de profundidade. Resultados similares foram obtidos em

Latossolos de regiões sub-tropicais e tropicais do Brasil (Valencia, 1993; Gomes, 1995; Pessenda *et al.*, 1996a e b).

Nas camadas de 0 a 10 cm, valores de porcentagem de carbono moderno superiores a 100% indicaram a presença do  $^{14}C$  de *fallout*, ou seja, carbono que foi incorporado ao solo após as explosões nucleares na década de 1950. No caso do Cambissolo F1, observou-se a presença do carbono de *fallout* até a camada 20-30 cm.

As idades das frações humina do Cambissolo Tr e F1 apresentaram-se mais antigas do que aquelas encontradas para as mesmas profundidades nas amostras de solo total. Trabalhos desenvolvidos por Valencia (1993), Gomes (1995) e Pessenda *et al.* (1996a), em Latossolos de várias regiões do Brasil, mostraram resultados similares, evidenciando que a fração humina do solo apresenta-se mais antiga do que o solo total. Provavelmente, este fato relaciona-se à presença dos ácidos fúlvico e húmico do solo total, que rejuvenescem a MOS e são extraídos durante o preparo da fração humina.

Observou-se, também, que as amostras de solo sob vegetação de campo apresentaram-se mais antigas do que as amostras de solo sob floresta para as mesmas profundidades. Provavelmente, este aspecto esteja relacionado ao fato de que, nas florestas, a quantidade de biomassa em decomposição como folhas, frutos, cascas, raízes, etc. é significativamente maior do que nas áreas de campo, ocorrendo, assim, maior entrada de matéria orgânica recente, por meio da atividade biológica e lixiviação, que irá incorporar-se à MOS com conseqüente rejuvenescimento de todo o perfil. A presença do car-

bono de *fallout* em camada mais profunda no solo sob floresta, anteriormente descrita, confirma a hipótese descrita.

#### Interpretação paleoclimática

A transição campo-floresta da região de Humaitá e os resultados de  $\delta^{13}C$  e  $^{14}C$  das amostras de solo em relação à profundidade são apresentados na Figura 4.

Nas camadas mais profundas, entre 200 e 120 cm, os valores de  $\delta^{13}C$  (-26 a -22‰) de todos os solos estudados, com exceção do Cambissolo F1, caracterizaram a presença de MOS proveniente, predominantemente, de plantas do tipo  $C_3$ . Estes resultados sugerem que, pelo menos, de, aproximadamente, 12000 a 8000 anos AP, toda a área estudada foi coberta por vegetação de floresta, com provável presença de gramíneas do km 5 ao km 20.

Entre 160 e 120 cm em todos os solos, com exceção do Podzólico F2 sob vegetação de floresta, verificou-se a ocorrência de quatro "picos", ou seja, valores de  $\delta^{13}C$  mais empobrecidos (-25,8, -26,4, -22,4 e -23,8‰). Em análises de plantas de campos e florestas das regiões de Rondônia e Humaitá (Gomes, 1995; Gouveia, 1996), valores médios de  $\delta^{13}C$ , significativamente mais empobrecidos (cerca de até 20%), foram obtidos em áreas de vegetação mais densa. Com base nessa premissa, os valores obtidos naquele intervalo poderão indicar a presença de uma vegetação predominantemente  $C_3$ , provavelmente mais desenvolvida e com uma biomassa mais abundante do que o estágio anterior, cujo período situa-se em torno de 10800 anos AP.



