

capítulo

Fracionamento da matéria orgânica humificada de solos brasileiros

Tony J. Ferreira Cunha
Luciano P. Canellas
Gabriel de A. Santos
Lucedino P. Ribeiro

A pergunta que, geralmente, é feita no primeiro dia do curso sobre matéria orgânica é: qual é o conteúdo ideal de matéria orgânica no solo? A resposta quase sempre frustra o aluno. Nos solos tropicais intemperizados, bem drenados, o conteúdo de carbono raramente excede 5 % da massa de solo, com valores da mediana em torno de 1%. Mesmo fazendo parte da menor fração sólida do solo, suas características imprimem e ao mesmo tempo refletem as suas propriedades. Foram reunidas aqui as experiências com fracionamento da matéria orgânica em alguns solos brasileiros obtidos de artigos publicados, principalmente, na Pesquisa Agropecuária Brasileira e na Revista Brasileira de Ciência do Solo. Como há uma plethora de métodos de fracionamento, a comparação entre os resultados requer cautela por parte do leitor. Realizaram-se análises qualitativas sobre a distribuição das frações humificadas e suas relações com aspectos de fertilidade do solo. No início da unidade são tecidos alguns comentários sobre o uso da matéria orgânica como base da fertilidade do solo e da produção da agricultura familiar e os princípios da transformação dos resíduos orgânicos adicionados ao solo. Ao final, é realizada de forma muito sucinta uma análise sobre recuperação de teores de matéria orgânica com adição de resíduos orgânicos.

Introdução

O conteúdo de matéria orgânica é controlado pelos fatores de formação do solo. O clima, o material de origem, o relevo, a atividade biológica e o tempo condicionam o balanço de carbono em sistemas naturais não perturbados. Com o cultivo, ou seja, a perturbação do equilíbrio dinâmico, as condições para oxidação da matéria orgânica são favorecidas e um novo estado de equilíbrio é alcançado. Porém, geralmente, com menor conteúdo de matéria orgânica no sistema. O direcionamento do fluxo de energia e de matéria proveniente da fotossíntese para obtenção de produtos agrícolas com valor de mercado provoca uma simplificação do ecossistema, reduzindo ao mínimo, com a monocultura, a diversidade de organismos e suas interrelações. Essa simplificação diminui a qualidade do ambiente. Doran & Parkin (1994) consideraram a qualidade do solo como a capacidade do mesmo em funcionar

dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, a fim de sustentar a produtividade biológica, manter ou aumentar a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e dos animais. Essa conceituação traz implícita uma contradição: manejar um sistema natural é alterar sua qualidade ambiental, ou seja, aspectos econômicos (e.g. produção agrícola) são incompatíveis com a preservação do ambiente (aspectos ecológicos). Esse choque de interesses orienta a questão do debate sobre um *desenvolvimento sustentado* com sérias limitações ou até impossíveis dentro dos marcos da economia neoliberal. Um aprofundamento dessa questão será visto mais adiante no capítulo 11 sobre manejo da matéria orgânica sob a perspectiva Agroecológica.

Transformação dos resíduos orgânicos no solo

Em clima úmido e quente os resíduos vegetais que chegam ao solo são rapidamente transformados (Dabin, 1981), podendo sofrer seqüestro imediato pela fração mineral ou transformação através de processos bioquímicos de natureza não clara que levam até a sua estabilização. Através da análise da matéria orgânica de diferentes regiões de clima tropical e subtropical do Brasil, Volkoff & Cerri (1988) postularam que os principais fatores que controlam a formação do húmus (tanto húmus como matéria orgânica serão utilizados daqui para frente como sinônimos da fração de compostos orgânicos do solo formados pelas substâncias húmicas e não-húmicas) são a temperatura, presença ou ausência de bases e drenagem, ou seja, os fatores que mais influenciam a atividade biológica. Indicam, ainda, que a presença de bases tem um efeito mais importante do que os outros fatores. Na ausência de bases, a diferenciação é feita, antes de tudo, em função da drenagem e, em condições bem drenadas, a humificação é controlada pelas mudanças de temperatura. Se uma mudança relativa desses fatores altera as frações que compõem a matéria orgânica, parece óbvio que o estudo das relações entre as frações refletirão a intensidade da atividade biológica sobre o solo. Como o processo de formação da matéria orgânica é lento, flutuações no conteúdo relativo de suas frações expressam mudanças efetivas de curso duradouro. Em outras palavras, é um indicador estável, conservador. Somente mudanças significativas no sistema em estudo serão refletidas na distribuição dos componentes humificados da matéria orgânica.

O conteúdo de matéria orgânica foi definido por Kononova (1968) como o produto do balanço entre as quantidades relativas formadas e decompostas anualmente somadas ao húmus inicial do solo. Essa reserva de compostos orgânicos reflete, principalmente, o balanço entre a produção de biomassa microbiana, a estabilização dos resíduos orgânicos oriundos de plantas e animais e a mineralização dos compostos orgânicos.

A composição química dos resíduos vegetais, principais precursores da matéria orgânica humificada, é bastante conhecida. C, H, O, N, P e S compõem os tecidos, celulose, hemicelulose, proteínas, amido, pectinas, taninos, ligninas e lipídeos totalizam entre 10 a 25% da massa vegetal. Desses constituintes, os principais são a celulose e a hemicelulose (30-65%), as ligninas (8-25%), as proteínas e aminoácidos (1-5%) que, de acordo com sua distribuição relativa, grau de maturidade, natureza dos tecidos incorporados e atuação dos fatores de clima e solo controlam a velocidade de conversão dos compostos de carbono

dos resíduos da fitomassa para matéria orgânica humificada. O coeficiente de humificação dos materiais orgânicos (fração remanescente após um ano de decomposição) varia com a composição química da planta, sendo, via de regra, maior quanto mais elevado o teor de lignina do material, devido à sua maior resistência ao ataque microbiano (Flaig, 1988). A Figura 3.1 mostra os principais constituintes dos vegetais que, ao chegarem ao solo, servirão como substrato para a atividade microbiana e como precursores do processo ecológico da humificação. A decomposição dos resíduos vegetais e animais compreende, em termos teóricos, uma fase inicial de perdas constantes e bastante rápidas, preferencialmente de carboidratos. Uma fase posterior corresponde ao período de perdas mais lentas dominado pela degradação de compostos insolúveis em meio ácido. Em termos médios, as taxas de humificação do carbono fixado pela fotossíntese são da ordem de 0,7% (Zech *et al.*, 1997).

Nem toda a massa remanescente dos processos de decomposição é convertida em húmus e nem todas as substâncias húmicas recentemente formadas são retidas no solo. Uma taxa de estabilização tão baixa de carbono no solo comparada às reservas totais de húmus de solos do mundo inteiro (estimadas em $2,5 \times 10^{12}$ Mg) levou Kononova (1982) a constatar que aproximadamente 1000 anos foram necessários para a formação dessas reservas. Apesar da grande variabilidade intrínseca dos métodos de datação de carbono, os valores obtidos para substâncias húmicas indicam um tempo médio algo entre 250-1000 anos. Para ambientes tropicais, esse tempo tende a ser menor. Por exemplo, a partir de dados de delta C-13 foi estimada uma taxa de renovação de ácidos húmicos de cerca de 13 anos (Canellas *et al.*, 2002b).

Além da relativa estabilização do húmus, é observada a longa duração dos processos de sua formação. A chave dessa questão é: em química do solo, a avaliação de características (atributos do solo) requer que o sistema esteja em equilíbrio, o que é impossível num sistema aberto como o solo e dependente de tempos geológicos. A análise da qualidade do solo a partir de atributos e propriedades químicas da matéria orgânica do solo será o resultado do processo de sua formação e das mudanças proporcionadas pelo manejo (ou os tratamentos de um experimento) que terão pouca influência sobre a distribuição relativa dos componentes humificados num período curto de tempo. Alterações na natureza química das frações humificadas implicarão, portanto, mudanças marcantes nas condições ecológicas e aponta para uma intervenção imediata no sentido de se assegurar a qualidade da matéria orgânica.

Apesar da matéria orgânica humificada no solo apresentar-se como um *continuum* indissociável de compostos de carbono que vão desde os encontrados em células vivas até biomacromoléculas pouco ou muito transformadas, é possível separar distintas frações com base em aspectos químicos, tais como, solubilidade, densidade e massa molar. As diferentes frações de carbono orgânico humificado extraído do solo apresentam características químicas, físicas e morfológicas diferenciadas, e a distribuição destas frações no solo podem indicar, portanto, a qualidade da matéria orgânica. O uso da distribuição relativa das frações de matéria orgânica, como indicador da mudança de manejo do solo ou da qualidade do ambiente, encontra respaldo nos trabalhos de Kononova (1982), Schnitzer & Khan (1978) e Schnitzer (1991).

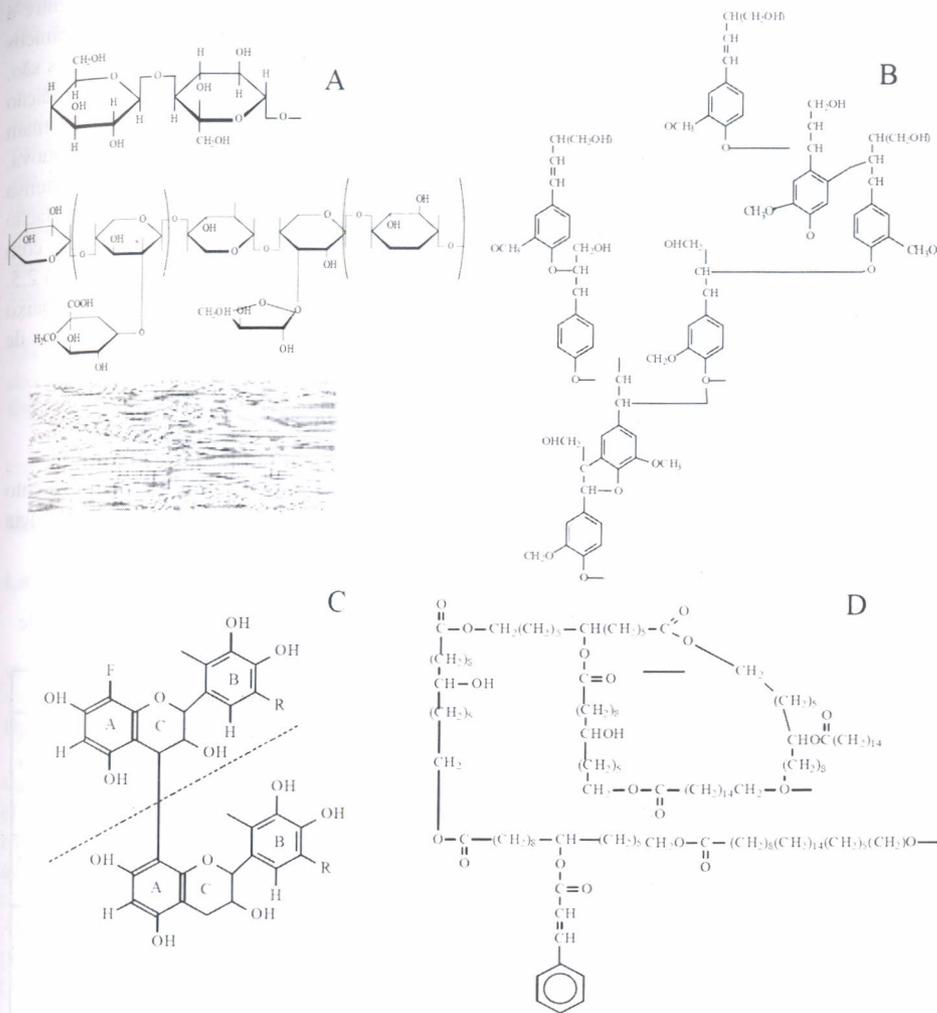


Figura 3.1. A: Monômeros de celulose e de hemicelulose. Rede de microfibrilas responsáveis pela sustentação da parede celular vegetal. B: Representação esquemática de uma lignina e suas principais C: Representação esquemática dos monômeros dos taninos (genericamente conhecidos como os polifenóis do solo). D.: Esquema representativo de lipídeos presentes nos tecidos vegetais. Todas as figuras foram adaptadas de Kogel-Knaber. I. *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 139-162, 2002.

