

Jafaro

Aulo

"CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOFÍSICO DO CARBONO ORGÂNICO  
NO PERFIL DE UM SOLO TROPICAL UTILIZANDO A TÉCNICA DO RADIOCARBONO"

J.-M. Flexor, P.F.S. Lôbo, J.-L. Rapaire e G. Siefferman

Laboratório de Geofísica Nuclear, Instituto de Física UFBA  
Salvador (Ba)

## 1. Introdução

O aumento crescente do  $\text{CO}_2$  atmosférico devido à combustão de carbono fóssil de origem industrial e, mais recentemente, a introdução de  $\text{C}^{14}$  de origem termonuclear, permitiram a vários autores um estudo detalhado do ciclo do carbono na natureza (REVELLE ET AL, 1957; RAFTER ET AL, 1965; RAFTER, 1968; NYDAL, 1968).

Este ciclo é governado principalmente pelas trocas de  $\text{CO}_2$  entre a atmosfera e os oceanos no seu sentido mais amplo. Entretanto, a fotossíntese que representa uma troca de cerca de 3% do  $\text{CO}_2$  atmosférico com a biosfera terrestre (REVELLE ET AL, 1957), tem sido, geralmente, apenas objeto de estimativas clássicas.

Por outro lado, 40% da biosfera terrestre está situada entre as latitudes  $30^{\circ}\text{N}$  e  $30^{\circ}\text{S}$ . Além disto <sup>sendo</sup> a sua parte mais ativa. Assim, um estudo de solos florestais característicos destas regiões deveria fornecer resultados interessantes com respeito à quantidade e atividade específica do  $\text{CO}_2$  libertado por mineralização dos vários horizontes e sobre os tempos de residência das diversas frações do humus, sub-reservatório pouco conhecido da biosfera.

Os primeiros resultados obtidos para um destes solos são apresentados.

## 2. Solo estudado.

O perfil estudado está situado em Ondina, nos arredores de Salvador (Ba). Trata-se de um solo ferralítico marrom avermelhado que se desenvolve a partir de um granodiorito, na parte inferior de uma colina a uma altitude de 10 m.

O perfil evolue sob a ação do clima tropical úmido de Salvador caracterizado por uma pluviosidade de 1800 mm e uma temperatura anual média de  $26^{\circ}\text{C}$ . O solo traz uma cobertura vegetal florestal secundária; a drenagem é média. Na superfície observa-se uma liteira de folhas decompostas pouco espessa.

O perfil só foi examinado até 1 m de profundidade:

- a coloração é bastante homogênea em sua totalidade: marrom-avermelhado

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

Nº : 28734 Ex 4

Cote : 13

um pouco mais escuro na superfície do que em profundidade (7,5 YR 5/4).

- o solo é húmifero até aproximadamente 1 m de profundidade; o sistema radicular é importante nos primeiros 40 cm.

- a textura passa progressivamente de areno-argilosa nos 5 cm superiores à argilosa a partir de 20 cm de profundidade.

- a estrutura é fragmentar poliédrica com tendência "grenue" nos 20 cm superiores.

- a porosidade passa de boa, na superfície a média por volta de 1 m de profundidade.

- o perfil contém raras ocorrências de pequenas concreções ferruginosas concentradas nos 20 primeiros centímetros.

Do estudo de outros perfis semelhantes, pode se afirmar que este é a parte superior ( horizontes A e BA) de um perfil do tipo A(B)C; com um horizonte A húmifero, um horizonte (B) estrutural e um horizonte C de alteração da rocha-mãe.

Características físico-químicas:

Granulometria: a textura é areno-argilosa(20%) nos 5 primeiros cm; argilo-arenosa(36%) entre 5 e 15 cm de profundidade e argilosa (42%) a partir dos 15 cm de profundidade.

Matéria Orgânica: o teor de matéria orgânica é elevado: perto de 5% nos 5 primeiros cm; 4% por volta dos 15 cm e ainda 2% aos 50 cm de profundidade. As frações, ~~as frações~~, <sup>em</sup> consideração, a respeito dos métodos de extração são apresentadas no parágrafo seguinte.