**Tabela 2** - Determinação das idades radiocarbônicas das amostras de solo de Humaitá.

Profundidade (cm)	Solo Total (S.T.) *		Humina (Hum.) **	
	Porcentagem de Carbono Moderno	Idade Radiocarbônica (Anos AP)	Porcentagem de Carbono Moderno	Idade Radiocarbônica (Anos AP)
Gley C1				
0 - 10	107,5 ± 0,8	Moderno*	-	-
20 - 30	91,9 ± 0,7	680 ± 60,0	-	-
90 - 100	44,9 ± 0,6	6440 ± 110,0	-	-
Litossolo C2				
0 - 10	115,8 ± 0,9	Moderno*	-	-
20 - 30	92,3 ± 0,7	640 ± 60,0	-	-
90 - 100	-	-	50,0 ± 1,5	5570 ± 240
140 - 150	-	-	26,1 ± 0,4	10790 ± 80
180 - 190	-	-	22,2 ± 0,3	12080 ± 90
Cambissolo Álico Tr				
0 - 10	113,9 ± 0,1	Moderno*	-	-
20 - 30	96,3 ± 0,7	310 ± 60,0	-	-
90 - 100	64,1 ± 1,1	3570 ± 130,0	47,6 ± 1,5	5960 ± 260
Cambissolo Álico F1				
0 - 10	109,6 ± 0,8	Moderno*	-	-
20 - 30	102,1 ± 1,0	Moderno*	-	-
90 - 100	74,6 ± 0,6	2360 ± 60,0	53,4 ± 3,5	5040 ± 530
180 - 190	46,6 ± 0,5	6130 ± 90,0	36,2 ± 1,9	8170 ± 430
Podzólico Vermelho-Amarelo F2				
10 - 20	111,1 ± 0,9	Moderno*	-	-
20 - 30	95,6 ± 0,7	360 ± 60,0	-	-
90 - 100	55,3 ± 0,5	4760 ± 70,0	-	-

. datações feitas pela técnica de Cintilação Líquida no Laboratório de <sup>14</sup>C do CENA/USP

.. datações feitas pela técnica de AMS no Canadá

\* valores de porcentagem de carbono moderno superiores a 100%

- amostras não analisadas

C1 = campo km 5; C2 = campo km 17; Tr = transição campo - floresta km 18; F1 = floresta km 20; F2 = floresta km 50

Pesquisas paleoambientais, realizadas na América do Sul, por Van der Hammen (1991) e Servant *et al.* (1993) e

por Absy *et al.* (1991) e Siffedine *et al.* (1994), em Carajás, Pará, indicaram que o clímax do desenvolvimento da

floresta tropical ocorreu entre 10000-9500 e 8000 anos AP. Estes dados encontram-se em concordância com o presente

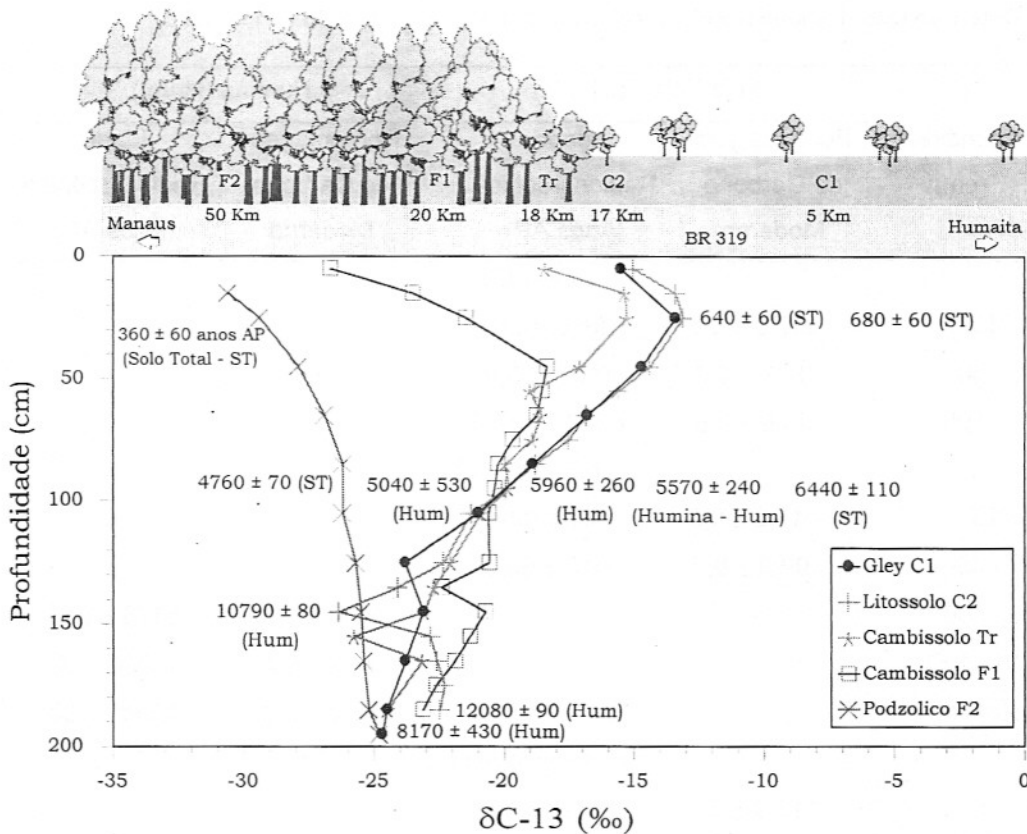


Figura 4 - Datações radiocarbônicas e composição isotópica da matéria orgânica dos solos de Humaitá.

trabalho, indicando, provavelmente, a presença de um clima úmido na região de Humaitá naquela época.