A formação das substâncias húmicas é caracterizada por um processo complexo baseado na síntese e/ou ressíntese dos produtos da mineralização dos compostos orgânicos que chegam ao solo. É possível, teoricamente, simplificar os vários caminhos da humificação em dois mecanismos: a preservação seletiva de biopolímeros e a policondensação de moléculas pequenas (Camargo *et al.*, 1999). Essas transformações incluem um conjunto de reações de oxidação, desidratação, hidrólise, descarboxilação e condensação que são influenciadas pelas condições do solo, tais como, tipo de argila, pH e teor de bases (Zech *et al.*, 1997). Assumindo qualquer das várias possibilidades para o processo de estabilização

dos compostos orgânicos no solo, os ácidos húmicos representam a fração intermediária entre a estabilização dos compostos pela interação com a matéria mineral e a ocorrência de ácidos orgânicos oxidados livres na solução do solo (ácidos fúlvicos livres ou associados). Os ácidos húmicos são, portanto, um marcador da direção do processo de humificação e refletem, como tal, tanto a condição de gênese, como de manejo do solo. Solos de ambientes temperados, naturalmente férteis, apresentam teores relativos maiores de ácidos húmicos e valores da relação C_{AH}/C_{AF} maiores que 1,0 (Kononova, 1982). Já a fração orgânica dos solos tropicais é dominada pelas huminas e, tanto a intensa mineralização dos resíduos, como restrições edáficas à atividade biológica, torna os valores da relação C_{AH}/C_{AF} menores do que 1,0 (Dabin, 1981; Ortega, 1982; Canelas *et al.*, 2000). De acordo com Kononova (1982), a faixa dos valores da relação C_{AH}/C_{AF} para solos temperados varia de 0,7 a 2,5. Para solos tropicais, os valores médios são mais baixos (Ortega, 1982). De uma forma geral, o baixo conteúdo de bases trocáveis nos solos mais intemperizados diminui a intensidade dos processos de humificação (condensação e síntese). Em conseqüência, a relação C_{AH}/C_{AF} é menor.

Fracionamento químico da matéria orgânica humificada

A Tabela 3.1. apresenta uma possibilidade de interpretação dos dados obtidos a partir do fracionamento químico da matéria orgânica. Note que a interpretação é sempre relativa. Isso denota a importância da contextualização do estudo da matéria orgânica do solo.

Tabela 3.1. Proposta de Interpretação do fracionamento químico da matéria orgânica do solo de acordo com Labrador Moreno (1996).

Índice	Avaliação
C_{AH}/C_{AF}	É um indicador de condensação da matéria orgânica solúvel. Valores normais superiores a 1. Valores inferiores podem indicar: evolução limitada da matéria orgânica devido a razões edáficas ou de manejo; aportes recentes de matéria orgânica.
$C_{HUM}/(C_{AH}+C_{AF})$	Indica a estabilidade estrutural da matéria orgânica. Quanto mais elevado o valor melhor; avaliar mais sua evolução do que os valores absolutos.
$C_{AH}+C_{AF}+C_H/C_{TOTAL}$	Avalia o grau de humificação da matéria orgânica do solo. Valores normais entre 65 e 92%. Valores inferiores podem indicar: resíduos orgânicos recém adicionados ao solo que ainda não tiveram tempo para evoluir; Valores superiores indicam solos empobrecidos sem aportes de matéria orgânica.

É difícil recomendar um valor absoluto de C no solo como sendo o valor ideal, bem como uma concentração de C em cada uma das frações humificadas. É preciso conhecer o ambiente original, a cultura e o grau de impacto que o agricultor proporciona no ambiente agrícola decorrente de sua necessária atividade. A pesquisa sobre matéria orgânica não pode, portanto, perder seu nexos com a história do ambiente estudado que envolve, além das questões ambientais de clima, aspectos sociais e econômicos.

A maioria dos trabalhos realizados diz respeito a solo e de resíduos orgânicos em países de clima frio. O levantamento sistemático dos diversos trabalhos realizados com fracionamento da matéria orgânica na zona tropical asiática, africana e americana ainda está para ser feito. Segue uma revisão de alguns dos trabalhos realizados com solos brasileiros.

Fracionamento químico da matéria orgânica humificada em alguns tipos de solos do Brasil

Para elaboração deste tópico foram revisados diversos trabalhos realizados no Brasil sobre fracionamento das substâncias húmicas. Muitos trabalhos não puderam ser utilizados para o cálculo médio da distribuição das frações húmicas por classe de solo, uma vez que os dados foram apresentados em gráficos. Outros apresentavam os dados do fracionamento, porém não faziam referências aos dados químicos do solo. Além disso, os trabalhos não seguem uma metodologia padronizada de fracionamento dificultando a análise dos mesmos. Como se vê, limitações de ordem metodológica impedem um detalhamento quantitativo mais apurado. No entanto, a análise qualitativa pode ser realizada sem grandes riscos.

Foram coletadas informações dos diferentes horizontes "A" analisados em 99 perfis de solo. Essas informações foram agrupadas nas principais classes de solos, quando possível, ou em função do ambiente (hidromórfico ou não, etc.). Dos trabalhos que não apresentaram informações quantitativas foram coletadas informações qualitativas com vista ao enriquecimento do presente texto.

As fontes de informações, as diferentes classes de solos estudadas, o método de extração utilizado e os respectivos conteúdos de cada fração húmica, podem ser visualizados na Tabela 3.2.

Matéria orgânica humificada nas principais classes de solos do Brasil

Latossolos

Os Latossolos são os solos mais representativos da cobertura pedológica no Brasil, abrangendo cerca de 40% do território brasileiro. Diversos estudos foram realizados com vistas ao entendimento e conhecimento da dinâmica das frações húmicas nestes solos em diferentes regiões bioclimáticas do Brasil.

A composição da matéria orgânica do horizonte superficial de Latossolos Amarelos álicos de textura argilosa a muito argilosa em diferentes regiões bioclimáticas do Brasil foi estudada por Longo (1982). Os Latossolos da região de Viçosa-MG e do Vale do Jequitinhonha apresentaram teores maiores de ácidos húmicos do que o Latossolo da região Amazônica que apresentou maior teor de ácidos fúlvicos em relação aos demais solos estudados. O autor atribuiu esse resultado ao ciclo mais rápido de mineralização da matéria orgânica em solos sob clima quente e úmido como os da Amazônia. Além disso, a ausência de contrastes climáticos suficientes podem impedir a polimerização dos precursores húmicos e sua conversão em compostos de massa molecular aparentemente mais elevada (Andreux & Becerra, 1975).

Tabela 3.2. Principais classes de solos estudadas, frações húmicas em % relativa do carbono total, autores e método utilizado na extração e fracionamento.

Solo	Hor.	AH	AF	H	AH/AF	SHS/H	Autor	Método
-----% do C-----					-	-		
Cambissolo	A1	19,6	6,36	62,39	3,1	0,42	Cunha	Dabin
Cambissolo	A1	5,22	16,62	55,69	0,3	0,39	(1998)	
Cambissolo	A1	12,53	11,16	67,09	1,1	0,35		
Cambissolo	Ap	7,18	18,77	62,45	0,4	0,42		
Cambissolo	Ap	12,03	15,41	63,27	0,8	0,43		
Cambissolo	A1	13,27	15,36	63,77	0,9	0,45		

Tabela 3.2. Principais classes de solos estudadas, frações húmicas em % relativa do carbono total, autores e método utilizado na extração e fracionamento (continuação)

Solo	Hor.	AH	AF	H	AH/AF	SHS/H	Autor	Método
Latossolo	A	14,3	24,0	61,7	0,6	0,62	Coelho (1991)	Kononova
Latossolo	A	8,8	33,8	57,4	0,3	0,74		
Latossolo	A	9,6	32,7	57,7	0,3	0,73		
Latossolo	A	8,7	32,6	58,7	0,3	0,70		
Latossolo	A	10,5	31,4	58,1	0,3	0,72		
Latossolo	A	12,7	28,5	58,8	0,4	0,70		
Latossolo	A1	15,9	11,8	61	1,3	0,45	Santa Isabel (1988)	Dabin
Latossolo	A1	18,8	14,7	56,5	1,3	0,59		
Planossolo	A1	13,5	19,6	58,3	1,3	0,66		
							Manzatto	
Gleissolo	A1	13,99	15,43	67,35	0,7	0,57	(1990)	Dabin
Latossolo	A1	0,85	2,3	7,6	0,9	0,44	Borges (1993)	Dabin
Latossolo	Ap	0,72	2,7	6,5	0,4	0,41		
Latossolo	Ap	0,3	2,1	5,8	0,3	0,53		
Latossolo	Ap	0,41	2	5,2	0,1	0,41		
Latossolo	Ap	0,88	2,6	7,2	0,2	0,46		
Orgânosolo	Hp	33,2	39,4	27,4	0,3	0,48	Conceição (1989)	Dabin
Organossolo	Hp	27,5	12,8	59,7	0,8	2,65		
Gleissolo	Ap	42,7	36,8	20,5	2,1	0,68		
Gleissolo	Ap	29,6	45,2	25,2	1,2	3,88		
Terra preta	A	39,89	9,28	39,34	0,7	2,97	Lima (2001)	IHSS
Terra preta	A	34,1	9,53	56,35	4,3	1,25		
Terra preta	A	29,74	1,98	56,94	3,6	0,77		
Latossolo	A	11,02	30,14	54,41	15,0	0,56		
Latossolo	A	20,27	23,64	58,1	0,4	0,76		
Gleissolo	A	4,81	18,07	67,46	0,9	0,76		
Neossolo	A	11,34	13,4	70,1	0,3	0,34		
Plintossolo	A	18,75	20,13	56,25	0,8	0,35		
Alissolo	A	10,16	15,25	73,3	0,9	0,69		
Plintossolo	A	24,76	14,76	49,52	0,7	0,35		
Latossolo	A1	1,61	2,64	5,07	1,7	0,80		
Latossolo	A1	0,37	3,85	4,87	0,6	0,84		
Latossolo	A1	2,11	5,9	9,49	0,1	0,87		
Latossolo	A1	16,29	11,68	18,78	0,4	0,84		
							Melo	
Latossolo	A	5,27	20,43	73,62	1,4	1,49	(1994)	Dabin
Latossolo	A	10,46	25,58	64,34	0,3	0,33	Longo (2000)	Schutzer
Latossolo	A	6,67	17,03	76,29	0,4	0,56		
Cambissolo	Ap	4,29	4,56	56,93	0,4	0,31	Canellas (2003)	Kononova
Cambissolo	Ap	2,74	6,47	69,68	0,9	0,16		
Cambissolo	Ap	2,12	3,81	38,24	0,4	0,13		
Cambissolo	Ap	1,78	3,3	32,65	0,6	0,16		

Tabela 3.2. Principais classes de solos estudadas, frações húmicas em % relativa do carbono total, autores e método utilizado na extração e fracionamento (continuação)

