

**Dinâmica do carbono no solo influenciada pela textura,
drenagem, mineralogia e carvões em florestas primárias na
região centro-oriental da Amazônia**

EVERALDO DE CARVALHO CONCEIÇÃO TELLES

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Agosto – 2002

**Dinâmica do carbono no solo influenciada pela textura,
drenagem, mineralogia e carvões em florestas primárias na
região centro-oriental da Amazônia**

EVERALDO DE CARVALHO CONCEIÇÃO TELLES

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **LUIZ ANTONIO MARTINELLI**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Agosto - 2002

**Dedico este trabalho aos meus pais
Ederaldo e Rita pelo carinho e apoio
incondicional ao meu trabalho.**

**Ofereço este trabalho a minha companheira
Elenara pelo estímulo e amor e a minha
querida menina Isis pela alegria, energia e
companhia.**

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Luiz Antonio Martinelli, pela orientação e confiança;
- ao co-orientador e amigo Plínio Camargo pelo constante apoio e orientação;
- à Susan Trumbore pela orientação, apoio e hospitalidade em Irvine;
- ao INPA, EMBRAPA e IBAMA-Santarém pela infra-estrutura no trabalho de campo, e mais especificamente a Niro Higuchi, Joaquim dos Santos e Raimundo Cosme dos Santos;
- ao LBA pelo apoio financeiro, infra-estrutura no trabalho de campo e oportunidades científicas;
- ao Curso do CENA pelas oportunidades de aprendizado;
- à FAPESP pela bolsa e pelos recursos da reserva técnica;
- ao pessoal do Laboratório de Ecologia Isotópica pelo excelente convívio científico;
- a todas as pessoas que me ajudaram, de alguma modo, a construir este trabalho.

SUMÁRIO

PÁGINA

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	5
2. Material e métodos.....	6
2.1. Caracterização geral das áreas.....	6
2.2. Anomalias climáticas nas áreas de estudo.....	13
2.3. Métodos.....	16
2.3.1. Amostragem.....	16
2.3.2. Preparo das amostras.....	16
2.3.3. Análises para caracterização física e química dos solos.....	17
2.3.4. Mineralogia da fração argila e silte.....	18
2.3.5. Separações de carvões macroscópicos e microscópicos.....	20
2.3.6. Determinação do C, N, ^{13}C e ^{15}N	23
2.3.7. Determinação do ^{14}C	24
2.3.8. Estoque de carbono.....	26
2.3.9. Cálculo da propagação de erros para os estoques.....	27
2.3.10. Análise estatística.....	27

2.3.11.	Parametrização do Century	28
3.	RESULTADOS	30
3.1.	Caracterização dos solos estudados	30
3.1.1.	Distribuição espacial dos solos	30
3.1.2.	pH, teor de argila, carbono, complexo sortivo e fósforo.....	31
3.1.3.	Teor de argila.....	37
3.1.4.	Análise química da terra fina (menor que 2 mm).....	38
3.1.5.	Mineralogia da fração argila e silte	41
3.1.6.	Densidade	42
3.2.	Diferenças no método de preparo das amostras influenciando os resultados de C, N, ^{13}C e ^{15}N 44	
3.3.	Variação dos dados de C, N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ e $\Delta^{14}\text{C}$	47
3.3.1.	Variação do C	47
3.3.2.	Variação do N.....	49
3.3.3.	Variação da relação C/N.....	50
3.3.4.	Variação do $\delta^{13}\text{C}$	51
3.3.5.	Variação do $\delta^{15}\text{N}$	52
3.3.6.	Variação do $\Delta^{14}\text{C}$	53
3.4.	Número de amostras necessárias para obter a precisão do erro analítico para o C, N ^{13}C e ^{15}N 54	
3.5.	Raízes, carvões e ^{14}C	57
3.6.	Separações de carvões macroscópicos e microscópicos	58

3.7.	Estoques de C.....	60
3.8.	Modelagem dos dados de C, N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$	62
3.9.	Modelo para previsão do ^{14}C a partir do C, N e profundidade	68
4.	Discussão	70
4.1.	Caracterização dos solos, variação nos estoques e tempo de ciclagem.....	70
4.1.1.	Controle do estoque e tempo de ciclagem do carbono associado a textura, composição química e drenagem dos solos	70
4.1.2.	Coleta e preparo de amostras influenciando os dados analíticos de C, N, ^{13}C e ^{15}N	73
4.1.3.	Relação entre a variação dos isótopos de C e N.....	74
4.1.4.	Equilíbrio na entrada e saída de carbono dos solos com o tempo (“Steady State”) e sequestro de carbono nos Latossolos de Manaus.....	77
4.1.5.	Separação de carvões microscópicos	83
4.2.	Teste de previsão dos carvões com o Century.....	87
4.3.	Capacidade de acúmulo de carbono no Latossolo de Manaus.....	90
5.	CONCLUSÕES.....	93
	referências bibliográficas	97
	Anexo - RESUMO DO LBA.....	109

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

1: Localização das áreas de estudo na Amazônia com setas e indicação de outras áreas do projeto LBA (Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia).	7
2: Imagens de satélite das áreas estudadas, a esquerda a FLONA do Tapajós e a direita a ZF-2. As setas indicam os locais de trabalho, na FLONA apenas na quadricula 7. A rede de drenagem é mais densa em Manaus e o relevo mais dissecado. A seta na quadricula 4 em Santarém indica a quebra acentuada de relevo em direção ao rio Tapajós, formando “baixios” semelhantes à Manaus, porém extensos e com Argissolos e Neossolos arenosos. A imagem de Santarém é do projeto LBA e de Manaus de Nobre et al. (1998).....	9
3: Corte esquemático de uma topossequência representativa da transição Latossolo Amarelo/Espodossolo na ZF-2 mostrando diferenças de solos associado ao relevo e mudança de vegetação. Em Santarém não foi observada a formação de Espodossolo nos baixios, nem próximos aos Igarapés.	10
4: Precipitação média mensal e desvios padrões de Manaus, Santarém e Paragominas.....	14
5: Diferenças dos totais anuais em mm em relação a média histórica de Manaus e Santarém nos períodos medidos, respectivamente 2284 e 2160 mm anuais.	15
6: Quarteador de Jones para amostras com cerca de 200 gramas.....	17
7: Distribuição vertical do teor de argila nos solos estudados. Os solos estudados podem ser agrupados superficialmente em quatro classes de textura: muito argilosa, argilosa, média e arenosa, respectivamente em relação aos teores de argila, maior de 60 %, de 35 a 60 %, de 15 a 35 % e abaixo de 15 %.....	38
8 : Relações K_i nos solos estudados.	40
9: Relações K_r nos solos estudados.	40

10: teores de ferro entre os solos estudados.....	41
11: Densidade dos solos estudados mostrando a baixa variação e o adensamento a partir de 1 metro, mais pronunciado no Latossolo de Manaus.....	44
12: Teores médios de carbono entre os solos de Manaus, Santarém e Paragominas e os respectivos erros padrões da média. O solo de Paragominas está como comparação, com dados de Trumbore em Telles et al. (2002).....	49
13: Teores médios de N e os erros padrões da média, não existem dados de N para os Latossolos de Paragominas.....	50
14: Variação da relação C/N mostrando as tendências em profundidade para os solos mais representativos estudados.....	51
15: Dados de $\delta^{13}\text{C}$ e respectivos erros padrões.....	52
16: Dados de $\delta^{15}\text{N}$ e respectivos erros padrões.....	53
17: dados de $\Delta^{14}\text{C}$ dos solos estudados. A linha vertical tracejada indica o atividade limite inferior para o ^{14}C do “efeito bomba”, acima deste valor o carbono é considerado moderno. O números próximos aos pontos são as idades em anos após o presente (1950) para os diferentes solos.....	54
18: Relação do $\delta^{13}\text{C}$ com o carbono total.....	64
19: Relação a $\delta^{15}\text{N}$ com a relação C/N.....	64
20: Modelo estatístico gerado com Latossolo de Manaus com todos os eixos em unidades de $\delta^{13}\text{C}$ (‰), os valores previstos estão próximos dos observados e sem tendências.....	65
21: O modelo gerado com Latossolo de Manaus com todos os eixos em unidades de $\delta^{13}\text{C}$ (‰), os erros em relação aos valores previstos estão próximos do erro analítico.....	65
22: Modelo para $\delta^{15}\text{N}$ obtido com os dados dos Latossolos de Manaus e Santarém.....	66

23: Teste do modelo gerado em Manaus para o $\delta^{13}\text{C}$ com os dados de solos similares na Amazônia literatura e os dados do Latossolo muito argiloso de Santarém. Todos os eixos em $\delta^{13}\text{C}$ (‰).	67
24: Relação obtida em o C, N, ^{13}C e os dados de ^{14}C nos solos estudados. Na figura de cima o modelo com os valores previstos e observados. Na figura de baixo os erros em relação aos valores previstos. Todos os eixos em $\Delta^{14}\text{C}$ (‰).	69
25: Estoques acumulados de carbono com propagação de erros (desvio padrão) no Latossolo de Manaus e a literatura. O carbono do solo está em equilíbrio, discordando do seqüestro de carbono na ordem de 3,6 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ como MOS humificada proposto por Malhi et al. (1999), pois em 20 anos haveria um aumento de 72 $\text{Mg} \cdot \text{ha}$ no estoque de carbono no solo.	78
26: Dados históricos de teores de carbono nos Latossolos de Manaus.	79
27: Diferentes intensidades de remoção de carbono pelo fogo a cada 400 anos (linhas oscilantes, maior intensidade), a diferentes valores de produtividade bruta mensal, para a área do Latossolo de Manaus.	88
28: Simulação do aumento de produtividade de 25 % para o Latossolo muito argiloso de Manaus, com os diferentes reservatórios de carbono. O tempo de ciclagem da fração ativa é de até alguns anos, a lenta de dezenas a centenas de anos e a passiva de centenas a milhares de anos. Malhi et al. (1999) consideraram o tempo de ciclagem do carbono no solo fixo em 16 anos.	92

LISTA DE TABELAS

PÁGINA

1: lista das espécies mais importantes do platôs dos transectos N-S e L-O na ZF-2 na ordem de importância em Higuchi et al. (1998).....	12
2: pH, teor de argila, C, SB, T , V % e P disponível e total dos Latossolos Amarelos muito argilosos alumínicos.	32
3: pH, teor de argila, C, SB, T , V % e P disponível e total dos Argissolos Amarelos alumínicos textura média.	34
4: pH, teor de argila, C, SB, T , V % e P disponível e total dos Argissolos/Latossolos Amarelos alumínicos textura argilosa.....	36
5: pH, argila, carbono, SB, T, V % e P disponível e total do Espodossolo de Manaus.	37
6: Comparação das médias, desvios padrões (DP) e coeficiente de variação (CV) dos dados analíticos do primeiro e segundo platôs do transecto N-S em Manaus, no segundo com 3 e 16 pontos de observação. .	46
7: número de amostras (Nº) necessárias para se obter a precisão do erro analítico nos principais solos estudados ao nível de 5 % e probabilidade e respectivos coeficientes de variação (CV %). Para os Latossolos utilizou-se a precisão de 10 % da média nas profundidade de 0-5 e 5-10 cm.....	55
8: Valores médios de C associado a carvões em relação ao carbono total do solo, erro padrão (EP), estimativa de carvões microscópicos e carvões microscópicos separados. A estimativa de carvões microscópicos foi baseada em (Skjemstad et al., 1999) multiplicando-se por 10 o teor de carbono associado aos carvões macroscópicos.	59

9: Diferenças percentuais no teor de carbono total e carbono associado a carvões na fração leve (abaixo de 2 g.cm ⁻³) entre Santarém e Manaus, sempre maiores para os Latossolos de Santarém.....	60
10:.. Estoque de carbono (Mg.ha ⁻¹) de raízes, matéria orgânica-mineral (sem raízes) e carbono total de Manaus Santarém e Paragominas (Camargo et al., 1999).	61

Dinâmica do carbono no solo influenciada pela textura, drenagem, mineralogia e carvões em florestas primárias na região centro-oriental da Amazônia

Autor: Everaldo de Carvalho Conceição Telles
Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli

RESUMO

Estudou-se a dinâmica do carbono influenciada por diferentes formas de proteção em solos de floresta primária próximos de Manaus e Santarém na Amazônia. Avaliou-se a variação do estoque e tempo de ciclagem com radiocarbono, sua relação com a de textura, drenagem, ^{13}C , N e carvões. Os solos variam de 90 % de argila, predominantemente caulinítica, a 95 % de areia quartzosa. Os Latossolos muito argilosos e os Argissolos mais arenosos são bem drenados; o Espodossolo é arenoso e mal drenado e ocorre apenas em Manaus. O teor de ferro na fração argila é decrescente do Latossolo de Santarém com cerca 6 % até próximo de 0 % no Espodossolo. O carbono presente no solo abaixo de 2 mm foi separado em 2 frações, denominadas leve e densa. A fração leve é constituída de raízes e carvões macroscópicos e a densa de raízes e carvões microscópicos e matéria orgânica humificada associada a fração mineral. A variação dos dados foi reduzida na ordem de duas a três vezes através do refinamento da amostragem, preparo das amostras e o isolamento da contribuição de

raízes e carvões macroscópicos. Esta redução melhorou as correlações entre o C, N, ^{13}C , ^{15}N e ^{14}C . Os modelos estatísticos prevêm o ^{13}C e ^{15}N para os Latossolos e ^{14}C para os principais solos estudados, com precisão próxima do erro analítico para o ^{13}C e ^{15}N e similar à variação natural para o ^{14}C . O estoque e tempo de ciclagem do carbono foram influenciados pelo teor de argila, mineralogia, drenagem e carvões microscópicos. Os carvões microscópicos isoladamente representam para o carbono da fração densa, na profundidade de 0-5 centímetros, 56 % do carbono do Argissolo de Santarém e cerca de 20 % para os Latossolos. Na profundidade de 10-20 cm os carvões microscópicos representam menos que 12 % do carbono total da fração densa. O procedimento prévio de limpeza de raízes microscópicas e de extração de carvões para os solos argilosos foi menos eficiente. O método necessita ser melhorado para permitir a observação micromorfológica e a quantificação mais precisa dos carvões microscópicos com auxílio de tratamento e classificação de imagens. A redução da variabilidade do estoque e determinação do erro associado a estas medidas, facilitou o teste da condição de equilíbrio dinâmico do carbono no Latossolo de Manaus em 20 anos, a partir de dados deste trabalho e da literatura. Constatou-se o não funcionamento do modelo Century na previsão do carbono associado a carvões. Simulou-se com o Century a capacidade do Latossolo de Manaus em acumular carbono com elevação da produtividade florestal em 25 %, a taxa de aumento de 0,2 % ao ano. O equilíbrio foi alcançado em 500 anos com aumento em 80 % do estoque de carbono no solo.

Carbon dynamics in the soil controlled by the texture, drainage, mineralogy and charcoals in primary forests in the center-oriental area of the Amazonia

Author: Everaldo de Carvalho Conceição Telles
Adviser: Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli.

SUMMARY

This work studied the carbon dynamics influenced by different forms of protection of carbon in soils of primary forest close to Manaus and Santarém in the Amazonian. The soils texture range from 90% clay predominantly Kaolinite to 95% of quartz sand. The clay-rich Oxisol and sandiest Ultisol are well drained; the Spodosol is sandy, badly drained and only present in Manaus. The content of iron in the clay fraction decreases from the Santarém Oxisol with 6%, to nearly 0% in the Spodosol. The carbon less than 2 mm was separated in 2 fractions, a light one and a dense one. The light one contains roots and macroscopic charcoals and the dense one contains roots, microscopic charcoals and humified organic matter. The variation of the carbon stock and cycling time was evaluated with radiocarbon, relationship with texture, drainage, ^{13}C , N and charcoal. The variation of the data was reduced from 2 to 3 times with refinement of the sampling, preparation of the samples and the isolation of the contribution of roots and macroscopic charcoal. The reduction of the variation

improved the correlation among C, N, ^{13}C and ^{14}C . The generated statistical models predict ^{13}C , ^{15}N for Oxisols and ^{14}C for the main soils studied accurately close to the analytical error for ^{13}C e ^{15}N and similar to the natural variation for the ^{14}C . The control of the stock and time of cycling of the carbon was determined mainly by the clay content and secondarily for the drainage, mineralogy and microscopic charcoal. In the 0-5 depth interval, microscopic charcoal represents 56% of the carbon in the Ultisol of Santarém and 20 % in the Oxisols. In the 10-20 cm interval, the microscopic charcoal represent less than 12% of the carbon of the dense fraction. The procedure for the charcoal extraction was less efficient to the clay soils, as was true for the process removing microscopic roots in this soil. The method needs to be improved to allow the micromorfological observation and to allow the most efficient quantification of the microscopic charcoal for imaging treatment. The reduction of the variability of the stock and determination of the associated error in these measures facilitated the test of the condition of steady state of the carbon in Oxisol of using data in the literature published 20 years previously. The Model Century did not simulate charcoal carbon in soils successfully. Century was used to simulate of the Oxisol of Manaus capacity to accumulate carbon with elevation a 25 % increase in forest productivity, at the rate of 0.2% year for 113 years. The balance was reached in 500 years with increase of 80% in the stock of soil carbon.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um importante reservatório de carbono e considerado tanto fonte quanto dreno, podendo trocar CO_2 rapidamente com a atmosfera (Schimel, 1995; Trumbore et al., 1996). A floresta tropical tem uma atuação significativa no balanço global do carbono (Friedlingstein et al., 1995; McGuire et al., 1996; Thompson et al., 1996) sendo que o aporte de carbono para as raízes e sua contribuição para a produção primária líquida (net primary production-NPP) é pouco conhecido nestes ecossistemas (Clark et al., 2001). Apesar de sua importância como reservatório, os estoques de carbono são muito variáveis, pouco se sabe sobre sua dinâmica e tempo de residência em solos tropicais.

São muitas as variáveis para estimar o estoque e o tempo de ciclagem do carbono nos solos. Modelos biogeoquímicos como o Century (Parton et al., 1987) baseiam-se principalmente na textura e clima (Schimel et al., 1994). Outras variáveis são as relacionadas à vegetação, características físicas e químicas do solo, posição no relevo, drenagem e manejo do solo. Outro modo de expressar os controles do estoque e tempo de ciclagem do carbono seria associar a proteção à decomposição do carbono como química (Scharpenseel & Becker-Heidmann, 1992), inerente a constituição da matéria orgânica do solo (MOS) e dada por fatores de formação deste carbono,

e física, relacionada a matriz do solo (Elliot, 1986; Feller & Beare, 1997; Gregorich et al., 1989; Tisdall & Oades, 1982).

A variação natural dos isótopos estáveis de carbono fornece informações sobre o grau de evolução da matéria orgânica do solo (MOS) (Melillo et al. 1989; Berg et al. 1993) e está associada a formas de proteção físicas (Vitorello et al, 1989) e químicas do carbono (Volkoff, 1982; Volkoff, 1987). O enriquecimento em ^{13}C é relacionada a redução da atividade do ^{14}C natural em profundidade (Scharpenseel et al., 1989; Scharpenseel & Becker-Heidmann, 1992).

O ^{14}C natural é produzido a taxas relativamente constantes na estratosfera sendo oxidado a CO_2 e incorporado na biosfera. Com a morte do tecido vivo cessa a incorporação de ^{14}C . Isto pode ser utilizado para medir o tempo de residência do carbono, na escala de centenas a milhares de anos (Trumbore, 2000). O ^{14}C produzido pelas explosões atômicas atmosféricas nas décadas de 50 e 60 é um traçador da MOS recém incorporada (Trumbore, 2000). A presença de carvões pode interferir no estudo da dinâmica do carbono com o uso destes isótopos e provocar erros na determinação do teor de carbono e na composição química associada à MOS (Schmidt & Noack, 2000).

Nas condições climáticas atuais incêndios florestais são raros na Amazônia (Nepstad et. al. 1999). No entanto, nos últimos 6.000 anos ocorreram com relativa frequência, associados a atividade antrópica e períodos mais secos (Sanford et al., 1985). Estes eventos são relacionados a mega eventos do fenômeno *El Niño* - Oscilação Sul (ENOS), recorrentes a cada 400 anos nos últimos 1600 anos na Amazônia (Meggers, 1994).

Assim como na matéria orgânica, as características físicas dos solos atuam na proteção dos resíduos de incêndios. Quimicamente estes resíduos são considerados um “continuum”, com um grau de refratabilidade crescente na ordem: carvões, “Black Carbon” (BC) e grafite (Schmidt et al., 2001). A partir do BC o carbono cicla em milhares de anos e os carvões são menos estáveis (Schmidt et al., 2001).

Estima-se que até 30 % do carbono de solos australianos seja constituído de carvões microscópicos protegidos pela microagregação do solo (Skjemstad et al., 1996), representando 90 % do total dos carvões separados (Skjemstad et al., 1999). Na Amazônia, os incêndios de Roraima em 1997, imobilizaram em média 150 kg de C .ha⁻¹ na forma de carvões macroscópicos (Barbosa & Fearnside, 1999). Incêndios florestais rasteiros aumentam a mortalidade de árvores e cipós, e se sucessivos, podem reduzir a biomassa acima do solo à 25% da biomassa original (Cochrane et al., 1999). Os carvões produzidos nestes episódios alteraram o teor de carbono total nos solos, imobilizando o carbono da vegetação em uma forma mais estável que a MOS.

Não existem determinações de carvões microscópicos como o realizado por Skjemstad et al. (1996) na Amazônia, apenas há medidas de BC e estes estão na ordem de 1-2 % do carbono total (Graser et al., 1998). Nos Latossolos [Amarelos antrópicos (Terras Pretas de Índio) com até 50 % de carbono, metade deste pode ser de BC (Graser et al., 1998). Na comparação de métodos de quantificação das diferentes frações de resíduos de incêndios, o carbono dos carvões presentes nos solos são até 10 vezes maiores que o carbono associado ao BC (Schmidt et al., 2001).

Os solos estudados localizam-se em florestas primárias próximas de Manaus e Santarém. Nestas áreas, os Latossolos muito argilosos e os Argissolos mais

arenosos são bem drenados; o Espodossolo é arenoso, mal drenado e presente apenas em Manaus. O carbono granulometricamente abaixo de 2 mm foi separado em 2 frações, uma leve e outra densa. A fração leve é constituída de raízes e carvões macroscópicos e a densa de raízes, carvões microscópicos e matéria orgânica humificada associada a fração mineral. Avaliou-se a variação do estoque e do tempo de ciclagem (^{14}C) do carbono, sua relação com a de textura, drenagem, ^{13}C , N e carvões. Testou-se a condição de equilíbrio dinâmico do carbono, o funcionamento do modelo Century na previsão de carvões e a capacidade do Latossolo de Manaus absorver carbono com aumento simulado da produtividade florestal em 25 %. Os resultados da capacidade do Latossolo para a acumulação de carbono foram comparados com Telles et al. (2002), que utilizaram modelagem por balanço de massas de C, ^{13}C e ^{14}C e com Malhi et al. (1999), que utilizaram dados de inventário florestal e o balanço entre a entrada e saída global de carbono da floresta pela técnica de correlação de vórtices turbulentos.

A variação espacial dos isótopos de carbono nos solos e a relação com formas de proteção físicas e químicas do carbono são importantes para o estudo da dinâmica da matéria orgânica nos solos e fornecem uma noção do erro associada à utilização destes isótopos. A determinação dos estoques de carbono mais refratários (carvão) e sua contribuição para o sinal isotópico do carbono podem revelar um tempo de ciclagem mais rápida para a MOS; explicar com mais precisão a relação entre a variação dos isótopos de carbono e a proteção da MOS; permitir estimativas mais precisas do estoque e do tempo de ciclagem do carbono e melhorar a sensibilidade dos modelos que estudam a dinâmica da MOS.

Para conhecer a variabilidade dos isótopos de carbono e suas causas, foram propostas algumas questões:

- A variação da composição dos isótopos estáveis do carbono pode ser reduzida com refinamento morfológico na coleta ou é natural? Se natural, qual o número de amostras necessárias para se estimar com mais precisão o carbono total e o ^{13}C ? A variação do carbono total se relaciona à variação do ^{13}C ?
- Qual a influência das diferentes formas de proteção física e química do carbono dos solos estudados na variabilidade dos isótopos estáveis de carbono?
- A separação e quantificação dos carvões podem melhorar a sensibilidade de utilização do ^{13}C e ^{14}C para o estudo da DMOS, revelando uma ciclagem mais rápida do carbono associado à MOS?

1.1. Objetivos

Para responder as questões citadas anteriormente estabeleceram-se os seguintes objetivos:

- Estudar a variabilidade espacial dos isótopos estáveis de carbono nos solos e como suas variações se relacionam.
- Estabelecer a relação entre formas de proteção física e química do C e a textura, mineralogia e composição química dos solos, que auxiliem a compreensão da variabilidade dos isótopos estáveis de carbono.
- Estimar a contribuição dos carvões na ciclagem do carbono.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. *Caracterização geral das áreas*

Foram estudadas duas áreas na Amazônia (Figura 1). A Reserva do Departamento de Silvicultura do Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia (INPA) e a Floresta Nacional do Tapajós (FLONA). A Reserva de Silvicultura do INPA (ZF-2) localiza-se a 50 Km ao norte de Manaus-AM, no km 34 da rodovia Manaus-Boavista. O trabalho foi desenvolvido no transecto norte-sul (N-S), km 34 da estrada vicinal da ZF-2 (no mesmo platô da torre de fluxo, que possui as coordenadas 2 ° 30' S e 60° 12' W), mais detalhes em Higuchi et al. (1998). A FLONA do Tapajós situa-se ao sul de Santarém-PA, sendo que a área estudada encontra-se no Km 83 da rodovia Cuiába-Santarém (coordenadas 2° 5' N e 55° 20' W), blocos 8 A e 4 B delimitados para a exploração seletiva de madeira que ocorreu após coleta das amostras. Os locais escolhidos foram identificados no texto como Manaus e Santarém. A área de Paragominas-PA será utilizada apenas como comparação, principalmente com os dados de Camargo et al. (1999).

A escolha dos sítios atendeu a requisitos de representatividade dos solos e clima na Amazônia, facilidade de acesso, dados e infra-estrutura disponíveis.

Segundo a classificação de Köppen, grande parte da Bacia Amazônica é do tipo Ami, ou seja, tropical chuvoso, quente e úmido. Ocorrem ainda os tipos Afⁱ no extremo oeste e o tipo Awⁱ à sudeste e sudoeste. Estes tipos são semelhantes em relação a oscilação anual da temperatura, inferior a 5 ° C, com valores médios variando de 24 °C a 28 °C (Nimer, 1977; Salati & Marques, 1984; Vieira & Santos, 1987). A precipitação varia de 1500 a 3000 mm anuais (Nimer, 1977).



http://lba-ecology.gsfc.nasa.gov/lbaeco/About_the_Project/research/brazil_map.gif

Figura 1 - Localização das áreas de estudo na Amazônia com setas e indicação de outras áreas do projeto LBA¹ (Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia).

¹ O LBA é um projeto científico de cooperação internacional que estuda a interação da floresta amazônica com a atmosfera regional e global (mais detalhes no resumo em anexo ou <http://lba-eco.gsfc.nasa.gov/lbaeco>).

Em Manaus a média de precipitação é de 2101 mm e em Santarém de 2096 mm; o período seco é de até três meses em Manaus e de três meses em Santarém (Vieira & Santos, 1987). As médias mensais de precipitação são mais uniformes em Manaus, sendo o período chuvoso de novembro até maio, com o pico seco em agosto (Figura 4). Em Santarém há uma estação seca definida de agosto até outubro (Figura 4). O clima de Santarém é do tipo Ami e Manaus Afí, com diferenças na estação seca, respectivamente, definida e mal definida (Vieira & Santos, 1987). O tipo Awi, com nítida estação seca ocorre em Paragominas.

