

# DIVISÃO 1 - SOLO NO ESPAÇO E NO TEMPO

## Comissão 1.1 - Gênese e morfologia do solo

### PODZOLIZAÇÃO EM SOLOS DE ÁREAS DE DEPRESSÃO DE TOPO DOS TABULEIROS COSTEIROS DO NORDESTE BRASILEIRO<sup>(1)</sup>

Elen Alvarenga Silva<sup>(2)</sup>, João Bosco Vasconcellos Gomes<sup>(3)</sup>, José Coelho de Araújo Filho<sup>(4)</sup>, Carlos Alberto Silva<sup>(5)</sup>, Samara Andrade de Carvalho<sup>(6)</sup> & Nilton Curi<sup>(5)</sup>

#### RESUMO

Os solos associados às depressões de topo dos Tabuleiros Costeiros são diferenciados sob vários aspectos ainda pouco estudados no Brasil. Geralmente, à medida que se aproxima dessas depressões, nota-se que a textura dos solos é mais arenosa e o hidromorfismo, mais acentuado, sendo comum a ocorrência de Espodossolos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar diferentes extrações de Fe, Al, Si e C orgânico com o intuito de compreender o processo de podzolização em solos associados às depressões de topo dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro. Foram descritos perfis e coletadas amostras de solo em quatro áreas: Coruripe, AL; Neópolis, SE; Acajutiba, BA; e Nova Viçosa, BA. Nas amostras, determinou-se o teor de Fe, Al e Si pelos extratores ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, oxalato de amônio e pirofosfato de sódio e realizou-se o fracionamento químico da matéria orgânica do solo. Os aumentos nos teores de C orgânico e de Fe e Al pelos diferentes extratores nos horizontes iluviais (de acúmulo) de cada solo, relativamente aos horizontes eluviais (de perda), refletiram a morfologia de campo e reforçaram a importância do processo de podzolização nos solos estudados. Complexos Al-húmus dominam inteiramente a matriz dos horizontes iluviais associados ao hidromorfismo, enquanto naqueles sem hidromorfismo a influência das diferentes formas de Fe é variável. O perfil de Espodossolo Ferrihumilúvico é o único, dos quatro estudados, que possui horizontes

<sup>(1)</sup> Extraído da tese de Doutorado da primeira autora, financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em 03 de fevereiro de 2012 e aprovado em 20 de novembro de 2012.

<sup>(2)</sup> Pós-doutoranda em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - UFLA. Caixa Postal 3037. CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: elenalvarenga@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Pesquisador da Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira, km 111. CEP 83411-000 Colombo (PR). E-mail: jbvvgomes@cnf.embrapa.br

<sup>(4)</sup> Pesquisador da Embrapa/CNPS, Unidade de Execução de Pesquisa - UEP. R. Antônio Falcão, 402, Boa Viagem. CEP 51020-240 Recife (PE). E-mail: coelho@uep.cnps.embrapa.br

<sup>(5)</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. E-mail: csilva@dcs.ufla.br; niltcuri@dcs.ufla.br

<sup>(6)</sup> Mestranda em Ciência do solo, Departamento de Ciência do solo, UFLA. E-mail: samaraandrade@yahoo.com.br

espódicos com subscrito "s" e, portanto, onde os teores de Fe extraídos refletiram-se diferencialmente na morfologia.