Solo	Hor.	AH	AF	H	AH/AF	SHS/H	Autor	Método
Latossolo	A1	10,2	12,8	65,4	0,5	0,16	Cunha	Dabin
Latossolo	A1	14,3	9	63,5	0,8	0,35	(2003) Oliveira	
Latossolo	Ap	4,99	41,26	37,02	1,6	0,37	(1990)	Kononova
Argissolo	Ap	0,42	1,48	52,33	0,1	1,25	Canellas	Dabin
Argissolo	Ap	0,29	2,07	71,43	0,3	0,04	(2004)	
Argissolo	Ap	0,47	3,61	48,78	0,1	0,03		
Planossolo	A1	2,9	3,65	39,76	0,1	0,08		
Planossolo	A1	2,78	2,19	29,91	0,8	0,16		
Glei	Ap	0,61	2,88	33,4	1,3	0,17		
Terra preta	Au	25	10	51	0,2	0,10	Cunha	IHSS
Terra preta	Au	31	21	52	2,5	0,69	(2005)	
Terra preta	Au	31	22	33	1,5	1,00		
Terra preta	Au	35	9	41	1,4	1,61		
Terra preta	Au	35	13	41	3,9	1,07		
Terra preta	Au	29	13	52	2,7	1,17		
Terra preta	Ap	26	10	49	2,2	0,81		
Terra preta	Ap	40	11	42	2,6	0,73		
Terra preta	Ap	26	16	46	3,6	1,21		
Terra preta	Ap	45	11	41	1,6	0,91		
Terra preta	Ap	46	17	31	4,1	1,37		
Terra preta	Ap	37	15	56	2,7	2,03		
Terra preta	Ap	25	11	61	2,5	0,93		
Terra preta	Ap	41	8	31	2,3	0,59		
Terra preta	Ap	28	11	41	5,1	1,58		
Terra preta	Ap	26	11	43	2,5	0,95		
Terra preta	Ap	28	8	39	4,7	0,85		
Terra preta	Ap	18	16	51	3,5	0,92		
Latossolo	A	22	20	43	1,1	0,67		
Latossolo	A	16	21	55	1,1	0,98		
Latossolo	A	19	8	48	0,8	0,67		
Latossolo	A	25	10	51	2,4	0,56		
Plintossolo	A1	21	36	46	0,6	1,24	Benites	IHSS
Planossolo	Ap	21	29	44	0,7	1,14	(2000)	
Argissolo	Ap	16	25	46	0,6	0,89		
Argissolo	AP	11	24	55	0,5	0,64		
Chernossolo	Ap	15	17	59	0,9	0,54		
Planossolo	Ap	17	30	61	0,6	0,77		
Luvissolo	Ap	14	23	54	0,6	0,69		
Luvissolo	Ap	11	27	53	0,4	0,72		

Tabela 3.2. Principais classes de solos estudadas, frações húmicas em % relativa do carbono total, autores e método utilizado na extração e fracionamento (continuação)

Solo	Hor.	AH	AF	H	AH/AF	SHS/H	Autor	Método
Neossolo	Ap	16	24	41	0,7	0,98	Benites (2000)	IHSS
Argissolo	Ap	19	33	58	0,6	0,90		
Luvissolo	Ap	11	28	56	0,4	0,70		
Latossolo	Ap	12	35	43	0,3	1,09		
Latossolo	Ap	14	31	51	0,5	0,88		
Latossolo	A1	15	28	47	0,5	0,91		
Latossolo	A1	12	41	45	0,3	1,18		
Cambissolo	A	16	25	50	0,6	0,82		
Nitossolo	A1	13	35	46	0,4	1,04		
Nitossolo	Ap	11	34	54	0,3	0,83		
Latossolo	Ap	12	37	49	0,3	1,00		
Argissolo	A	19	26	43	0,7	1,05		

AH: ácidos húmicos; AF: ácido fúlvico; H: humina; AH/AF: razão ácido húmico/ácido fúlvico; SHS/H: substâncias húmicas solúveis/humina;

Estes fatores devem contribuir para que a velocidade de condensação dos precursores húmicos ocorra de forma menos acentuada nos Latossolos da região Amazônica. A relação AH/AF foi de 1,02, para os Latossolos da região de Viçosa (clima temperado chuvoso mesotérmico) e Vale do Jequitinhonha (clima contrastado em estações secas e úmidas) e de 0,66 para os Latossolos da Amazônia (clima úmido). Somente para o Latossolo de Viçosa foi realizado o estudo em profundidade e foi observado aumento da fração ácidos fúlvicos com a mesma, onde a relação AH/AF diminuiu de 1,02 no horizonte superficial para 0,31 em subsuperfície.

Comparando a composição do húmus de Latossolos Amarelos na Amazônia, sob diferentes coberturas vegetais (capoeira jovem, sob floresta primária e sob capoeira de 35 anos) Manarino *et al.* (1982), concluíram que a matéria orgânica humificada do solo sob capoeira jovem se distingue nitidamente daquele do solo sob floresta. Sob capoeira de 35 o fracionamento apresentou resultados muito próximos ao obtido na floresta.

Na Amazônia, a maior parte do carbono constituinte da matéria orgânica humificada do solo sob floresta natural encontra-se na forma de ácidos fúlvicos livres (30%) e humina (50%). O restante (20%) distribui-se nas frações alcalino-solúveis (ácidos húmicos e fúlvicos ligados), Manarino *et al.*, (1982). De modo geral, foi verificado que, em profundidade, ocorre aumento dos ácidos fúlvicos livres, mas a fração humina manteve-se praticamente constante ao longo do perfil. Já as frações alcalino-solúveis diminuíram em profundidade. Tanto na serrapilheira como no solo, a razão AH/AF correlacionou-se com os teores de H^+ e Al^{+++} , ou seja, tanto a serrapilheira como o solo com maior conteúdo de ácidos húmicos são mais ácidos. Para os autores, o desmatamento, mesmo seguido por cultura de curta duração, provoca importantes mudanças na dinâmica do carbono, resultando numa distribuição diferente do carbono no perfil do solo, numa modificação das características da matéria

orgânica humificada e no aumento da acidez do solo. Neste caso, o novo estado húmico não é permanente, sendo a matéria orgânica possuidora de características de agente desestabilizador. É pouco condensada e ácida e se o solo desmatado for mantido sob cultura contínua, seria necessário limitar a acidificação e a lixiviação utilizando-se plantas de cobertura apropriada.

Em Latossolos distróficos da Floresta Amazônica na região do rio Madeira, Volkoff & Cerri (1981) verificaram que a matéria orgânica humificada do horizonte A foi diferente daquela encontrada em profundidade. No horizonte A foi observada a seguinte composição: 50% de carbono na humina, 15% nos ácidos fúlvicos livres e 35% nos alcalino-solúveis. Já o horizonte B o húmus apresentou: 40% de carbono na forma de humina, 40% nos ácidos fúlvicos livres e 20% nos alcalino-solúveis. Nestes solos tanto no horizonte A como no horizonte B a fração alcalino-solúvel foi constituída por proporções elevadas de ácidos fúlvicos. Apesar dos autores não terem apresentado a razão AH/AF ao longo dos perfis, ficou claro que a fração ácidos fúlvicos foi a dominante em relação à fração ácidos húmicos ao longo de todo o perfil de solo. A fraca condensação e a rápida renovação são as características da matéria orgânica humificada na superfície do solo diretamente relacionada com a dinâmica da floresta (Volkoff & Cerri, 1981).

De modo geral, em solos ferralíticos típicos de clima tropical úmido, verifica-se uma dominância importante dos ácidos fúlvicos sobre os ácidos húmicos e a relação AH/AF diminui à medida que aumenta a profundidade (Dabin, 1981). Comportamento bastante diferente é observado nas frações húmicas de Latossolos possuidores de horizonte A antrópico (Terra Preta de Índio), quando comparados a outros Latossolos não antropogênicos (Cunha, 2005). O horizonte A antrópico é bastante enriquecido em bases trocáveis, principalmente Ca^{++} , apresenta pH em torno de 6,5, teor elevado de matéria orgânica e portanto, elevada fertilidade química. O conteúdo elevado de carbono nos solos antropogênicos, mesmo localizados em ambientes favoráveis à decomposição e lixiviação, pode ser atribuído à formação de complexos de alta estabilidade matéria orgânica-cálcio, ou ainda, à própria composição da matéria orgânica rica em carbono pirogênico (carvão) adicionado ao solo pela atividade dos povos indígenas pré-colombianos. Um estudo sistemático deste solo poderá indicar o caminho para uma agricultura sustentável nos trópicos úmidos e quentes. Uma forte indicação já pode, no entanto, ser obtida com o fracionamento químico da matéria orgânica. A maior parte das substâncias húmicas destes solos é constituída pela fração humina, sendo a fração ácidos húmicos a dominante das frações alcalino-solúveis. A fração ácidos húmicos nos solos antropogênicos encontra-se num estágio mais avançado de humificação, devido à maior concentração de estruturas estáveis (aromáticas) e reativas (grupos carboxílicos). Na Tabela 3.3 pode-se observar o maior enriquecimento em ácidos húmicos nos Latossolos antropogênicos comparados com outros Latossolos do Brasil. Verifica-se também um grande predomínio da fração ácidos fúlvicos em relação à fração ácidos húmicos e uma dominância da fração humina nos Latossolos não antropogênicos. O predomínio da fração ácidos húmicos sobre a fração ácidos fúlvicos nos solos antropogênicos, ao contrário do que se observa nos demais solos de terra firme e várzea da Amazônia, pode ser o resultado de intensa humificação e rápida mineralização de grandes quantidades de material orgânico rico em N, P, e Ca incorporados ao solo (Zech *et al.*, 1990).

Tabela 3.3. distribuição percentual das frações humificadas em relação ao carbono total de alguns solos brasileiros

Tipo de solo	H	AF	AH	AH/AF
% do carbono total				
Latossolos	44	17	10	0,60
Terra Preta do Índio	45	12	33	2,75
Argissolos	57	10	4	0,40
Cambissolos	57	10	8	0,80
Neossolos	70	13	11	0,85
Organossolos	43	26	30	1,16
Planossolos	43	8	6	0,75
Plintossolos	53	17	21	1,25
Gleissolos	43	24	18	0,77
Média (excluída as terras pretas)	51	16	13	0,82

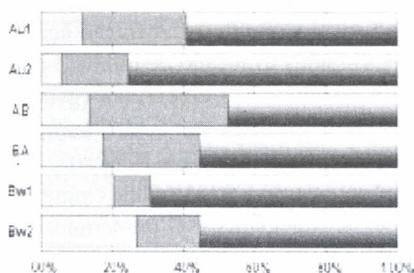
H: humina; AF: ácidos fúlvicos; AH: ácidos húmicos

Em Latossolos antropogênicos sob mata, a fração ácidos húmicos foi dominante no horizonte A antrópico e quando sob uso agrícola foi dominante em todo o perfil do solo, inclusive no horizonte Bw, em relação à fração ácidos fúlvicos (Figura 3.2). Neste caso, o cultivo favorece a oxidação de frações húmicas menos evoluídas e o acúmulo relativo de frações mais estáveis (ácidos húmicos e humina).

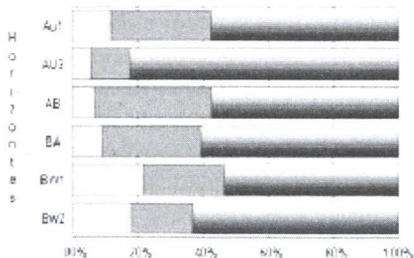
Em relação a Latossolos sob cerrado, Volkoff & Cerri (1988), verificaram que a matéria orgânica humificada foi composta de aproximadamente 50% de humina e que as frações alcalino-solúveis predominavam sobre os ácidos fúlvicos livres. Em profundidade, a proporção de humina permaneceu constante e a fração ácidos fúlvicos livres predominou sobre as frações alcalino-solúveis. A razão AH/AF nestes solos foi igual ou inferior a 1, indicando a predominância de frações menos evoluídas, estando estas relacionadas à reação ácida dos solos sob cerrado.

Em Latossolos em região semi-árida, Santa-Isabel (1988), verificou que a matéria orgânica humificada foi caracterizada pelo enriquecimento em huminas (mais de 60% do carbono total) e que a fração alcalino-solúvel foi constituída, principalmente, por compostos orgânicos pouco condensados (ácidos fúlvicos precursores, ácidos húmicos marrons e provavelmente ácidos hidrossolúveis). Ocorre naturalmente uma concentração maior de ácidos húmicos em superfície (razão AH/AF = 1,35) e diminuição em profundidade (razão AH/AF = 0,27). A maior atividade biológica em superfície junto com o maior aporte de resíduos orgânicos concorre para a formação de substâncias húmicas alcalino solúveis mais condensadas.

LATOSSOLO AMARELO Coeso antrópico (mata)



LATOSSOLO AMARELO Coeso antrópico (8 anos de uso)



Acidos fúlvicos Acidos húmicos huminas

Figura 3.2. Distribuição das frações húmicas em perfis de Latossolos Antrópicos da Amazônia, (Cunha, 2005).