Predominam geologicamente nas áreas os sedimentos do Cretáceo superior, Grupo Barreiras, Formação Alter do Chão, sendo constituídos de arenitos caulíníticos, argilitos e brechas intraformacionais, os arenitos são intercalados com argilitos, em camadas de decímetros de espessura (Brasil, 1976). Em Manaus a paisagem é constituída por platôs baixos, localmente dissecados pela rede hidrográfica, ligando-se por vertentes convexas a vales de fundo chato (baixios) (Chauvel, 1981). Em Santarém a rede de drenagem é menos densa, ocorrendo na área estudada na FLONA, platôs menos dissecados e ao longo dos rios pouco frequentes, encostas íngremes e com comprimento de algumas dezenas de metros (Figura 2).

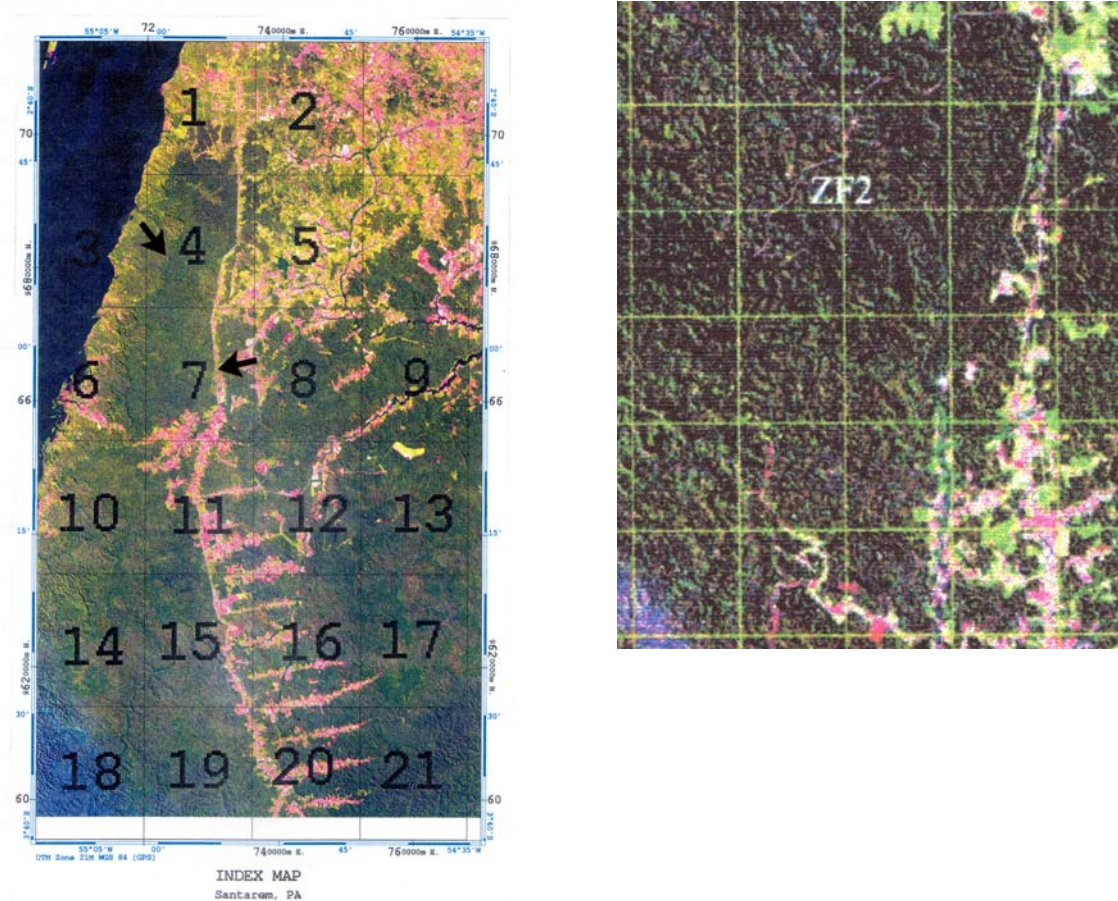


Figura 2 - Imagens de satélite das áreas estudadas, a esquerda a FLONA do Tapajós e a direita a ZF-2. As setas indicam os locais de trabalho, na FLONA apenas na quadricula 7. A rede de drenagem é mais densa em Manaus e o relevo mais dissecado. A seta na quadricula 4 em Santarém indica a quebra acentuada de relevo em direção ao rio Tapajós, formando “baixios” semelhantes à Manaus, porém extensos e com Argissolos e Neossolos arenosos. A imagem de Santarém é do projeto LBA e de Manaus de Nobre et al. (1998).

Os Latossolos correspondem a 40 % dos solos da Amazônia e predominam nas duas áreas (Brasil, 1976). Latossolos ocorrem em relevos mais planos a suave ondulados, podendo, excepcionalmente, ocorrer em relevos ondulados. Nas áreas estudadas foram encontrados ainda Espodossolo e Argissolos, associados a variação de

relevo, vegetação e textura (Figura 3). O grande intervalo de variação na textura dos solos (de arenosa a 95 % de argila), cobre o espectro possível de variação textural dos solos e provavelmente boa parte da variação em mineralogia dos solos tropicais, em que predominam óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, gibsit, caulinita e quartzo. A grande variação em textura e mineralogia possibilita uma maior variabilidade na estrutura, porosidade, densidade, teor e tempo de ciclagem do carbono.

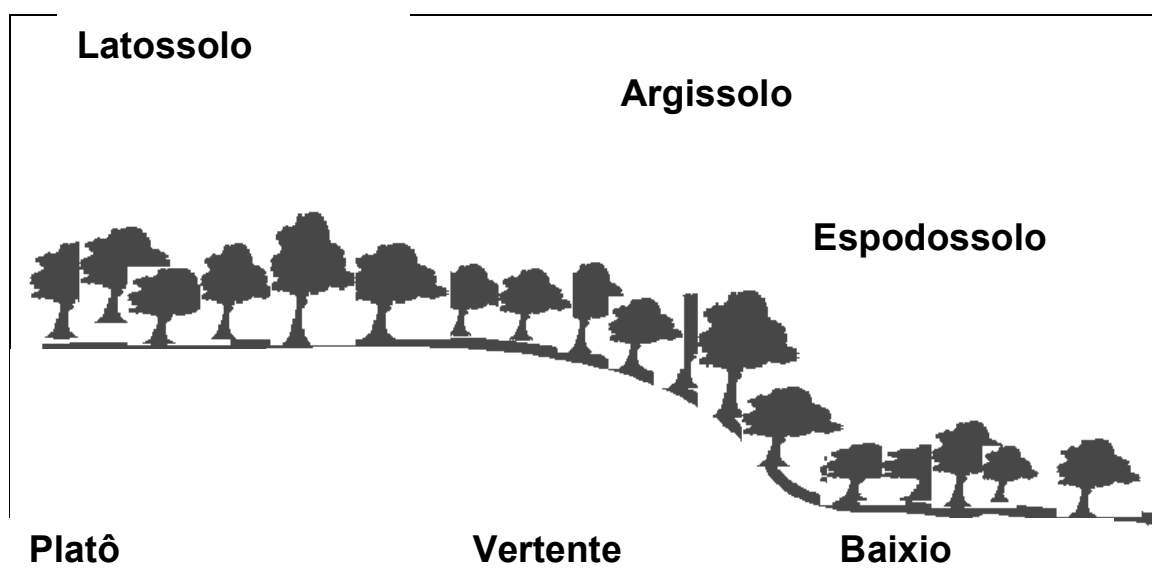


Figura 3 - Corte esquemático de uma topossequência representativa da transição Latossolo Amarelo/Espodossolo na ZF-2 mostrando diferenças de solos associado ao relevo e mudança de vegetação. Em Santarém não foi observada a formação de Espodossolo nos baixios, nem próximos aos Igarapés.

A vegetação nas duas áreas é classificada com floresta tropical úmida densa. Existem diferenças no porte e estrutura da vegetação entre os solos muito argilosos do platô e os solos mais arenosos na porção mais baixa do relevo em Manaus. não existem diferenças em relação a floresta de platô e encosta (Higuchi et al. 1998). Em

Santarém não há grandes diferenças entre o platô com solos argilosos e os solos arenosos do platô. Em Manaus, as diferenças entre o platô e baixio, pode estar relacionados além da textura dos solos e posição do relevo, a má drenagem dos baixios sazonalmente inundados no período úmido.

Na região dos transectos Norte-Sul e Leste-Oeste ocorrem 218 espécies de 37 famílias (Higuchi et. al. 1998). Nestas áreas nos platôs o Índice de Valor de Importância, que representa a importância de cada espécie arbórea de acordo com a abundância, frequência e dominância foram determinadas por Higuchi et al. (1998). No geral ocorrem as mesmas espécies na floresta de encosta e do baixio, apenas o Piãozinho e Munguba (*Bombacopsis sp*) são exclusivas do platô e baixio respectivamente (Higuchi et al. 1998). As 20 mais importantes da floresta de platô, na ordem decrescente são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. lista das espécies mais importantes do platôs dos transectos N-S e L-O na ZF-2 na ordem de importância em Higuchi et al. (1998).

Nome vulgar	Gênero e espécie	Família
Matá-matá amarelo	<i>Eschweilera odora</i>	Lecythidaceae
Abiurana	várias espécies	Sapotaceae
Ripeiro vermelho	<i>Corythophora alta</i>	Lecythidaceae
Breu vermelho	<i>Protium apiculatum</i>	Burseraceae
Tachi vermelho	<i>Sclerolobium eriopetalum</i>	Caesalpiniaceae
Macucu chiador	<i>Licania oblongifolia</i>	Chrysobalanaceae
Abiurana olho de veado	<i>Micropholis sp</i>	Sapotaceae
Castanha vermelha	<i>Eschweilera sp</i>	Lecythidaceae
Piãozinho	<i>Micrandropis scleroxylon</i>	Euphorbiaceae
Cliclete bravo	<i>Micropholis guyanensis</i>	Sapotaceae
Caraipé	<i>Licania sp</i>	Chrysobalanaceae
Pajurazinho	<i>Couepia cff canomensis</i>	Chrysobalanaceae
Cardeiro	<i>Scleronema micranthum</i>	Bombacaceae
Breu manga	<i>Tetragastris altissima</i>	Burseraceae
Louro preto	<i>Dicypelium manausense</i>	Lauraceae
Seringa vermelha	<i>Hevea guianensis</i>	Euphorbiaceae
Mamãozinho	<i>Mouriri ficoides</i>	Memecylaceae
Carapanaúba	<i>Aspidospermum oblogum</i>	Apocynaceae
Pau rainha	<i>Brosinum rubescens</i>	Moraceae
Embaubarana	<i>Pourouma sp</i>	Moraceae

Na Floresta Nacional do Tapajós as espécies emergentes são: Castanha do Pará (*Bertholletia excelsa*), Imbirema (*Couratari sp*), Angelim (*Dinizia excelsa*), Jatobá (*Hymenaea coubaril*), Maçaranduba (*Manikara huberi*), Fava bolota (*Parkia sp*), Inga copaiba (*Pithecellobium sp*) e Pau d' arco amarelo (*Tabebuia serratifolia*) (Parrota et al. 1995).

No clima atual neste tipo de vegetação são raros incêndios florestais (Nepstad et al., 1999), podendo formar mais de 50 toneladas de liteira e madeira morta por hectare, com camadas de até 5 a 10 centímetros de espessura. A umidade relativa do

ar é próxima de 65% (PROARCO²). Eventos secos são registrados há 1600 anos na Amazônia, com recorrência a cada 400 anos (Meggers, 1994). O aumento da intensidade ou frequência destes eventos pode ter propiciado um ressecamento suficiente do meio para tornar a floresta combustível no passado. Os carvões provenientes de atividade antrópica pré colombiana ou incêndios naturais no passado são comuns nos solos da parte leste à central da Amazônia (Sanford et al, 1985; Clark & Uhl, 1987).

As topossequências escolhidas estão próximas das torres de observações micrometereológicas do projeto LBA. Estas torres atingem 15 m acima da copa das árvores e seus dados são válidos para uma área de um Km², mede diretamente o fluxo de dióxido de carbono, vapor de água e calor sensível. Baseado nestes dados e utilizando a técnica de correlação de vórtices turbulentos determina-se o balanço líquido entre a fotossíntese e a respiração da floresta.

2.2. Anomalias climáticas nas áreas de estudo

Considerando-se a precipitação mensal abaixo de 100 mm como o limite para a definição de estação seca, os valores médios de Manaus estão próximos de 100 mm de junho a outubro (Figura 4). Baseado na variação das médias, apenas um mês pode ser considerado com menos de 100 mm.

Em Santarém temos praticamente 6 meses com médias próximas de 100 mm, de junho até dezembro, com os meses de agosto, setembro e outubro secos (Figura 4). A variação é elevada em relação à média podendo ter casos de ausência de chuva por

² Projeto PROARCO: <http://www.ibama.gov.br/proarco/proarco.html>

até 6 meses. Paragominas é um exemplo mais extremo com um período seco de até 6 meses (Figura 4).

Séries históricas de precipitação nas áreas de estudo

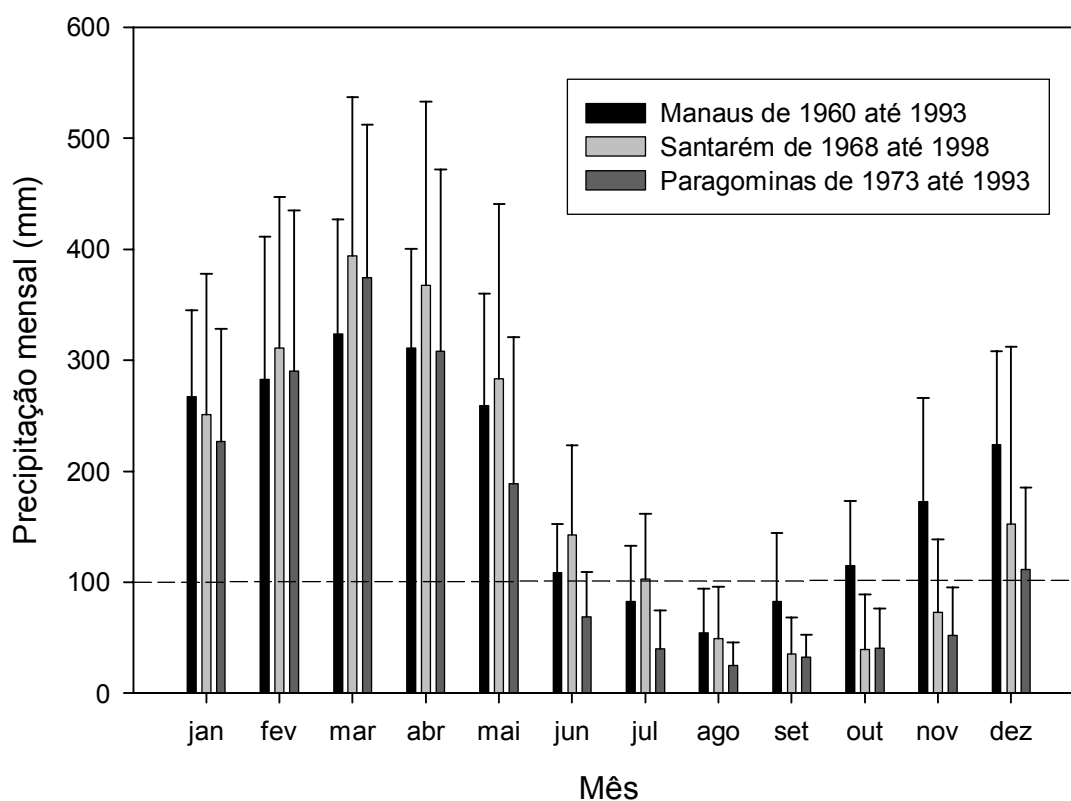


Figura 4 - Precipitação média mensal e desvios padrões de Manaus, Santarém e Paragominas.

Somente em três anos a precipitação ficou abaixo de 500 mm em relação à média em Manaus, enquanto em Santarém, a precipitação total anual pode diminuir para valores abaixo de 1000 mm nos anos de *El Niño* - Oscilação Sul recentes mais

severos (Figura 5). Em Santarém o risco de incêndio foi maior no último mega *El Niño* em 1997/1998 (Nepstad et al. 1998).

Anormalidades em relação a média de precipitação anual em Manaus e Santarém

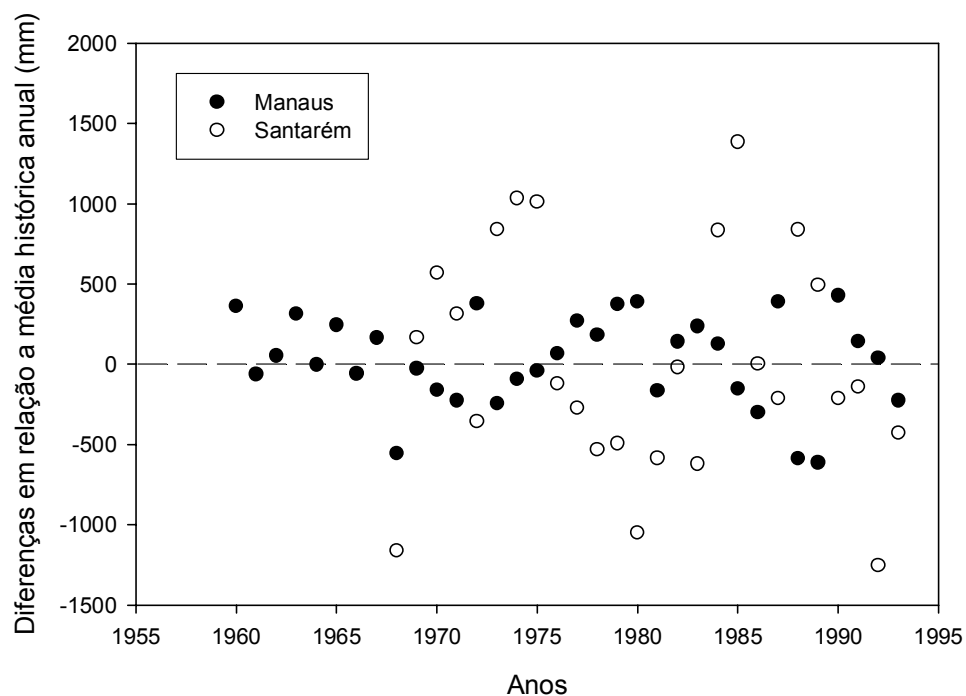


Figura 5 - Diferenças dos totais anuais em mm em relação a média histórica de Manaus e Santarém nos períodos medidos, respectivamente 2284 e 2160 mm anuais.

2.3. Métodos

2.3.1. Amostragem

A partir de levantamento detalhado no campo delimitaram-se os principais solos e os de transição. As coletas foram realizadas em trincheiras de dois tipos: minitrincheiras de 60x60x60 centímetros e trincheiras de 2x1x3 metros. Nos solos principais, Latossolo Amarelo aluminico muito argiloso e Espodossolo em Manaus e Latossolo Amarelo aluminico muito argiloso e Argissolo Amarelo aluminico textura média em Santarém, foram abertas 16 minitrincheiras, sendo destas escolhidas as três mais representativas de cada solo para a caracterização em profundidade. O espaçamento entre as minitrincheiras foi de 30 metros, com exceção do Espodossolo, com 20 metros, dispostos na forma de grade quadrada. No Espodossolo não foram abertas trincheiras. Nas minitrincheiras amostrou-se pelo menos 200 gramas nos intervalos de profundidade de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 centímetros. Nas trincheiras foram amostrados sistematicamente de 60-70, 90-100, 140-150 e 200-210 centímetros e por horizontes. Foram coletadas amostras de solo para as diferentes análises, determinação de densidade e serrapilheira (^{14}C). Nos solos de transição foram realizados apenas análises de caracterização dos solos até 100 centímetros. As análises realizadas serão detalhadas a seguir.

2.3.2. Preparo das amostras

Todas as subamostras analisadas foram obtidas através do quarteador de Jones (Figura 6), sendo um dos melhores dispositivos para se obter amostras

representativas em diferentes análises físicas e químicas (Mullins & Hutchison, 1982; Schumacher et al., 1990; Smith & Pratt, 1984).

Na submostra quarteada final, com massa entre 5 a 10 gramas, foram removidos todas as raízes e carvões macroscópicos (com tamanho desde centímetros até décimos de milímetros), com resultados semelhantes à separação da fração leve por densidade de Trumbore & Zheng (1996).

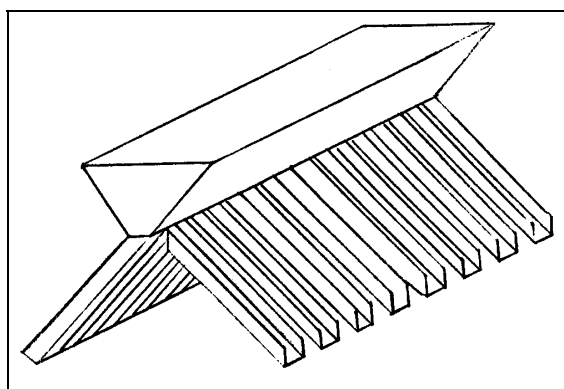


Figura 6 - Quarteador de Jones para amostras com cerca de 200 gramas.

2.3.3. Análises para caracterização física e química dos solos

As análises granulométricas foram realizadas através do método do densímetro (Camargo et al., 1986), utilizando-se como dispersante o hidróxido de sódio e o hexametáfosfato de sódio, sendo separadas as frações areia e argila. O silte foi obtido por diferença, acumulando o erro da análise.

Conforme Raij (1987) foram analisados: pH em água, carbono, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$. A determinação do carbono foi realizada colorimetricamente (Walkley & Black, 1934); o Ca^{2+} e o Mg^{2+} foram determinados por espectrofotometria

de absorção atômica; o K^+ por fotometria de chama de emissão e o $H^+ + Al^{3+}$ por titulação.

O P solúvel foi extraído pelo método da resina. Para o P total as amostras foram calcinadas a 550 °C e digeridas com HCl (1:1) a quente. A determinação do P foi realizada pelo método molibdato-ácido ascórbico e quantificado por espectrofotometria, sendo os resultados expressos na forma de P elementar.

A análise química da terra fina (< 2 mm) foi realizada após ataque sulfúrico (Camargo et al., 1986), determinando-se o SiO_2 , Al_2O_3 , TiO , Fe_2O_3 e MnO . A quantificação do SiO_2 foi realizada por gravimetria, Al_2O_3 por titulação, TiO_2 por colorimetria e Fe_2O_3 e MnO por espectrofotometria de absorção atômica.

A análise granulométrica, o pH, o complexo sortivo, o fósforo total a análise química por ataque sulfúrico foram determinados no Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ-USP.

2.3.4. Mineralogia da fração argila e silte

As análises mineralógicas qualitativas das frações argila e silte foram realizadas por difratometria de raios-X.

Inicialmente foram eliminados os sais solúveis, a matéria orgânica e os óxidos de ferro (Jackson, 1969). Os sais solúveis foram removidos com uma solução de acetato de sódio a pH 5, a matéria orgânica por oxidação posterior com peróxido de hidrogênio a 30 % e lavagem novamente com solução de acetato de sódio a pH 5.

Em amostras livre de sais e matéria orgânica removeram-se os óxidos de ferro livre pela adição de citrato de sódio 0,3 M, bicarbonato de sódio 1M, ditionito de sódio e finalmente, adicionou-se uma solução de NaCl 1N para promover a floculação dos colóides. Repetiu-se toda a operação até a amostra apresentar-se branca ou cinza.

Em seguida a fração argila foi separada por sifonação e saturada com K^+ e Mg^{2+} . Subamostras foram irradiadas com raios-X através de difratômetro Rigaku, com tubo de cobre e filtro de níquel, no intervalo 2θ de 3° a 30° .

Subamostras saturadas com K^+ e Mg^{2+} foram submetidas, respectivamente, a aquecimentos de $110^\circ C$ e $550^\circ C$ e solvatadas com etileno-glicol e posteriormente irradiadas.

Os minerais da fração argila foram identificados baseados nos espaçamentos basais e suas alterações segundo os tratamentos realizados (Brindley & Brown, 1980). A mica pelo espaçamento basal de aproximadamente 5 \AA e 10 \AA , que não se alteram com os tratamentos. A haloisita por seus picos a $7,2 - 7,5 \text{ \AA}$ que desaparecem com aquecimento a $550^\circ C$. A vermiculita pelo pico a aproximadamente $14 - 15 \text{ \AA}$ com os tratamentos de argila saturada com Mg^{2+} e Mg^{2+} solvatada com etileno glicol, que se contrai a aproximadamente 10 \AA com os outros tratamentos. A não contração com a saturação com K^+ a $25^\circ C$, indica vermiculita com intercamada de hidróxido de alumínio. A esmectita pelo espaçamento basal em torno de 17 \AA com Mg^{2+} solvatado com etileno glicol, que se contrai a: 14 \AA com Mg^{2+} , aproximadamente $12,5 \text{ \AA}$ com K^+ $25^\circ C$ e aproximadamente 10 \AA com K^+ a 350 e $550^\circ C$. A clorita pelo espaçamento próximo de 14 \AA que não se altera com nenhum tratamento.

Interestratificados foram identificados com espaçamentos dos argilominerais constituintes somados e seus possíveis submúltiplos com mica/clorita 24-26 Å e 12-13 Å em todos os tratamentos. A mica/vermiculita pelo espaçamento intermediário entre 10 e 14 Å se contrai a 10 Å com K^+ 25 °C, podendo ter picos da soma dos dois argilominerais constituintes, segundo os respectivos tratamentos (Méring, 1949).

O silte foi analisado na forma de pó, no intervalo 2 θ de 2° a 60°.

A identificação dos minerais da fração silte foi realizada através dos espaçamentos basais (Brindley & Brown, 1980).

A análise mineralógica foi realizada no Departamento de Solo e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ-USP.

2.3.5. Separações de carvões macroscópicos e microscópicos

A quantificação de carvões macroscópicos foi realizada por catação nas profundidades de 0-5 e 5-10 centímetros em amostras de cerca de 3 kg de solo, com 4 repetições por solo. Os resultados foram expressos em relação a massa seca em estufa a 105 °C por 24 horas.

Baseado na observação da presença de carvões de dimensão submilimétrica encontrado na fração leve (Trumbore, 1993; Schmidt et al., 1999; Spycher et al., 1983) e na fração densa em microagregados (Skjemstad et al., 1996) foi aprimorado o fracionamento por densidade de Trumbore & Zheng (1996). A fração densa e leve utilizada por estes autores baseiam-se apenas em densidade. No trabalho atual foram separados por catação manual a fração leve, que é constituída de carvões e

raízes macroscópicas e a fração densa de raízes e carvões microscópicos. No caso da extração de carvões pela destruição da microagregação, os carvões microscópicos com baixa densidade são separados da fração mineral densa por flotação com auxílio de uma solução de politungstato de sódio com densidade 2 g.cm^{-3} .

O método de Trumbore & Zheng (1996) baseia na separação por densidade em uma solução de politungstato de sódio com densidade de 2 g.cm^{-3} , com dispersão por agitação mecânica em agitador de tubos de centrífuga e ultra-som. A separação completa das frações é realizada com centrifugação, sendo a fração leve recuperada em filtros de quartzo.

As principais modificações visaram aumentar a eficiência da destruição da microagregação dos Latossolos muito argilosos e permitir uma maior recuperação de carvões protegidos pela microagregação. Aumentou-se o número e o tempo de desagregação e introduziu-se uma etapa de repouso por meia hora antes da centrifugação, para a separação mais eficiente da fração leve e densa. Estes procedimentos aumentaram em até 5 vezes a quantidade de material extraído na fração leve.