Entre as camadas 110 e 40 cm, com exceção do solo Podzólico F2, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  apresentaram-se mais enriquecidos (-21,3 a -14,4‰). Para os solos sob floresta no km 20, e sob a transição no km 18, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  indicaram a presença de uma mistura de plantas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  (-20,6 a -17,1‰), enquanto, para os solos do km 17 e km 5, os valores de -21,3‰ a -16,8‰ indicaram a presença de uma mistura de plantas  $\text{C}_4$ , posteriormente, a predominância de plantas  $\text{C}_4$  (-14,7‰). Esses dados indicam uma regressão da floresta no Holoceno Médio, anterior a 6000 anos AP, provavelmente em função da presença de um período

climático mais seco que atingiu aquela região do Amazonas.

O período seco do Holoceno Médio, por volta de 6000 anos AP, indicado na região de Humaitá (Fig. 4), encontra-se em concordância com outros estudos que também documentaram a ocorrência de períodos secos entre 7000-4000 anos AP em diversas áreas da Amazônia (Servant & Fontes, 1978; Servant *et al.*, 1989; Absy *et al.*, 1991; Lucas *et al.*, 1993; Turcq *et al.*, 1993; Sifeddine *et al.*, 1994; Gomes, 1995; Desjardins *et al.*, 1996; Pessenda *et al.*, 1996a e c).

A regressão da floresta, provavelmente antes de 6000 anos AP, ocorreu até pelo menos o km 20, ali constituindo uma região de contato com o campo. Esta hipótese baseia-se

no fato de que o valor da camada 40-50 cm no solo sob floresta (-18,4‰) foi idêntico ao obtido para a camada superficial do solo sob a vegetação de transição. Há pelo menos 680 anos AP, a floresta teria apresentado uma tendência de expansão sobre o campo, visto que, atualmente, o contato entre a floresta e o campo encontra-se no km 18.

Nas camadas mais superficiais, os valores isotópicos caracterizaram perfeitamente as vegetações de cobertura atuais.

## CONCLUSÕES

Os dados obtidos indicaram que, aproximadamente entre 12000 e 8000 anos AP, a floresta ocupou a área de campo até, pelo menos, o km 5 do

ecossistema estudado, regressou, posteriormente, antes de 6000 anos AP até, pelo menos, o km 20 e ali constituiu uma região de transição/contato com o campo. Esta regressão da floresta e expansão do campo, deveu-se, provavelmente, à presença de um clima mais seco do que o atual, que atingiu a região sul do estado do Amazonas por volta de 6000 anos AP. Mais recentemente, há pelo menos 680 anos AP, a floresta apresentou uma tendência de expansão sobre o campo, visto que, atualmente, o contato entre a flores-

ta e o campo encontra-se no km 18 do ecossistema estudado.

As mudanças de vegetação e, provavelmente, climáticas, descritas neste trabalho, apresentaram-se concordantes com outras pesquisas desenvolvidas na bacia amazônica. Entretanto, a intensificação de estudos paleoecológicos faz-se necessária para a melhor compreensão da história climática e da vegetação daquela região.