Em Latossolos Amarelos coesos distróficos de tabuleiro na região do Recôncavo Baiano Cunha *et al.*, (2003b), verificaram que a maior parte do carbono foi encontrada na fração humina, seguida pela fração ácidos fúlvicos, semelhante ao comportamento observado por Santa Isabel (1988). Os valores da razão AH/AF foram sempre menores do que 1 indicando predomínio da fração ácidos fúlvicos sobre a fração ácidos húmicos ao longo de todo o perfil de solo. Também verificou-se aumento da fração ácidos fúlvicos livres com a profundidade e diminuição da fração humina.

Em Latossolos distróficos do Nordeste sob floresta tipo equatorial úmida, floresta de altitude com clima mais seco e vegetação de caatinga, foi observado que o conteúdo de matéria orgânica não depende diretamente dos aportes vegetais, mas sim dos fatores climáticos tais como, temperatura e umidade (Volkoff, 1977). Sob clima quente e úmido os baixos teores de matéria orgânica são explicados, sobretudo, pela mineralização rápida da matéria orgânica. Sob clima seco e frio, ao contrário, ocorre uma diminuição da biodegradação e conseqüentemente maior acumulação de matéria orgânica. A repartição do húmus em Latossolos distróficos evidenciou que a matéria orgânica leve é quase inexistente, resultado da pequena persistência dos produtos vegetais no solo, pois a mesma é rápida e totalmente humificada (Volkoff, 1977). A proporção das frações alcalino-solúveis é muito grande representando entre 60 a 70% do carbono total do solo. A humina apresenta os menores teores (10 a 20% do carbono total). A repartição do carbono ao longo de 50 a 100 cm de profundidade indicou que os compostos orgânicos percussores da humificação liberados dos restos vegetais na superfície não eram imediatamente imobilizados e migravam até grandes profundidades. A fração ácidos fúlvicos livres representou entre 1 a 6% do carbono total do solo em superfície chegando a compor entre 40 - 60% do C em profundidade, conseqüentemente houve diminuição da razão AH/AF. Os ácidos fúlvicos livres constituem uma das frações mais importantes do húmus dos Latossolos distróficos e sua presença está associada à presença do Al^{+++} trocável (Volkoff, 1977). Em Latossolos distróficos do Nordeste, os restos vegetais são rapidamente mineralizados formando grande quantidade de produtos pré-húmicos solúveis. Estes produtos podem migrar para baixo do perfil. A forte humificação, a instabilidade das matérias húmicas formadas, a abundância e permanência de frações de massa molecular aparentemente menos elevada e, ainda, o deslocamento destas frações mostram que, nos Latossolos distróficos, a matéria orgânica pode exercer uma ação importante na mobilização de elementos minerais. As substâncias húmicas mais móveis migram para o horizonte B. A sua acumulação pode explicar o aparecimento de características estruturais particulares, como uma consistência mais forte, ligada à desorganização estrutural do horizonte B (Volkoff & Andrade, 1976).

Em resumo, na superfície dos Latossolos, a mineralização dos detritos vegetais é sempre rápida; os produtos pré-húmicos que se formam no decorrer da mineralização migram facilmente em profundidade; uma proporção variável desses produtos dá origem a ácidos fúlvicos (AFL) que são adsorvidos nas argilas ou retidos sob forma de complexo com o alumínio; o restante precipita e se condensa mais ou menos rapidamente, transformando-se em ácidos húmicos e também em produtos de massa molecular relativamente mais elevada que vão integrar a humina (Volkoff & Andrade, 1976; Volkoff, 1977). No que diz respeito ao húmus dos Latossolos distróficos este é constituído por duas partes: uma bastante transitória e outra mais permanente. Na primeira, têm-se os ácidos húmicos e uma fração da humina herdada. A outra parte é formada pelos ácidos fúlvicos e uma outra fração da humina chamada de humina de precipitação. No horizonte A, a humina se renova mais rapidamente que todas as frações, enquanto que em profundidade ela aparece mais estável. Os ácidos fúlvicos livres, no horizonte A são, em comparação a outras frações, os que se renovam mais lentamente e, em profundidade, eles se renovam quase tão

lentamente quanto a humina (Volkoff *et al.*, 1978).

Argissolos e Cambissolos

Argissolos e Cambissolos eutróficos, ricos em argila montmorilonita e vermiculita foram estudados por Volkoff *et al.*, (1989). Na parte superior do perfil do Cambissolo argissólico e do Argissolo câmbico, 50 a 60% do carbono foi encontrado na forma de humina, enquanto 40 a 50% nas frações alcalino-solúveis. Na parte inferior dos perfis foi verificado que apenas entre 10 a 20% do carbono constituíram a fração alcalino-solúvel. A maior parte do carbono foi encontrado na fração humina. Nos dois solos estudados por Volkoff e colaboradores foi verificada pouca quantidade de ácidos fúlvicos livres (menos de 10%). Foi observado, ainda, acúmulo de ácidos fúlvicos livres na superfície; o conteúdo de ácidos alcalino-solúveis foi na ordem de 50-60% do carbono total, sendo a maior parte pertencente à fração huminas. Em subsuperfície foram observadas quantidades não negligenciáveis de ácidos fúlvicos livres (20% do carbono total). Neste solo a razão AH/AF foi sempre menor do que um.

Num Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico submetido a diferentes sistemas de cultivo, foi observado por Saraiva (1987) que a fração ácidos fúlvicos foi três a quatro vezes maior do que a fração ácidos húmicos. O autor verificou que a humina correspondeu a mais da metade do carbono do solo, em todas as situações analisadas. Comportamento semelhante também foi verificado em estudos realizados por Parra (1986) e Nascimento (1989).

Em frações humificadas da matéria orgânica de uma topossequência no estado do Rio de Janeiro, foi verificado que os perfis situados nos terços superior e médio da encosta apresentaram maior percentual de humina do que os perfis situados no terço inferior e em geral, menor percentual de ácidos húmicos, mesmo nos Argissolos eutróficos (Canellas *et al.*, 2000). O valor da razão AH/AF foi sempre menor do que um em praticamente todos os horizontes dos perfis estudados. Entretanto, observou-se que os valores desta relação aumentaram com a descida na encosta.

Estudando a composição da matéria orgânica de Cambissolos eutróficos desenvolvidos sob calcário na região de Irecê-Ba, Cunha & Ribeiro (1998) observaram que a fração humina representou mais de 50% do carbono total. Sob cultivo, os solos apresentaram maiores quantidades de ácidos fúlvicos. Entretanto, esta fração diminuiu em profundidade. No solo sob mata foi observado menor quantidade de ácidos fúlvicos livres e maior de humina. A diminuição em profundidade foi atribuída ao teor elevado de cálcio que promove a estabilização dos compostos orgânicos e à transformação imediata dos compostos orgânicos precursores hidrossolúveis. A migração da fração solúvel pode ser desfavorecida uma vez que o cálcio pode provocar precipitação dos ácidos fúlvicos, que seguida pelas reações de condensação provocada pela ação de outros íons tais como ferro por exemplo, favorecem a formação de substâncias húmicas mais condensadas (Jacquin *et al.*, 1980).

A composição média do húmus do horizonte superficial de Argissolos e Cambissolos do Brasil pode ser observada nas Tabela 3.3. Pode ser observados o predomínio da fração humina e baixo conteúdo de ácidos húmicos nos Argissolos estudados. A distribuição da fração humificada nos Cambissolos também é qualitativamente a mesma, ou seja, maior conteúdo de humina, predominância de ácidos fúlvicos em relação aos ácidos húmicos nas frações alcalino solúveis.

Solos com problemas de hidromorfia

A natureza da matéria orgânica humificada é determinada por fatores diretamente ligados ao solo, principalmente à presença ou à ausência de nutrientes (Volkoff & Cerri, 1988, 1980, 1981;

Volkoff *et al.*, 1984). Em condições de drenagem impedida ou má drenagem (Volkoff & Cerri, 1980) observaram uma proporção elevada de frações alcalino-solúveis com razão AH/AF > 1, e os ácidos húmicos com valores baixos para a relação E_4/E_6 (para ver detalhes da razão E_4/E_6 , consulte o capítulo 5) tanto em meio alcalino como nos Gleissolos, como em meio distrófico nos Plintossolos (Volkoff & Cerri, 1981). Foi observada ausência da fração ácidos fúlvicos livres no Gleissolo, enquanto que no Plintossolo essa fração foi abundante. Isso pode ser um indicativo de que a formação de ácidos fúlvicos livres ocorre em ambientes ácidos, ou seja, independe das condições, de drenagem (Cerri & Volkoff, 1988). Em relação aos outros solos, os solos hidromórficos apresentam-se relativamente enriquecidos em ácidos húmicos.

Em Vertissolos, Gleissolos e Planossolos (todos distróficos em superfície e eutróficos em profundidade) foi verificado que o húmus apresentou composição bastante semelhante (Cerri & Volkoff, 1988). A matéria orgânica encontrava-se bastante humificada e aproximadamente 50% do húmus foi constituído de frações alcalino-solúveis. Os ácidos húmicos, no entanto, apresentaram baixa mobilidade eletroforética e pequena absorção de luz na região do visível, o que caracterizou um húmus de elevado grau de maturação. Nesses três solos foi observada uma pequena quantidade de ácidos fúlvicos. Estes ácidos estão geralmente associados a solos distróficos.

Em solos de restinga, sob influência da hidromorfia, Gomes *et al.*, (1998), verificaram em Espodossolos que a fração ácidos húmicos foi dominante em relação à fração ácidos fúlvicos, e a razão AH/AF foi sempre maior do que 1 ao longo de todos os perfis estudados. Farmer *et al.* (1983), também verificaram em horizontes Bh de Espodossolos hidromórficos que mais de 90% da fração extraível foi composta pela fração ácidos húmicos. Cerri & Volkoff (1988) encontraram valores similares para outros Espodossolos. Gomes *et al.*, (1998) verificaram decréscimo da razão AH/AF em profundidade nos perfis de Espodossolos brasileiros e atribuíram este comportamento à maior mobilidade e menor condensação dos ácidos fúlvicos em relação aos ácidos húmicos, permitindo que os ácidos fúlvicos estejam presentes em maiores proporções nas partes inferiores dos horizontes Espódicos. Alterações na matéria orgânica de um Espodossolo hidromórfico pelo uso com pastagens cultivadas no Pantanal Mato-grossense foram estudadas por Fernandes *et al.*, (1999). Os autores observaram alterações nas proporções relativas das frações húmicas em função da introdução da pastagem. No cerrado nativo predominou a fração ácidos fúlvicos (82% do carbono total); sob pastagem de dez anos, predominou a fração húmica (62% do carbono total) em detrimento da fração ácidos fúlvicos, além de uma pequena diminuição no conteúdo de ácidos húmicos. No solo sob pastagem (20 anos) os ácidos fúlvicos voltaram a predominar novamente, seguido pela fração ácidos húmicos e diminuição do conteúdo de húmica diminuiu. Após 20 anos de cultivo da pastagem foi observado uma redução de 28% no conteúdo de carbono na profundidade de 0-40 cm. Essa dinâmica de evolução das frações húmicas foi atribuída por Fernandes *et al.*, (1999) como uma conseqüência do aumento do conteúdo de cálcio que tem papel importante na formação de humatos de cálcio (Oades, 1988). Uma elevação no conteúdo de cálcio pode provocar aumento no conteúdo das frações húmicas mais estáveis representado pelo aumento da húmica observado no solo sob pastagem de dez anos. A diminuição dos teores de cálcio no perfil sob pastagem de 20 anos, até valores próximos aos observados no solo sob cerrado nativo, pode ter provocado diminuição do conteúdo de húmica e aumento do conteúdo de ácidos fúlvicos, fração menos estável, característica de solos mais ácidos (Cerri & Volkoff, 1988).