Para reduzir a heterogeneidade final do material depositado no filtro, devido à presença de raízes e carvões microscópicos, argila e politungstato de sódio foram inseridas outras modificações. Foi introduzida a limpeza da fração leve no final, contaminada com argila (muito pouco) e com politungstato de sódio. No método de Trumbore & Zheng (1996) é difícil remover o politungstato e a argila, que ficam impregnados no filtro de quartzo. No trabalho atual a quantificação da fração leve com carvões é mais precisa, com menos contaminantes para as análises elementares e

isotópicas, permitindo a homogeneização mais eficiente e não existindo contaminação do material do filtro. O material do filtro de quartzo (livre de carbono) apenas dilui o carbono da amostra. A contaminação com politungstato pode interferir e/ou danificar o aparelho de análise de carbono.

A sequência completa de extração dos carvões microscópicos é apresentada a seguir.

As amostras de solo utilizadas foram quarteadas e depois desagregadas até menos de 1 mm, sendo macroscopicamente limpas de carvões e raízes (até décimos de milímetros). As raízes microscópicas foram removida utilizando uma solução de politungstato de sódio com densidade $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$ e agitação manual leve. A centrifugação para a sedimentação da fração mineral densa foi realizada a 4500 rpm por pelo menos meia hora, até a solução se tornar límpida. As raízes microscópicas do sobrenadante foram recuperadas por sifonação em filtro de fibra de vidro.

Na sequência alterou-se a densidade da solução para 2 g.cm^{-3} e iniciou-se a extração de carvões microscópicos. A dispersão mecânica em tubos de centrífuga ocorreu por meia hora, sendo seguida da dispersão por ultra-som pelo mesmo tempo. Após o repouso por meia hora o sobrenadante leve com carvões microscópicos foi recuperado por sifonação e acumulado em outro tubo de centrifuga para posterior limpeza. As extrações foram sequenciais. Para o Argissolo foram suficientes 7 extrações sucessivas. Para os Latossolos a extração foi encerrada na 15^a sequência, sendo que ainda estava sendo extraído carvões na dimensão coloidal (muito pouco).

No final do processo a fração densa é lavada 5 vezes com água e com auxílio de agitador e ultra-som, para remover a contaminação com politungstato. A fração leve foi limpa duas vezes com ultra-som em água e centrifugação.

As frações leve com carvões microscópicos e a mineral densa limpas foram secas em centrífuga evaporadora a vácuo com aquecimento a 45 °C por 24 horas. Sendo depois homogeneizadas para análises elementares e isotópicas.

A observação da fração leve na escala microscópica deveria ter sido realizada para uma quantificação mais precisa dos carvões e eventuais raízes microscópicas não separadas previamente no processo. Isto não pode ser realizado devido à pulverização final das amostras. A centrifugação e secagem excessiva causam a fragmentação de carvões (Rhodes, 1998) além da agitação agressiva e o uso de ultra-som. O método necessita ser melhorado para favorecer a observação e aumentar a eficiência da extração nos solos muito argilosos (Latosolos).

Estas separações foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA.

2.3.6. Determinação do C, N, ^{13}C e ^{15}N

Para as análises elementares e isotópicas as amostras foram moídas finamente (abaixo de 250 micra) e secas a 60 °C por 24 horas.

As amostras foram queimadas em meio oxidante, com os gases produzidos separados por cromatografia gasosa em um analisador elementar (Carlo Erba). Após a remoção da água os gases foram coletados por fluxo contínuo no espectrometro de massas. O teor de C e N e os isótopos de ^{13}C e ^{15}N foram determinados

no espectrometro de massa. O teor de C e N é expresso em porcentagem em massa da amostra analisada.

A razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ é expressa na forma δ (‰), que é definida pela fórmula abaixo:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrao}}}{R_{\text{padrao}}} \right) * 1000 \quad (1)$$

Onde: R_{amostra} é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra e R_{padrao} é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão. O padrão é a rocha calcária da Formação Pee Dee (PDB - *Pee Dee Belemnite*), da região do Gran Canyon nos Estados Unidos.

De forma semelhante utiliza-se o $\delta^{15}\text{N}$ (‰), onde: R_{amostra} é a razão isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ da amostra e R_{padrao} é a razão isotópica $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ do padrão. O padrão é a abundância de ^{15}N no ar atmosférico.

O erro analítico foi baseado em amostras de padrão de solo LECO, sendo respectivamente para o C, N, ^{13}C e ^{15}N , 0,15 %, 0,01 %, 0,30 ‰ e 0,50 ‰.

Todas estas análises foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA.

2.3.7. Determinação do ^{14}C

Inicia-se com a combustão das amostras em tubos de quartzo pré-evacuados a 800 °C com CuO. O CO_2 liberado é purificado criogenicamente e medido manometricamente. Segue-se com a redução catalítica do CO_2 a grafite (Vogel, 1992) .

O grafite é então acoplado a alvos especiais e inserido no espectrômetro de massa. A incerteza analítica baseada em repetições de padrão secundários é de ± 5 ‰.

A atividade do ^{14}C é expressa de forma similar ao ^{13}C , com a notação de Δ ‰. O padrão é o ácido oxálico preparado pelo National Bureal of Standart dos Estados Unidos da América.

$$\Delta^{14}\text{C} = 1000.(R_{\text{amostra}}/(0.95.R_{\text{padrão}}) - 1) \quad (2)$$

Onde o R_{amostra} é a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra (corrigido para $\delta^{13}\text{C}$ de -25 ‰) e o $R_{\text{padrão}}$ é a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão.

O ^{14}C , produzido a taxas relativamente constantes na estratosfera pelo bombardeamento do ^{14}N por raios cósmicos, é oxidado a CO_2 e incorporado na biosfera. Com a morte de tecido vivo cessa a incorporação de ^{14}C . Isto é utilizado para medir o tempo de residência do carbono, na escala de centenas a milhares de anos (Trumbore, 2000).

Outra fonte de ^{14}C são as explosões atômicas atmosféricas, que ocorreram entre 1954 e 1963. Estas elevaram a atividade do ^{14}C na atmosfera (efeito bomba), dobrando atividade natural do ^{14}C em 1963 e desde então esta atividade está decaindo (Trumbore, 2000). Valores maiores que 0 ‰ indicam a atividade de ^{14}C do “efeito bomba”. Para os solos estudados as atividades são: $100,1 \pm 7$ ‰, $90,9 \pm 7$ ‰, $91,9 \pm 9$ ‰, $84,0 \pm 9$ ‰ e $83,3 \pm 9$ ‰, respectivamente para os anos de 1996, 1997, 1998, 1999 e 2000 (Telles et al., 2002).

As análises de ^{14}C foram realizadas no Laboratório de Espectrometria de Massa (acoplado ao acelerador de partículas) de Lawrence Livermore, São Francisco, Califórnia.

2.3.8. Estoque de carbono

O estoque de carbono foi determinado pela multiplicação da densidade do solo pela espessura da camada considerada e sua respectiva concentração de carbono. Para a determinação da densidade do solo foram utilizados três tamanhos de cilindros: de 97, 206 e 1650 cm^3 . O menor foi utilizado apenas em solos arenosos em profundidade, o médio nos solos argilosos e o maior em todos os solos nas profundidades de 0-5 e 5-10 centímetros.

Foram pelo menos quatro observações, em trincheiras e minitrincheiras, por solo e profundidade. Não houve repetições por ponto de observação para o amostrador grande. Para o pequeno foram três repetições e para o médio de três a cinco repetições. Foram amostrados nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 30-40 60-70, 90-100, 140-150 e 200-210.

Houve um controle morfológico e por pesagem no campo. As coletas foram repetidas quando apresentavam deformação ou diferença acima de 10 % em massa entre repetições por ponto de observação e profundidade. O controle morfológico foi baseado em compactação em relação ao solo estudado e altura interna e externa do anel cravado no solo.

2.3.9. Cálculo da propagação de erros para os estoques

Os dados de teor de carbono e densidade apresentaram no geral quase normalidade, pois são necessários mais de 30 repetições para a normalidade completa ser assumida. A propagação foi baseada no desvio padrão. Os valores não medidos entre profundidades medidas foram obtidos pela média, sendo propagado também os respectivos erros.

2.3.10. Análise estatística

Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no SAS (SAS, 1991). Através do procedimento Univariate se determinou a variância, a comparação das médias foi realizada pelo teste de Tukey e a possível relação entre as variáveis realizado através de equações de regressão multivariadas com o procedimento stepwise, utilizando-se este procedimento sabe-se qual a contribuição de cada variável para o R^2 geral da equação de regressão.

O ajuste não linear utilizado neste trabalho, com estimativas iniciais do coeficiente (a) e do expoente (b) da equação do tipo:

$$y = a \cdot x^b \quad (3)$$

Através do método iterativo de Gauss-Newton o procedimento nlin ajusta os valores de a e b até ser alcançada a convergência entre os valores dependente e independente da equação.

Para o cálculo do número de amostras necessárias para se alcançar a precisão requerida para os dados de C, N, ^{13}C e ^{15}N foi utilizada a equação proposta por Tan ?? (pegar data e referência completa), apresentada abaixo:

$$N = t^2 \cdot S^2 / E^2 \quad (4)$$

, onde n é o número de amostra necessárias, t é o valor do teste t de student ao nível de probabilidade desejado, o S^2 a soma dos quadrados e E o erro aceitável ou desejado.

2.3.11. Parametrização do Century

O modelo Century é baseado no balanço de massas e ciclagem de nutrientes, simulando a dinâmica planta-solo do carbono, nitrogênio, fósforo, enxofre de diferentes biomas e sistemas de cultivo. O carbono da matéria orgânica do solo é dividido diferentes reservatórios, ativo, lento e passivo com ciclagem respectivamente em anos, dezenas de anos e centenas a milhares de anos. A fração ativa é constituída de raízes e biomassa microbiana, a lenta e passiva de matéria orgânica humificada (Parton et al. 1987; Pulliam, 1996; Shimel et al. 1994).

A parametrização inicial foi baseada nos dados deste trabalho para os estoques de carbono no solo; séries históricas de 30 anos de precipitação e temperatura do Instituto Nacional de Meteorologia; curva de retenção de água no solo de Ranzani (1980); nutrientes Vitousek & Sanford (1986), Vitousek et al. (1998) e Silver et al. (2000). As demais dúvidas em relação a parametrização e demais parametros do modelo foram baseados em Pulliam (1996) e manuais do usuário da versão 4 e a 5.3 do Century (utilizada neste trabalho). Na versão do Century 5.3 o arquivo fix é ajustado ao bioma floresta tropical.

A simulação inicial por 2000 anos para obter o equilíbrio foi realizada para reiniciar o modelo no equilíbrio. Os dados de saída atualizaram os arquivos de

parametrização SITE e TREE. Os valores de equilíbrio de estoque e tempo de ciclagem foram comparados com os dados medidos por este trabalho sendo similares, assim como os valores de produtividade primária líquida (NPP) e produção de CO₂ em Telles et al. (2002).

Foram realizadas duas simulações:

a) teste de funcionamento (ou sensibilidade) do modelo Century na previsão de carvões, a três níveis de produtividade bruta, com baixa e alta intensidade de remoção de carbono pelo fogo, recorrentes a cada 400 anos por 2.000 anos.

b) aumento da produtividade do ecossistema para estimativa da capacidade de absorção de carbono no solo. O aumento de produtividade foi contínuo, a taxa de 0,2 % ao ano, num total de 25 % em 113 anos.

3. RESULTADOS

3.1. *Caracterização dos solos estudados*

3.1.1. Distribuição espacial dos solos

Em Manaus e Santarém existem três tipos de solos predominantes: Latossolo e Espodossolo em Manaus e Latossolo e Argissolo em Santarém. Os Latossolos e os Argissolos são bem drenados. O Espodossolo é sazonalmente inundável no período chuvoso. Os Latossolos são muito semelhantes nos dois locais, com área aproximada de 60 % em Santarém e até 70 % em Manaus. Os Argissolos representam em área cerca de 40 % e 10%, respectivamente, em Santarém e Manaus.

Os Latossolos estão localizados principalmente nos platôs, podendo ocorrer desde o platô até o baixio nas vertentes mais íngremes em Manaus. Os Espodossolos ocorrem somente nos baixios de Manaus, não sendo observados em Santarém. As vertentes são mais íngremes em Manaus, podendo chegar a 100 % de inclinação enquanto em Santarém estão normalmente entre 10-20 %. Embora as vertentes do transecto Norte-Sul de Manaus representem cerca de 30 % em área, os Argissolos ocorrem no contato com o baixio, em relevo mais plano. O Espodossolo é o solo dominante nos baixios de Manaus com área podendo chegar a 30 %.

Nas duas áreas, entre os Latossolos dos platôs e os Argissolos, podem ocorrer Argissolos/Latossolos Amarelos com textura argilosa/muito argilosa. Quando não houver citação mais detalhada no texto, os solos predominantes, respectivamente, Latossolo Amarelo alumínicos muito argiloso caolinitico, Argissolo Amarelo alumínico textura média de Santarém e Espodossolo ferrocárbico hidromórfico hiperespesso silicoso de Manaus, serão denominados Latossolo, Argissolo e Espodossolo.

3.1.2. pH, teor de argila, carbono, complexo sortivo e fósforo

Todos os solos estudados são muito ácidos e pobres em nutrientes. Serão apresentados, agrupados por tipo de solo, os dados de: pH, teor de argila, complexo sortivo, soma das bases (SB: $K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}$) capacidade de troca de cátions (T), porcentagens de saturação em bases no complexo sortivo (V%), fósforo disponível e total. Os valores de carbono apresentados aqui foram determinados por via úmida. A comparação mais detalhada e precisa do carbono foi feita por via seca, logo após a caracterização dos solos.

Latossolos Amarelos alumínicos muito argilosos

O Latossolo muito argiloso da FLONA é mais fértil (Tabela 2). As diferenças de fósforo total entre os Latossolos estudados neste trabalho são pequenas, sendo semelhantes aos dados de Chauvel (1982) e Ferraz et al. (1998) para o Latossolo de Manaus. Os dados de Ferraz et al. (1998) foram obtidos praticamente no mesmo ponto ao deste trabalho e os de Chauvel em Latossolo semelhante na ZF-2. As diferenças encontradas no fósforo total em relação aos dados de Silver et al. (2000) no

Latossolo de Santarém podem ser explicadas pelo método diferente de extração do P total. As diferenças no fósforo total podem ser até 11 vezes maior pelo método de Parkinson & Allen (1975) utilizado por Silver et al. (2000).

Próximo à superfície o teor de C é maior na FLONA e em profundidade os teores são muito baixos e o erro analítico grande. Não existem diferenças importantes na textura entre os solos, sendo comum o pequeno aumento do teor de argila em profundidade.

Tabela 2. pH, teor de argila, C, SB, T, V % e P disponível e total dos Latossolos Amarelos muito argilosos aluminicos.

Horizonte	Prof ¹ (cm)	pH H ₂ O	Argila %	C ² g. kg ⁻¹	SB mmolc.kg ⁻¹	T %	V %	P disp.	P total mg.kg ⁻¹
FLONA do Tapajós, km 83									
A	3,5	3,2	82	26	9,4	110,4	9	17	189,3 ³
AB	17	3,6	86	14	7,3	65,3	11	7	141,7 ³
BA	40	4,0	83	5	5,3	45,3	12	3	-
B1	87	3,9	93	4	6,7	43,7	15	3	219,5 ³
B1.B2	142	4,0	93	4	5,1	35,1	15	7	-
B2	180	4,3	95	4	3,2	31,2	10	7	-
Manaus, Reserva do INPA (ZF-2), km 34									
A	4	3,7	73	19	3,7	89,7	4	9	23 ⁴
	24	4,0	81	13	3,3	47,3	7	4	30 ⁴
B	75	4,1	89	4	2,1	32,1	7	4	-
	135	4,2	90	4	3,6	27,6	13	4	-
	180	4,6	94	4	2,1	24,1	9	5	-

¹ Indica a profundidade média de coleta, no centro de cada horizonte identificado.

² Utilizando o método de Walkley & Black (1934)

³ Valor obtido de Silver et al. (2000) utilizando o método de Parkinson & Allen (1975) nas profundidades que mais se aproximam das descritas por estes autores (0-10 cm, 10-40 cm e 40-100 cm).

⁴ Dados baseados em Ferraz et al. (1998) sendo os valores de fósforo total 20 e 27 mg.kg⁻¹ em 50 e 100 cm de profundidade.

Argissolos Amarelos alumínicos textura média

Na Tabela 3 estão os dados do Argissolo Amarelo alumínico textura média das áreas de Manaus e Santarém. A sugestão de classificação destes solos é da Reunião de Classificação (1979) sendo ainda atribuídos na literatura a denominação de Podzólico Vermelho Amarelo alumínico latossólico textura média a arenosa como em Ranzani (1980) e Chauvel (1982). O perfil de Santarém está próximo do limite inferior de 15 % de argila para a textura média e sem alterações em profundidade, porém é o ponto mais arenoso dos 16 perfis abertos. Para Manaus a textura média é mais típica, dobrando o teor de argila em 30 centímetros de profundidade e em 1 metro o teor de argila está próximo de 50 % (informação morfológica).

Na amostra de 90-100 cm do Argissolo de Manaus os valores de soma de bases são os mais elevados do perfil e a saturação com Al é baixa. O sub-bosque é mais limpo, sendo atípico na região dos transectos³. Neste solo é muito freqüente a ocorrência de carvões, sendo o ponto mais seco do transecto, pois tem textura média e é localizado no terço inferior da vertente, ainda longe do lençol freático do baixio (15 metros de desnível aproximadamente).

Em períodos secos a vegetação deste solo pode sofrer um estresse hídrico maior, favorecendo a ocorrência de incêndios no passado. Estes solos são os que secam mais rapidamente segundo medidas de umidade do solo⁴ em posição altimétrica semelhante na primeira vertente do transecto Norte-Sul. Nestes pontos há maior

³ Informação confirmada no campo com Francisco Quintiliano, mateiro do INPA na ZF-2.

⁴ Informação pessoal de Jeff Chambers- UC Irvine, pesquisador do projeto Carbon Dynamics in Vegetation and Soils along the Eastern LBA.

freqüência de carvões dos solos de Manaus. Este ponto do relevo, próximo ao contato com os baixios, é o local de deposição de colúvios que podem ter ocorrido no passado.

Tabela 3. pH, teor de argila, C, SB, T, V % e P disponível e total dos Argissolos Amarelos aluminicos textura média.

Camada/ Horizonte	Prof ¹ (cm)	pH H ₂ O	Argila g. kg ⁻¹	C ² mmolc.kg ⁻¹	SB mmolc.kg ⁻¹	T %	V %	P disp. mg.kg ⁻¹	P total mg.kg ⁻¹
FLONA do Tapajós, km 83									
A	12,5	3,6	8	8	3,1	50,1	6	4	70 58,2 ³
AB	31	3,7	12	10	2,1	62,1	3	4	30 74,7 ³
BA	59	4,1	14	7	2,1	43,1	5	3	20 -
B1	112	4,1	16	4	5,1	51,1	10	3	- 79,4 ³
B2	172	4,2	14	4	5,1	40,1	13	3	- -
Manaus, Reserva do INPA (ZF-2), km 34									
A	2,5	4,0	18	28	2,7	86,7	3	11	30 24 ⁴
	7,5	3,9	14	14	3,4	56,4	6	5	30 30 ⁴
B	15	3,9	26	14	4,3	70,3	6	4	20 -
	25	3,9	36	8	2,1	52,1	4	4	- -
	65	4,2	-	4	3,2	34,2	9	3	- -
	95	4,0	-	4	9,5	17,5	54	4	- -

¹ Em Santarém a amostragem foi feita em trincheira mais representativa das 3 abertas. A profundidade indicada é a média do horizonte. Em Manaus amostrou-se sistematicamente em minitrincheiras (60x60x60 cm) e com trato a 65 e 95 cm.

² Utilizando o método de Walkley & Black (1934).

³ Valor obtido de Silver et al. (2000) utilizando o método de Parkinson & Allen (1975), nas profundidades que mais se aproximam das descritas por estes autores (0-10 cm, 10-40 cm e 40-100 cm).

⁴ Dados baseados em Ferraz et al. (1998), sendo os valores de fósforo total de 20 e 27 mg.kg⁻¹ a 50 e 100 cm de profundidade do transecto N-S a 2030 metros e com inclinação de cerca de 100 %. O solo deste trabalho se encontra em cota altimétrica semelhante e deslocado aproximadamente 150 metros a leste em situação topográfica mais plana (10 % de inclinação).

Os Argissolos estudados não possuem cerosidade revestindo os agregados, sendo a classificação devida ao gradiente textural entre o horizonte A e B, que dobram entre estes horizontes.

O Argissolo de Manaus é o solo que apresenta o maior teor de carbono dos solos estudados. Isto pode ser explicado tanto pela presença abundante de carvões

como pelo caminhamento lateral de ácidos orgânicos provenientes da montante. Este caminhamento é favorecido nas camadas mais arenosas superficiais e inclinação de 10 % do terreno e o aumento do teor de argila para próximo de 50 % em profundidade.

Argissolo/Latossolos alumínicos textura argilosa

Estes solos são muito semelhantes aos Latossolos muito argilosos dos platôs, as diferenças são apenas nos primeiros 50 cm superficiais (Tabela 4). Ocorre em pequenas manchas de transição entre os Latossolos muito argilosos e os Argissolos textura média, sem diferenças na vegetação.

Tabela 4. pH, teor de argila, C, SB, T, V % e P disponível e total dos Argissolos/Latossolos Amarelos aluminicos textura argilosa.

Camada/ Horizonte	Prof ¹ (cm)	pH H ₂ O	Argila %	C ² g. kg ⁻¹	SB mmolc.kg ⁻¹	T	V %	P disp.	P total mg.kg ⁻¹
FLONA do Tapajós, km 83									
A	2,5	3,5	34	14	13,1	85,1	15	11	-
	7,5	3,5	44	14	5,7	65,7	9	8	121,9 ³
B	15	3,6	50	8	2,4	47,4	5	5	-
	25	3,8	-	7	5,2	44,2	12	4	117,5 ³
Manaus, Reserva do INPA (ZF-2), km 34									
A	2,5	3,9	37	19	2,6	68,6	4	9	40
	7,5	3,5	42	11	6,5	60,5	11	7	40
	15	3,8	46	11	2,2	49,2	4	7	20
B	25	3,9	58	5	3,1	43,1	7	4	-
	65	4,4	-	5	2,1	28,1	7	4	-
	95	4,2	-	5	2,1	26,1	8	4	-

¹ Amostragem sistemática em minitrincheiras. A profundidade é a média de coleta, no centro de cada camada.

² Utilizando o método de Walkley & Black (1934).

³ Valor obtido de Silver et al. (2000) utilizando o método de Parkinson & Allen (1975), nas profundidades que mais se aproximam das descritas por estes autores (0-10 cm, 10-40 cm e 40-100 cm).

⁴ Sem solo similar no transecto N-S nos dados de Ferraz et al. (1998), pois apenas foi encontrada uma pequena área de solo sem dados de P total no transecto Leste-Oeste (L-O, cruza o transecto N-S). Pode-se estimar um valor entre 40 e 30 mg.kg⁻¹ a partir do Latossolo e do Argissolo próximo.

Espodossolo ferrocárbico hidromórfico hiperespesso silicoso de Manaus

Na Tabela 5 são apresentados dados do Espodossolo de Manaus. Apesar do horizonte A ser arenoso, possui um elevado teor de carbono e uma distribuição relativamente uniforme no perfil analisado, com um ligeiro aumento a 45 centímetros que pode ser explicado pelo meio hidromórfico e pelo caminhamento de carbono no perfil. Em profundidade existe um aumento do teor de P total, indicando um possível caminhamento do P no pacote arenoso segundo os dados de Ferraz et al. (1998). Nestes solos há um aumento no teor de carbono em profundidade, tendo no horizonte B

espódico um acúmulo em profundidade de carbono e ferro (Lucas et al. ,1984; Righi, et. al., 1990).

Granulometricamente a areia é constituída de areia grossa/muito grossa, homogênea em profundidade até o primeiro metro e predominantemente quartzosa. Próximo da vertente, com a elevação do terreno, inicia-se um aumento da argila em profundidade, melhoria da drenagem e a transição para o Argissolo.

Tabela 5. pH, argila, carbono, SB, T, V % e P disponível e total do Espodossolo de Manaus.

Camada/ Horizonte	Prof ¹ (cm)	pH H ₂ O	Argila %	C ² g. kg ⁻¹	SB mmolc.kg ⁻¹	T mmolc.kg ⁻¹	V %	P disp.	P total mg.kg ⁻¹
A	2,5	3,7	10	22	6,3	70,3	9	11	60 -
	7,5	4,1	-	16	3,4	54,4	6	9	60 12,53 ³
	15	3,9	8	11	3,2	33,2	10	6	- -
	25	3,8	-	10	2,1	28,1	7	4	- 0 ³
	35	4,0	-	5	5,1	28,1	18	4	- -
	45	3,8	-	7	3,2	25,2	13	4	- 0 ³

¹ Amostragem sistemática em minitrincheiras, a profundidade é a média de coleta, no centro de cada camada.

² Utilizando o método de Walkley & Black (1934)

³ Em Ferraz et al. (1998) os valores de P total sobem para 25 mg.Kg⁻¹ a 1 metro.

3.1.3. Teor de argila

A distribuição vertical do teor de argila (Figura 7) é relativamente uniforme nos Latossolos e Podzois e dobrando o teor em profundidade nos Argissolos. Os Latossolos de Transição são argilosos apenas na superfície, sendo muito argilosos em profundidade (informação morfológica). O Argissolo de Manaus é argiloso em profundidade (informação morfológica). No geral os valores de silte estão abaixo de 10 % para todos os solos, mais freqüentes até 5 %, nos diferentes solos e profundidades. É

preferível não interpretar as diferenças dos teores de silte, pois, estes são obtidos pela diferença entre os valores medidos de areia e argila, acumulando o erro da análise.

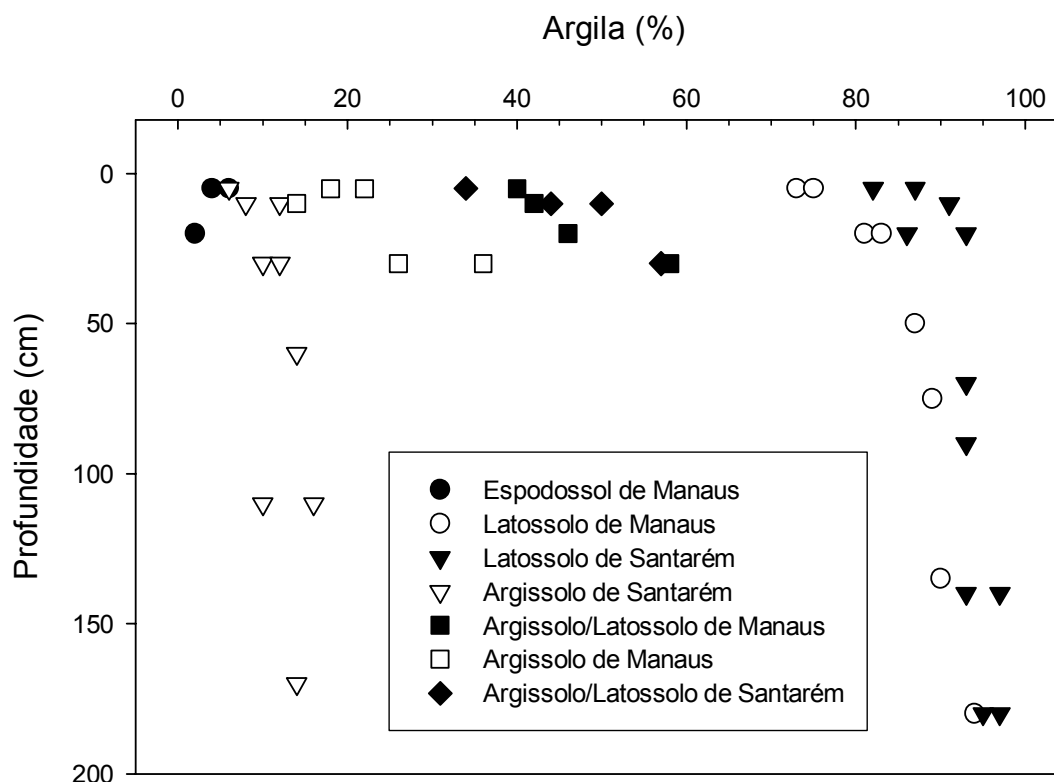


Figura 7 - distribuição vertical do teor de argila nos solos estudados. Os solos estudados podem ser agrupados superficialmente em quatro classes de textura: muito argilosa, argilosa, média e arenosa, respectivamente em relação aos teores de argila, maior de 60 %, de 35 a 60 %, de 15 a 35 % e abaixo de 15 %.