**Termos de indexação:** translocação, posição na paisagem, solos arenoquartzosos, carbono orgânico.

**SUMMARY: PODZOLIZATION IN SOILS OF DEPRESSED SUMMIT AREAS ON THE COASTAL PLAINS OF THE BRAZILIAN NORTHEASTERN REGION**

*The soils associated to depressed summits on the Coastal Plains are still little studied in Brazil and are differentiated in several aspects. Generally, the closer a soil is to these depressions, the sandier is the texture and the more accentuated the hydromorphism, where the occurrence of Spodosols is common. The objective of this work was to perform different extractions of Fe, Al, Si and organic C to understand the podzolization process in soils of the summit depressions of the Coastal Plains of Northeastern Brazil. For this purpose, soil profiles were described and samples collected in four areas: Coruripe, AL; Neópolis, SE; Acajutiba, BA; and Nova Viçosa, BA. In these samples, the Fe, Al and Si contents were determined by the sodium dithionite-citrate-bicarbonate, ammonium oxalate and sodium pyrophosphate extractors and soil organic matter was chemically fractionated. The increase in organic C, and Fe and Al contents by different extractors from the iluvial (accumulation) horizons of each soil, relatively to the eluvial (loss) horizons, reflects the field morphology and reinforces the importance of the podzolization process in the studied soils. Complexes of Al-humus entirely dominate the matrix of the iluvial horizons associated to hydromorphism, while there is a variable influence of different Fe forms on those with no hydromorphism. The Ferrihumiluwic Spodosol profile is the only one of the four studied profiles with spodic horizons with "s" subscript, i.e., where the contents of extracted Fe affected the morphology differentially.*

*Index terms:* translocation, soil landscape position, sandy-quartz soils, organic carbon.

## INTRODUÇÃO

Áreas de depressão são comuns em topos de Tabuleiros Costeiros brasileiros, dominados por Argissolos e Latossolos Amarelos coesos, principalmente naquelas superfícies pouco entalhadas (topos amplos) (Corrêa et al., 2008). O raio de influência dessas depressões sobre os solos da paisagem pode estar restrito a poucos metros ou se fazer presente na quase totalidade da superfície (Araújo Filho, 2003). Os solos relacionados a essas áreas são ainda pouco estudados no Brasil e são diferenciados sob vários aspectos. Geralmente, à medida que se aproxima dessas depressões, nota-se que a textura dos solos fica mais arenosa e o hidromorfismo mais acentuado (UFLA/UFV, 2004), sendo comum a ocorrência de Espodossolos. Esses solos tendem a apresentar processos e feições associados ao excesso de água, com ou sem proximidade do lençol freático, e horizontes cimentados.

A ocorrência de Espodossolos por vezes tira a floresta da condição de vegetação clímax, em um ambiente que mescla deficiência de fertilidade, água e oxigênio (Bonifacio et al., 2006). A deficiência de água e oxigênio no mesmo ambiente de solo está relacionada à textura mais arenosa nos horizontes superficiais e

à camada endurecida e impermeável em subsuperfície, influenciando a elevação do lençol freático suspenso no período úmido. No Nordeste, grandes áreas produtoras de alimentos e madeira estão localizadas nos Tabuleiros Costeiros e na grande maioria das vezes os solos dessas depressões são utilizados sem um manejo diferenciado, o que implica em queda da produtividade e afastamento da sustentabilidade ambiental.

O processo de formação do horizonte B espódico, relativamente rico em óxidos de Fe e Al e, ou, carbono orgânico iluviais, podendo ser pobre em argila e endurecido, é bastante discutido na literatura, principalmente para Espodossolos do hemisfério norte, com revisões e artigos que discutem diferentes hipóteses sobre o processo de podzolização (De Coninck, 1980; Farmer, 1982; Lundström et al., 2000a; Buurman & Jongmans, 2005; Sauer et al., 2007). Para ambientes tropicais, a presença de material de origem essencialmente quartzoso e de impedimento subsuperficial (lençol freático elevado e, ou, horizonte cimentado) representa condição comum de ocorrência de horizonte espódico.

Nesses solos, onde os materiais orgânicos da superfície formam complexos com os íons de Al e Fe e são eluviados para os horizontes de subsuperfície (Bul

et al., 1980), a influência das substâncias húmicas foi corroborada em condições brasileiras por Gomes et al. (1998), em solos sob restingas, e Benites et al. (2001), em solos sob campos de altitude. Mais recentemente, Coelho (2008) encontrou evidências, a partir de análises micromorfológicas de solos sob restinga do Estado de São Paulo, da participação de material orgânico segregado de raízes e precipitado na formação de horizontes espódicos, adaptando para Espodosolos tropicais a hipótese da complexação dos íons de Al e Fe pelos materiais orgânicos, desenvolvida por Buurman & Jongmans (2005).