Acidez: o pH, pouco ácido, é aproximadamente constante na parte estudada do perfil: 6,2 na superfície e 6,1 a um metro de profundidade.

Capacidade de troca - bases trocáveis e taxa de saturação: a capacidade de troca da terra fina (< 2mm) é fraca, 14 meq.% entre 0 e 5 cm e 11 meq.% entre 15 e 45 cm. A soma das bases trocáveis é elevada: 11,3 meq.% entre 0 e 5 cm; 6,5 meq.% entre 5 e 15 cm e 4,6 meq.% entre 15 e 45 cm de profundidade. Resulta uma taxa de saturação elevada: 80% nos primeiros 5 cm 64% entre 5 e 15 cm e 43% entre 15 e 45 cm de profundidade. Esta taxa de saturação explica o pH relativamente elevado deste perfil.

Estudo da fração argilosa: as extrações inferiores a 2 μ dos 3 níveis estudados ( 0-5, 5-15 e 15-45) foram examinados por difratometria de raios-X. Os diagramas obtidos são semelhantes para os 3 níveis. O diagrama da amostra 15 - 45 cm, representado na figura abaixo mostra:

- 1) caolinita desordenada segundo o eixo b,
- 2) quartzo,
- 3) goetita,
- 4) uma pequena quantidade gipsita,
- 5) traços de hematita,
- 6) traços de ilitas e de argilas "incháveis" (gonflantes).

A amostra contém uma quantidade bastante importante de ferro amorfo.

### 3. Método de extração. Resultados.

O método de extração utilizado neste trabalho é o de DABIN (1971). As ligeiras modificações introduzidas ( acidificação sistemática das frações, principalmente aquelas extraídas com NaOH, afim de evitar uma contaminação pelo  $C^{14}$  do  $CO_2$  atmosférico) foram descritas anteriormente ( FEBXOR ET AL, 1971). Trata-se, provavelmente, de um dos métodos mais modernos e eficientes conhecido atualmente.

Este método, entretanto, não escapa a uma das críticas mais sérias que se pode fazer a todos os métodos de extração. Trata-se do problema da neo-formação a partir dos detritos vegetais de estrutura ainda organizada, pela ação dos reativos alcalinos. A solução fosfórica ( $d=1,3$ ), utilizada no método DABIN é destinada a eliminar estes detritos por densidade, não se podendo obter resultados absolutos. Para isto seria preciso prever uma triagem ao microscópio binocular (POLACH E COSTIN, 1971). Não foi realizado aqui, pois é bem provável que existam outros fatores de erro, muito mais importantes, pelo menos do ponto de vista atividade específica  $C^{14}/C^{12}$ .

Com efeito, supondo uma extração perfeita das frações, sem efeitos de neo-formação, i.e., ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (H) (variável, na realidade, com o pH dos reativos alcalinos utilizados, THOMAN, 1963), não se sabe exatamente a que se refere a atividade específica das frações obtidas pois:

- ácidos fúlvicos definidos como produtos solúveis em reativos alcalinos, não precipitáveis em meio ácido, seriam uma juxtaposição de:

- a) formas jovens resultantes de uma polimerização fraca e incompleta de moléculas solúveis;
- b) de ácidos fenóis e polímeros que parecem constituir o "núcleo" mais ou menos esférico da molécula fúlvica;

c) cadeias sacáricas e urônicas, formando as partes laterais da molécula e que podem ser considerados como humina.

- ácidos húmicos definidos como produtos solúveis em reativos alcalinos, precipitáveis em meio ácido, seriam uma juxtaposição de :

- a) formas jovens, pouco polimerizadas, próximas dos ácidos fúlvicos, pouco resistentes à biodegradação;
- b) formas evoluídas com núcleo fenólico muito importante com ~~relação~~ relação às cadeias laterais, resistentes à biodegradação;
- c) formas muito polimerizadas, somente extráíveis com HF e que podem ser assimiladas à humina.