3.1.4. Análise química da terra fina (menor que 2 mm)

A relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ multiplicado por 1,7 (Ki) é atributo da composição quantitativa média da proporção global dos principais elementos que constituem os minerais secundários integrantes da terra fina (fração menor que 2 mm) (Camargo et al., 1987). O Kr é a relação molecular $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,6375 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) \cdot 1,7$ desta mesma fração. Tanto o Ki como o Kr são indicadores do grau de intemperismo dos

solos (Prado 1993). Quanto menos intemperizados ou mais jovens os solos, maiores as relações Ki e Kr (Vieira & Santos, 1987).

Existem dois padrões de variação vertical para os valores de Ki (Figura 8), sem tendências para os Latossolos e Argissolo de Manaus e com redução drástica para o Argissolo de Santarém. Embora não existam dados dos pontos em profundidade para o Espodossolo, não se espera uma grande redução em profundidade na relação Ki, pois não há variação de textura e nem de estrutura para este solo em profundidade.

Para os Argissolos de Santarém e o Espodossolo de Manaus os valores de Ki e Kr (Figura 9) na profundidade de 0-5 cm são elevados, respectivamente 10,63 e 9,42 para o Espodossolo e 13,27 e 6,80 para o Argissolo.

Os teores de ferro (Figura 10) são próximos de zero no Espodossolo, seguido das camadas superficiais dos Argissolos e Argissolo/Latossolo argiloso de transição de Manaus. Apesar do Argissolo/Latossolo argiloso de Manaus ser muito argiloso, em profundidade, tem teor de ferro de 1,99 %, semelhante ao Argissolo textura média de Santarém.

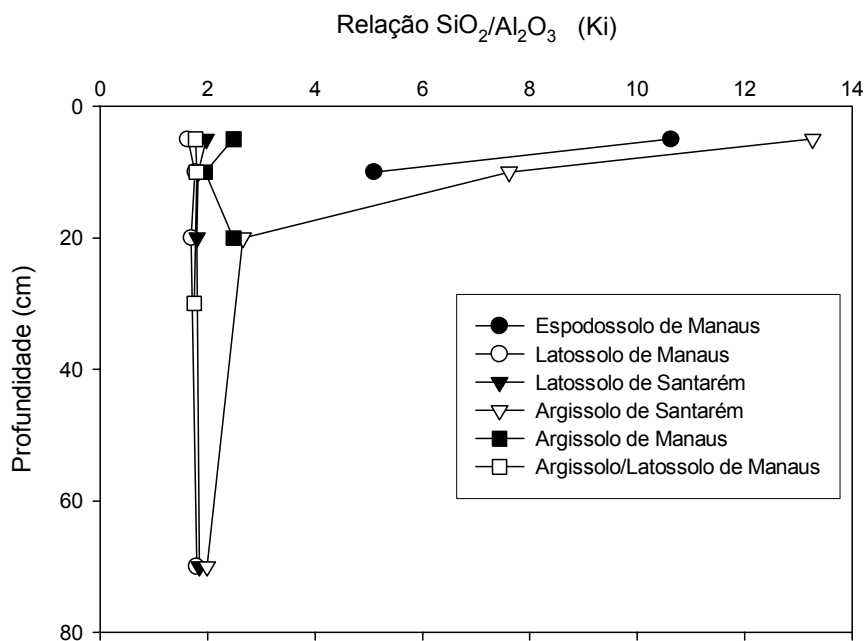


Figura 8 - relações Ki nos solos estudados.

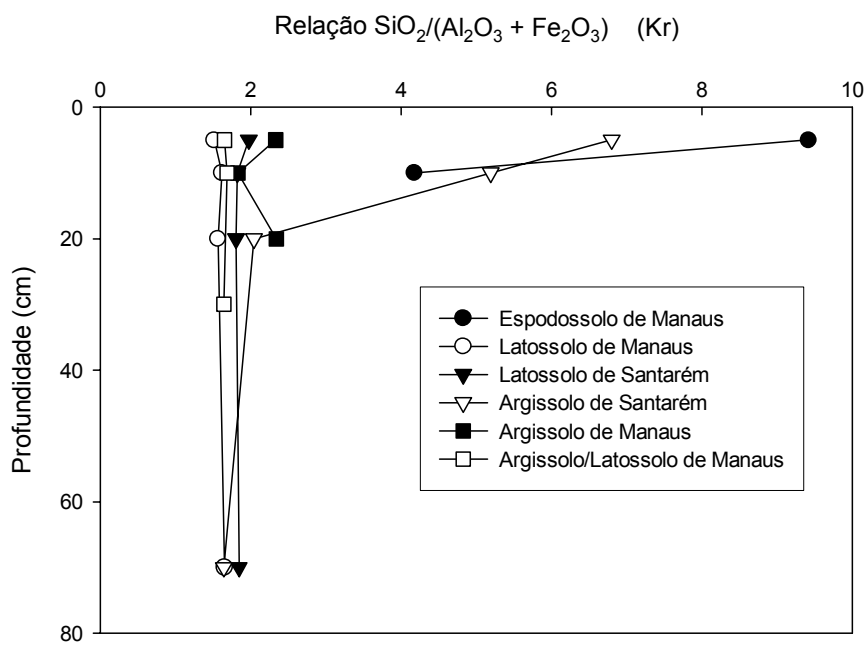


Figura 9 - Relações Kr nos solos estudados.

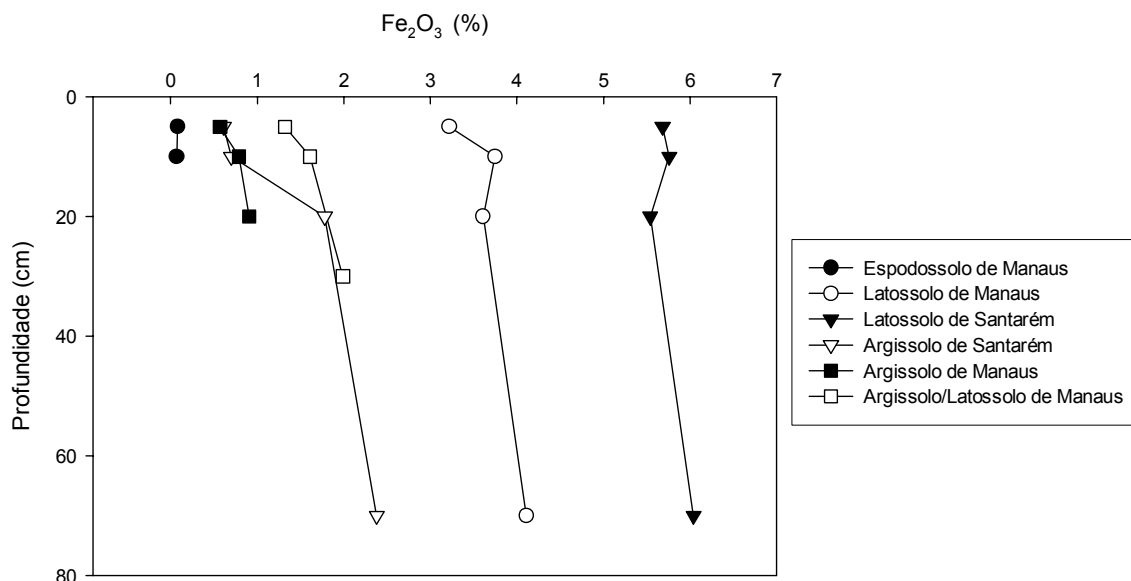


Figura 10 - teores de ferro entre os solos estudados.

3.1.5. Mineralogia da fração argila e silte

Foram identificados na fração argila a presença de caulinita em todos os solos. A muscovita em todos os solos de Santarém e no Espodossolo de Manaus. A gibsita no Latossolo muito argiloso de Manaus e Argissolo textura média de Santarém. A clorita só não foi encontrada no Latossolo muito argiloso de Santarém e no Espodossolo de Manaus. A presença de quartzo não foi constatada na fração argila em nenhum solo.

Na fração silte foi encontrado quartzo nos Latossolos muito argilosos. O feldspato ortoclase em todos os solos. A pirofilita só não estava presente no Latossolo muito argiloso de Manaus. A mica ocorreu só no Latossolo de Manaus.

3.1.6. Densidade

No geral, a variação de densidade para cada solo é baixa, menor que 10 %. Os solos argilosos possuem a maior variação, em alguns casos se eleva próximo de 10 % na superfície (Figura 11).

Os valores de densidade obtidos com o amostrador grande apresentaram uma variação maior em todos os solos de cerca de 10 a 20 %. Para os Latossolos são apresentados os valores com o amostrador médio e com uma variação menor, abaixo de 10 %. Isto pode ter ocorrido devido à variação maior e mais real do amostrador grande, que contabiliza raízes com até cerca de 2 centímetros, enquanto os amostradores menores, apenas as raízes finas (abaixo de 2 mm). Os valores de densidade obtidos com os amostradores grandes também são menores, devido a este mesmo motivo.

Para os solos arenosos é impossível a amostragem de 0-5 e 5-10 centímetros com os amostradores médio e pequeno devido à quantidade grande de raízes (até 80 % do volume do solo no Espodossolo). Em profundidade os amostradores médio e grande, apresentam resultados similares. É nítida a diferença dos valores de densidade influenciada pela textura entre os solos arenosos e argilosos, principalmente em profundidade, onde a contribuição de raízes é menor.

No geral há um aumento de densidade dos solos com a redução da quantidade de raízes em profundidade, uma pequena redução com o desenvolvimento da estrutura nos horizontes B e um adensamento natural a partir de 1 metro, mais pronunciado no Latossolo de Manaus. Isto provoca uma drenagem lenta neste solo,

podendo tornar o perfil seco abaixo de 1 metro, enquanto a superfície pode ainda estar muita úmida (formação de lençol de água suspenso).

No Argissolo de Santarém, em profundidade há uma estrutura um pouco mais desenvolvida devido o aumento do teor de argila e de ferro e aos valores de Ki da fração argila que se aproximam de 2, típico da caulinita. Isto favorece a redução da densidade entre 30 a 100 cm, e abaixo desta profundidade existe um adensamento natural.

Na comparação de médias de densidade dos Latossolos utilizou o teste T, não sendo significativas ao nível de 5 % as diferenças de densidade do solo para os primeiros 50 cm. Em profundidade a densidade do Latossolo de Manaus é menor que o Latossolo de Santarém, sendo iguais densidades a 100 cm e maiores no Latossolo de Manaus abaixo de 1 metro.

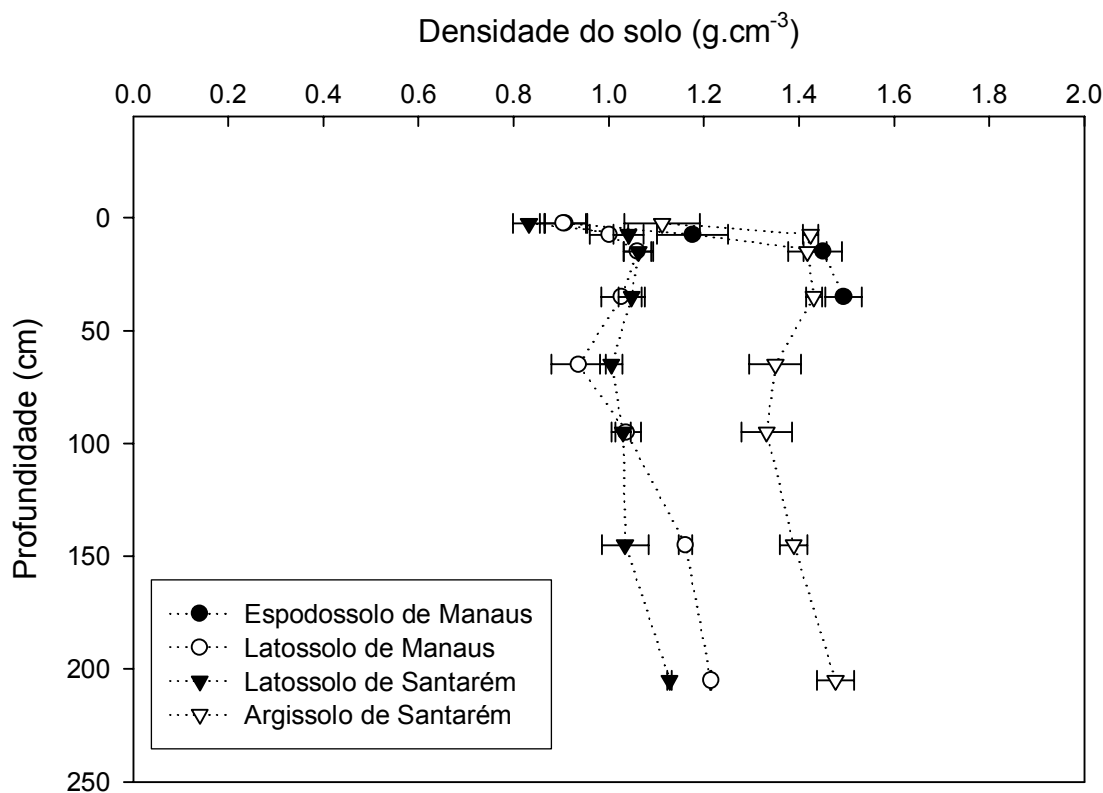


Figura 11 - Densidade dos solos estudados mostrando a baixa variação e o adensamento a partir de 1 metro, mais pronunciado no Latossolo de Manaus.

3.2. *Diferenças no método de preparo das amostras influenciando os resultados de C, N, ^{13}C e ^{15}N*

Testou-se a influência do preparo de amostras nos resultados analíticos. O solo testado é o mais homogêneo vertical e lateralmente dos solos estudados, com baixa frequência de carvões. Foram comparados os Latossolos do primeiro e segundo platô do transecto Norte-Sul da ZF-2 com 1200 metros de distância entre eles. No primeiro platô foram abertas 3 minitrincheiras e no segundo 16, todas com 30 metros de espaçamento entre elas. Estes solos são muito homogêneos e semelhantes, com diferenças mais

visíveis apenas nos primeiros centímetros. No segundo platô o espaçamento foi variável, tentando buscar o máximo de variação em cor, quantidade de serrapilheira e atividade biológica.

No primeiro platô utilizou-se o método de rotina de preparo de amostras do laboratório de Ecologia Isotópica e no segundo o método utilizado neste trabalho. No método de rotina é retirada uma subamostra e nestas são retirados as raízes e carvões mais grosseiros (acima de 2 mm). No método utilizado neste trabalho as amostras são quarteadas utilizando-se um quarteador de Jones e na subamostra final foram removidos todas as raízes e carvões macroscópicos (com tamanho desde centímetros até décimos de milímetros), com resultados semelhantes à separação da fração leve por densidade de Trumbore & Zheng (1996).

Compararam-se as médias dos teores de C e N e os δ ‰ de ^{13}C e ^{15}N , nas diferentes profundidades, através do teste Tukey para amostras independentes. Não foram encontradas diferenças significativas ao nível de 5 % entre as médias das diferentes análises dos dois solos. Na Tabela 6 são apresentados as análises descritivas da variação entre os dois platôs, as médias e os respectivos desvios padrões. São apresentados também os resultados das 16 minitrincheiras (pontos de observação).

Tabela 6. Comparação das médias, desvios padrões (DP) e coeficiente de variação (CV) dos dados analíticos do primeiro e segundo platôs do transecto N-S em Manaus, no segundo com 3 e 16 pontos de observação.

Prof. (cm)	Primeiro Platô			Segundo platô (3)			Segundo platô (16)		
	Média	DP	CV%	Média	DP	CV%	Média	DP	CV%
$\delta^{13}\text{C} (\text{‰})$									
2,5	-28,5	0,3	-1,1	-27,7	0,2	-0,8	-27,7	0,3	-1,0
7,5	-27,5	0,1	-0,5	-27,1	0,2	-0,7	-27,1	0,2	-0,9
15	-27,3	0,2	-0,6	-27,2	0,1	-0,5	-26,7	0,2	-0,8
25	-26,9	0,3	-1,3	-26,8	0,1	-0,5	-26,4	0,2	-0,7
35	-26,5	0,4	-1,4	-26,2	0,2	-0,8	-26,1	0,2	-0,7
45	-26,4	0,4	-1,6	-25,9	0,1	-0,4	-26,0	0,2	-0,8
$\delta^{15}\text{N} (\text{‰})$									
2,5	8,7	0,5	5,4	8,4	0,0	0,3	8,4	0,4	4,7
7,5	10,0	0,6	6,2	9,0	0,2	2,3	9,5	0,4	4,2
15	10,8	1,3	11,7	11,5	0,5	4,1	10,4	0,5	5,0
25	11,1	0,8	7,6	11,5	0,4	3,2	10,6	0,4	4,0
35	11,2	1,1	9,6	10,9	0,4	3,2	10,9	0,4	3,9
45	12,3	1,6	12,9	9,8	0,3	2,7	10,8	0,6	5,3
C (%)									
2,5	3,2	0,4	13,4	2,4	0,3	11,0	2,5	0,5	19,7
7,5	2,0	0,2	9,9	1,6	0,2	11,4	1,6	0,3	16,3
15	1,4	0,2	14,6	1,1	0,1	11,3	1,2	0,1	11,4
25	1,2	0,4	29,3	1,0	0,1	11,0	0,9	0,1	10,0
35	1,0	0,4	34,9	0,8	0,1	14,0	0,8	0,1	11,3
45	0,8	0,3	36,0	0,7	0,1	8,4	0,7	0,1	9,5
N (%)									
2,5	0,26	0,03	9,56	0,19	0,02	8,18	0,19	0,02	11,77
7,5	0,18	0,01	7,35	0,15	0,02	10,84	0,14	0,02	13,44
15	0,13	0,02	16,43	0,09	0,01	12,37	0,10	0,01	10,39
25	0,11	0,03	24,05	0,08	0,01	12,50	0,08	0,008	9,65
35	0,09	0,02	24,74	0,07	0,01	8,66	0,07	0,008	10,85
45	0,08	0,02	27,15	0,06	0,00	0,00	0,06	0,005	7,96

Em geral, no novo método proposto, a variação é duas a três vezes menor, mais homogênea nas diferentes análises e profundidade. A variação do carbono é baixa, próxima de 10 %. Na comparação dos 3 pontos com a variação dos 16 do segundo platô não existem diferenças importantes. A elevação da variação para as diferentes análises

com maior número de amostras é explicada por um ou dois pontos mais distantes da média.

3.3. Variação dos dados de C, N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ e $\Delta^{14}\text{C}$

3.3.1. Variação do C

Os teores médios de carbono estão entre 3,28 e 0,19%, respectivamente da superfície até 2,10 metros de profundidade (Figura 12). Os solos argilosos tem os maiores valores e os arenosos os menores. Em profundidade a redução dos teores de carbono é exponencial para todos os solos até os primeiros 20 centímetros, mantendo-se assim para os Latossolos e tornando-se lineares no Argissolo e Espodossolo. No Espodossolo, os valores são praticamente idênticos abaixo de 20 centímetros. Os teores dos Latossolos e Argissolo se igualam a 2,10 metros.

As variações laterais, dadas pelo coeficiente de variação, são menores que 28% nos Latossolos. O Latossolo de Manaus é o que possui a menor variação de todos os solos, com redução para menos de 10 % em profundidade. Nos solos arenosos a variação é maior, com o Espodossolo atingindo até 56 %. No Argissolo a variação está abaixo de 50 %, oscilando entre 20 e 30 %.

O Latossolo de Santarém possui teores de C em média de 20 a 30 % maiores que os de Manaus nos primeiros 50 cm superficiais (Figura 12). Aplicando-se o teste T para comparação de médias duas a duas, as diferenças são significativas ao nível de 5 % de probabilidade.

Os dados de carbono do Latossolo de Paragominas de Telles et al. (2002), semelhante em textura aos Latossolos do atual trabalho, foram obtidos com

fracionamento por densidade pelo método de Trumbore & Zheng (1996), com a retirada mais eficiente das raízes e carvões macroscópicos e de grande parte das raízes microscópicas. São semelhantes ao Latossolo de Manaus (Figura 12). Não existe ordem de grandeza da variação lateral para o Latossolo de Paragominas. Baseados nos dados de Camargo et al. (1999) para o mesmo solo, onde foi utilizado o método de rotina do laboratório no preparo das amostras, pode ser esperada uma variação de até 2 a 3 vezes maior em relação ao obtido no atual trabalho. Outras explicações para as diferenças podem ser associadas a diferenças na mineralogia e pequena perda de carbono mais solúvel no método de fracionamento por densidade (não quantificado).

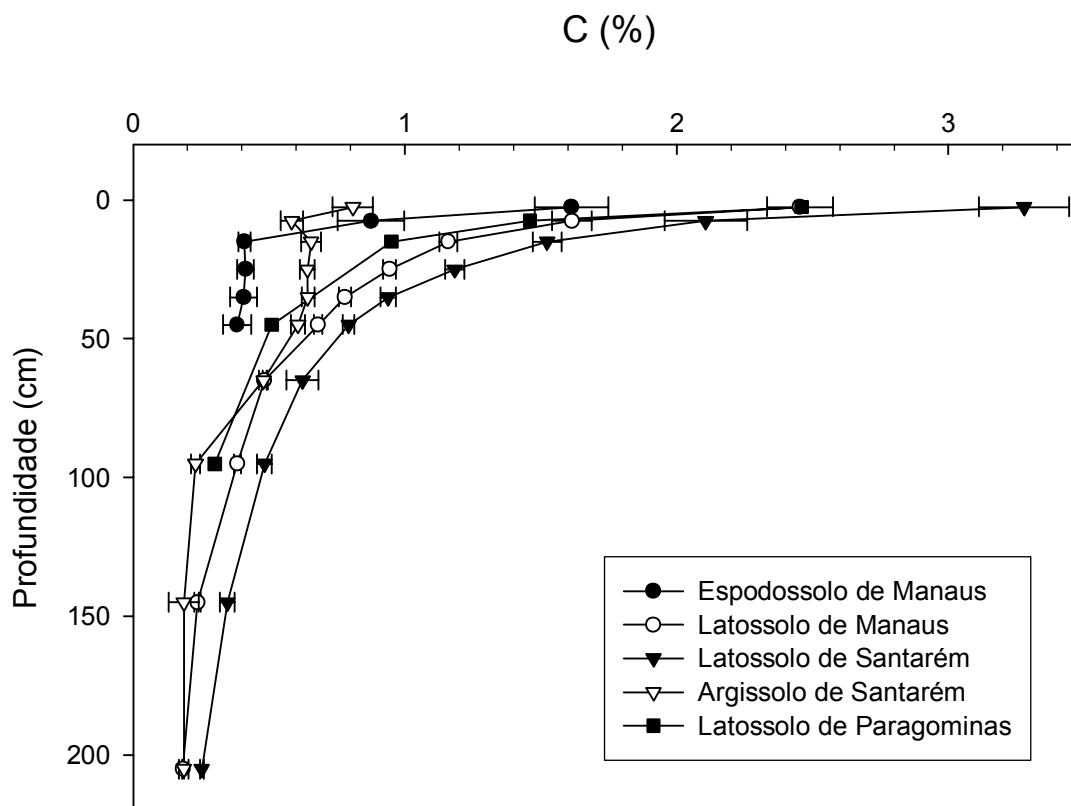


Figura 12 - Teores médios de carbono entre os solos de Manaus, Santarém e Paragominas e os respectivos erros padrões da média. O solo de Paragominas está como comparação, com dados de Trumbore em Telles et al. (2002).

3.3.2. Variação do N

Em geral, a variação do N acompanha a do C para os diferentes solos e profundidades, seguindo tendências semelhantes. Na Figura 13 estão as médias e os erros padrões para os diferentes solos e profundidades.

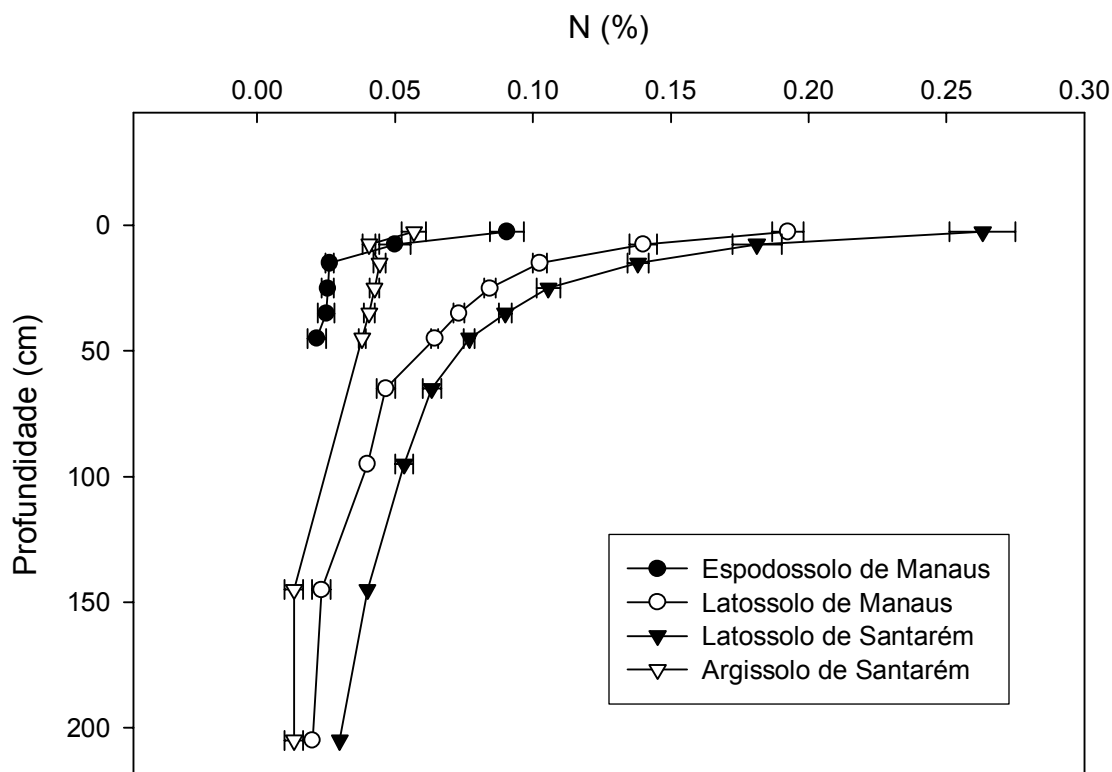


Figura 13 - Teores médios de N e os erros padrões da média, não existem dados de N para os Latossolos de Paragominas.