A presença do processo de podzolização pode ser identificada pela distribuição das frações ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU) no perfil do solo. Os AFs são compostos de maior solubilidade, os AHs possuem baixa solubilidade e as HUs consistem em um aglomerado de materiais húmicos e apresentam baixa reatividade (menor CTC) (Mokma & Buurman, 1982; Stevenson, 1982; Benites et al., 2003). Os AFs, juntamente com os ácidos de baixo peso molecular, apresentam elevada capacidade complexante.

Os extratores químicos possuem capacidades diferenciadas de extrair os metais nas suas formas inorgânicas e orgânicas (Farmer et al., 1983a). Fe, Al e Si na solução do solo corresponderiam à fração desses metais com maior potencial de mobilização junto com as frações orgânicas (Lundström, 1993; Lundström et al., 2000b; Jansen et al., 2005). Considerando que os solos estudados apresentam material de origem extremamente quartzoso e grosseiro, esses perdem em importância à liberação, principalmente de Si, pelo intemperismo de minerais primários, como geralmente enfatizado para Espodosolos de regiões temperadas (Hees et al., 2000). O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006) faz, basicamente, referências não quantitativas às diferentes extrações de Fe, Al e Si e também aos teores de C orgânico presentes no horizonte espódico. A cor é o atributo que mais distingue as diferentes classes de Espodosolo, principalmente no nível hierárquico de subordem.

Com base nas considerações anteriores, o objetivo deste trabalho foi realizar diferentes extrações de Fe, Al, Si e C orgânico com o intuito de compreender o processo de podzolização em solos associados às depressões de topo dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Sítios de estudo

Foram descritos perfis e coletadas amostras de solo em quatro áreas associadas às depressões de topo dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro (Coruripe, AL; Neópolis, SE; Acajutiba, BA; e Nova Viçosa, BA)

(Figura 1). Esses solos são formados sobre sedimentos de idade Terciária, sendo sua vegetação nativa representada pela floresta tropical subperenifolia.

O material de origem dos solos estudados é constituído por sedimentos arenoquartzosos da Formação Barreiras. As áreas de Coruripe (AL), Neópolis (SE) e Acajutiba (BA) estão sob clima tropical com chuvas no verão (Aw, segundo a classificação de Köppen). Já a área de Nova Viçosa (BA) apresenta clima tropical com todos os meses chuvosos; o mês mais seco apresenta mais de 60 mm de chuva (Af, segundo a classificação de Köppen).

### Método

Foram realizadas a descrição morfológica e a amostragem dos horizontes (Santos et al., 2005), a análise textural (Embrapa, 1997) e a classificação dos solos (Embrapa, 2006) (Quadros 1 e 2).

As amostras foram coletadas em duplicata; uma parte foi armazenada sob refrigeração para posterior extração da solução do solo e a outra, seca ao ar e passada em peneira de malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