- humina definida como sendo a fração não extraível pelos reativos alcalina nos seria uma juxtaposição de :

- a) formas resultantes de uma evolução direta de compostos vegetais (lignina) sem passagem por fase solúvel;
- b) formas ( cadeias urônicas e sacáricas) resultando de uma insolubilização mitorápida de compostos solúveis;
- c) formas resultantes de uma " superevolução" dos ácidos húmicos.

Por outro lado, sobre dois solos distintos estudados ( solo a cañinita e solo a montmorillonita), os pesos aparentes dos ácidos húmicos extraídos estão numa relação de 25, o que parece altamente improvável. Uma explicação possível deste fato é dada por DUCHAUFOR, 1971: " o carbono dos ácidos húmicos seria o carbono ligado às argilas dispersáveis enquanto que o carbono ligado às argilas não dispersáveis seria considerado como a humina".

As extrações e as respectivas medidas de atividade específica são apresentadas na tabela abaixo:

Horizonte	AP		AH		H	
	$Q$ (g C.m <sup>-2</sup> )	$\delta^{14}C\%$	$Q$ (g C.m <sup>-2</sup> )	$\delta^{14}C\%$	$Q$ (g C.m <sup>-2</sup> )	$\delta^{14}C\%$
0 - 5 cm	84	15±1	305	25±1	1060	36±1
15 - 45 cm	858	-3±1	780	-3±1	1600	-29±1

Tabela I

Apesar das críticas expostas , os resultados concernentes a atividade específica apresentados acima e suas interpretações, podem interessar os especialistas em ciências dos solos. Para isto é suficiente considerar estes resultados como uma aproximação, por técnicas radiométricas, ao ataque do problema da evolução da matéria orgânica num perfil, muito estudado por inúmeros pedólogos pelos métodos os mais clássicos.

4 - Leis de conservação. Equações gerais.

Aplicando leis de conservação ao teor em carbono de uma fração i num horizonte H qualquer, podemos escrever:

$$\frac{dQ_i}{dt} = a_i F_i - b_i Q_i \quad \text{e} \quad \frac{dQ_i}{dt} = a_i F_i - (b_i + \lambda) Q_i ,$$

onde

- $Q_i$  - quantidade de carbono da fração i presente no horizonte;
- $Q_i$  - número de átomos de  $C^{14}$  contidos em  $Q_i$ ;
- $F_i$  - quantidade de carbono disponível para a formação da fração i;
- $F_i$  - número de átomos de  $C^{14}$  contidos em  $F_i$ ;
- $a_i$  - probabilidade de formação da fração i;
- $b_i$  - probabilidade de desaparecimento da fração i;
- $\lambda$  - constante de desintegração do  $C^{14}$ .

Se o teor em carbono é estacionário, introduzindo o conceito de atividade específica ( $C^{14}/C^{12}$ ) com  $Q_i^* = Q_i/Q_i$  e  $F_i^* = F_i/F_i$ , vem:

$$\frac{dQ_i^*}{dt} = b_i F_i^* - (b_i + \lambda) Q_i^* \quad \dots \dots \dots (1)$$

e  $F_i^* = q_i^*$  representa então a atividade específica da fração i entrando no horizonte por unidade de tempo.

Deprezoando o " Efeito Suess", vem:

- antes de 1954, início das perturbações termonucleares,  $\frac{dQ_i^*}{dt} = 0$ ,

i.e.:

$$T_R^i = \frac{1}{\lambda} ( q_i^*(0)/Q_i^*(0) - 1 ) \quad \dots \dots \dots (2)$$

com  $T_R^i = 1/b_i$ , tempo de residência da fração i no horizonte considerado e  $Q_i^*(0) = Q_i^* ( T \leq 1954 )$ ,  $q_i^*(0) = q_i^* ( T \leq 1954 )$ .

- após 1954,  $\frac{dQ_i^*}{dt} \neq 0$  e a equação (1) é integrada:

$$Q_i^*(T) = b_i \int_0^T q_i^*(T-t) e^{-(b_i + \lambda)t} dt$$

com  $t = 0$  em 1954.