Uma evolução parecida dos compartimentos húmicos foi observado por Dabin (1982) em solos da Costa do Marfim, onde o cultivo contínuo, durante cinco anos, com uma leguminosa do gênero *Pueraria*, levou a aumentos nos teores de cálcio, acompanhados de aumentos do carbono

total e da fração húmica. De modo inverso, numa área contígua submetida a cultivo contínuo com milho foi observada diminuição nos teores de cálcio, com predomínio de ácidos fúlvicos na fração húmica.

O predomínio da fração ácidos fúlvicos em solos de cerrado também foi observado por Andreux & Becerra (1975) estudando áreas de savana inundáveis na Colômbia sob solos arenosos. Segundo esses autores, nas áreas de solos mais arenosos, a alta porosidade favorece o arraste dos precursores húmicos para as camadas mais profundas. Além disso, a baixa disponibilidade de água nas camadas superficiais durante a estação seca é um fator limitante para a atividade biológica e, conseqüentemente, para a condensação dos precursores da humificação, refletindo em valores baixos da razão AH/AF.

Em Organossolos da baixada litorânea do Rio de Janeiro Freixo *et al.* (1997) verificaram que a matéria orgânica humificada foi constituída, principalmente, pela fração húmica e apenas uma pequena parte pelas frações alcalino-solúveis. Os valores da razão AH/AF foram próximos da unidade. Conceição (1989), estudou solos hidromórficos de elevado teor de matéria orgânica (Organossolos e Gleissolos Distróficos) e constatou que o húmus apresentou um conteúdo relativamente baixo de ácidos fúlvicos livres e de húmica e proporções mais elevadas de substâncias alcalino-solúveis principalmente de ácidos húmicos. Nos solos orgânicos, a razão AH/AF variou de 2,1 em superfície até 1,6 em profundidade. No Gleissolo os valores para esta razão foram da ordem de 0,4 em superfície a 0,7 em profundidade. Freixo *et al.* (1997) e Valadares (2003), verificaram baixos teores de substâncias húmicas alcalino-solúveis em outros Organossolos do Estado do Rio de Janeiro. Ambos os trabalhos relatam a predominância da fração húmica na composição da matéria orgânica destes solos indicando a necessidade de estudos mais sistemáticos sobre o fracionamento químico da fração humificada dos solos orgânicos.

Na região semi-árida do Rio Grande do Norte a matéria orgânica humificada de um Gleissolo eutrófico, rico em argila montmorilonita, apresentou a mesma composição ao longo de todo o perfil do solo (Volkoff & Cerri, 1980). Foi observado um conteúdo baixo de húmica e aumento nas frações alcalino-solúveis, principalmente ácidos húmicos extraídos com pirofosfato de sódio. Foram encontrados, ainda, valores entre 1 e 2 para a razão AH/AF. Os autores observaram influência da reação do meio e do tipo de argila sobre a distribuição das frações humificadas. O meio alcalino e a argila do tipo 2:1 (montmorilonita), favorecem o processo de condensação das substâncias húmicas uma vez que esta é um processo ecológico mediado pela atividade biológica favorecida nestas condições.

Em solos degradados de várzea (Gleissolos distróficos) localizados no Rio de Janeiro Manzatto (1990), observou o domínio da fração húmica (60%) sobre as frações alcalino-solúveis (20-30%) e ácidos fúlvicos livres (menos de 10%). A concentração de húmica foi atribuído à humificação direta dos tecidos lignificados modificados por processos de demetilação, uma vez que as vias de humificação através dos mecanismos de insolubilização e de neossíntese microbiana são bastante reduzidas em condições de hidromorfismo (Duchaufour, 1977). A maior parte das frações alcalino-solúveis correspondeu aos ácidos húmicos. Uma composição semelhante do húmus de Gleissolos foi descrita por Ortega (1982), que também relacionou o alto conteúdo de húmica às condições hidromórficas que limitam os processos de humificação da matéria orgânica, dominantes durante a formação desses solos. Por outro lado, Cerri & Volkoff (1988) encontraram proporções mais elevadas das frações alcalino-solúveis, menos de 50% da fração húmica e proporção muito reduzida de ácidos fúlvicos livres na matéria orgânica humificada de Gleissolos eutróficos com argila de atividade alta da ilha do Marajó. Da mesma forma, Conceição (1989) estudando a composição do húmus de Gleissolos álicos com argila de atividade alta no Rio de

Janeiro, detectou um predomínio das frações alcalinas-solúveis sobre as frações húmica e ácidos fúlvicos livres em proporções semelhantes àquelas obtidas por Cerri & Volkoff (1988). A proximidade destes resultados foi atribuída à presença de argila de atividade alta e de cátions polivalentes (Ca^{++} , Mg^{++} e Fe^{+++}), que atuam intensificando os processos de condensação e estabilização dos ácidos húmicos desencadeados, provavelmente, no período de drenagem sazonal ou artificial.

O predomínio da fração ácidos fúlvicos em relação à fração ácidos húmicos em todo o perfil do um Gleissolo distrófico foi observado por Manzatto (1990). Nesse solo, a razão AH/AF foi maior nos horizontes superficiais (AH/AF=0,7), enquanto em profundidade a fração ácidos fúlvicos foi mais dominante (AH/AF=0,2). Ortega (1982), também observou decréscimo da razão AH/AF com a profundidade em Gleissolos, com valores mudando de 1,0 em superfície para 0,7 a 50 cm de profundidade. O autor atribuiu a maior proporção de AH em superfície à melhor aeração do horizonte superficial nos períodos de abaixamento do lençol freático, que favorece a atividade biológica e, por conseguinte, a mineralização da matéria orgânica e a produção de compostos fenólicos solúveis, os quais por sua vez, através de processos de policondensação dão origem a fração ácidos húmicos (Duchaufour, 1977). A presença de um horizonte glei quase que permanentemente reduzido, torna desfavorável a síntese de ácidos húmicos, podendo contribuir para a formação preferencial de substâncias húmicas pouco condensadas e húmica em profundidade conforme constatado no estudo realizado por Manzatto (1990). Dessa forma, podemos observar que a presença ou ausência de hidromorfia modifica a distribuição das frações húmicas. Martins (1987) verificou que essa distribuição foi idêntica nos solos imperfeitamente e moderadamente drenados, porém diferente da encontrada nos solos bem drenados. As diferenças ocorreram, principalmente, na fração ácidos húmicos e nos ácidos fúlvicos ligados. Em solo bem drenado foi observado maior conteúdo de ácidos húmicos e menor de ácidos fúlvicos extraídos com hidróxido de sódio. Este comportamento sugere o favorecimento da formação de ácidos húmicos em detrimento dos ácidos fúlvicos em solos bem drenados, ou seja, de condições físicas favoráveis à atividade biológica.

A composição da matéria orgânica de Gleissolos degradados foi estudado por Conceição (1989) que observou menor razão AH/AF (0,7) em solos com horizonte A parcialmente decapitado em relação a uma maior razão AH/AF (1,2) em solos onde o horizonte A não se encontrava degradado. Manzatto (1990) observou que o cultivo em Gleissolos promoveu variações rápidas na distribuição das frações húmicas ao longo do ciclo da cultura de arroz inundado. Estas consistiram, resumidamente, em aumento na proporção dos ácidos húmicos e ácidos fúlvicos livres e diminuição das frações húmica e ácidos fúlvicos ligados, indicando que, além da mineralização, a matéria orgânica destes solos deve sofrer processos de condensação com o cultivo. Não foi verificado efeito da aplicação de doses de calcário + aração profunda na distribuição das frações humificadas após o cultivo. Entretanto, quando a aração não foi seguida pela calagem, a quantidade de ácidos fúlvicos diminuiu e de húmica aumentou, sugerindo que a aração pode favorecer a insolubilização das frações mais lábeis. Nas parcelas que receberam apenas doses de calcário e não foram aradas foi observada uma redução no conteúdo de ácidos fúlvicos e aumento da fração húmica. Esse comportamento foi atribuído por Manzatto (1990) à ação do cálcio na formação de agregados estáveis insolúveis. O papel do cálcio na estabilização das substâncias húmicas foi discutido por Duchaufour (1970).

A composição do húmus de Organossolos e Gleissolos do sudoeste da Bahia, distróficos e álicos, respectivamente, foi estudada por Couto & Resende (1985). Foi observado maior evolução do húmus nos Organossolos (predomínio de ácidos húmicos). Os autores não apresentaram

dados quantitativos referentes às diferentes frações húmicas.

Santa-Isabel (1988) observou em Planossolos predominância da fração húmica na composição da matéria orgânica. Os ácidos fúlvicos constituíram a maior parte da fração solúvel em todo o perfil. Foi verificado, ainda, baixo teor de ácidos fúlvicos livres. A composição do húmus destes solos foi atribuída à presença de hidromorfia que dificulta a evolução das substâncias húmicas. Modificações no uso do solo proporcionaram mudanças na composição da matéria orgânica de um Planossolos hidromórficos somente nos primeiros 5. Foi verificado diminuição no conteúdo de ácidos fúlvicos nos sistemas sob cultivo, revelando tendência de maior redução desta fração nos sistemas com maior revolvimento do solo. A maior parte do carbono total foi encontrado na forma de húmica (46-62%), seguida pela fração ácidos húmicos (25-40%) e fúlvicos (7-2%) independente do sistema de manejo. Os sistemas de cultivo do solo com preparo convencional reduziram os teores de carbono total e das frações ácidos húmicos e húmica, quando comparado ao solo com cobertura vegetal original.

Canellas *et al.* (2000) verificaram, em ambiente com drenagem limitada, que o impedimento de drenagem encontrado no terço inferior da encosta e o fluxo vertical de água mais intenso favorecem as reações de policondensação dos compostos orgânicos, aumentando a relação AH/AF à medida que se desce na encosta, onde ocorrem os Planossolos e Gleissolos. A posição do solo na toposequência influencia a dinâmica da água, que por sua vez, condiciona os teores das frações da matéria orgânica, principalmente das frações ácidos fúlvicos livres e ácidos fúlvicos, que são transportados pelo fluxo lateral e vertical de água no relevo.

A composição média do húmus do horizonte superficial de alguns solos sob influência de hidromorfia pode ser observada na Tabela 3.3. Nos Gleissolos e Planossolos verificou-se o predominância da fração ácidos fúlvicos sobre a fração ácidos húmicos. Nos Organossolos e Plintossolos a fração ácidos húmicos predomina sobre a fração ácidos fúlvicos. A fração húmica foi a fração com maiores teores nos diferentes solos estudados.

Solos de campos de altitude

A composição da matéria orgânica humificada dos horizontes superficiais de três solos distróficos de campo de altitude em Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina (Cambissolo, Chernossolo e Cambissolo húmico, respectivamente), estudados por Volkoff *et al.*, (1984) foi marcada pela nítida acumulação de material humificado. O fracionamento da matéria orgânica apresentou as seguintes características: proporção elevada de ácidos fúlvicos livres (10-20%) e de frações alcalino-solúveis (40%) no horizonte A acompanhado do menor conteúdo de húmica (40%). Foi observado (nos três solos) aumento dos ácidos fúlvicos livres em profundidade. Em conclusão, o húmus desses solos foi constituído de ácidos fúlvicos e húmicos facilmente extraíveis, ou seja, de produtos de pequeno grau de condensação, o que evidencia certa mobilidade das frações. Uma composição similar foi encontrada em horizontes Bh de Espodossolos (Turenne, 1977) e A de Andossolos (Hetier, 1975) e atribuídas à existência de complexos organo-minerais, com o alumínio. Para Volkoff *et al.* (1984), a participação do alumínio no processo de acumulação do húmus não pode ser negligenciada e, nas condições climáticas dos campos de altitude, a temperatura suficientemente baixa diminui a rapidez do processo de mineralização das substâncias húmicas do solo.