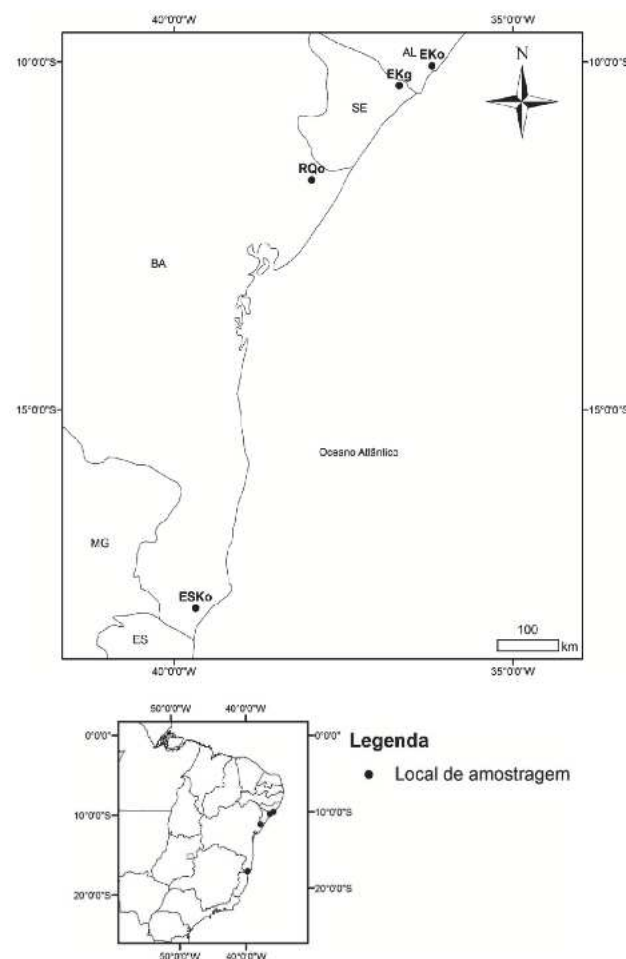


Figura 1. Localização dos solos estudados.

**Quadro 1. Código, local, situação e classificação dos solos estudados**

| Código | Local           | Situação   | Solo, textura e profundidade inicial de ocorrência do horizonte espódico   |
|--------|-----------------|--|--|
| EKo    | Coruripe, AL    | Depressão em topo plano de Tabuleiro Costeiro sob floresta primária alterada | Espodossolo Humilúvico órtico dúrico - arenosa/média - 63 cm               |
| EKg    | Neópolis, SE    | Depressão em topo plano de Tabuleiro Costeiro sob plantio de coco            | Espodossolo Humilúvico hidromórfico espessarênico - arenosa/média - 150 cm |
| RQo    | Acajutiba, BA   | Depressão em topo plano de Tabuleiro Costeiro sob plantio de eucalipto       | Neossolo Quartzarênico órtico espódico - arenosa - 150 cm                  |
| ESKo   | Nova Viçosa, BA | Depressão em topo plano de Tabuleiro Costeiro sob plantio de eucalipto       | Espodossolo Ferrihumilúvico órtico dúrico - arenosa/média - 48 cm          |