3.3.3. Variação da relação C/N

A relação C/N é similar entre os solos muito argilosos e entre os solos arenosos nos primeiros 50 centímetros (Figura 14). Para os Latossolos varia de 12,8 a 10,3, respectivamente de 2,5 até 45 de centímetros de profundidade, sendo maior no Latossolo de Manaus em relação ao de Santarém. O aumento da relação C/N para o Argissolo de Santarém é sistemático até os 45 centímetros iniciais desde 14,2 até 15,9, tendendo a valores mais semelhantes aos solos argilosos em profundidade. Para o Espodossolo não há tendências claras, podendo ser relacionado à elevada variação do C e N, próximo de 50 % e do grande erro analítico para valores muito baixos de C e N.

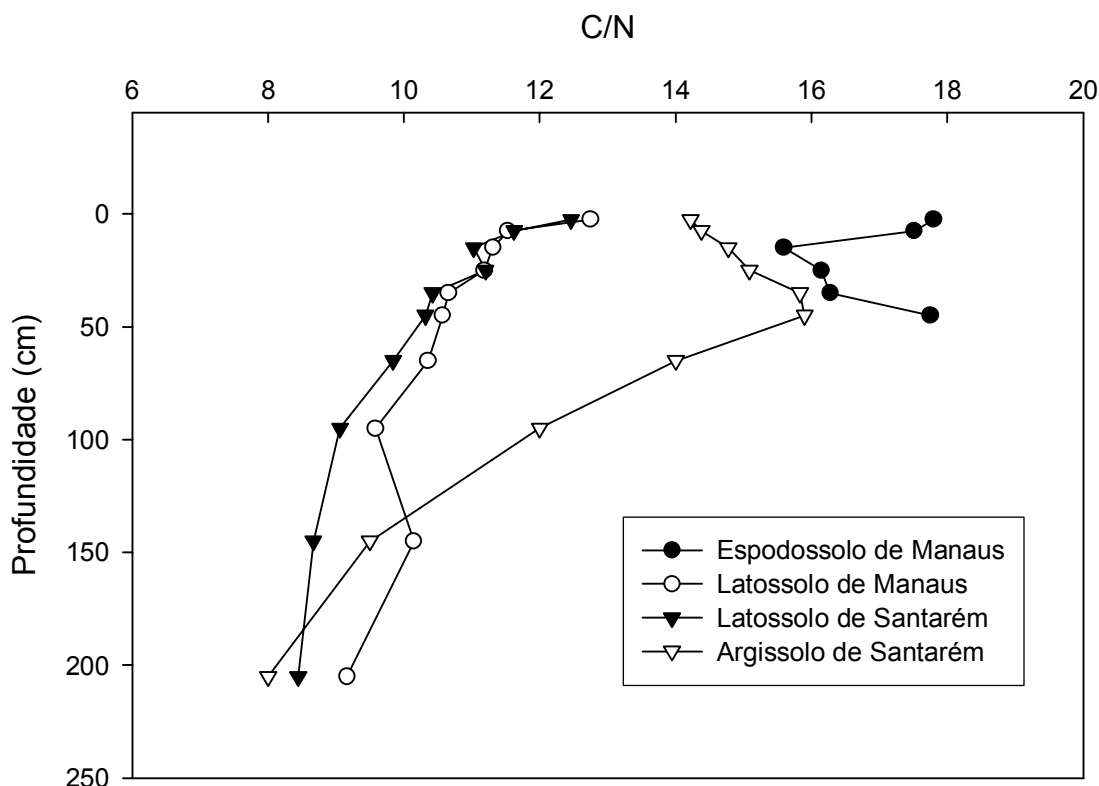


Figura 14 - Variação da relação C/N mostrando as tendências em profundidade para os solos mais representativos estudados.

3.3.4. Variação do $\delta^{13}\text{C}$

O $\delta^{13}\text{C}$ varia de -29,34 até -25,16 ‰, desde 5 centímetros no Espodossolo até 210 centímetros no Latossolo de Manaus (Figura 15). Os Latossolos são semelhantes nos primeiros 45 centímetros com enriquecimento em ^{13}C em profundidade. No Argissolo este enriquecimento é linear e no Espodossolo não há tendência em profundidade até os 50 cm medidos. A partir de 45 centímetros o enriquecimento em ^{13}C se estabiliza para o Latossolo de Santarém e Manaus. Abaixo até 100 centímetros há novamente um enriquecimento em ^{13}C no Latossolo de Manaus. O coeficiente de

variação é crescente do Latossolo até o Espodossolo, porém abaixo de 1,6 % para todos os solos.

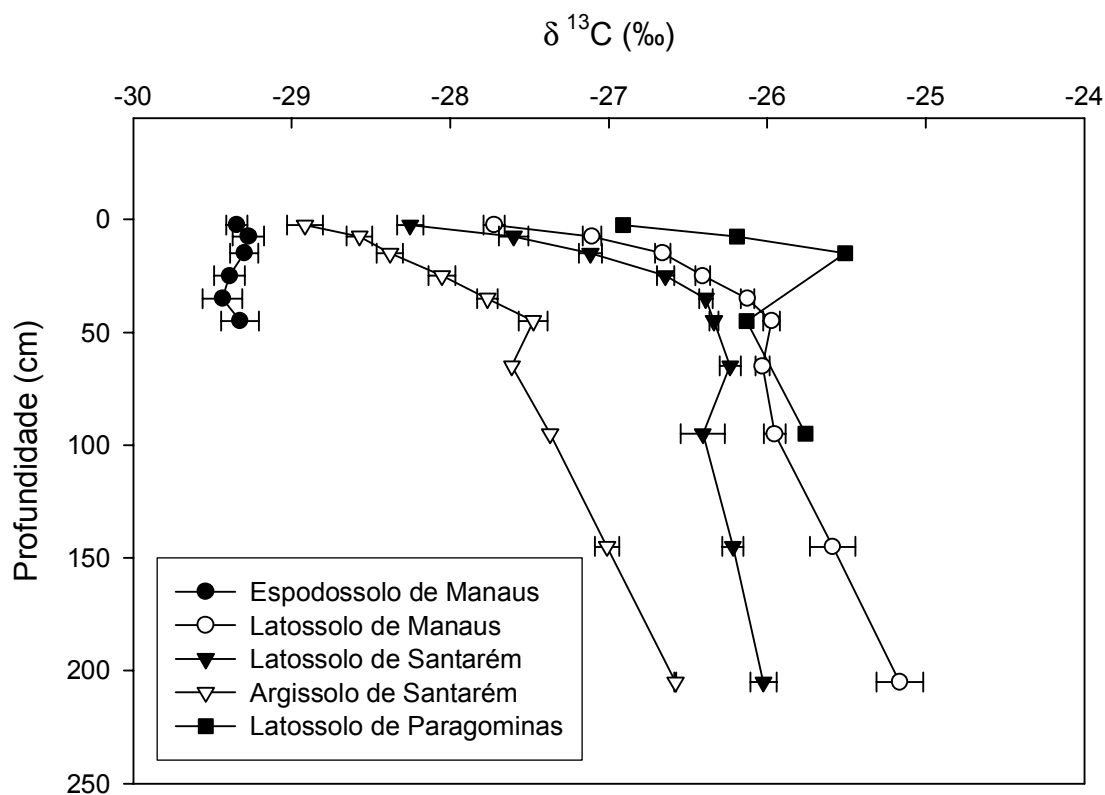


Figura 15 - Dados de $\delta^{13}\text{C}$ e respectivos erros padrões.

3.3.5. Variação do $\delta^{15}\text{N}$

O $\delta^{15}\text{N}$ (Figura 16) tem um comportamento semelhante ao $\delta^{13}\text{C}$ em meio bem drenado nos Latossolos e Argissolo (Figura 15), com enriquecimento do isótopo em ^{13}C em profundidade. No caso do Espodossolo, o valor do $\delta^{15}\text{N}$ é muito próximo do sinal da vegetação, similar aos valores de ^{13}C . Abaixo de 45 cm é difícil explicar a variação dos valores de ^{15}N devido ao erro analítico elevado para os Latossolos, pois

quase não existe N detectável (erro de 0,01 %). Os valores de N são muito baixos para os solos arenosos.

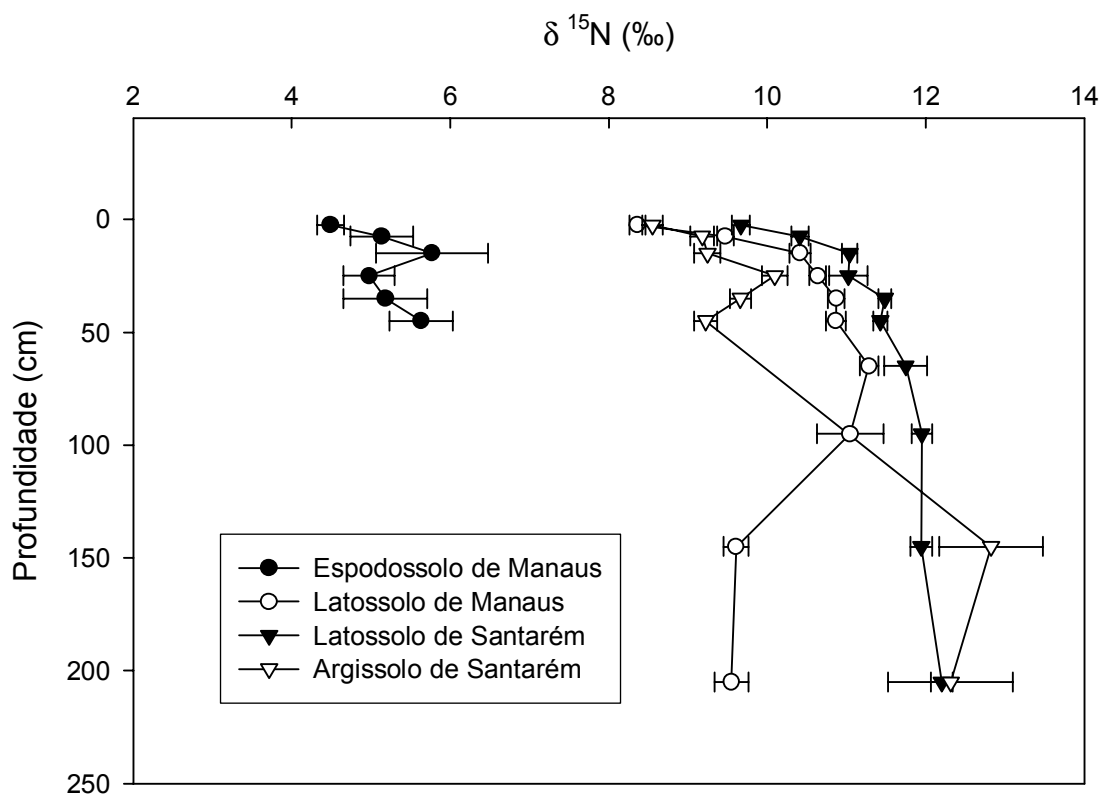


Figura 16 - Dados de $\delta^{15}\text{N}$ e respectivos erros padrões.

3.3.6. Variação do $\Delta^{14}\text{C}$

Com exceção do Espodossolo, que não apresenta tendências, há uma redução do ^{14}C em profundidade (Figura 17), relativamente linear e mais acentuada nos Latossolos. Nos primeiros 50 cm o carbono do Latossolo de Santarém é mais antigo que o Latossolo de Manaus, com uma inversão destes valores a partir de 75 centímetros. Isto é acompanhado de enriquecimento isotópico de ^{13}C e ^{15}N .

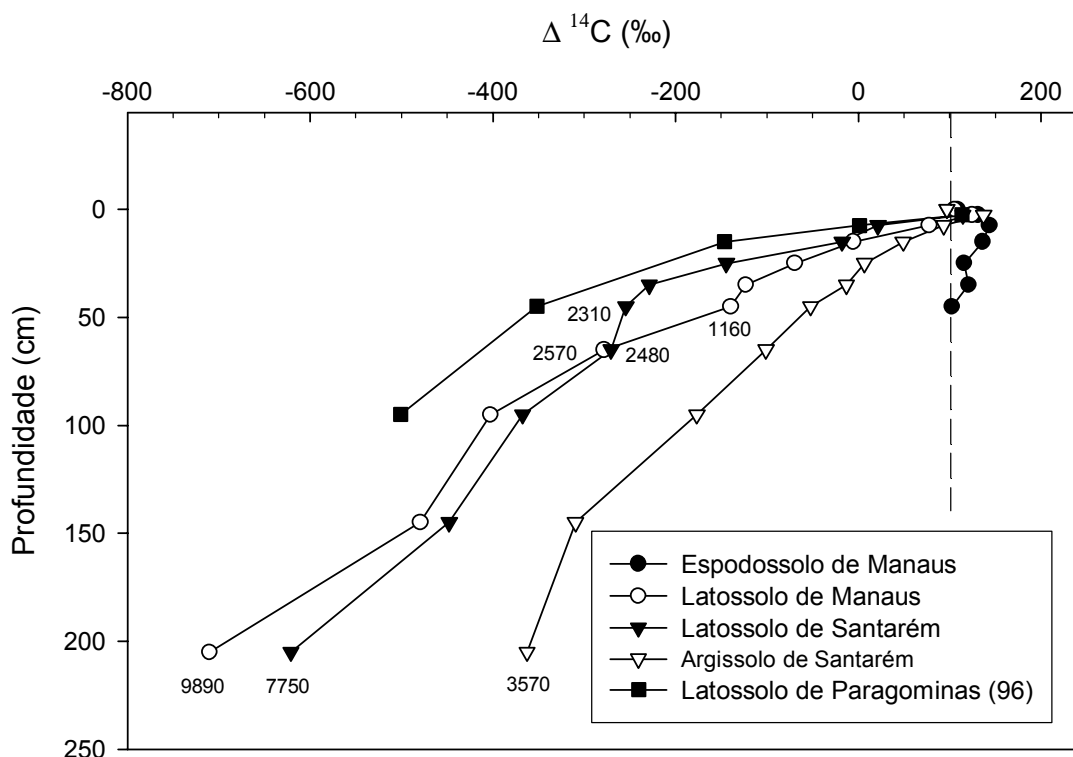


Figura 17 - dados de $\Delta^{14}\text{C}$ dos solos estudados. A linha vertical tracejada indica o atividade limite inferior para o ^{14}C do “efeito bomba”, acima deste valor o carbono é considerado moderno. O números próximos aos pontos são as idades em anos após o presente (1950) para os diferentes solos.

3.4. Número de amostras necessárias para obter a precisão do erro analítico para o C, N, ^{13}C e ^{15}N

Estimou-se o número de amostras necessárias para obter a precisão do erro analítico para o Espodossolo, Latossolo de Manaus e Santarém e Argissolo de Santarém. O cálculo é significativo ao nível de 5 % de probabilidade (teste t de student) para o C, N, ^{13}C e ^{15}N , respectivamente, 0,30 %, 0,01 %, 0,30 % e 0,50 % (Tabela 7). O coeficiente de variação (CV %) fornece a precisão do desvio padrão em relação a média. O número de amostras necessárias baseia-se na ordem de grandeza da variância em

relação ao erro analítico e o número de amostras utilizadas (16 por profundidade e solo).

Para mais informações ver Análise Estatística em Material e Métodos.

Tabela 7. número de amostras (Nº) necessárias para se obter a precisão do erro analítico nos principais solos estudados ao nível de 5 % e probabilidade e respectivos coeficientes de variação (CV %). Para os Latossolos utilizou-se a precisão de 10 % da média nas profundidade de 0-5 e 5-10 cm.

Prof (cm)	Espodossolo		Latossolo Manaus		Latossolo Santarém		Argissolo Santarém	
	CV %	Nº	CV %	Nº	CV %	Nº	CV %	Nº
C %								
2,5	33,3	58,4	19,7	17,6	20,3	18,7	36,5	17,6
7,5	56,0	48,5	16,8	12,9	28,9	37,9	27,9	5,3
15	22,3	1,7	11,4	3,5	14,1	9,3	22,2	4,3
25	29,7	3,1	10,0	1,8	11,9	4,0	17,1	2,4
35	47,7	7,6	11,3	1,6	11,9	2,5	14,5	1,8
45	48,8	7,0	9,5	0,8	10,8	1,5	17,5	2,3
¹³C								
2,5	-0,9	3,5	-1,0	3,6	-1,2	5,7	-1,6	10,5
7,5	-1,3	7,7	-0,9	2,8	-1,4	7,2	-1,1	5,2
15	-1,2	6,1	-0,7	2,0	-1,1	4,2	-1,2	5,6
25	-1,3	7,7	-0,7	1,7	-0,8	2,4	-1,2	5,8
35	-1,7	12,7	-0,7	1,5	-0,6	1,4	-0,9	3,5
45	-1,6	11,3	-0,8	2,1	-0,4	0,7	-1,3	6,7
¹⁵N								
2,5	14,9	8,2	4,7	2,8	4,8	3,8	5,9	4,6
7,5	30,7	45,1	4,2	2,9	4,1	3,3	6,5	6,4
15	49,1	144,4	5,1	5,1	3,5	2,7	7,2	8,1
25	25,8	30,0	4,0	3,2	8,8	17,0	6,3	7,3
35	41,5	79,0	3,9	3,2	2,8	1,9	5,6	5,3
45	25,6	37,8	4,7	4,7	3,1	2,3	6,5	6,5
N %								
2,5	27,2	27,5	11,8	6,3	18,1	14,9	31,3	14,3
7,5	45,6	23,6	13,4	8,2	19,7	17,7	22,9	3,9
15	24,5	1,8	10,4	5,1	11,3	11,0	20,1	3,6
25	34,8	3,6	9,6	3,0	16,2	13,3	16,1	2,1
35	49,2	7,0	10,8	2,9	9,9	3,6	19,0	2,7
45	56,4	6,7	8,0	1,2	10,3	2,9	14,3	1,3

Os Latossolos muito argilosos no geral possuem CV % menores que os solos arenosos. O Latossolo de Manaus possui o menor CV %, seguido do Latossolo de

Santarém, Argissolo de Santarém e Espodossolo para todas as variáveis e profundidades. O CV% é normalmente maior próximo a superfície.

Segundo Pimentel (1990), valores de CV % abaixo de 10 % são muito baixos e precisos, médios entre 10 e 20 %, altos entre 20 e 30 % e muito altos acima de 30 %.

Para o carbono os valores de CV% estão entre altos a muito altos para o Espodossolo e para os demais solos são em geral entre baixos e médios abaixo de 15 cm. Próximo da superfície o CV % é de médios até muito elevados. Para o nitrogênio o CV % é semelhante ao do carbono.

O valores de CV% para o ^{13}C são baixos para todos os solos e profundidades. Isto ocorre também para o ^{15}N , com exceção do Espodossolo, com valores de CV % médios a muito altos.

Os valores de desvio padrão estão normalmente inferiores ao erro analítico para todas as variáveis, com exceção do ^{15}N para o Espodossolo e de 0-5 e 5-10 cm para os Latossolos. No caso dos Latossolos utilizou-se como medida de precisão o erro abaixo de 10 % da média, ao invés do erro analítico para estas profundidades. Nas demais profundidades para os Latossolos e em todas as profundidades para os demais solos utilizou-se o erro analítico.

Quando avalia-se a precisão através do número de amostras necessárias em relação ao erro analítico, algumas inversões acontecem em comparação ao CV %. Os resultados dos solos arenosos se tornam mais precisos, com exceção do ^{15}N para o Espodossolos. O Latossolo de Manaus continua sendo o mais preciso, seguido do Argissolo de Santarém, Latossolo de Manaus e Espodossolo.

O número de amostras necessárias para a precisão requerida é em geral menor que 10 amostras para o ^{13}C e ^{15}N . Para o ^{15}N no Espodossolo o número é muito elevado, podendo chegar a 144 amostras para a profundidade de 15 cm. Para o ^{13}C são necessários respectivamente para o Espodossolo, Latossolo de Manaus, Latossolo de Santarém e Argissolo de Santarém, os seguintes número de amostras: entre 4 - 13, 2 - 4, 1 - 7 e 4 - 11. Para o ^{15}N , na mesma ordem: 8 - 144, 3 - 5, 2 - 17 e 5 - 8 amostras.

Para o carbono próximo a superfície são normalmente necessárias mais que 16 amostras para obter a precisão e do erro analítico ou de 10 % da média para os Latossolos. Isto é válido também para o N no Espodossolo e Latossolo de Santarém. Para o C nas profundidades entre 15 e 45 cm o número de amostras necessárias são, respectivamente para o Espodossolo, Latossolo de Manaus, Latossolo de Santarém e Argissolo de Santarém: 2 - 8, 1 - 4, 2 - 9 e 2 - 4 amostras. No caso do ^{15}N nas mesmas profundidades e sequência: 2 - 7, 1- 5, 3 -13 e 1 e 4. amostras.

Para a Estatística Experimental são utilizados números acima de 20 repetições para se obter uma precisão razoável (Pimentel 1990). Com exceção do ^{15}N para o Espodossolo e nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm para o C e N, há uma elevada precisão nos dados obtidos.

3.5. Raízes, carvões e ^{14}C

Foram analisados apenas as raízes dos Podzois de Manaus de 0-5 e 5-10 cm, com as idades sendo crescentes das raízes menores que 0,250 mm a 1 mm, de menos de 1 ano até 8 anos.

Os carvões analisados não foram limpos, podendo conter carbono recente adsorvido. De 0-5 cm para o Latossolo de Manaus, Latossolo de Santarém, Argissolo de Santarém possuem, respectivamente, moderno, 1240 anos e moderno. Para a profundidade de 5-10 cm no Latossolo de Manaus, Latossolo de Santarém, Argissolo de Santarém possuem em anos, respectivamente, 1090, 1310 e 2480. As amostras modernas foram limpas na sequência ácido (HCl 0,5 N), alcalino (NaOH 2 %) e ácida (HCl 0,5 N), tendo idades acima de 300 anos. A idade não significa o tempo que ocorreu o incêndio, pois os carvões podem ser provenientes de árvores com centenas de anos.

3.6. *Separações de carvões macroscópicos e microscópicos*

Foram apenas realizadas extrações nos solos principais, com exceção do Espodossolo, nas profundidades de 0-5 e 10-20 centímetros. Foi testada a estimativa de carvões microscópicos multiplicando-se por 10 o teor de carbono associado aos carvões macroscópicos, baseado em Skjemstad et al. (1999) (Tabela 8).

No geral, extraíram-se mais carvões microscópicos nas 3 primeiras extrações, sendo a seguir extraído material de natureza coloidal. Enquanto para o Argissolo não havia praticamente mais material a ser extraído após a sétima extração, para os Latossolos continuou-se até a décima quinta, sendo finalizado o processo de extração, embora continuasse a sair carvões na dimensão coloidal. Para todos os solos extraíram-se mais carvões microscópicos de 0-5 cm em relação a 10-20 cm de profundidade.

Formas solúveis de carbono e ferro foram extraídas principalmente no Argissolo. A extração de carvões microscópicos é mais eficiente em solos arenosos (Tabela 8). Principalmente nos solos argilosos, foi removido um material coloidal amarelado, possivelmente ferrihidrita.

Tabela 8. Valores médios de C associado a carvões em relação ao carbono total do solo, erro padrão (EP), estimativa de carvões microscópicos e carvões microscópicos separados. A estimativa de carvões microscópicos foi baseada em (Skjemstad et al., 1999) multiplicando-se por 10 o teor de carbono associado aos carvões macroscópicos.

Profundidade (cm)	Carvões macroscópicos C-carvões/massa solo (%)			Carvões microscópicos C-carvões/C solo (%)	
	Média %	EP	CV%	Estimativa a partir de carvões macroscópicos	Carvões microscópicos separados
Latossolo Manaus					
0-5	0,0117	0,0067	166	4,76	24,32
5-10	0,0081	0,0047	118	5,01	-
10-20	-	-	-	-	3,77
Latossolo Santarém					
0-5	0,0261	0,010	77	7,96	20,63
5-10	0,0133	0,002	30	6,32	-
10-20	-	-	-	-	12,28
Argissolo Santarém					
0-5	0,0093	0,002	52	11,53	56,43
5-10	0,0097	0,003	67	16,71	-
10-20	-	-	-	-	8,76

Para os Latossolos os carvões microscópicos separados explicam parte da variação encontrada nos teores totais de carbono nos solos de Santarém e Manaus (Tabela 9), a maior parte da diferença entre os solos é explicada pelas diferenças na fração com densidade maior que 2 g.cm^{-3} . Para os Argissolos de Santarém os carvões microscópicos separados são importantes para o estoque total de carbono.

Tabela 9. Diferenças percentuais no teor de carbono total e carbono associado a carvões na fração leve (abaixo de 2 g.cm^{-3}) entre Santarém e Manaus, sempre maiores para os Latossolos de Santarém.

Profundidade (cm)	C Total (%)	C- Carvões (%)	Contribuição do C-carvões para diferença total(%)
0-5	33,33	16,61	7,58
10-20	20,59	388	2,57

3.7. *Estoques de C*

Os estoques de raízes apresentam uma variação grande, normalmente acima de 50 % (Tabela 10). A contribuição de raízes para o estoque de carbono é em média acima de 40 % do estoque total nos primeiros centímetros, reduzindo para cerca de 10 % em profundidade. O Argissolo de Santarém apresenta de 0-10 cm o menor teor de carbono total, não existindo diferenças significativas entre os demais solos nesta profundidade.

A 2,10 metros o maior estoque de carbono total é de Santarém, de $151,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$, não existindo diferenças no estoque de raízes em relação ao Latossolo de Manaus. Com exceção dos primeiros 10 cm, os estoques do Latossolo de Santarém sem raízes são sempre maiores que os do Latossolo de Manaus, a despeito do adensamento maior em profundidade deste solo.

A comparação pela mínima diferença significativa, utilizando as médias dos teores de carbono, densidade e seus respectivos erros padrões demonstraram que as diferenças são mantidas, tendo o Latossolo de Santarém em média de 20 a 30 % a mais de carbono que o Latossolo de Manaus. Estas diferenças são associados à mineralogia e carvões entre áreas.

Tabela 10. Estoque de carbono ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de raízes, matéria orgânica-mineral (sem raízes) e carbono total de Manaus Santarém e Paragominas (Camargo et al., 1999).

Profundidade (cm)	Matéria orgânica-mineral		Raízes		Carbono total	
Latossolo de Paragominas						
0-10			0,7		26,0	
10-100			1,4		76,0	
Total			2,03		102	
Latossolo de Manaus						
0-10	19,2	(2,9) ¹	8,8	(3,6)	28,0	(4,9)
10-40	30,4	(2,7)	3,0	(1,7)	33,4	(3,2)
40-100	29,5	(2,0)	2,0	(0,8)	31,6	(2,2)
100-150	16,2	(0,8)	0,9	(0,6)	17,1	(1,1)
150-210	14,7	(0,6)	0,3	(0,2)	15,0	(0,6)
Total	110,0	(4,6)	15,0	(4,1)	125,0	(6,3)
Espodossolo de Manaus						
0-10	12,5	(3,9)	8,1	(3,4)	26,9	(5,5)
10-40	18,0	(4,7)	1,3	(0,2)	19,3	(4,7)
Total	30,5	(6,1)	9,3	(3,4)	46,2	(7,2)
Latossolo Santarém						
0-10	24,6	(4,5)	7,0	(3,2)	31,7	(5,7)
10-40	39,1	(4,0)	0,9	(0,4)	40,0	(4,1)
40-100	38,6	(3,1)	1,3	(0,7)	39,9	(3,2)
100-150	20,7	(1,6)	0,2	(0,1)	20,9	(1,6)
150-210	19,0	(1,3)	0,0	(0,0)	19,0	(1,3)
Total	142,1	(7,1)	9,4	(3,3)	151,5	(8,0)
Argissolo de Santarém						
0-10	8,7	(2,1)	3,9	(1,7)	12,5	(2,7)
10-40	27,7	(1,8)	1,5	(0,9)	29,3	(3,7)
40-100	34,8	(2,2)	2,1	(0,9)	36,9	(4,5)
100-150	13,9	(2,0)	0,3	(0,1)	14,2	(4,0)
150-210	16,1	(1,5)	0,1	(0,0)	16,2	(3,0)
Total	101,2	(4,3)	7,9	(2,1)	109,1	(8,1)

¹ desvio padrão entre parenteses, com respectiva distribuição de erros de C, densidade e em profundidade nos valores acumulados.