A maior prevalência de ácidos fúlvicos nos solos de reação ácida pode resultar, em longo prazo, em ambientes menos favoráveis à atividade microbiana, com concomitante redução na fertilidade do solo (Silva *et al.*, 2000). Benites *et al.* (2001) caracterizaram a matéria orgânica

de Neossolo Litólico, Espodosolo Ferrocárbico e Cambissolo Húmico, todos álicos, sob campos de altitude no parque estadual da Serra do Brigadeiro em Minas Gerais. Foi observado teores elevados de ácidos fúlvicos (26% do carbono total) e predomínio da fração humina, principalmente nos horizontes superficiais. A razão AH/AF diminuiu com o aumento da profundidade em todos os solos estudados. Valores elevados da razão AH/AF (da ordem de 3,2) foram observados apenas no horizonte A do Neossolo Litólico e Espodosolo Ferrocárbico. A composição média do húmus do horizonte superficial de Neossolos pode ser observada na Tabela 3.3. Verifica-se o predomínio da fração ácidos fúlvicos sobre a fração ácidos húmicos e uma alta percentagem da fração humina.

Baseado nos dados desta revisão pode-se concluir que na maior parte dos solos do Brasil, os horizontes superficiais são enriquecidos em humina e em ácidos fúlvicos (exceção para os solos antropogênicos e alguns organossolos). Segundo Mendonça & Rowell (1994), a predominância de ácidos fúlvicos deve-se à limitação nas reações de condensação, enquanto a predominância da humina é atribuída à rápida insolubilização dos resíduos vegetais que chegam ao solo (Canellas *et al.*, 2003). No que diz respeito à distribuição das frações húmicas no perfil do solo, degradados ou não, observou-se que dos solos estudados apenas 14% destes apresentaram razão AH/AF > 1 no horizonte superficial, não considerando as Terras Pretas. Quando no cálculo foram incluídos os dados provenientes de solos antropogênicos a percentagem passou para 35%. Em subsuperfície, na maioria dos casos que puderam ser analisados, a razão AH/AF foi sempre menor do 1. Em relação à fração não extraível, dos 99 solos estudados, apenas 20% destes apresentaram teores mais elevados de alcalino-solúveis em relação à humina, com valores da razão AH+AF/H > 1 (Conceição, 1989; Lima, 2001; Volkoff & Andrade, 1976). Em alguns solos antropogênicos foi observada relação AH/AF maior do que 1 a quase 1,5 m de profundidade (Cunha, 2005). Estes conteúdos estão relacionados ao horizonte A antrópico, que como mostrado anteriormente, são mais enriquecidos em ácidos húmicos.

Na Tabela 3.3, pode ser visualizada a composição média da distribuição percentual das frações humificadas da matéria orgânica em solos do Brasil. Vale ressaltar que aqui foram computadas todas as classes de solos apresentadas na Tabela 3.2, com exceção dos solos antropogênicos, devido às suas características especiais, e também que não se levou em consideração às diferenças entre os métodos de extração utilizados, portanto pede-se cautela por parte do leitor na interpretação destes dados. Pode se concluir, que a distribuição da matéria orgânica humificada dos solos brasileiros é caracterizada pelo elevado conteúdo da fração insolúvel (humina) e a maior parte da fração solúvel é composta pelos ácidos fúlvicos.

Manejo dos solos e frações húmicas

A composição da matéria orgânica e as feições estruturais das substâncias húmicas podem fornecer informações para descrever e estabelecer parâmetros sobre a capacidade do agroecossistema suportar determinadas práticas agrícolas (Mielniczuck, 1999). O uso da matéria orgânica do solo como indicador de qualidade está baseado na premissa de que ela exerce uma importante ação na fertilidade dos solos (afeta propriedades químicas, físicas e biológicas), e suas frações humificadas são um marcador químico estável da história do solo (Canellas *et al.*, 2004).

Apesar de geralmente ser encontrado em menor proporção nos solos brasileiros, os ácidos húmicos assumem um papel importante como indicador da qualidade da matéria orgânica do solo devido ao fato de que esta fração é a que mais sofre alterações estruturais durante o processo de humificação (Kögel-Knaber *et al.*, 1988). Geralmente, o comportamento espectroscópico da

fração ácidos fúlvicos é semelhante ao de polissacarídeos e a humina é pouco modificada devido a sua associação com a fração mineral do solo e sua natureza predominantemente apolar (Zech *et al.*, 1997). Desta maneira a composição do húmus pode ser utilizada como um indicador apropriado dos efeitos do manejo sobre a qualidade do solo (MacCallister & Chien, 2000; Canellas *et al.*, 2003), já que os processos ecológicos de formação do húmus dependem intensamente da interferência antrópica. Mudanças marcantes na matéria orgânica do solo são observadas com a alteração no uso do solo, tanto do ponto de vista quantitativo quanto do ponto de vista qualitativo (Campbell, 1978; Andreux & Cerri, 1989). De modo geral, os níveis de matéria orgânica do solo diminuem quando sistemas nativos são utilizados para o cultivo. Alterações na temperatura, umidade, aeração, absorção e lixiviação em consequência do cultivo (Sanchez, 1976), além da destruição completa da serrapilheira original, modificam a distribuição e a atividade da fauna e microbiota do solo (Cerri *et al.*, 1985), influenciando assim o tempo de residência do carbono armazenado no solo e a sua distribuição entre as distintas frações.

A diminuição da adição anual de carbono bem como as altas taxas de decomposição, características das regiões tropicais, ocasionam um declínio do conteúdo de matéria orgânica humificada no solo antes em equilíbrio com a vegetação nativa. Detwiller (1986) estimou uma perda de 40% no conteúdo de carbono com o cultivo agrícola e uma perda de 20% no caso de uso com pastagem. A relação entre a matéria orgânica (carbono total) e o equilíbrio das frações húmicas influencia as características do solo, tais como: estrutura, capacidade de troca catiônica e disponibilidade de nutrientes (Dabin, 1982). Alterações no uso do solo podem, também, modificar esse equilíbrio (Martins *et al.*, 1990), acarretando consequência para as propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos.

A razão AH/AF foi utilizada por Kononova (1982) com um indicador da qualidade do húmus. O baixo conteúdo de bases trocáveis no solo pode diminuir a intensidade do processo de humificação, isto é, as reações de síntese e condensação química e microbiana (Steverson, 1994). Como resultado, espera-se uma menor razão AH/AF em solos mais intemperizados. Avaliando a composição da matéria orgânica humificada de um Argissolo Amarelo distrófico em tabuleiros costeiros sob cultivo, Canellas & Façanha (2004) observaram que o conteúdo de ácidos fúlvicos livres variou de 8 a 10% e com predomínio de ácidos fúlvicos na fração alcalino-solúvel. O conteúdo de ácidos húmicos foi sempre menor do que o de ácidos fúlvicos e o mesmo se concentrou na superfície. Os maiores teores foram observados para a fração humina e a razão AH/AF foi sempre menor que um e diminuiu com a profundidade. Canellas *et al.*, (2004), avaliaram as alterações no teor e qualidade da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho-Amarelo na região de Seropédica-RJ, com a introdução de leguminosa herbáceas perenes. Apesar do pequeno tempo de duração do experimento (2 anos) foi observado uma mudança qualitativa significativa com o manejo dos resíduos vegetais (não foram observadas mudanças quantitativas). A introdução da cobertura permanente do solo com leguminosas conferiu maior grau de condensação aos ácidos húmicos, ou seja, a alteração deu-se em relação a aspectos qualitativos.

Avaliando o efeito de longo prazo da preservação da palhada por ocasião da colheita e da adição de vinhaça sobre as propriedades químicas de um Cambissolo Háptico Ta vértico (Canellas *et al.*, 2003) observaram que o manejo com cana crua e o com adição de vinhaça aumentaram os teores de macro e micronutrientes, em comparação com o manejo cana queimada e sem adição de vinhaça. A melhoria dos atributos químicos do solo favoreceu a formação de substâncias húmicas alcalino-solúveis mais condensadas (ácidos húmicos).

Parra (1986) observou após oito anos de cultivo que a maior redução no teor de matéria orgânica na camada de 0-10 cm de um Latossolo Vermelho distrófico submetido ao plantio

convencional, refletiu numa maior contribuição relativa dos ácidos fúlvicos e diminuição da porcentagem de carbono da fração humina, sugerindo uma tendência de formação preferencial de ácidos fúlvicos em solos com cultivo mais intenso. O autor encontrou valores da relação AH/AF em torno de 0,33. O efeito do manejo do solo nas frações húmicas de um Latossolo Vermelho distrófico foi avaliado por Nascimento (1989) que encontrou valores para a relação AH/AF próximos a 0,3, nos cinco centímetros superficiais, e valores inferiores a 0,5 na camada de 15 a 20 cm.

A influência da vinhaça, da fertilização mineral e do cultivo nas frações humificadas da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob cerrado e cultivado por sete anos com milho foi estudada por Coelho (1991). Foi observada uma elevação da fração ácidos fúlvicos em relação às outras frações húmicas e a aplicação da vinhaça não alterou qualitativamente a distribuição das substâncias húmicas do solo. A fração humina representou mais de 50% do carbono total e o solo sob cerrado apresentou os menores teores de ácidos fúlvicos e os maiores de ácidos húmicos. Foi observado, ainda, aumento da fração ácidos fúlvicos com a profundidade do solo.

O uso de lodo da estação de esgoto num Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar, alterou o conteúdo das frações orgânicas, promovendo, principalmente, aumento da fração humina seguida das frações ácidos fúlvicos e ácidos húmicos (Nascimento *et al.*, 1988; Melo *et al.*, 1994). Os autores observaram interconvenções muito rápidas entre as frações do húmus, influenciadas pelas variações climáticas e pelo estágio de evolução do sistema radicular da cana-de-açúcar e seus reflexos sobre a biomassa microbiana do solo. A incorporação de restos culturais ao solo também altera a distribuição das frações humificadas. Albertini (1983) verificou que aumentos de 82 e 27% no carbono das frações ácidos fúlvicos e húmicos, respectivamente dos 15 aos 31 dias de incubação e diminuição de 13 e 5% nos teores de carbono orgânico total e humina. Foi verificado que a razão AH/AF aumentou sensivelmente até os 105 dias após o plantio. Tal comportamento foi atribuído à condensação de compostos orgânicos mais simples, inclusive os produzidos pelo sistema radicular da cana e pelos microrganismos associados à rizosfera. Em solos em vias de degradação, a relação AH/AF diminui à medida que a estabilidade estrutural aumenta (Dabin, 1976). Demétrio *et al.*, (1998) estudando os efeitos da adição de diferentes resíduos de culturas ao solo sobre a distribuição do carbono das frações humificadas da matéria orgânica, não detectaram alterações nos teores das frações alcalino-solúveis, mas verificaram uma elevação significativa nos teores da fração humina. Por outro lado, Ceretta *et al.* (1997), estudando o acúmulo de carbono nas frações húmicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto observaram que, na camada mais superficial, a fração humina foi dominante seguida pela fração ácidos húmicos e da fração ácidos fúlvicos. Observaram, também, que o sistema de plantio direto permitiu o aumento do carbono no solo e que o mesmo promoveu uma distribuição mais uniforme das frações ácidos húmicos e fúlvicos nos horizontes mais profundos. A razão AH/AF foi sempre maior do que 1 em superfície.

Alterações na distribuição das frações humificadas da matéria orgânica de horizonte superficial de Latossolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo, ambos distróficos, que receberam o equivalente a 80 t ha⁻¹ de composto de lixo urbano e lodo da estação de tratamento de esgoto foram avaliadas por Canellas *et al.*, (2001). Observou-se, nesse experimento, aumento do conteúdo de ácidos fúlvicos, com conseqüente diminuição da razão AH/AF e da qualidade do húmus. Os autores, apesar de não terem observado mudanças quantitativas no conteúdo de ácidos húmicos, observaram alterações importantes nas suas características químicas que serão discutidas nos capítulos cinco até nove. A razão AH/AF dos resíduos foi maior do que a observado nos solos e a adição dos resíduos conferiu para ambos os solos o caráter fúlvico para a matéria orgânica. A

predominância de AF sobre os AH é indicativo de características desfavoráveis ao húmus dos resíduos orgânicos em relação ao do solo.