Tendo em vista uma solução numérica, esta equação pode ser escrita na forma:

$$Q_i^*(T) = Q_i^*(0)e^{-(b_i+\lambda)n} + b_i \sum_{n=1}^T q_i^*(T-n)e^{-(b_i+\lambda)n} \dots (3)$$

com n = 0 para 1954.

Por outro lado, o tempo de residência, independente da variação de atividade específica no horizonte considerado, deve satisfazer simultaneamente as equações (2) e (3). Pode também ser definido por:

$T_R^i = Q_i/q_i$ , onde  $q_i$  é a quantidade de carbono da fração i que penetra no horizonte por unidade de tempo.

5- Solução das equações. Resultados.

a) formação no horizonte e mineralização:  $q_i$  provém diretamente da liteira e do sistema radicular ou pela polimerização de compostos hidrossolúveis. A migração, a partir de um horizonte superior, é aqui desprezada.

*En vue de faciliter les calculs nous prenons, dans cet article, pour activité spécifique de la quantité de carbone injectée, la valeur de celle de l'air atmosphérique. Cette simplification peut se justifier par les considérations suivantes:*

também para o sistema radicular.

- O tempo de formação de uma fração i a partir da matéria fresca não ultrapassa 4 anos ( DUCHAUFOUR, ), sendo provávelmente próximo de 1 ano em zona tropical úmida.

A variação da atividade específica do CO<sub>2</sub> do ar, para uma latitude de 13°S é dada no quadro abaixo (FLEXOR ET AL, 1971):

(FLEXOR ET AL)

Ano	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<sup>14</sup> C%	0	1	2	3	9	15	20	20	25	40	59	63	62	60	59	58	56	55

Os valores da atividade específica das frações, permitem obter os valores de  $T_R^i$  compatíveis com as eq. (2) e (3):

Camada	AF			AH			H		
	$T_R$ (anos)	$Q$ g.m <sup>-2</sup>	$q$ g/ano. .m <sup>-2</sup>	$T_R$ anos	$Q$ g.m <sup>-2</sup>	$q$ g/ano. .m <sup>-2</sup>	$T_R$ anos	$Q$ g.m <sup>-2</sup>	$q$ g/ano. .m <sup>-2</sup>
0 - 5 cm	36	84	2,3	20	305	15,2	13	1060	84
15 - 45 cm	380	858	2,25	380	780	2,0	3200	1600	0,5

TABLEAU

Dos resultados encontrados deduz-se que os tempos de residência do humus,  $T_R = \sum Q_i / \sum q_i$  nos horizontes 0 - 5 e 15 - 45 cm são, respectivamente de 13 e 675 anos.

Fazendo-se uma aproximação sobre as atividades específicas e os teores de carbono em camadas sucessivas de 5 cm de espessura entre a superfície e o nível 45 cm, este mesmo cálculo dá para os ácidos húmicos, por exemplo, a série de resultados:

Tabela III

Horizonte (cm)	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30-35	35-40	40-45
$T_R$ (anos)	20	22	29	44	74	153	450	860	1460
$Q$ (g/m <sup>2</sup> )	302	266	188	170	155	140	120	100	85
$q$ (g.m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup> )	15	12	6,4	3,8	2,1	1	0,2	0,1	0,05
$\sum q$	15	27	33,6	37,4	39,5	40,5	40,7	40,8	40,9

Estendendo estes cálculos aos ácidos fúlvicos e à humina e notando-se, por outro lado que  $q_i$  representa, na ausência de migração a quantidade de carbono saindo do horizonte considerado por mineralização ( $q_{i,min}^*(T) = Q_i^*(T)$ ), obtém-se: ~~seguinte~~:

- mais de 90% do CO<sub>2</sub> libertado pelo solo por mineralização ( $\sum q_i$ ) proviria dos 30 primeiros centímetros e sua atividade específica seria de

*Ce carbone représenterait en poids 225 g m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> qui comparé à celui disponible annuellement que nous estimons à compris entre 80 et 160 g m<sup>-2</sup> à partir de l'épave de la litière et de la couverture végétale (X 1985) donne la suivante faïssa sobre o tempo de residência do húmus no solo*

$$30 < T_R < 95 \text{ ans.}$$

b) Caso geral: formação, migração e mineralização.  $q_i$  provém simultaneamente da matéria fresca e da parte migrada a partir do horizonte imediatamente superior.