#### AGRADECIMENTOS

À FAPESP (95/3037-2 e

96/1447-1) e ao PRONEX (41.96.0938.00) pelo suporte financeiro. Ao major Eduardo, comandante do 54º Batalhão da Infantaria da Selva (BIS), pelo suporte durante o trabalho de campo. Ao Sr. Paulo A. Cardia, proprietário da fazenda Barra do Prata e ao Sr. Eric Stone, Superintendente do INCRA em Humaitá, pelo apoio logístico. À M.V.L. Cruz e ao C. Bonini, do Laboratório de <sup>14</sup>C do CENA/USP, pelo preparo das amostras.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSY, M. L. (1985) Palynology of Amazonia: the history of the forests as revealed by the palynological record. *In*: G.T. Prance & T.E. Lovejoy (Eds.) Key environments Amazonia. Pergamon Press, p.72-82.
- ABSY, M.L. & VAN DER HAMMEN, T. (1976) Some palaeoecological data from Rondonia, southern part of the Amazon Basin. *Acta Amazônica*, 6 (3): 293-299.
- ABSY, M.L.; CLEEF, A.; FOURNIER, M.; MARTIN, L.; SERVANT, M.; SIFEDDINE, A.; SILVA, M.F.; SOUBIÈS, F.; SUGUIO, K.; TURCQ, B.; VAN DER HAMMEN, T. (1991) Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 312(2):673-678.
- BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. (1987) Natural <sup>13</sup>C abundance as tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, 19(1):25-30.
- BOUTTON, T.W. (1991) Stable carbon isotopes ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine and freshwater environmental. *In*: D.C. Coleman & B. Fry (Eds.) Carbon isotopes techniques. Academic Press, p.173-185.
- BRASIL (1978) Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SB 20, Purus. (Levantamento de Recursos Naturais, 17), 566p.
- BRUCKERT, S. & KILBERTUS, G. (1980) Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant Soil*, 57: 271-295.
- CERRI, C.C.; FELLER, C.; BALESDENT, J.; VICTORIA, R.; PLENECASSAGNE, A. (1985) Application du traçage isotopique naturel en <sup>13</sup>C, à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 300(2):423-428.
- DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CERRI, C.C. (1991) Distribution du carbone total et de l'isotope <sup>13</sup>C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Science du Sol*, 29(3):175-187.
- DESJARDINS, T.; CARNEIRO FILHO, A.; MARIOTTI, A.; CHAUVEL, A.; GIRARDIN, C. (1996) Changes of the forest-savanna boundary in Brazilian Amazonia during the Holocene as revealed by soil organic carbon isotope ratios. *Oecologia*, 108:749-756.
- FELLER, C. (1979) Une methode de fractionnement granulometrique de la matiere organique des sols. Application aux sols tropicaux, à textures grossières très pauvres en humus. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, 18(4):339-346.
- GOMES, B.M. (1995) Estudo paleoambiental no estado de Rondônia utilizando datação por <sup>14</sup>C e razão <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C da matéria orgânica do solo. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 106p.