A retirada da vegetação nativa para introdução de pastagens leva a importantes modificações na dinâmica das substâncias húmicas. A influência da introdução de pastagens nas frações húmicas de Latossolos distróficos sob Cerrado e da floresta Amazônica foram estudadas por Longo & Espíndola (2000). Os autores observaram diminuição nas concentrações de ácidos fúlvicos livres e humina com a mudança da condição de vegetação natural para pastagens, tanto no cerrado como na floresta tropical. As maiores modificações foram observadas no solo sob floresta, evidenciando o efeito do tipo da cobertura vegetal sobre o teor e sobre a distribuição dos componentes orgânicos em solos tropicais. Não foram verificadas diferenças significativas em relação à fração ácidos húmicos nas duas condições estudadas. A ocorrência de decréscimo no teor de carbono das frações mais condensadas depois de instalada nova vegetação também foi observada por Ferreira (1977). Longo & Espíndola (2000) observaram concentração das frações ácidos húmicos e humina em superfície e aumento relativo da fração ácidos fúlvicos em profundidade. Quando foi comparada a distribuição das frações húmicas entre o solo da região amazônica e a do cerrado verificaram nitidas diferenças nas duas situações de manejo (vegetação nativa e pastagem), tendo o solo sob vegetação nativa sob floresta apresentado os maiores valores de ácidos húmicos. Para os autores, esta diferença está relacionada às diferenças fitoclimáticas existentes entre as duas regiões, o que promoveu, possivelmente, mudanças nos processos de mineralização e síntese do húmus, pois estes são de natureza predominantemente microbiana. Qualquer fator que afete a atividade dos microrganismos afeta a ecologia da humificação.

Marchiori Junior & Melo (2000) estudaram a alteração na composição do húmus de Latossolo Vermelho eutrófico sob mata e submetido à diferentes sistemas de manejo. Com a cobertura de mata foram encontrados os maiores valores para a fração humina (74% do carbono total) e o uso agrícola aumentou os teores de ácidos húmicos e fúlvicos na camada de 0 a 10 cm. Tanto sob mata natural como sob cultivo os teores de ácidos fúlvicos foram menores do que os de ácidos húmicos, o que sob o ponto de vista da fertilidade do solo pode ser interessante, por colaborar para uma menor lixiviação ou translocação de elementos químicos da camada arável para as camadas subsuperficiais (Greenland, 1965).

Diferentes sistemas de produção agrícola foram estudados durante seis anos por Souza & Melo (2003) que observaram mudanças na composição da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho Eutrófico. Os cultivos em sistemas de plantio direto com pousio e cultivo de mucuna preta e feijão guandu no inverno favoreceu o aumento da fração humina nas camadas superficiais do solo. Foi observado também que os sistemas de plantio direto de milho em monocultura e sucessão com leguminosas (mucuna preta e feijão guandu) favoreceu a migração de ácidos fúlvicos para as camadas mais profundas, reduzindo os teores de substâncias húmicas alcalino-solúveis na camada superficial e também a interconversão mais rápida de ácidos fúlvicos em ácidos húmicos. Foi verificada diminuição significativa da fração humina com a profundidade.

As fontes de matéria orgânica quer sejam naturais ou introduzidas no solo, contribuem de forma significativa para a produção do húmus (Primavezi, 1981). Em estudos realizados em áreas de cerrado foi observado que, após a retirada da vegetação e implantação de vários sistemas de cultivo agrícola, a composição da matéria orgânica humificada não foi alterada, ou seja, as grandes mudanças na vegetação não causaram significativas alterações no húmus do solo (Nascimento *et al.*, 1992). No entanto, a ecologia da humificação foi sustentada pelo aporte massivo de energia ao solo (associada aos adubos químicos).

Clima e as frações húmicas

Dabin (1981) verificou, em condições tropicais, que a matéria orgânica humificada formada sob clima úmido foi caracterizada pelo aporte importante de resíduos vegetais ao solo, os quais são rapidamente transformados, podendo sofrer imobilização imediata pela fração mineral ou através de processos bioquímicos de condensação. Nas áreas de clima seco e contrastado, os processos de condensação são dominantes e conduzem ao aparecimento de matéria orgânica humificada, sobretudo em solos argilosos.

Diversos estudos (Cerri & Volkoff, 1988; Flexor & Volkoff, 1977; Volkoff & Cerri, 1980; Volkoff & Cerri, 1981; Volkoff *et al.*, 1978) em diferentes regiões de clima tropical e subtropical do Brasil, evidenciaram que os principais fatores que controlam a formação de matéria orgânica humificada nos solos são temperatura, presença ou ausência de bases e drenagem. Esses são também os fatores que mais influenciam a atividade biológica. Segundo os autores, a presença de bases tem um efeito mais importante sobre os demais fatores. Em situações de baixo conteúdo de bases trocáveis disponíveis, a diferenciação é feita, antes de tudo, em função da drenagem e, em condições bem drenadas, esta é ditada pelas mudanças climáticas, principalmente de temperatura. A influência de processos pedoclimáticos na estabilização da matéria orgânica do solo foi citada por Duchaufour (1977) como uma consequência de alternâncias sazonais climáticas, em particular dos ciclos de umedecimento e secagem do solo que, apesar de intensificar os processos de biodegradação da fração mais lábil da matéria orgânica, favorecem a polimerização dos núcleos aromáticos de certos compostos húmicos, os quais sofrem, ao contrário, uma estabilização.

Comparando o húmus de solos desenvolvidos sob diferentes condições tropicais, Dabin (1981) concluiu que os processos de condensação e mineralização secundária são dominantes em regiões de clima tropical com estação seca bem definida, ocorrendo, sobretudo em solos argilosos. Por outro lado, Volkoff & Cerri (1980), constataram que o húmus da região semi-árida do Nordeste, com estação seca bem definida, apresentou pequena evolução por policondensação, o que poderia estar relacionado à duração demasiadamente longa (7 a 8 meses de estação seca) e aos índices pluviométricos extremamente baixos, característicos desta estação na região, estabelecendo assim uma condição desfavorável à atividade microbiana. Avaliando posteriormente as variações da relação E_4/E_6 da matéria orgânica de solos de diferentes regiões climáticas do Brasil, Volkoff & Cerri (1988) identificaram a ocorrência de dois estados distintos de condensação dos ácidos húmicos:

- a) grandes moléculas frouxas em solos ácidos bem drenados, sob floresta na região amazônica e;
- b) pequenas moléculas densas em solos sob cerrado, solos da região semi-árida, solos saturados e solos hidromórficos temporariamente inundáveis na região amazônica.

Calagem, fertilização orgânica e substâncias húmicas.

A calagem exerce importante papel na correção de solos ácidos e desta forma interfere também na dinâmica das substâncias húmicas. Em solos submetidos à calagem normalmente é observada diminuição do conteúdo da fração ácidos húmicos. A diminuição do conteúdo de ácidos húmicos pode estar relacionada à diminuição do conteúdo de alumínio trocável com a calagem, pois a calagem diminui as formas de alumínio trocável e aquelas associadas com as moléculas orgânicas além de aumentar o conteúdo de cálcio associado à matéria orgânica (Mendonça & Rowell, 1994). Por esta razão, ela promove desestabilização das moléculas orgânicas, tornando-as mais susceptível ao ataque microbiano, pois os complexos de cálcio

com a matéria orgânica são mais instáveis que aqueles com o alumínio (Canellas *et al.*, 1999). A redução no conteúdo das frações ácidos fúlvicos e húmicos em um Latossolo Vermelho plantado com citrus, com o uso da calagem foi observada por Silva *et al.*, (2000). A diminuição nos conteúdos de ácidos húmicos pode estar relacionada à presença de óxidos que são abundantes nos Latossolos. Em solos tropicais ricos em óxidos e caulinita, a fração ácidos húmicos pode ser mais facilmente decomposta que a fração ácidos fúlvicos, favorecendo o surgimento de frações mais reativas e mais facilmente consumida por microrganismos, pois a adsorção da matéria orgânica aos óxidos é influenciada por grupos carboxílicos, mais abundantes nos ácidos fúlvicos, tornando estes ácidos mais resistentes à decomposição que os ácidos húmicos (Mendonça, 1995; Lobartini & Orioli, 1996). Em Latossolo Vermelho-Amarelo variação Uma submetido à queima e à percolação, Araújo *et al.* (1995) observou que o aumento do pH pode afetar a dinâmica as frações da matéria orgânica do solo, favorecendo a mineralização da fração ácidos húmicos.

O efeito da adição de vermicomposto de esterco de curral associado à calagem nas frações humificadas da matéria orgânica foi estudado por Yagi *et al.* (2003), que verificaram que o aumento das doses de vermicomposto provocou diminuição da fração ácidos húmicos e humina. Por outro lado, aumentos significativos no conteúdo de ácidos húmicos e fúlvicos em horizontes superficiais de solo (0-20 cm) foram observados por Rosales *et al.* (1999) com a aplicação de composto, combinado ou não com fertilizantes minerais indicando que a adição de resíduos orgânicos ao solo alteram a dinâmica da humificação em direções que dependem de uma rede complexa de interconexões das mais diferentes esferas do ambiente que condicionam a atividade biológica e, portanto a humificação.

Frações humificadas da matéria orgânica e sua relação com a fertilidade

Os ácidos húmicos são considerados um marcador natural do processo de humificação podendo refletir tanto a condição de formação, como de manejo do solo. Solos naturalmente férteis em ambientes temperados apresentam-se mais enriquecidos em ácidos húmicos, onde a razão AH/AF é maior do que 1. Por outro lado, nos trópicos, valores menores do que 1 tem sido reportado na literatura científica (Dabin, 1981; Canellas *et al.*, 2000; Canellas *et al.*, 2003; Cunha *et al.*, 2003b). Neste ambiente, onde a presença de bases trocáveis nos solos é baixa, devido à ação do intemperismo a que estes solos foram submetidos, espera-se uma menor intensidade dos processos de humificação (condensação e síntese) e como consequência, menores teores de ácidos húmicos (Canellas *et al.*, 2003).

Objetivando-se obter informações sobre a relação entre fertilidade do solo e conteúdo de ácidos húmicos procedeu-se análise de correlação, Figura 3.3, entre os valores obtidos nos diferentes estudos (Tabela 3.2) para a saturação por bases (V%) e o conteúdo de ácidos húmicos (% relativa do carbono total), quando possível, das 99 amostras, haja vista que nem todos os trabalhos revisados apresentaram informações sobre parâmetros de fertilidade.

A Figura 3.4 indica ausência de correlação significativa entre o parâmetro de fertilidade do solo (Valor V%) e o conteúdo de ácidos húmicos no conjunto de solos estudados. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que classes de solos diferentes tenham entrado juntas na análise de correlação. Como a humificação é um processo ecológico seu estudo deve ser particularizado. Para verificar este efeito, realizou-se a análise de correlação com as diferentes classes de solos em separado, por autor, e desta forma os conteúdos de ácidos húmicos extraídos com o mesmo procedimento foram analisados conjuntamente. Foram verificadas correlações

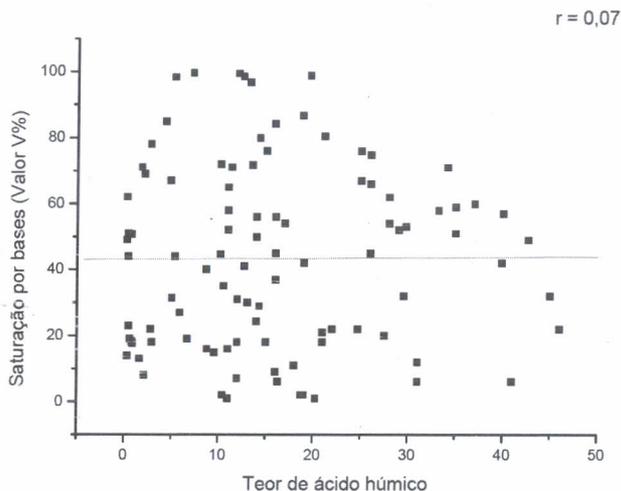


Figura 3.3. Correlação entre o conteúdo de ácidos húmicos e valores de saturação por bases em diversas classes de solos do Brasil conforme apresentado na Tabela 3.2.

significativas entre teor de ácidos húmicos, razão ácido húmico/ácido fúlvico e parâmetro de fertilidade do solo (saturação por bases, Ca^{++} e CTC efetiva), Figura 3.4.