A atividade específica da quantidade de carbono injetada no horizonte H é dada pela relação:

$$q_{i,(H)}^*(T) = xq_{i,mig(H-1)}^*(T) + (1-x)q_{i,MF}^*(T) \dots\dots\dots(4)$$

onde

$q_{i,(H)}^*(T)$ , atividade específica do carbono introduzido sob forma de fração i no horizonte H;

$q_{i,mig(H-1)}^*(T)$ , atividade específica do C proveniente por migração da fração i a partir do horizonte imediatamente superior H-1;

$q_{i,MF}^*(T)$ , atividade específica do C proveniente da matéria fresca, igual à do CO<sub>2</sub> atmosférico no ano T;

x, percentagem de migração.

Colocando os valores de  $q_{i,(H)}^*(T)$  ( 1954 ≤ T ≤ 1971) calculado para o horizonte 5 - 10 cm nas eq. (2) e (3), obtêm-se as variações possíveis dos tempos de residência das frações em função das percentagens de migração limitadas superiormente, supondo-se que  $T_R^i(5 - 10) \geq T_R^i(0 - 5)$ , ou seja:

$$q_{mig}^{AF}(5 - 10) \leq 13\%, q_{mig}^{AH}(5 - 10) \leq 11\% \text{ e } q_{mig}^H(5-10) \leq 40\%.$$

Estes valores limites permitem determinar para cada fração no horizonte 0 - 5 cm, os tempos de residência para migração e mineralização, os  $q_i$  correspondentes e a velocidade máxima de migração. Os resultados obtidos são apresentados no quadro

quadro

Horizonte 0 - 5 cm	$T_R$ total (anos)	$T_R$ mínimo p/migração (anos)	$T_R$ máx. mineraliz. (anos)	$q_{mig}$ máximo (g.an <sup>-1</sup> . .m <sup>-2</sup> )	$q_{miner.}$ mínimo (g.an <sup>-1</sup> . .m <sup>-2</sup> )	veloc. máx. de migr. (mm.an <sup>-1</sup> )
AF	36	200	44	0,4	2	0,025
AH	20	210	22	1,5	14	0,02
H	13	40	19	27	57	0,12



Le point de vue activité spécifique, non homogène et sans  
 d'humidité, fractions de plus active, peut donner naissance à des acides humiques  
 et fulviques. Pour l'horizon 15-17 ce sont les acides fulviques les  
 plus actifs. Le processus inverse serait principalement.

La complexité du problème de la composition de la matière organique a été  
 abordée précédemment. Les quelques résultats peuvent être considérés comme une  
 contribution à sa résolution.

~~À partir d'approximations successives~~ Par ailleurs, la quantité maximum de carbone  
 rejetée annuellement sous forme de  $CO_2$  dans l'atmosphère serait  $225 g m^{-2} an^{-1}$ ,  
 sur activité spécifique:  $5^{th} C = 26\%$ . Ces valeurs ont été obtenues en supposant  
 un régime de migration nulle dans le profil de A-F-H-H-H. ~~Par ailleurs~~ Mais  
 on se rend compte que les vitesses maximum de migration de ces fractions à partir de  
 l'horizon supérieur étaient respectivement 2,5-2 ~~cm~~ mm en 100 ans

En étendant les mesures d'activité spécifique à d'autres horizons, il sera  
 possible de fixer des limites de variation à ces valeurs. Si au ~~Enfin~~ et autres  
 des études du même type ~~font~~ sur d'autres sols forestiers caractérisés de la  
 zone tropicale devrait conduire à une ~~estimation plus précise~~ ~~estimation plus précise~~ ~~estimation plus précise~~  
 du  $CO_2$  entre atmosphère et biosphère terrestre ~~d'un réservoir connu existant dans~~  
~~cycle du carbone dans la nature.~~ ~~un réservoir~~ ~~connu existant dans~~  
 cycle du carbone dans la nature.