3.8. Modelagem dos dados de C, N, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$

A relação da variação do C com o $\delta^{13}\text{C}$ não é linear (Figura 18). A relação C/N com o $\delta^{15}\text{N}$ é linear (Figura 19). Baseados nestas relações foram gerados modelos estatísticos. Os dados de C, N, ^{13}C e ^{15}N são de amostras sem raízes e carvões macroscópicos, sendo os resultados semelhantes estatisticamente ao método de rotina do Laboratório, que incluem raízes e carvões macroscópicos (ver diferenças no preparo de amostras nos resultados destas variáveis).

Os modelos foram escolhidos pela sua simplicidade e capacidade de previsão, não tendência entre os valores previstos e observados, resíduos (erros) sem correlação e pela capacidade de precisão dos dados de solos semelhantes. O R^2 apenas informa um ajuste geral dos dados dos modelos. É muito controversa a aceitação do cálculo do R^2 para ajuste não linear (Kvalseth, 1985), sendo que o SAS (SAS, 1991) não oferece a opção deste cálculo.

Foi preferido o ajuste não linear pelo método de Gauss-Newton em relação a transformação de variáveis para a linearização dos ajustes. O ajuste fixo por transformação e linearização das variáveis não representa a realidade, sendo apenas uma aproximação. Nas Figura 20 e 21 são apresentados o modelo e os resíduos obtidos em relação aos dados observados para a previsão do $\delta^{13}\text{C}$ (‰). O modelo foi gerado com os 16 pontos do Latossolo muito argiloso de Manaus, com dados de até 50 cm de profundidade. Não existem tendências no modelo, é simples e consegue prever com precisão de até 3 vezes o erro analítico de 0,3 ‰.

Abaixo é apresentado o modelo para o ^{13}C :

$$\delta^{13}\text{C} = -26,50715 * C^{(0,049530)} ; \text{ onde } \delta^{13}\text{C} \text{ em (‰)} \text{ e } C \text{ em \%}.$$

Para o $\delta^{15}\text{N}$ o modelo foi obtido com os dados dos Latossolos muito argilosos de Manaus e Santarém. O ajuste apenas com o N foi muito preciso para prever os dados de $\delta^{15}\text{N}$ do Latossolo de Manaus e pouco preciso para prever os valores dos Latossolos de Santarém e não será apresentado. Foram 32 pontos com 6 profundidades superficiais (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50). Entram as variações C/N e profundidade, em um ajuste linear multivariado (Figura 22):

$$\delta^{15}\text{N} = 14,5926 - 0,4096 * (\text{C:N}) + 0,02468 * \text{profundidade} \quad R^2 = 0,5327$$

onde; $\delta^{15}\text{N}$ em (‰), C e N em % e profundidade em centímetros.

Também é um modelo que não apresenta tendências e com precisão de duas vezes o erro analítico de 0,5 ‰.

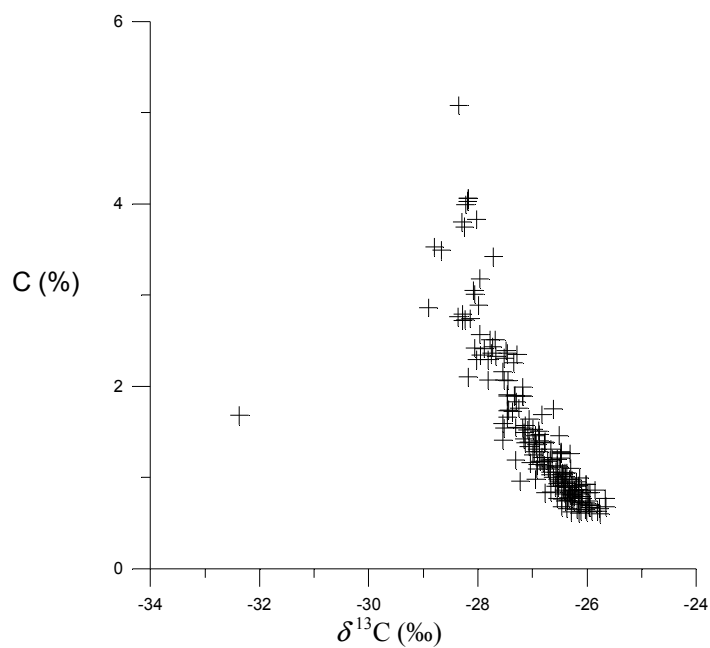


Figura 18 - Relação do $\delta^{13}\text{C}$ com o carbono total.

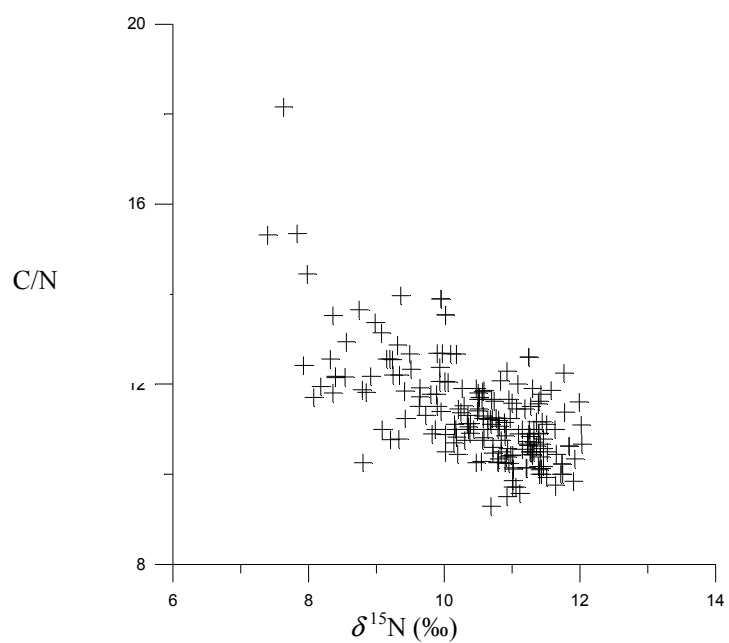


Figura 19 - Relação a $\delta^{15}\text{N}$ com a relação C/N.

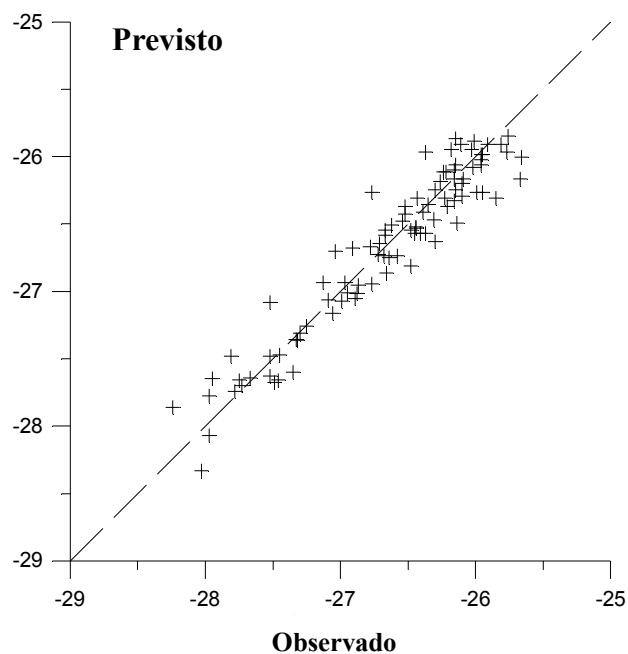


Figura 20 - Modelo estatístico gerado com Latossolo de Manaus com todos os eixos em unidades de $\delta^{13}\text{C}$ (‰), os valores previstos estão próximos dos observados e sem tendências.

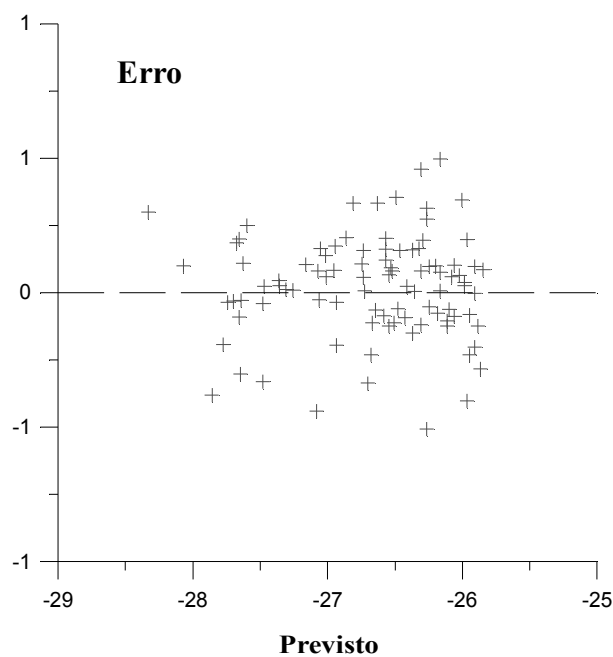


Figura 21 - O modelo gerado com Latossolo de Manaus com todos os eixos em unidades de $\delta^{13}\text{C}$ (‰), os erros em relação aos valores previstos estão próximos do erro analítico.

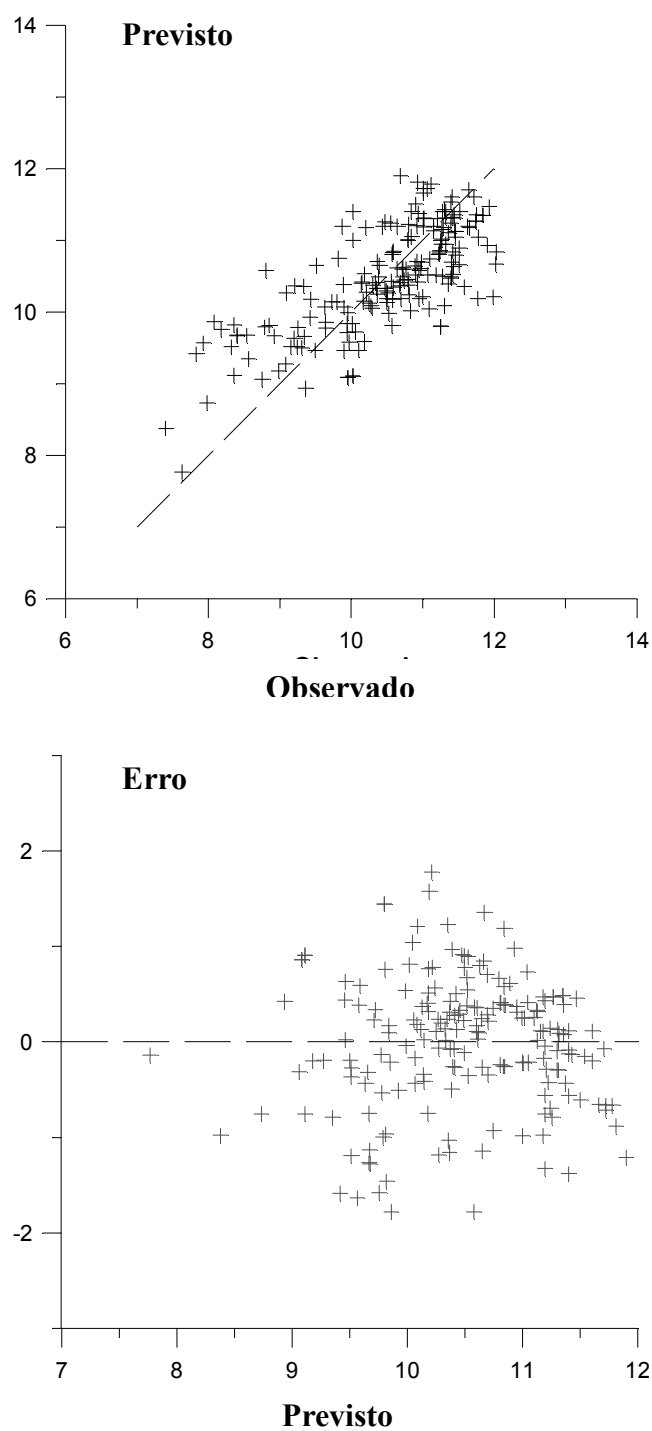


Figura 22 - Modelo para $\delta^{15}\text{N}$ obtido com os dados dos Latossolos de Manaus e Santarém.

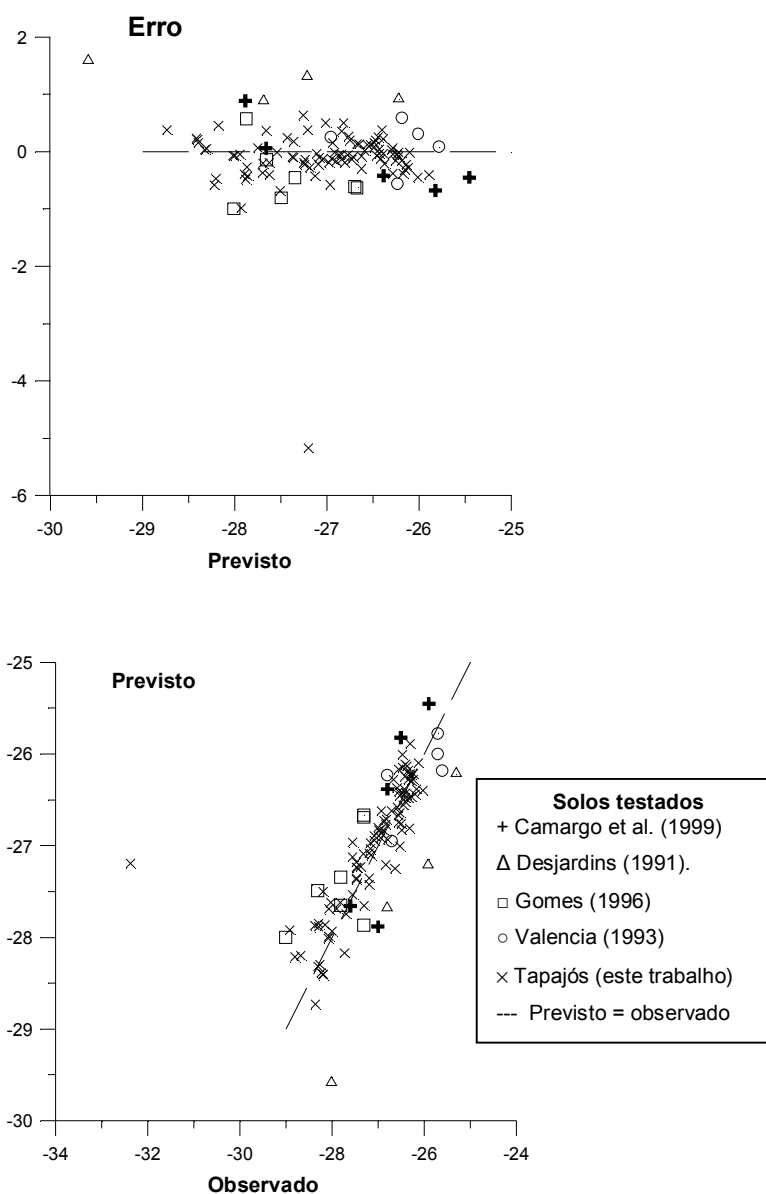
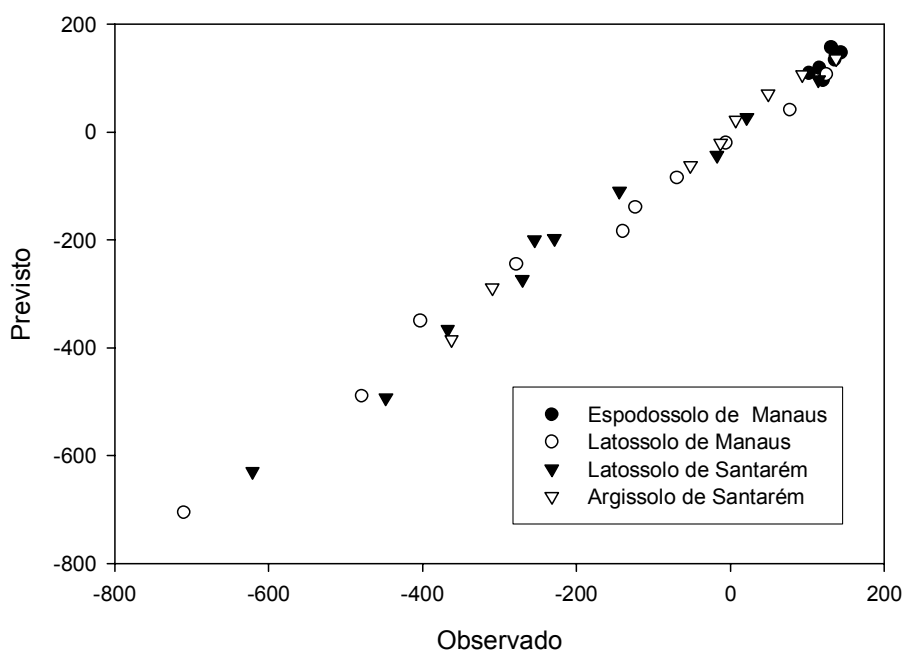


Figura 23 - Teste do modelo gerado em Manaus para o $\delta^{13}\text{C}$ com os dados de solos similares na Amazônia literatura e os dados do Latossolo muito argiloso de Santarém. Todos os eixos em $\delta^{13}\text{C}$ (‰).

O modelo para previsão de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) apresenta uma precisão próxima de 1 ‰, similar ao testado com os próprios dados do modelo. O modelo foi testado com dados publicados na literatura de Camargo et al (1999), Desjardins et al. (1991), Gomes (1996) e Valencia (1993) (Figura 23).

3.9. *Modelo para previsão do ^{14}C a partir do C, N e profundidade*

A variação do ^{14}C nos solos estudados, nas diferentes profundidades é explicada por modelagem estatística multivariada (Figura 24), com coeficiente de determinação de 0,9894. Os coeficientes de determinação parciais para cada variável do modelo são respectivamente para a Profundidade*C, $\delta^{13}\text{C}/\text{N}$, $1/\text{C}$ e $\delta^{13}\text{C}/\text{C}$, 0,8214, 0,0722, 0,0935 e 0,0023. As relações são significativas ao nível de 1 %, sendo 2 % para a relação $\delta^{13}\text{C}/\text{C}$. O erro entre os valores previstos e observados está abaixo 50 % e próximo da variação natural para os solos (Camargo et al., 1999). Não existem tendências no modelo.



$\Delta^{14}\text{C} = 170,0589 - 7,34689 \cdot \text{prof} \cdot \text{C} - 412,346 \cdot \text{N} - 0,33774 \cdot \text{C13} / \text{N} - 8,92344 \cdot \text{C13} / \text{C}$ $R^2 = 0,9894$
 ; prof = profundidade (cm), C = carbono (%), N = nitrogênio (%) e C13 = $\delta^{13}\text{C}$ (‰).

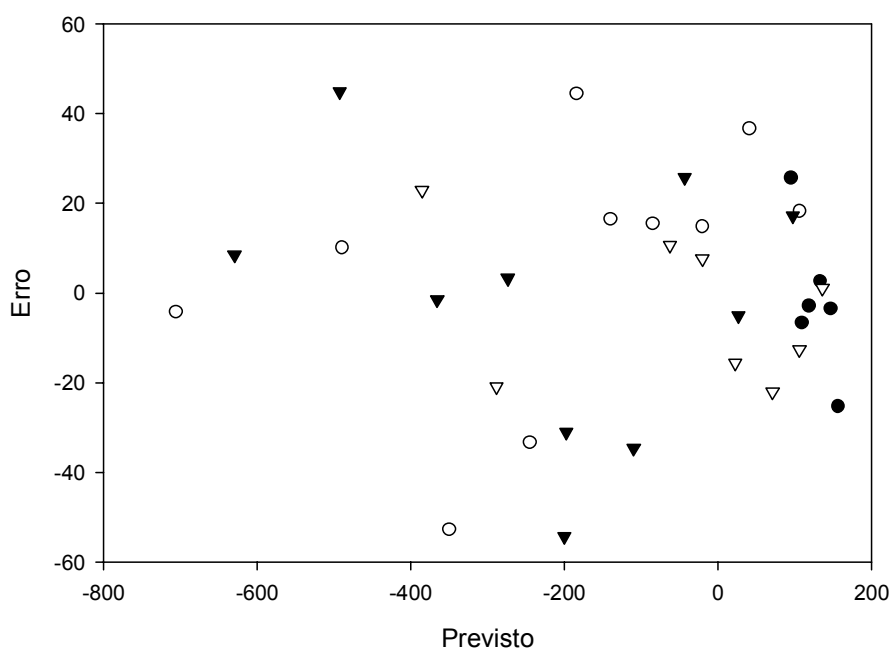


Figura 24 - Relação obtida em o C, N, ^{13}C e os dados de ^{14}C nos solos estudados. Na figura de cima o modelo com os valores previstos e observados. Na figura de baixo os erros em relação aos valores previstos. Todos os eixos em $\Delta^{14}\text{C}$ (‰).

4. DISCUSSÃO

Serão discutidas inicialmente a caracterização dos solos e sua relação com variação do estoque e do tempo de ciclagem do carbono. Isto embasará o teste do estado de equilíbrio dinâmico do carbono no Latossolo de Manaus, com medidas históricas de estoque e tempo de ciclagem.

A seguir será avaliada a influência dos carvões no estoque e no tempo de ciclagem do carbono nos solos estudados. O modelo Century será testado quanto à capacidade para a previsão de carvões.

A discussão será finalizada com a simulação do aumento da produtividade do ecossistema e a capacidade de acúmulo de carbono no Latossolo de Manaus. Estes resultados serão comparados com Malhi et al. (1999) e Telles et al. (2002).

4.1. *Caracterização dos solos, variação nos estoques e tempo de ciclagem*

4.1.1. Controle do estoque e tempo de ciclagem do carbono associado a textura, composição química e drenagem dos solos

O controle principal do teor de carbono e do tempo de ciclagem é associado a textura, como em Parton et al. (1987) e Schimel et al. (1994). Nos solos tropicais além da textura, o teor e forma de ferro estão associados à agregação e a

proteção mais eficiente do carbono à decomposição (Feller & Beare, 1997). Para solos com teor de argila semelhantes, como o Espodossolo de Manaus e o Argissolo de Santarém as diferenças podem ser relacionadas à mineralogia, teor de ferro e drenagem. Para os Latossolos muito argilosos as diferenças no teor de carbono podem ser explicado da mesma forma, só que entre estes solos a diferença de drenagem seria interna, com o adensamento maior em profundidade e a formação de lençol suspenso próximo de 75 cm de profundidade no Latossolo de Manaus.

Quimicamente o ataque sulfúrico reage principalmente com os minerais da fração argila, sendo que as frações mais grosseiras são consideradas praticamente inertes, sendo constituídas principalmente de minerais resistentes química e fisicamente, como o quartzo (Vieira & Santos, 1987). Como não existe a separação da fração argila no método, parte do SiO_2 tem origem do quartzo e não de argilominerais. Isto ocorre mais frequentemente próximo a superfície, pois normalmente contém mais areia e esta é quimicamente e fisicamente mais alterada que em profundidade, que aumenta a capacidade de extração pelo ataque sulfúrico. Assim, explica-se os valores mais elevados de K_i e K_r próximo a superfície para os solos estudados.

No caso dos Argissolos/Latossolos argilosos a muito argilosos estes valores de K_i estão próximos de 2, típicos da caulinita. Nos Latossolos muito argilosos

os valores de Ki médios são de 1,72 e 1,86 e Kr 1,58 e 1,66, respectivamente para Manaus e Santarém. O Latossolo de Santarém é ligeiramente menos intemperizado que Manaus, tendo os dois solos texturas similares. A presença de gibsita é outro indicativo do estágio mais avançado de intemperismo do Latossolo muito argiloso de Manaus em relação ao mesmo solo de Santarém. As pequenas diferenças de agregação e adensamento em profundidade podem ser explicadas pelo teor de ferro e a presença de gibsita (ver dados de densidade na Figura 11). O aumento do teor de ferro favorece o desenvolvimento da estrutura microagregada, que se comporta como esqueleto mais grosseiro, melhorando a drenagem e reduzindo a densidade. A presença de gibsita é relacionada ao maior adensamento em profundidade nos Latossolos. O Latossolo de Santarém possui mais ferro e não contém gibsita.

Segundo Vieira & Santos (1987), baseado no dados do projeto RADAM, nos solos da Amazônia os valores de Ki extremos nos Latossolos Amarelos argilosos a muito argilosos, desde da profundidade a superfície são de 1,13 até 2,34, com média próxima de 1,8 para os perfis analisados. Para os Argissolos Vermelho Amarelo textura média a argilosa distróficos os extremos em profundidade e superfície são de 1,31 a 2,47, com média geral dos perfis de cerca de 2,1. Para os Podzóis os extremos são 9,51 no B espódico e 23,25 na superfície, a média no B espódico é de 2,06 e 5,26 no

horizonte A. Os valores extremos citados em Vieira & Santos (1987) são dos vários perfis estudados e não tem relação entre si.

Na difração de RX da fração argila e silte não há quartzo presente nos solos arenosos. A elevada presença de SiO_2 nos solos arenosos estudados não pode ser associado à presença de quartzo nestas frações granulométricas. O ataque sulfúrico dissolve uma fração do quartzo das frações arenosas. Isto também pode indicar uma menor estabilidade de parte do quartzo nos solos arenosos e é relativamente comum para estes solos muito intemperizados porém pouco evoluídos (Vieira & Santos (1987). No Espodossolo, dado o ambiente geoquímico muito agressivo, com a oscilação do lençol próximo da superfície, com ciclos de aerobiose e anaerobiose atuantes na ferrólise há a destruição dos argilominerais e degradação maior do esqueleto silicoso com perdas dos elementos em solução.

4.1.2. Coleta e preparo de amostras influenciando os dados analíticos de C, N, ^{13}C e ^{15}N

A redução da variação dos dados obtida neste trabalho é devido a três procedimentos: refinamento morfológico na coleta das amostras, com delimitação de

manchas homogêneas de solo, utilização do quarteador de Jones e remoção de raízes e carvões macroscópicos.

A distribuição de raízes é muito heterogênea tanto lateral quanto verticalmente (ver nos estoques de carbono), assim como os carvões macroscópicos. Em profundidade a variação dos dados no método de rotina é normalmente maior. O aumento da profundidade é associado a redução no teor de carbono, sendo mais importante a retirada de raízes e carvões.

Embora tenha sido retirado apenas as raízes e carvões acima de 2 mm no método de rotina nas amostras do primeiro platô, refletindo valores maiores de carbono, as médias são estatisticamente iguais ao método utilizado no segundo platô. A não retirada de raízes e carvões introduz uma variação maior, redução da homogeneidade das variâncias e uma provável diminuição da precisão na quantificação do teor associado às raízes. Outra vantagem do procedimento utilizado neste trabalho é a separação da fração ativa de carbono no solo associado a raízes e outra passiva associada a carvões macroscópicos.

4.1.3. Relação entre a variação dos isótopos de C e N

A variação natural dos isótopos estáveis de carbono fornece informações sobre o grau de evolução da matéria orgânica do solo (Melillo et al. 1989; Berg et al.

1993) e está associada a formas de proteção físicas (Vitorello et al, 1989) e químicas do carbono nos solos (Volkoff, 1982; Volkoff, 1987).