- GOUVEIA, S.E.M. (1996) Estudos das alterações de paleovegetações na Amazônia Central, utilizando a datação radiocarbônica e razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  da matéria orgânica do solo. Dissertação de Mestrado - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 75p.
- HENDY, C.H.; RAFTER, T.A.; MACINTOSH, N.W.G. (1972) The formation of carbonate nodules in the soils of the Darling Downs, Queensland, Australia, and the dating of the Talgai cranium. *In: International  $^{14}\text{C}$  Conference*, 8, Royal Society of New Zealand, Wellington. Proceedings, D106-D126.
- KIEHL, E.J. (1979) Manual de edafologia; relações solo/planta. Agronômica Ceres.
- LEDRU, M.P. (1992) Modifications de la végétation du Brésil Central entre la dernière époque glaciaire et l'interglaciaire actuel. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **314**(2):117-123.
- LEDRU, M.P. (1993) Late Quaternary and climatic changes in Central Brazil. *Quaternary Res.*, **39**:90-98.
- LUCAS, Y.; SOUBIÈS, F.; CHAUVEL, A.; DESJARDINS, T. (1993) Estudos do solo revelam alterações climáticas da Amazônia. *Ciência Hoje*, **16**(93):36-39.
- MARTEL, Y.A. & PAUL, E.A. (1974) The use of radiocarbon dating of organic matter in the study of soil genesis. *Soil Science of America Proceedings*, **38**:501-506.
- MARTINELLI, L.A.; PESSENDA, L.C.R.; VALENCIA, E.P.E.; CAMARGO, P.B.; TELLES, E.C.C.; CERRI, C.C.; ARAVENA, R.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.E.; TRUMBORE, S. (1996) Carbon-13 variation with depth in soils of Brazil and climate changes during the Quaternary. *Oecologia*, **106**:376-381.
- PESSENDA, L.C.R. & CAMARGO, P.B. (1991) Datação radiocarbônica de amostras de interesse arqueológico e geológico por espectrometria de cintilação líquida de baixa radiação de fundo. *Química Nova*, **14**(2):98-103.
- PESSENDA, L.C.R.; VALENCIA, E.P.E.; CAMARGO, P.B.; TELLES, E.C.C.; MARTINELLI, C.A.; CERRI, C.C.; ARAVENA, R.; ROZANSKI, K. (1996a) Natural radiocarbon measurements in Brazilian soils developed on basic rocks. *Radiocarbon*, **38**(2):203-208.
- PESSENDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; MELFI, A.J.; TELLES, E.C.C.; BOULET, R.; VALENCIA, E.P.E.; TOMAZELLO, M. (1996b) The use of carbon isotopes ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in central Brazil. *Radiocarbon*, **38**(2):191-201.
- PESSENDA, L.C.R.; GOMES, B.M.; RIBEIRO, A.; GOUVEIA, S.E.M.; BOULET, R.; CRUZ, M.V.L.; ROVERATTI, R.; PESSIN, G. (1996c) Avaliação de mudanças de vegetação na Amazônia ocidental durante o Holoceno com emprego dos isótopos do carbono do solo. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 39, Salvador, BA. SBG, Anais, p.539-544.
- PESSENDA, L.C.R.; GOUVEIA, S.E.M.; GOMES, B.M.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; RIBEIRO, A.S. (1998a) Studies of paleovegetation changes in the central Amazon by carbon isotopes ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) of soil organic matter. *In: Internat. Symp. on Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere*, Viena. IAEA Proceedings, p.645-652 (IAEA-SM-349/46).
- PESSENDA, L.C.R.; GOMES, B.M.; ARAVENA, R.; RIBEIRO, A.S.; BOULET, R.; GOUVEIA, S.E.M. (1998b) The carbon isotope record in soils along a forest-cerrado ecosystem and their implications for vegetation changes in the Rondonia state, southwestern Brazilian Amazon region. *The Holocene*, **(8)**5 (Aceito para publicação).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. (1983) Métodos de análise química de solo para fins de fertilidade. *IAC Boletim Técnico* nº, 81, 40p.
- SERVANT, M. & FONTES, J.C. (1978) Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, **10**(1):9-23.
- SERVANT, M.; FONTES, J.C.; RIEU, M.; SALIÈGE, J.F. (1981) Phases climatiques arides holocènes dans le sud-ouest de l'Amazonie (Bolivie). *C.R. Acad. Sci. Paris*, **292**(2):1295-1297.
- SERVANT, M.; FOURNIER, M.; SOUBIÈS, F.; SUGUIO, K.; TURCQ, B. (1989) Sécheresse holocène au Brésil (18-20° latitude Sud). Implications paléométéorologiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **309**(2):153-156.
- SERVANT, M.; MALEY, J.; TURCQ, B.; ABSY, M.L.; BRENAC, P.; FOURNIER, M.; LEDRU, M.P. (1993) Tropical forest changes during the Late Quaternary in African and South American lowlands. *Global Planet. Change*, **7**:25-20.
- SIFEDDINE, A.; FRÖHLICH, F.; FOURNIER, M.; MARTIN, L.; SERVANT, M.; SOUBIÈS, F.;



- TURCQ, B.; SUGUIO, K.; VOLKMER-RIBEIRO, C. (1994) La sédimentation lacustre indicateur de changements des paléoenvironnements au cours des 30000 dernières années (Carajas, Amazonie, Brésil). C.R. Acad. Sci. Paris, **318**(2):1645-1652.
- SUGUIO, K.; ABSY, M.L.; FLEXOR, J.M.; LEDRU, M.P.; MARTIN, L.; SIFEDDINE, A.; SOUBIÈS, F.; TURCQ, B.; YBERT, J.-P. (1993) The evolution of the continental and coastal environments during the last climatic cycle in Brazil (120 Ky. B.P. to Present). Bol. IG-USP. Ser. Científica, **24**:27-41.
- TURCQ, B.; SUGUIO, K.; MARTIN, L.; FLEXOR, J.M. (1993) Registros milenares nos sedimentos dos lagos da serra de Carajás. Ciência Hoje, **16**(93):31-35.
- VALENCIA, E.P.E. (1993) Datação por  $^{14}\text{C}$  e Razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de solos sob climas tropical e subtropical do Brasil. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 91p.
- VAN DER HAMMEN, T. (1991) Palaeoecology of the neotropics: an overview of the state of affairs. Bol. IG-USP. Publ. Esp., **8**:35-55.
- VICTORIA, R.L.; FERNANDES, F.; MARTINELLI, L.A.; PICCOLO, M.C.; CAMARGO, P.B.; TRUMBORE, S. (1995) Past vegetation changes in the Brazilian pantanal arboreal-grassy savanna ecotone by using carbon isotopes in the soil organic matter. Global Change Biol., **1**:165-171.
- VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. (1987) Carbon isotopic fractionation in subtropical Brazilian grassland soils. Comparison with tropical forest soils. Plant Soil, **102**:27-31.