Com relação a Terra Preta do Índio Souza *et al.*, (2003) estudou a relação entre as frações das substâncias húmicas e atributos de fertilidade, objetivando entender qual fração se correlacionava mais com as propriedades de fertilidade deste tipo peculiar de solo, e observou que apenas a fração ácidos húmicos teve correlação com atributos de fertilidade (CTC, Valor S e Ca^{++}), evidenciando a importância desta fração húmica na fertilidade desses solos. Cunha (2005), também verificou estreita correlação entre parâmetros de fertilidade do solo e o conteúdo de ácidos húmicos de solos Antropogênicos (Figuras 3.4 e 3.5).

Verifica-se a partir da particularização das análises de correlações, que há uma nítida relação entre conteúdo de ácidos húmicos e parâmetros de fertilidade do solo (Valor V%, CTC efetiva e Ca^{++}). Canellas *et al.*, (2003) verificaram que o aumento dos teores de ácidos húmicos, em áreas de cana crua e cana com vinhaça, foram acompanhados da melhoria da fertilidade e da qualidade da matéria orgânica do solo com aumento do conteúdo de substâncias húmica alcalino-solúveis mais condensadas (ácidos húmicos). Devido ao fato de que a fração ácidos húmicos é a que sofre mais alterações estruturais durante o processo de humificação, estas podem ser utilizadas como indicador da qualidade da matéria orgânica do solo (Kogel-Knaber *et al.*, 1988), e poderia ser utilizada como um índice de fertilidade do solo para sistemas de agricultura orgânica e/ou agroecológica. Baseado nos dados das correlações apresentadas acredita-se que a utilização dos conteúdos de ácidos húmicos ou mesmo da razão AH/AF como indicador da fertilidade do solo, pode representar uma boa ferramenta para avaliação do potencial produtivo dos solos, ou seja, da sua fertilidade física e química (Índice de fertilidade). Como não é possível obter-se um nível ideal ou ótimo, mito menos uma faixa crítica de concentração esses indicadores devem ser relativos, ou seja, contrastados com as alterações observadas *in loco* na matéria orgânica do solo e na capacidade produtiva do sistema.

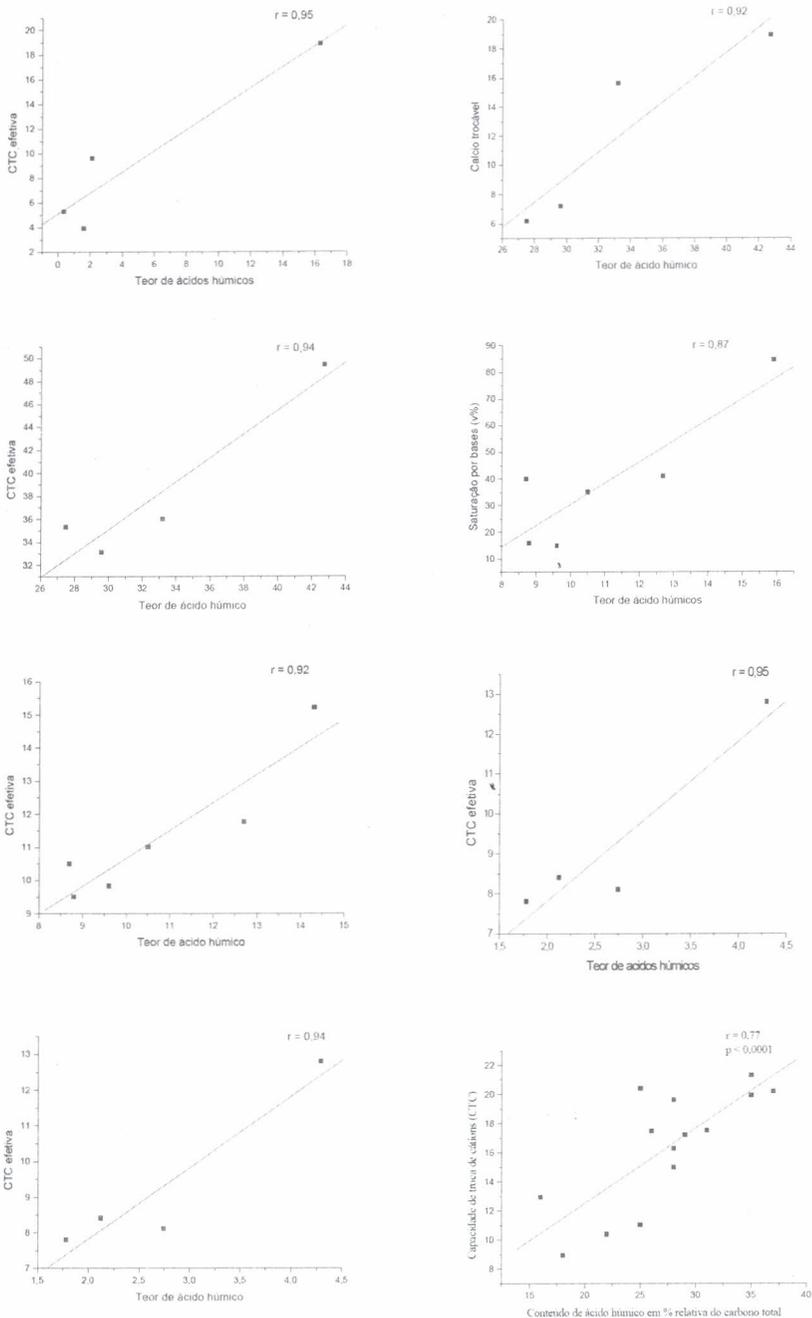


Figura 3.4. Correlação entre teores de ácidos húmicos e características de fertilidade (Dados de Volkoff et al.; 1976; Conceição, 1989; Coelho, 1991; Canellas et al., 2003; Cunha, 2005).

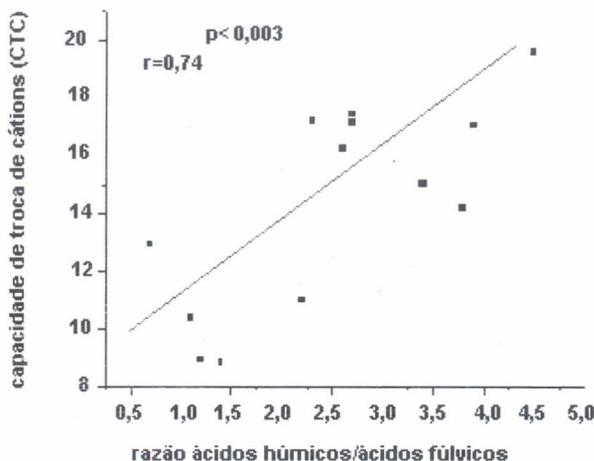


Figura 3.5. Correlação entre a razão ácido húmico/ácidos fúlvicos e a capacidade de troca de cátions (Dados de Cunha, 2005).

Manutenção de matéria orgânica no solo (estimativa aproximada)

O interesse mais sistemático e intensivo na adubação orgânica foi despertado pela crise energética mundial de 1973 onde os fertilizantes químicos, escassos e caros, tornaram-se de difícil acesso a maioria dos pequenos produtores (FAO, 1977). Foi gerada a necessidade de explorar possibilidades de aumento da produção agrícola com menor dependência dos fertilizantes químicos. Entre estas possibilidades, incluiu-se a reciclagem de nutrientes das plantas pela devolução dos restos das lavouras assim como aporte de compostos e resíduos produzidos nas propriedades e de origem industrial ou urbana. No sentido de dar uma noção do quanto é formado de matéria orgânica estável anualmente com a adição de diversos resíduos orgânicos ao solo segue-se um breve e simplificado roteiro.

Assumindo-se que, em termos médios, entre 1,5 a 2% da matéria orgânica estabilizada é perdida anualmente via mineralização, um manejo que vise conservar a matéria orgânica do solo deve incorporar anualmente essa quantidade perdida na forma de resíduos orgânicos. O modelo que se segue para incorporação de matéria orgânica humificada ao solo foi proposto por Labrador Moreno (1996). A partir daqui segue-se uma síntese desse trabalho.

Durante a sua evolução os resíduos orgânicos sofrem uma série de processos pelos quais parte de seus componentes se mineralizam e outra parte se transforma em compostos orgânicos de natureza e complexidade distinta que constituem o húmus do solo. A quantidade de húmus formada em um ano corresponde a:

$$MO_{humificada} = K_1 \times MO_{aportada}$$

A relação que caracteriza esse dinamismo é chamada de coeficiente *isohúmico* K_1 que depende essencialmente, mas não exclusivamente do material orgânico adicionado. De um modo geral quanto maior a quantidade de lignina no material maior a quantidade de húmus formado e quanto maior a quantidade de carboidratos e compostos nitrogenados maior será a mineralização. Algumas ordens de magnitude para os valores de K_1 se encontram na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Valores médios do coeficiente isohúmico (K_1) e massa seca de alguns resíduos orgânicos.

resíduo	K_1	Massa seca (%)
Esterco de curral curtido	0,40	25
Esterco fresco com palha	0,25	20
Composto de lixo urbano	0,25	20
Palhas (secas)/resíduos de colheita	0,15	80
Adubo verde	0,08	20

Adaptado de Labrador Moreno (1996)

O coeficiente K_1 foi definido como a constante de transformação da matéria seca aportada e por isso é conveniente efetuar os cálculos de reposição de matéria orgânica em base da matéria seca.

$$H = r.o. \times \frac{MS}{100} \times K_1$$

onde H é a quantidade de húmus gerado pelos resíduos adicionados; r.o. é quantidade de resíduo adicionado em $kg\ ha^{-1}$; MS é a matéria seca dos resíduos e K_1 o coeficiente isohúmico específico. Assim o aporte de uma tonelada de esterco bem decomposto que contém cerca de 25% de matéria seca e com um coeficiente isohúmico de 0,40 proporcionará um acréscimo de kg de húmus no solo.

$$H = 1000\ kg\ ha^{-1} \times \frac{25}{100} \times 0,40 = 100\ kg\ ha^{-1}$$

Como se pode observar a quantidade de húmus estável formado é baixa, mas apresenta uma influência intensa e expressiva no desenvolvimento biológico (como se verá na unidade seguinte).

As perdas de matéria orgânica ocorrem naturalmente através do processo de mineralização. As taxas de perda variam geralmente entre 1 e 2% da matéria orgânica do solo. Essa taxa de mineralização secundária ou coeficiente K_2 ao contrário do coeficiente isohúmico (K_1) depende mais de fatores do ambiente tais como temperatura média, precipitação pluviométrica, pH, conteúdo de bases do que da qualidade do resíduo orgânico.

É possível estimar as perdas de matéria orgânica, através de um cálculo simplificado:

Considerando

i) um solo com 2% de matéria orgânica, com uma densidade de $1,5\ Mg\ m^3$ e uma camada de 0,2 m de profundidade:

$$10.000\ m^2 \times 1,5\ Mg\ m^3 \times 0,20\ m \times 0,02 = 60\ Mg\ de\ matéria\ orgânica\ por\ ha$$

ii) uma perda média de 1,5% de matéria orgânica por ano:

$$60\ Mg \times 0,015 = 900\ kg\ de\ matéria\ orgânica\ perdida\ por\ ha\ em\ um\ ano.$$

As perdas de matéria orgânica podem, então ser estimadas pela equação:

$$P = prof \times densidade \times m.o. \times K_2$$

onde P corresponde às perdas de matéria orgânica em kg/ha ; prof= espessura da cada de solo em metros; densidade= densidade do solo em $Mg\ m^3$ e K_2 = taxa de mineralização média.

Assim, para atender as necessidades de recomposição de matéria orgânica nesse exemplo teórico é necessário adicionar o correspondente a 9 Mg de esterco curtido/ha, ou 7,5 Mg de palha/ha ou ainda 56 Mg de adubo verde/ha.

Esse cálculo aproximado tem as suas vantagens de servir como um guia geral, mas desconsidera os processos locais que devem necessariamente ser acompanhados na propriedade e recalibrados para uma atuação local.