A relação C/N informa o grau de humificação da MOS. Nos Latossolos de Manaus e Santarém os valores são semelhantes e estão de acordo com a redução esperada para próximo de 10 na relação C/N à 50 cm, correspondendo a MOS mais humificada. No Espodossolo de Manaus e no Argissolo de Santarém o teor de argila é menor que 15 %, sendo que os dois apresentam relações C/N altas, acima de 14 nos primeiros 50 centímetros. No Espodossolo, o carbono recente indicado pelos valores de ^{13}C , ^{15}N e ^{14}C explicam o caminhamento do carbono pouco humificado no solo, expresso também na elevada relação C/N. No Argissolo os carvões são muito frequentes e podem estar elevando a relação C/N. Os baixos teores de N nos solos arenosos e a alta variação, associado ao erro analítico, também podem explicar estes valores da relação C/N.

Verticalmente, nos diferentes solos estudados, associado à redução no teor de C, N e da atividade do ^{14}C , há o enriquecimento em ^{13}C e ^{15}N . Isto é mais pronunciado nos Latossolos muito argilosos e menos nos Argissolos textura média. No Espodossolo a redução do teor de C e N é relacionada à constância na composição isotópica nos primeiros 10 cm e em profundidade a valores constantes de C e N também.

A MOS caminha no perfil quartzoso grosseiro, praticamente sem ferro, em formas pouco humificadas. A elevação do lençol freático até a superfície no período chuvoso auxilia a uniformizar os valores isotopicamente. O caminhamento vertical do carbono é típico neste tipo de solo, sendo observado também por Cornu et al. (1998) e Lucas et al. (1984).

O modelo para previsão do ^{13}C reflete a correlação com o carbono para os Latossolos, ou seja quanto menor o teor de carbono maior o enriquecimento em ^{13}C , sendo isto acompanhado do aumento da profundidade no perfil. Para o ^{15}N a relação C/N e sua variação em profundidade é mais significativa para explicar a variação encontrada.

No Latossolo de Manaus o adensamento maior a partir de 75 cm reduz ainda mais o caminhamento de formas mais móveis de ácidos orgânicos, como os ácidos fúlvicos livres. Isto ocorre em uma escala de tempo de centenas a milhares de anos podendo explicar a atividade menor do ^{14}C em profundidade e a maior idade do carbono em relação ao Latossolo de Santarém.

A redução da atividade do ^{14}C natural em profundidade é associado ao enriquecimento em ^{13}C (Scharpenseel et al., 1989; Scharpenseel & Becker-Heidmann, 1992; Telles et al., 2002). O modelo estatístico gerado para a previsão da atividade do ^{14}C nos solos estudados reflete diferenças de textura, teor de ferro, mineralogia e

drenagem. Estas diferenças são expressas na variação vertical do C, N, e ^{13}C nos solos. O elevado coeficiente de determinação e o sentido físico das relações do modelo podem ser utilizados para estimar o ^{14}C natural e em modelos ecológicos.

4.1.4. Equilíbrio na entrada e saída de carbono dos solos com o tempo (“Steady State”) e sequestro de carbono nos Latossolos de Manaus

Globalmente as florestas estão atuando como drenos líquidos de carbono da atmosfera (Goulden et al., 1996; Grace et al., 1995). As florestas tropicais participam com 60% do estoque de carbono das florestas e 59 % deste estoque está alocado nos solos (Dixon et al., 1994). Cerca de 2/3 do carbono que está sendo drenado para estas florestas podem estar sendo alocados no aumento da matéria orgânica humificada dos solos (Malhi et al., 1999). Isto representa cerca de 3 % do estoque de 120 Mg.ha^{-1} no primeiro metro destes solos (Cerri & Volkoff, 1987; Chauvel, 1982).

Uma maneira de medir a ordem de grandeza da contribuição dos solos para o sequestro de carbono destas florestas é a determinação da variação histórica dos estoques de carbono. A relação do teor de carbono é não linear em profundidade com o Latossolo deste trabalho, o de Cerri & Volkoff (1987) e Chauvel (1982) ($C = 84,789 * \text{profundidade}^{(-0,6428)}$) (Figura 26), tendo um bom ajuste (não tem R^2 para ajuste

não linear). Os estoques acumulados de carbono até um metro nos Latossolos de Manaus são de $93 \pm 6 \text{ Mg.ha}^{-1}$, diferindo 18 Mg.ha^{-1} de Cerri & Volkoff (1987) e 24 Mg.ha^{-1} de Chauvel (1982) (Figura 25).

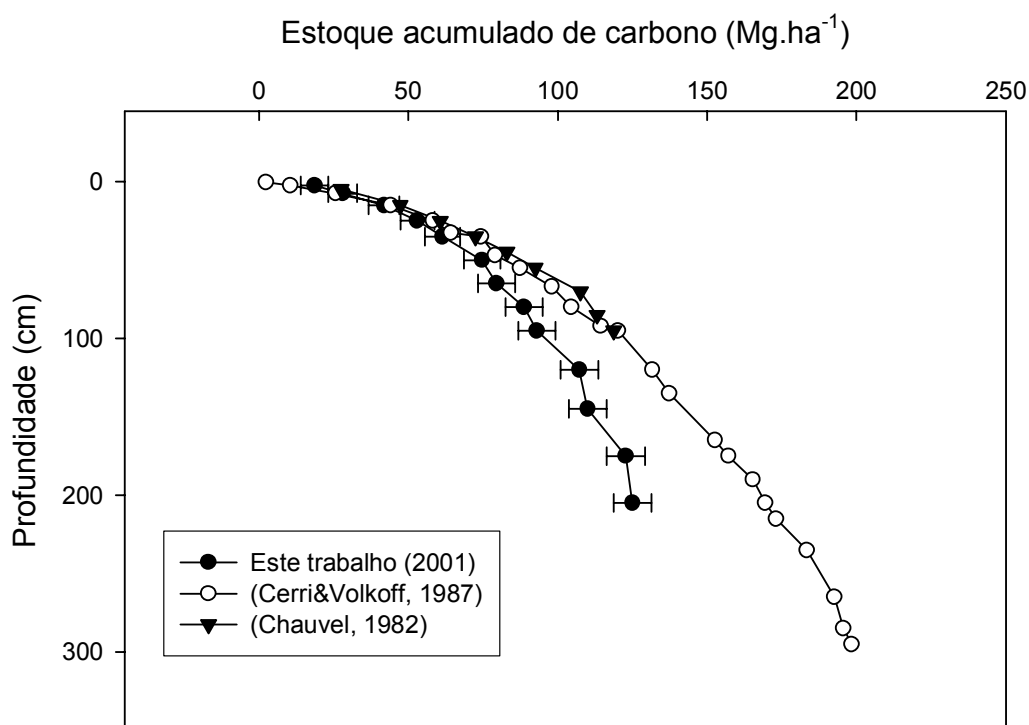


Figura 25 - Estoques acumulados de carbono com propagação de erros (desvio padrão) no Latossolo de Manaus e a literatura. O carbono do solo está em equilíbrio, discordando do seqüestro de carbono na ordem de $3,6 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ como MOS humificada proposto por Malhi et al. (1999), pois em 20 anos haveria um aumento de 72 Mg.ha no estoque de carbono no solo.

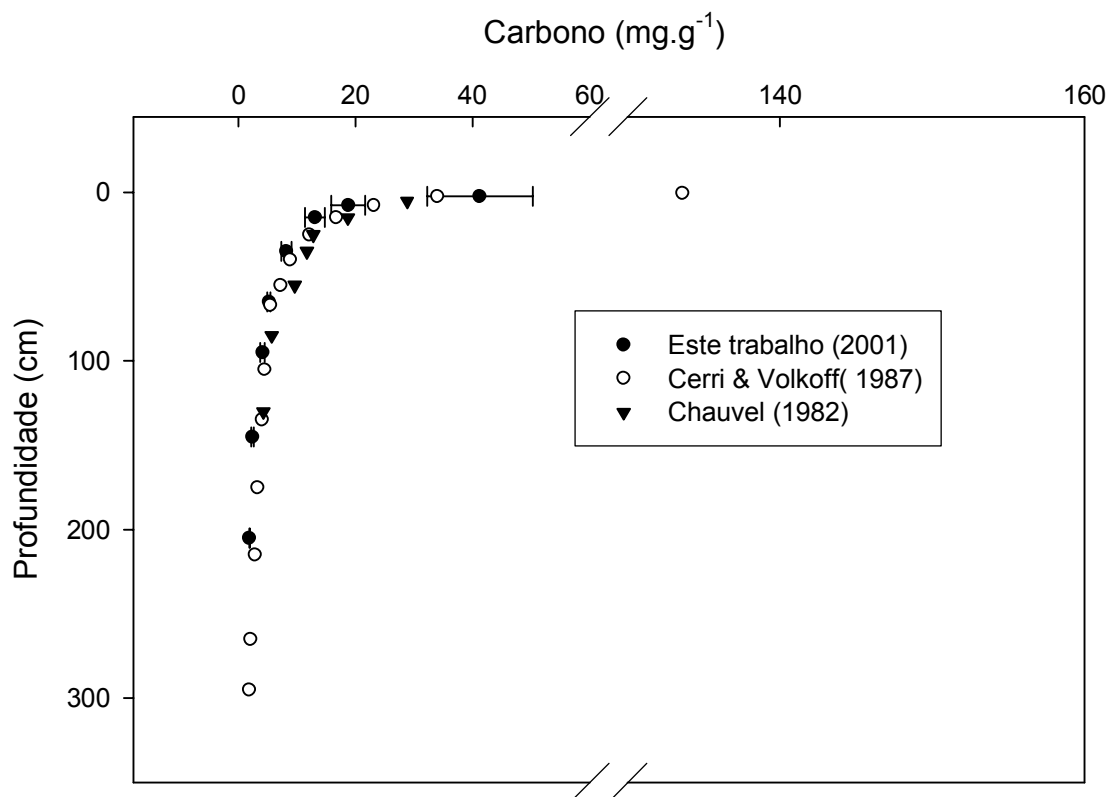


Figura 26 - Dados históricos de teores de carbono nos Latossolos de Manaus.

Existem pequenas diferenças de densidade, sendo os estoques de Chauvel (1982) reconstituídos com erro de 2 Mg.ha^{-1} (ou 1,7 % de erro) em um metro a partir dos valores de densidade do trabalho atual. A reconstituição foi necessária para construir a curva dos valores acumulados de estoque de Chauvel (1982), pois não foram

fornechos os valores de densidade. No primeiro metro as densidades variam de 0,91 a 1,04 g.cm⁻³ com média de 1,03 g.cm⁻³ (Desvio Padrão = DP= 0,09), sendo similares aos de Ranzani (1980) em solos semelhantes da ZF-2. As densidades de Cerri & Volkoff (1987) são sistematicamente maiores, com média de 1,15 g.cm⁻³ (DP=0,05). A umidade para a coleta de amostras indeformadas é importante em solos com cerca de 80-90 % de argila. Chauvel (1982) coletou 2 dias após uma chuva forte, a coleta deste trabalho só foi possível em outubro de 2000, período mais seco em Manaus, que esteve atipicamente muito chuvoso e ideal em termos de umidade do solo (ponto de sazão). Cerri & Volkoff (1987) amostraram em maio, não sendo informada a umidade de coleta. O aumento da umidade eleva a compactação na amostragem, podendo explicar maiores valores para densidades do solo.

Reduziu-se neste trabalho a variação do carbono no solo de 2 a 3 vezes com a separação das raízes e carvões e obtendo-se subamostras com o quarteador de Jones (veja material e métodos, e resultados da comparação de métodos de preparação de amostras). Baseados nos dados de erro de cerca de 7 % no estoque total neste trabalho, estima-se uma variação de 15 a 20 % no carbono total em um metro para os valores de estoque de Chauvel (1982) e Cerri & Volkoff (1987). As pequenas diferenças de teor de carbono e densidade estão sendo acumuladas e isto associado a variação

maior nos dados de Chauvel (1982) e Cerri & Volkoff (1987) tornam os estoques semelhantes aos deste trabalho.

O provável é que o carbono nestes solos esteja próximo do equilíbrio. Devido ao número de repetições, o isolamento da contribuição das raízes e o preparo das amostras, os valores de estoque provavelmente estão mais próximos dos reais neste trabalho. Os dados de Chauvel (1982) foram medidos no mesmo platô que as medidas de Malhi et al. (1999). Os solos de Manaus provavelmente não perderam carbono em 20 anos e nem acumularam cerca de $3,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, que integrariam cerca de $72 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ em 20 anos previsto por (Malhi et al., 1999).

Telles et al. (2002) compararam o tempo de residência do carbono dado pelo ^{14}C do efeito bomba entre os anos de 1986 e 2000 para os Latossolos de Manaus. A curva de ajuste da atividade de ^{14}C no intervalo de 0-10 cm, cerca de 70 % do carbono do solo tem tempo de ciclagem de 70 anos e 30 % com tempo de ciclagem de 500 anos. Historicamente, o estoque de carbono é constante no primeiro metro e o tempo de ciclagem do carbono é relativamente antigo, compatível com o estado de equilíbrio dinâmico.

Outro modo de demonstrar a relação da constância do teor de carbono e sua relação com o tempo de ciclagem é o teste do modelo estatístico para prever ^{14}C

com dados de Latossolos semelhantes na Amazônia (não realizado). No caso de um grande desequilíbrio entre o conteúdo de carbono e o tempo de ciclagem o modelo não funcionaria para solos semelhantes coletados em diferentes anos. O mesmo ocorre com o modelo estatístico para prever o ^{13}C a partir do teor de carbono, onde grandes aportes de carbono com valores de ^{13}C recentes inviabilizariam o teste do modelo para previsão dos dados da literatura, coletados nos últimos 10 anos na Amazônia (ver teste do modelo para previsão do ^{13}C nos Latossolos).

A condição próxima equilíbrio é a esperada para solos de florestas maduras, com idade acima de 100 anos (Mellilo et al., 1996a). O modelo Century (Parton et al., 1987) só considera a profundidade de 0-20 centímetros como realmente ativa nas trocas de carbono, o mesmo é observado com mudança do uso da terra, com substituição de florestas por pastagens por Cerri et al. (1996). O modelo Century prevê no equilíbrio, o estoque de carbono, distribuição entre as frações ativa, lenta e passiva, produtividade primária líquida (NPP) e fluxos de carbono semelhantes aos valores medidos neste trabalho e em Telles et al. (2002).

O Century sintetiza grande parte do conhecimento disponível sobre a dinâmica do carbono no solo, sendo testado em diferentes biomas no mundo (Schimel et al., 1994). Este conhecimento foi obtido durante décadas e um desequilíbrio na entrada

de carbono da ordem $3,6 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, conforme sugerido por Malhi et al. (1999) influenciaria a NPP, a respiração do solo, o tempo de residência e o estoque do carbono no solo. Não existe evidências ecológicas que isto esteja ocorrendo.

4.1.5. Separação de carvões microscópicos

Não foi encontrada uma relação entre o teor de carbono associado aos carvões macroscópicos e microscópicos. Se existir uma relação, esta deve ser apenas um indicativo geral, sendo diferente para solos argilosos e arenosos e dependentes da profundidade de coleta das amostras.

A ferrihidrita é um mineral amorfo de ferro com densidade acima de $2,3 \text{ g.cm}^{-3}$ (Besoain, 1985). Como é amorfo, sua associação com carbono pode reduzir sua densidade e facilitar sua extração com solução de densidade abaixo de 2 g.cm^{-3} . A ferridrita pode ser isolada em subsequente separação por densidade $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$, sendo estabelecida com mais precisão a relação com carvões coloidais e este mineral amorfo.

O pH do solo é próximo de 4 e da solução de politungstato 3. Neste pH não é esperado a extração de ácidos orgânicos mais humificados, porém pode extrair formas solúveis e pouco humificadas de carbono. A confirmação da natureza do material coloidal preto e com densidade abaixo de 2 g.cm^{-3} associado a ferridrita só pode ser feita com caracterização química mais detalhada. A caracterização micromorfológica das

frações separadas, e a análise química micropontual por fluorescência de raios X, se possível acoplado a microscopia eletrônica de varredura, poderia complementar o procedimento de caracterização do material extraído.

Este método de extração foi mais eficiente no Argissolo textura média. A quantificação mais detalhada dos carvões pode ser realizada por tratamento e classificação de imagens, sendo dada uma ordem de grandeza da contribuição de raízes microscópicas que não foram removidas pelo pré-tratamento. Não foi realizada por problemas no final do processo (ver material e métodos).

Os carvões podem se degradar superficialmente em ácido húmico (Haumaier & Zech, 1995), este ácido pode fazer ligações com cátions di e trivalentes (ferro, cálcio e alumínio) e argilominerais (Oades, 1989). Os fragmentos mais grosseiros de carvões na dimensão de areia fina/silte podem ser liberados desta ligação com o rompimento dos microagregados. Para os carvões na dimensão coloidal, com superfície específica de troca muito elevada, não é esperada a dissociação apenas com agitação e ultra-som. Os carvões se degradam fisicamente com o procedimento de extração utilizado, sendo em parte recuperados na dimensão coloidal extraída e parte ficaria retida pelos argilominerais nos solos tratados.

O uso de isótopos de ^{13}C e ^{14}C poderiam auxiliar na quantificação total dos carvões, que são excelentes adsorvedores tanto de cátions como anions orgânicos e inorgânicos. Os valores tanto de ^{13}C ao redor de -29 ‰ e C/N próximo de 20, indicam uma contaminação de carbono adsorvido recente neste material. O mesmo pode ocorrer para o ^{14}C . Os carvões devem ser limpos para o uso destas ferramentas isotópicas e normalmente se utiliza uma limpeza seqüencial ácida, alcalino e ácida. A limpeza tem que ser realizada até a constância nos valores isotópicos. Para o ^{13}C a limpeza poderia elevar os valores de delta em 2 ou 3 unidades, sendo provavelmente similares aos provocados pelo fracionamento inicial na queima do material vegetal. A etapa alcalina da limpeza remove ácidos húmicos adsorvido nos carvões, podendo degradar carvões em ácidos húmicos também (Schmidt & Noack, 2000), uma segunda possibilidade seria uma hidrólise ácida como utilizada em Trumbore (1993) e Schmidt et al. (2001). Ainda ter-se-ia que supor que todo o resíduo de carvão encontrado na amostra tenha a mesma origem e sinal do ^{14}C .

Implicações possíveis dos carvões microscópicos nos métodos de fracionamento físico e químico do carbono nos solos

Os carvões fazem parte do carbono passivo no solo, com ciclagem de centenas a milhares de anos. Para obter os diferentes reservatórios de carbono no solo,

ativos, lentos e passivos, são utilizados fracionamentos físicos e químicos do carbono. O fracionamento por densidade é utilizado para isto (Parton et al., 1987; Trumbore & Zheng, 1996) sendo separados a fração ativa ou leve, com densidade abaixo de 1.6 ou 2 g.cm⁻³ e a densa. Na fração densa é realizado um fracionamento químico seqüencial, ácido, alcalino e ácido para separar as frações lentas e o resíduo seria a fração passiva (Trumbore & Zheng, 1996). Os resíduos de incêndios (carvão, “black carbon e grafite”), contaminam as diferentes frações (Schmidt et al., 2001). O fracionamento alcalino ataca os carvões, transformando-os em ácidos húmicos (Schmidt et al., 2001).

Apesar dos resíduos de incêndios estarem incorporados na prática nos modelos que dividem a matéria orgânica em frações ativa, lenta e passiva. A retirada da contribuição do carbono associada aos carvões pode auxiliar a entender melhor a dinâmica do carbono nos solos arenosos, como os Argissolos textura média de Santarém, onde Silver et al. (2000) mediram o estoque de carbono 80 % acima do previsto pelo Century.

Quando a contribuição dos carvões é removida os valores reais se aproximam dos previstos pelo Century. Em média de 0-20 cm na camada simulada pelo Century, há cerca de 30 % de carvões microscópicos. A diferença para o total poderia ser atribuído ao mau funcionamento do fósforo no modelo, como sugerido por Silver et

al. (2000), podendo ainda ter relação com o teor de ferro ou mineralogia, como neste trabalho. Mais simplesmente, o estoque seria estatisticamente igual ao previsto pelo Century, levando em conta a variação do carbono na ordem de 30 %. Graser et al. (1998) relacionam o “black carbon” (BC) à fertilidade em fósforo dos Latossolos Amarelos antrópico (Terra Pretas de Índio na Amazônia). É esperada uma relação entre fertilidade e carvões e não apenas ao BC.

4.2. *Teste de previsão dos carvões com o Century*

Foram 2000 anos de simulação, com eventos de fogo a cada 400 anos, com baixa intensidade (pequena remoção de carbono) e alta (grande remoção de carbono). Foi testada a sensibilidade do Century na previsão dos carvões em três níveis de produtividade máxima da floresta em $\text{g/m}^2/\text{mês}$: 1400, 1200 e 800 g de Carbono/ $\text{m}^2/\text{mês}$ (Figura 27).

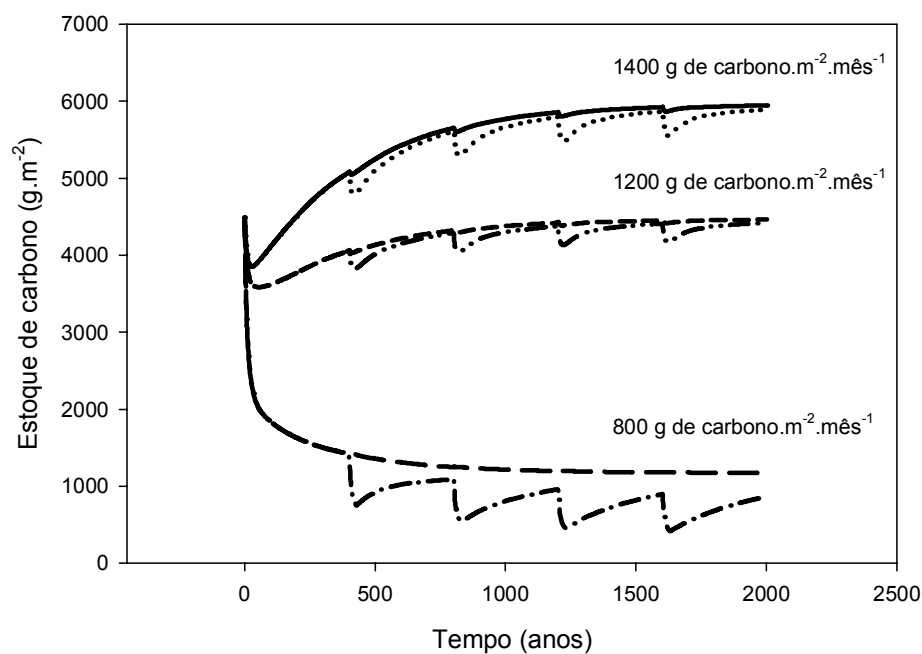


Figura 27 - Diferentes intensidades de remoção de carbono pelo fogo a cada 400 anos (linhas oscilantes, maior intensidade), a diferentes valores de produtividade bruta mensal, para a área do Latossolo de Manaus.

O Century responde ao aporte de carvões com a redução do carbono total do solo, que se reestabelece com o tempo. Não existem diferenças na previsão do Century para Manaus e Santarém, pois os solos possuem a mesma textura e climaticamente possuem similar precipitação total anual.

Quanto maior a produtividade e mais baixa a intensidade do fogo, mais rápido o reestabelecimento do equilíbrio. Quando a produtividade for baixa e a intensidade do incêndio alta, segundo a simulação realizada com fogo a cada 400 anos, há uma redução do carbono no solo com o tempo. O Century não prevê o aumento do carbono total do solo imobilizado na forma de carvões. A redução do teor de carbono no solo associado a incêndios pode ocorrer (Kauffman et al., 1995). Na Amazônia os incêndios de Roraima em 1997 imobilizaram em média 150 kg de C .ha⁻¹ na forma de carvões macroscópicos (Barbosa & Fearnside, 1999). Não foi encontrada uma relação clara no atual trabalho entre fragmentos de carvões macroscópicos e microscópicos, sendo no geral maior que a sugerida por Skjemstad et al. (1999) na ordem de 1:10 em diferentes entre solos e em profundidade. Esta relação também pode ser diferente entre fragmentos de carvões recentes e de paleoincêndios que podem ter ocorrido nas últimas centenas ou milhares de anos. Os carvões microscópicos podem ser translocados junto com a argila, serem arrastados pelo escoamento superficial e pelo vento e em parte serem decompostos (Schmidt & Noack, 2000).

4.3. Capacidade de acúmulo de carbono no Latossolo de Manaus

Os solos podem acumular muito carbono, nas Terras Pretas de Índio até 50 % de carbono (Graser et al., 1998), sendo nestes solos metade constituída de “black carbon”.

Foi simulado com o Century o aumento de produtividade em 25% para os Latossolos. Esta simulação ocorreu à taxa de 0,2% ao ano por 113 anos. A produtividade primária líquida acompanhou este aumento. Ao término do aumento de produtividade a simulação continuou por mais 2000 anos, para que se obter o novo equilíbrio. Este foi praticamente atingido 500 anos após o aumento da produtividade (Figura 28).

Quanto maior o incremento de produtividade anual, maior é a estimativa de estoque de carbono no equilíbrio (o aumento total de 25 % é o mesmo). A taxa de 0,2 % ao ano o funcionamento do modelo foi mais estável, não apresentando diferenças quando utilizado taxas menores de aumento da produtividade anual. O estoque de carbono no Century é determinado pelas frações lenta e passiva (Schimel et al. 1994). Os resultados da simulação ilustram isto, com as frações ativas sendo pouco alteradas em relação ao estoque total.

Para os Latossolos os valores de estoque no equilíbrio são de 69,5 Mg.ha⁻¹ de 0-20 centímetro de profundidade, com aumento de 81 % em relação ao inicial. Os

valores do estoque no equilíbrio são menores que o simulados por Telles et al. (2002), porém estão na mesma ordem de grandeza. Duas razões podem explicar as diferenças: 1) diferenças na estrutura dos modelos, o Century é um modelo muito complexo, baseado em balanço de nutrientes e tempo de residência do carbono, enquanto o modelo de balanço de massas utilizando ^{14}C em Telles et al. (2002) é muito simples; 2) taxa de aumento anual da produtividade de 0,5 ao ano em Telles et al. (2002) por 50 anos, integrando 25 % no total.

Não existe muito sentido comparar o tempo médio de residência do carbono das diferentes frações (ativa, lenta e passiva) da simulação do Century com a baseada em ^{14}C de Telles et al. (2002). No Century o tempo de ciclagem das frações são fixas enquanto em Telles et al. (2002) foram medidas. Em uma simulação mais detalhada e real, estes parâmetros fixos podem ser alterados. O ajuste do tempo de ciclagem do carbono pode ser um dos parâmetros a serem ajustados para compensar diferenças na mineralogia e conteúdo de carvão entre solos de mesma textura, drenagem, vegetação e clima, como os Latossolos muito argilosos de Manaus e Santarém.

Segundo os dados de Malhi & Grace (2000) com uma entrada de 3,6 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ seriam necessários apenas 8,6 anos para ser alcançado o estoque simulado pelo Century em 500 anos, nos primeiros 20 centímetros de solo.

Aumento de produtividade bruta de 25%
com taxa de 0.2 % anual com o Century

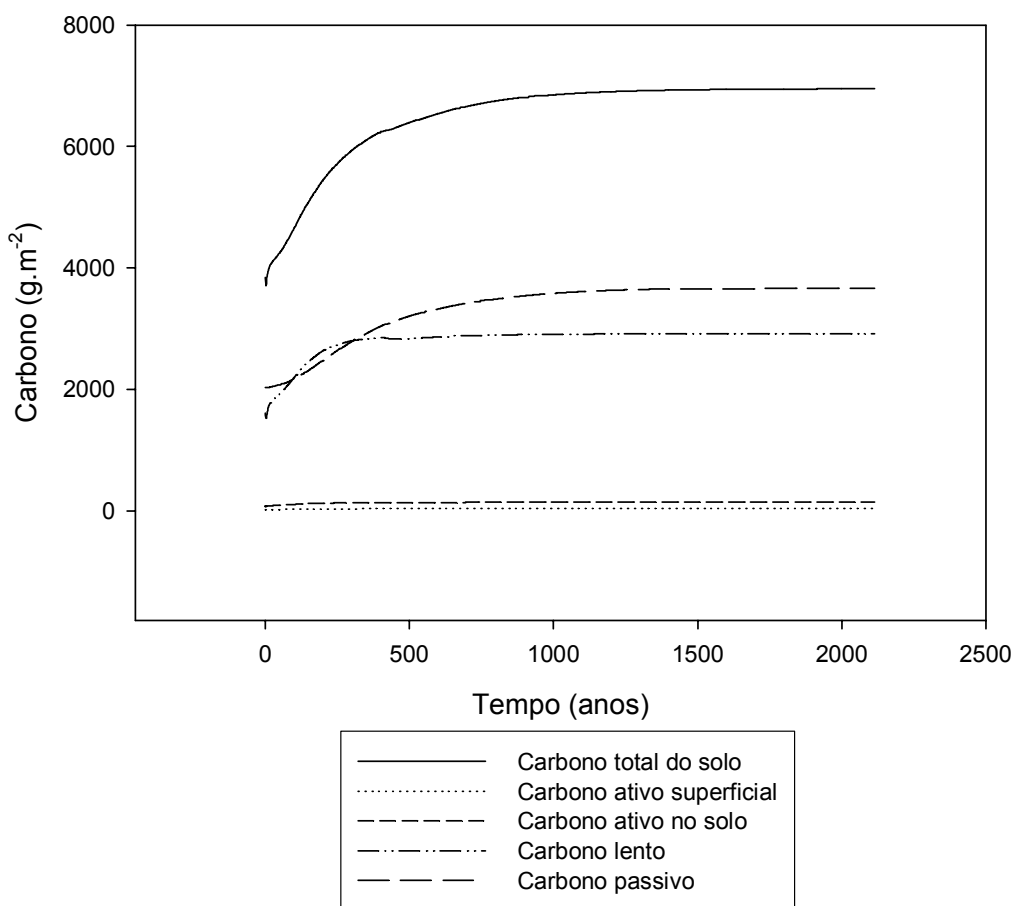


Figura 28 - Simulação do aumento de produtividade de 25 % para o Latossolo muito argiloso de Manaus, com os diferentes reservatórios de carbono. O tempo de ciclagem da fração ativa é de até alguns anos, a lenta de dezenas a centenas de anos e a passiva de centenas a milhares de anos. Malhi et al. (1999) consideraram o tempo de ciclagem do carbono no solo fixo em 16 anos.

5. CONCLUSÕES

1. A variação dos dados foi reduzida em até 2 a 3 vezes com refinamento da amostragem, preparo das amostras e o isolamento da contribuição de raízes e carvões macroscópicos. Isto permite obter uma estimativa mais precisa do teor de carbono mais lábil das raízes e do carbono mais passivo relacionado tanto a MOS humificada quanto aos carvões macroscópicos.

2. O CV % do ^{13}C e ^{15}N , com exceção do ^{15}N para o Espodossolo, é baixo para todas as profundidades no Espodossolo, Latossolo de Manaus, Latossolo e Argissolo de Santarém. Para estes solos os CV % do C e N são médios nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, com o Espodossolo com valores de CV % alto a muito altos. Em geral para as diferentes análises e profundidades o CV % do Latossolo de Manaus é mais baixo, seguido na ordem crescente do Latossolo de Santarém, Argissolo de Santarém e Espodossolo.

3. O número de amostras para se obter a precisão do erro analítico para o C, N, ^{13}C e ^{15}N para os diferentes solos e profundidades, e para o erro de 10 % em relação a média para o C e N nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm é em geral baixo. Nos diferentes solos e profundidades o número de amostras necessárias para o ^{13}C está entre 1 e 13 amostras. Para o ^{15}N entre 2 e 17, com o Espodossolo entre 8 e 144

amostras. O C e N possuem semelhante precisão, sendo requeridas em geral abaixo de 20 amostras para as profundidades de 0-5 e 5-10 cm, para o Espodossolo o número é acima de 49 amostras e para o C e 28 para o N. Ainda para o C e N este número reduz a menos de 10 amostras de 20 a 50 cm. O resultados em geral são mais precisos na ordem decrescente: Latossolo de Manaus, Argissolo de Santarém, Latossolo de Santarém e Espodossolo.

4. A redução da variação melhorou a correlação entre o C, N, ^{13}C e ^{14}C . Os modelos estatísticos gerados prevêem o ^{13}C , ^{15}N para os Latossolos e ^{14}C para os principais solos estudados com precisão próxima do erro analítico para o ^{13}C e ^{15}N e similar à variação natural para o ^{14}C .

5. O controle do estoque e tempo de ciclagem do carbono foi determinado fisicamente pelo teor de argila e secundariamente pela drenagem e mineralogia. A MOS pouco humificada caminha no perfil arenoso grosseiro quartzoso do Espodossolo de Manaus. Isto associado as inundações periódicas torna homogêneo os valores dos isótopos de C e N. Nos Latossolos muito argilosos a dificuldade do caminhar do carbono humificado permite um maior enriquecimento isotópico de ^{13}C e ^{15}N e uma redução da atividade do ^{14}C . O Argissolo textura média tem um comportamento intermediário entre o Espodossolo e os Latossolos muito argilosos.

6. Os carvões microscópicos separados representam para o carbono da fração densa, constituída de raízes e carvões microscópicos e matéria orgânica humificada, na profundidade de 0-5 centímetros, 56 % do carbono do Argissolo de

Santarém e para os Latossolos cerca de 20 %. Para a profundidade 10-20 cm os carvões microscópicos representam menos que 12 % do carbono da fração densa.

7. Embora os carvões sejam mais refratários por natureza, possuem o valor de ^{13}C semelhante a MOS pouco humificada pois possui carbono adsorvido. A contribuição dos carvões para o sinal do ^{14}C no Argissolo textura média de Santarém pode ser importante, dado o teor de carbono associado aos carvões microscópicos. Com a mudança do uso da terra este carbono relacionado aos carvões poderá compor o resíduo que fica no ecossistema com origem da floresta.

8. Para os solos argilosos, o procedimento para a extração de carvões e remoção prévia de raízes microscópicas é menos eficiente. O método necessita ser melhorado para permitir a observação micromorfológica e a quantificação mais eficiente dos carvões microscópicos por tratamento e classificação de imagens. É necessária estabelecer a relação entre o carbono mais refratário associado aos carvões e formas amorfas de ferro.

9. O Century não contabiliza os carvões na previsão de estoque de carbono no solo. Os valores medidos de carbono total contabilizam os carvões e contaminam o teor de carbono associável à matéria orgânica dos solos. O resultado final subestima o estoque de carbono no solo pelo modelo, pois o equilíbrio baseia-se em matéria orgânica do solo com tempo de ciclagem de anos a poucos milhares de anos. Os carvões ciclam em grande parte na escala de milhares de anos, o modo mais simples de adaptar o funcionamento do modelo Century é isolar a contribuição do estoque de carbono associado a carvões, principalmente nos solos arenosos.

10. A redução da variabilidade do estoque e determinação do erro permitiu o teste da condição de equilíbrio dinâmico do carbono no Latossolo de Manaus. Em 20 anos a partir de dados deste trabalho e da literatura. Os Latossolos de Manaus estão em equilíbrio em relação às trocas de carbono nos últimos 20 anos.

11. O Latossolo de Manaus podem aumentar o estoque em cerca de 80 % com a elevação da produtividade florestal em 25% a taxa de 0,2 % ao ano. O equilíbrio foi alcançado em cerca de 500 anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, R.I.; FEARNSIDE, P.M. Incêndios na Amazonia Brasileira: Estimativa da emissão de gases do efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Roraima na passagem do evento "El Niño" (1997/1998). **Acta Amazonica**, v. 29, n. 4, p. 513-534, 1999.
- BESOAIN, E. **Mineralogia de arcillas de suelos**. San José: IICA, 1985. 1205p.
- BRASIL. Levantamento de Recursos Naturais Folha SA. 21. In: **Projeto RADAMBRASIL**. (Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral ed.). Santarém: 1976.
- BRINDLEY, G.W.; BROWN, B. **Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification**. London: 1980.
- CAMARGO, M.N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos utilizada em levantamento pedológico no Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, n. 1, p. 11-13, 1987.

- CAMARGO, O.A.D.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p.
- CAMARGO, P.B.D.; TRUMBORE, S.E.; MARTINELLI, L.A.; DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; VICTORIA, R.L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 5, n. 6, p. 693-702, 1999.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; LIEBEREI, R.; REISDORFF, C.; MACHADO, A.D. Deforestation and use of soil as pasture: climatic impacts. **Interdisciplinary research on the conservation and sustainable use of the Amazonian rain forest and its information requirements**, p. 20-22 November 1995. 1996, 1177-1186, 1996.
- CERRI, C.C.; FELLER, C.; BALESSENTE, J.; VICTORIA, R.L.; PLENECASSAGNE, A. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. **C. R. Acad. Sci. Paris**, v. 9, p. 423-426, 1985.
- CERRI, C.C.; VOLKOFF, B. Carbon content in a yellow Latosol of Central Amazon rain forest. **Acta Oecologica**, v. 8, n. 1, p. 29-42, 1987.
- CHAUVEL, A. Contribuição para o estudo da evolução dos latossolos amarelos, distróficos, argilosos na borda do platô, na região de Manaus: mecanismos da gibbsitização. **Acta Amazonica**, v. 11, n. 2, p. 227-245, 1981.

- CHAUVEL, A. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. **Supl. Acta Amazonica**, v. 12, n. 3, p. 47-60, 1982.
- CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J.; HOLLAND, E.A. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 371-384, 2001.
- CLARK, K.; UHL, C. Farming, fishing and fire in the history of the Upper Rio Negro region of Venezuela. **Hum. Ecol.**, v. 15, p. 1-26, 1987.
- COCHRANE, M.A.; ALENCAR, A.; SCHULZE, M.D.; SOUZA, C.M.; NEPSTAD, D.C.; LEFEBVRE, P.; DAVIDSON, E.A. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. **Science**, v. 284, n. 5421, p. 1832-1835, 1999.
- CORNU, S.; LUCAS, J.; AMBROSI, J.P.; DESJARDINS, T. Transfer of dissolved Al, Fe and Si in two Amazonian forest environments in Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 49, p. 377-384, 1998.
- DESJARDINS, T.; ANDREUX, F.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. Distribution of ^{13}C in some Brazilian ferrallitic soils. **Cahiers ORSTOM, Serie Pedologie**, v. 26, n. 4, p. 343-348, 1991.
- DIXON, R.K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; SOLOMON, A.M.; TREXLER, M.C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v. 263, p. 185-190, 1994.

- ELLIOT, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 627-633, 1986.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1-4, p. 69-116, 1997.
- FERRAZ, J.; OHTA, S.; SALES, P.C. Distribuição dos solos ao longo de dois transectos em floresta primária ao Norte de Manaus (AM). In: INPA. **Pesquisas florestais para a conservação da floresta e reabilitação de áreas degradadas da Amazônia**. Manaus: 1998. p. 109-143.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; FUNG, I.; HOLLAND, E.A.; JOHN, J.; BRASSEUR, G.; ERICKSON, D.; SCHIMEL, D.S. On the contribution of CO₂ fertilization to the missing biospheric sink. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 9, p. 541-556, 1995.
- GOMES, B.M. **Estudo paleoambiental no estado de Rondônia utilizando datação por ¹⁴C e razão ¹³C/¹²C da matéria orgânica do solo**. Piracicaba, 1996. 106p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.
- GOULDEN, M.L.; MUNGER, J.W.; FAN, S.M.; DAUBE, B.C.; WOFSY, S.C. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. **Science**, v. 271, p. 1576-1578, 1996.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, C.A.; MEIR, P.M.H.S.; NOBRE, C.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science**, v. 270, p. 778-780, 1995.

- GRASER, B.; GUGGENBERGER, G.; HAUMAIER, L.; ZECH, W. **Sustainable soil in the Brazilian Amazon**. Paper presented at the 9^a International Humic Substances Society, 1998. Resumo.
- GREGORICH, E.G.; KACHANOSKI, R.G.; VORONEY, R.P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption. **Journal of Soil Science**, v. 40, n. 3, p. 649-659, 1989.
- HAUMAIER, L.; ZECH, W. Black Carbon - Possible Source of Highly Aromatic Components of Soil Humic Acids. **Organic Geochemistry**, v. 23, n. 3, p. 191-196, 1995.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis. Advanced course**. Madison, Wisconsin: 1969. 894p.
- KAUFFMAN, J.B.; CUMMINGS, D.L.; WARD, D.E.; BABBITTI, R. Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools and losses in slashed primary forests. **Oecologia**, v. 104, p. 397-408, 1995.
- KVALSETH, T.O. Cautionary note about R^2 . **The American Statistician**, v. 39, p. 279, 1985.
- LUCAS, Y.; CHAUVEL, A.; BOULET, R.; RANZANI, G.; SCATOLINI, F. Transição latossolos-podzóis sobre a formação barreiras na região de Manaus, Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 325-335, 1984.
- MALHI, Y.; BALDOCCHI, D.D.; JARVIS, P.G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell and Environment**, n. 22, p. 715-740, 1999.

- MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Tree**, v. 15, n. 8, p. 332-337, 2000.
- MCGUIRE, A.D.; MELLILO, J.M.; KICKLIGHTER, D.W.; PAN, Y.; XIAO, J.X. Global Change and Terrestrial Ecosystems. In: STEFFEN, B. W. A. W. **International Geosphere-Biosphere Programme Book**. Cambridge: 1996. p. 431-450.
- MEGGERS, B. Archeological evidence for the impact of Mega -Niños events of Amazonia during the past two millennia. **Climate Change**, v. 28, p. 321-338, 1994.
- MELLILO, J.M.; PRENTICE, K.M.; FARQUHAR, G.D.; SCHULZE, E.D.; SALA, O.E. Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate. In: HOUGHTON, R. A. **Climate change 1995: the science of climate change**. New York: Cambridge University Press, 1996a. p. 444-481.
- MÉRING, J. L'interférence des rayons X dans les systemes a stratification desordonee. **Acta Crystallographica**, v. 3, p. 371-377, 1949.
- MULLINS, C.E.; HUTCHISON, B.J. The variability introduced by various subsampling techniques. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 547-561, 1982.
- NEPSTAD, D.C.; MOREIRA, A.G.; ALENCAR, A.A. **A floresta em chamas: origens, impactos e prevenção de fogo na Amazônia**. Brasília, Brasil: 1999. 202p.
- NIMER, E. **Clima**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.
- NOBRE, A.D.; HIRATA, Y.; HONZAK, M.; CAMPOS, M.A.A. Classificação e mapeamento preliminares da vegetação na região de Manaus, Amazonas, utilizando sensoriamento remoto passivo. In: HIGUCHI, N. **Pesquisas florestais para a**

conservação da floresta e realbilitação de áreas degradadas da Amazônia.

Manaus: INPA, 1998. p. 29-49.

OADES, J.M. An introduction to organic matter in mineral soils. In: **Minerals in Soil Environments, SSSA Book Series**, no. B.: Weed, S, 1989. p. 1 [edited by Dixon, J.

OLIVEIRA, J.B.D.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

PARKINSON, J.A.; ALLEN, S.E. A wet oxidation process suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological materials. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 6, p. 1-11, 1975.

PARROTTA, J.A.; FRANCIS, J.K.; ALMEIDA, R.R.D. **Trees of the Tapajós: A photographic field guide**. Rio da Piedras, Puerto Rico: 1995.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, n. 5, p. 1173-1179, 1987.

PIMENTEL, F.G. **Curso de Estatística Experimental**. Piracicaba: Nobel, 1990. 468p.

PRADO, H. do. **Manual de Classificação de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. 218p.

PULLIAM, W.M. 1996. Forest centuty parameterization workbook, Ford Collins: Colorado State University ed., Vol. 2001.

RANZANI, G. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. **Acta Amazonica**, v. 10, n. 1, p. 7-41, 1980.

- RAIJ, B.V.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.A.S. **Análise Química do Solo para fins de Fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 165p.
- REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, C.E.I.D.A.A.D.S. **Anais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - SNLCS/S, 1979.
- RIGHI, D.; BRAVARD, S.; RANGER, J.; ROBERT, M.S. In situ study of soil processes in an oxisol-spodosol sequence of Amazonia (Brazil). **Soil Science**, v. 150, n. 1, p. 438-445, 1990.
- RHODES, A.N. A method for the preparation and quantification of microscopic charcoal from terrestrial and lacustrine sediment cores. **The Holocene**, v. 8, n. 1, p. 113-117, 1998.
- SALATI, E.; MARQUES, J. Climatology of Amazon Region. In: SIOLI, H. **The Amazon limnology in a landscape ecology of a might tropical river and its basin**. Dordrecht, W. Junk: 1984. p. 85-126.
- SANFORD, R.L., JR.; SALDARRIAGA, J.; CLARK, K.E.; UHL, C.; HERRERA, R. Amazon rain-forest fires. **Science**, v. 227, n. 4682, p. 53-55, 1985.
- SAS, I. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. Cary, NC: SAS Inst., 1991.
- SCHARPENSEEL, H.W.; BECKER HEIDMANN, P.; NEUE, H.U.; TSUTSUKI, K. Bomb-carbon, ^{14}C -dating and ^{13}C -measurements as tracers of organic matter dynamics as well as of morphogenetic and turbation processes. **Science of the Total Environment**, v. 81 & 82, p. 99-110, 1989.

- SCHARPENSEEL, H.W.; BECKER-HEIDMANN, P. Twenty-five years of radiocarbon dating soils: paradigm of erring and learning. **Radiocarbon**, v. 34, n. 3, p. 541-549, 1992.
- SCHIMEL, D.S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global Change Biology**, v. 1, p. 77-91, 1995.
- SCHIMEL, D.S.; BRASWELL, B.H.; HOLLAND, E.A.; MCKEOWN, R.; OJIMA, D.S.; PAINTER, T.H.; PARTON, W.J.; TOWNSENDE, A.R. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 8, n. 3, p. 279-293, 1994.
- SCHMIDT, M.W.I.; NOACK, A.G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 3, p. 777-793, 2000.
- SCHMIDT, M.W.I.; SKJEMSTAD, J.O.; CZIMEZIK, C.I.; GLASER, B.; PRENTICE, K.M.; GELINAS, Y.; KUHNBUSCH, T.A.J. Comparative analysis of black carbon in soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, n. 1, p. 163-167, 2001.
- SCHMIDT, M.W.I.; SKJEMSTAD, J.O.; GEHRT, E.; KOGEL-KNABNER, I. Charred organic carbon in German chernozemic soils. **European Journal of Soil Science**, v. 50, n. 2, p. 351-365, 1999.
- SCHUMACHER, B.A.; SHINES, K.C.; BURTON, J.V.; LAPP, M.L. Comparison of three methods for soil homogenization. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, p. 1187-1190, 1990.

- SILVER, W.L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. **Ecosystems**, v. 3, p. 193-209, 2000.
- SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J.A.; OADES, J.M.; MCCLURE, S.G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 34, n. 2, p. 251-271, 1996.
- SKJEMSTAD, J.O.; TAYLOR, J.A.; SMERNIK, R.J. Estimation of charcoal (char) in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 30, n. 15-16, p. 2283-2298, 1999.
- SMITH, R.B.; PRATT, D.N. The variability in soil particle size test results by various subsampling techniques. **Journal of Soil Science**, v. 35, p. 23-26, 1984.
- SPYCHER, G.; SOLLINS, P.; ROSE, S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: vertical distribution and seasonal patterns. **Soil Science**, v. 135, n. 2, p. 79-87, 1983.
- TAN, K.H.S. Errors and variability of soil analysis. In: **Soil sampling, preparation and analysis**. p. 17-26.
- TELLES, E.C.C.; TRUMBORE, S.; CAMARGO, P.B.D.; MARTINELLI, L.A.; COSTA, E.S.D.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; SANTOS, R.C. Effect of soil texture on carbon dynamics and storage in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**. 2002 (aceito).
- THOMPSON, M.V.; RANDERSON, J.T.; MALMSTRÖEN, C.M.; FIELD, C.B. Change in net primary production and heterotrophic respiration: How much is

- necessary to sustain the terrestrial carbon sink? **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, p. 711-726, 1996.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.
- TRUMBORE, S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 399-411, 2000.
- TRUMBORE, S.E.; CHADWICK, O.A.; AMUNDSON, R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. **Science**, v. 272, n. 5260, p. 393-396, 1996.
- TRUMBORE, S.E.; ZHENG, S. Comparison of fractionation methods for soil organic matter C-14 analysis. **Radiocarbon**, v. 38, n. 2, p. 219-229, 1996.
- VALENCIA, E.P.E. **Datação por ^{14}C e razão $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ de solos sob climas tropical e subtropical do Brasil**. Piracicaba, 1993. 91p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, L.S.; SANTOS, P.C.T.C.D. Clima da Amazônia. In: XXXVII, C. **Amazônia. Seus solos e outros recursos naturais**. São Paulo: 1987. p. 191-218.
- VITOUSEK, P.M.; HEDIN, L.O.; MATSON, P.A.; FOWNES, J.H.; NEFF, J. Within-system element cycles, input-output bugests, and nutrient limitation. In: PACE, M. GROFFMAN, P. M. **Successes, limitations and frontiers in ecosystem science**. New York: Springer Verlag, 1998. p. 432-451.

VITOUSEK, P.M.; SANTORD, R.L., JR. Nutrient cycling in moist tropical forest.

Annu. Rev. Ecol. Syst., v. 17, p. 137-167, 1986.

VOGEL, J.S. A rapid method for preparation of biomedical targets for AMS.

Radiocarbon, v. 34, p. 344-350, 1992.

WALKLEY, A.; BLACK, T.A. An examination of the digestion method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method.

Soil Science, v. 37, p. 29-38, 1934.

ANEXO: RESUMO DO LBA

O Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia, LBA) é uma iniciativa internacional de pesquisa liderada pelo Brasil. O LBA está planejado para gerar novos conhecimentos, necessários à compreensão do funcionamento climatológico, ecológico, biogeoquímico e hidrológico da Amazônia, do impacto das mudanças dos usos da terra nesse funcionamento, e das interações entre a Amazônia e o sistema biogeofísico global da Terra. O LBA está centrado em torno de duas questões principais que serão abordadas através de pesquisa multidisciplinar, integrando estudos de Ciências Físicas, Químicas, Biológicas e Humanas:

De que modo a Amazônia funciona, atualmente, como uma entidade regional?

De que modo as mudanças dos usos da terra e do clima afetarão o funcionamento biológico, químico e físico da Amazônia, incluindo sua sustentabilidade e sua influência no clima global?

No LBA, dar-se-á ênfase a observações e análises que ampliarão a base de conhecimentos sobre a Amazônia em seis áreas: Física do Clima, Armazenamento e Trocas de Carbono, Biogeoquímica, Química da Atmosfera, Hidrologia e Usos da Terra e Cobertura Vegetal. O programa está delineado para tratar das questões principais levantadas na Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas. O LBA proporcionará uma base de conhecimentos voltada ao uso sustentável da terra na Amazônia. Para tal, dados e análises serão utilizados para definir o estado presente do sistema Amazônico e sua resposta a perturbações atuais, e serão complementados com resultados de modelos para proporcionar um entendimento quanto a possíveis mudanças no futuro.

O componente de Armazenamento e Trocas de Carbono enfocará duas questões principais: (1) os ecossistemas nativos da Amazônia funcionam como um sorvedouro líquido de carbono? e (2) quanto de carbono é perdido como resultado de mudanças na cobertura vegetal e nos usos da terra, tais como desmatamentos para fins agrícolas e aquelas decorrentes de extração seletiva? Medições de longo prazo à superfície do armazenamento e dos fluxos de carbono serão feitas experimentais estrategicamente localizadas ao longo de gradientes de intensidade de uso da terra, vegetação e clima, e serão complementadas por observações de aviões instrumentados e modelagem. Resultados de modelos ecológicos serão utilizados junto a um sistema de informações geográficas (SIG) para estimar o balanço de carbono na Amazônia. Observações de aviões instrumentados permitirão estimativas dos fluxos de carbono integrados em toda Bacia para curtos períodos de tempo, e poderão ser utilizados na verificação de modelos.

O componente de Biogeoquímica enfocará a reciclagem de nutrientes e as emissões de gases do efeito estufa por florestas naturais e secundárias e por áreas submetidas a diferentes tipos de manejo. Observações serão feitas, durante alguns anos, em sítios estrategicamente localizados ao longo de gradientes de intensidade de usos da terra e de clima, cobrindo vários usos da terra e uma gama de fertilidades do solo. As medições quantificarão fluxos de gases-traço (principalmente metano e óxido nitroso), de nutrientes (incluindo transporte para os rios) e modificações em seus estoques. Esses dados serão complementados por observações aéreas periódicas, levantamentos em múltiplas escalas espaciais e experimentos de manipulação. Os dados serão unificados em um SIG e associados a modelos do funcionamento

de ecossistemas. Os resultados principais constitui-se-ão: em análises dos efeitos de mudança do uso da terra nos fluxos de gases do efeito estufa (uma ênfase básica da Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas); em diagnósticos dos efeitos de variações climáticas e de uso da terra nos balanços de nutrientes e gases-traço; e na avaliação das implicações para o uso sustentável da terra, de mudanças na dinâmica de nutrientes devido a diferentes tipos de manejo.

No componente de Química da Atmosfera, o enfoque básico será o de entender a influência da Amazônia nas concentrações, global e tropical, de oxidantes (ozônio, hidroxila), seus precursores (óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono) e aerossóis, bem como de complementar os estudos de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, óxido nítrico e metano) propostos nos componentes de Biogeoquímica e Armazenamento e Trocas de Carbono. O planejamento experimental combina observações de longo prazo à superfície e medições intensivas com aviões instrumentados. As campanhas com aviões mapearão a troca de gases e aerossóis, em escala Amazônica, entre biosfera e atmosfera, complementando as observações à superfície, e investigarão o transporte de gases e aerossóis através das fronteiras da Bacia. Modelos de química da atmosfera tridimensionais, de grande escala, utilizando observações meteorológicas assimiladas (obtidas no componente de Física do Clima) e dados de avião e à superfície serão aplicados para quantificar as trocas de gases-traço e aerossóis entre a Amazônia e a atmosfera global.

Mudanças dos Usos da Terra e da Cobertura Vegetal, de vegetação nativa a cultivos agrícolas e regeneração subsequente, serão quantificadas e relacionadas a causas físicas e sócio econômicas. Estudos de desmatamento e alteração de florestas, em escala Amazônica, serão realizados utilizando-se dados de satélites e de levantamento de censos estatísticos. Estudos de caso serão realizados para ilustrar de que modo as mudanças dos usos da terra afetam a cobertura vegetal. Pesquisas para definir as condições e os fatores externos que causam essas mudanças enfocarão o desenvolvimento de modelos preditivos de mudanças de cobertura vegetal e usos da terra.

O LBA combinará novos instrumentos analíticos, experimentos inovadoras e multidisciplinares em uma poderosa síntese que gerará novos conhecimentos no intuito de enforçar questões e controvérsias ainda pendentes. O LBA proporcionará um novo entendimento de controles ambientais no fluxo de energia, água, carbono, nutrientes e gases-traços entre atmosfera, hidrosfera e biosfera na Amazônia, assentando as bases científicas para políticas voltadas ao uso sustentável dos recursos naturais na Amazônia. O aperfeiçoamento das capacidades e das redes de pesquisa nos, e entre os países da Amazônia associados ao LBA, motivará a formação e a pesquisa aplicada em desenvolvimento sustentável e auxiliará no processo de formulação de políticas para o desenvolvimento sustentável da região.