**Quadro 2. Descrição morfológica e granulometria dos horizontes genéticos dos perfis de solos estudados**

| Hor.                      | Prof.                   | Cor <sup>(1)</sup>                    | Estrutura <sup>(2)</sup> | Consistência <sup>(3)</sup> | Cimentação <sup>(4)</sup> | Transição <sup>(5)</sup> | Areia              | Silte | Argila |  |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|-------|--------|--|
|                           | cm                      | Úmida                                 |                          | Úmida                       |                           |                          | g kg <sup>-1</sup> |       |        |  |
| Perfil EKo - Coruripe     |                         |                                       |                          |                             |                           |                          |                    |       |        |  |
| A                         | 0-8                     | 10YR 4/2-4/1                          | 1 a 2P a MGr e Gs        | MFr                         | ñc                        | cp                       | 940                | 10    | 50     |  |
| E                         | 8-50                    | 10YR 4/2,5                            | Gs                       | MFr                         | ñc                        | cp                       | 870                | 40    | 90     |  |
| BE                        | 50-63                   | 10YR 3/3,5                            | 1P e MBls e Gs           | MFr                         | ñc                        | gp                       | 820                | 40    | 140    |  |
| Bh1                       | 63-85                   | 10YR 3/2,5                            | 1P e MBls e Gs           | MFr                         | ñc                        | gp                       | 780                | 60    | 160    |  |
| Bh2                       | 85-95                   | 10YR 3/2                              | 1P e MBls e Gs           | MFr                         | ñc                        | ap                       | 770                | 50    | 180    |  |
| Bm                        | 95-140+                 | 10YR 7/3                              | Ma                       | EFi                         | foc                       | -                        | 830                | 50    | 120    |  |
| Perfil EKg - Neópolis     |                         |                                       |                          |                             |                           |                          |                    |       |        |  |
| Ap                        | 0-25                    | 10YR 3/2                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | cp                       | 950                | 50    | 0      |  |
| E                         | 25-150                  | 10YR 7/2                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | cp                       | 910                | 70    | 20     |  |
| Bh                        | 150-170+                | 10YR 2/1                              | Ma                       | Fi                          | ñc                        | -                        | 760                | 160   | 80     |  |
| Perfil RQo - Acajutiba    |                         |                                       |                          |                             |                           |                          |                    |       |        |  |
| Ap                        | 0-18                    | 10YR 5/3                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | pg                       | 930                | 40    | 30     |  |
| EA1                       | 18-60                   | 10YR 6/3                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | pg                       | 930                | 20    | 50     |  |
| EA2                       | 60-115 (108-125)        | 10YR 5/3                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | og                       | 890                | 50    | 60     |  |
| E                         | 115 (108-125) - 150     | 2,5Y 6/2                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | cp                       | 890                | 60    | 50     |  |
| BhE                       | 150-180                 | 10YR 4/2                              | Ma                       | MFr                         | ñc                        | ap                       | 910                | 20    | 70     |  |
| Bm                        | 180-200+                | 10YR 7/2                              | Ma                       | EFi                         | foc                       | -                        | 590                | 150   | 260    |  |
| Perfil ESKo - Nova Viçosa |                         |                                       |                          |                             |                           |                          |                    |       |        |  |
| Ap                        | 0-20                    | 10YR 3/2                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | cp                       | 870                | 60    | 70     |  |
| E                         | 20-48                   | 10YR 6/2                              | Gs                       | MFr                         | ñc                        | cp                       | 920                | 30    | 50     |  |
| Bh                        | 48-57 (54-60)           | 10YR 3/3                              | Gs e 1P a MBls           | MFr                         | ñc                        | ao                       | 880                | 30    | 90     |  |
| Bhsx                      | 57 (54-60) - 87 (80-95) | 7,5YR 3/2                             | Ma                       | EFi                         | frc                       | ao                       | 820                | 50    | 130    |  |
| Bsm                       | 87 (80-95) - 125        | Vr 2,5Y 7/6;<br>2,5YR 3/4;<br>5YR 6/8 | G a MGL com Ma           | EFi                         | foc                       | cp                       | 800                | 110   | 90     |  |
| C                         | 125-180                 | 10YR 7/6                              | Ma                       | MFi                         | ñc                        | -                        | 630                | 130   | 240    |  |

Hor.: horizonte; Prof.: profundidade; <sup>(1)</sup> Cor - Vr: variegado. <sup>(2)</sup> Estrutura - 1: fraca; 2: moderada; P: pequena; M: média; G: grande; MG: muito grande; Gr: granular; Gs: grãos simples; Bls: blocos subangulares; Ma: maciça; e L: laminar. <sup>(3)</sup> Consistência: MFr: muito friável; Fi: firme; MFi: muito firme; e EFi: extremamente firme. <sup>(4)</sup> Cimentação - ñc: não cimentado; foc: fortemente cimentado; e frc: fracamente cimentado. <sup>(5)</sup> Transição - c: clara; p: plana; g: gradual; a: abrupta; e o: ondulada.

Na extração de Fe e Al cristalinos, utilizou-se o ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Mehra & Jackson, 1960; Jackson, 1974; Embrapa, 1997), em que a 1 g de TFSA (passado em peneira de 100 mesh) foram adicionados 5 mL da solução de citrato de sódio  $0,3 \text{ mol L}^{-1}$  e bicarbonato de sódio  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e, posteriormente, 0,2 g de ditionito de sódio a cada 3 min, durante 15 min de extração em banho-maria a  $70^\circ\text{C}$ . A mistura foi centrifugada e o sobrenadante separado, realizando-se novamente o mesmo procedimento; o segundo sobrenadante foi adicionado ao primeiro para determinar o Fe e Al.

Para a extração de Fe e Al associados à matéria orgânica, usou-se o pirofosfato de sódio, conforme método adaptado de Wang (1978), tendo sido adicionados 30 mL da solução de pirofosfato de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  a 1 g de TFSA (passado em peneira de 100 mesh). Essa mistura foi agitada durante 12 h com o sobrenadante utilizado para determinar o Fe e Al. A extração com o oxalato de amônio, método também adaptado de Wang (1978), foi utilizada para extrair o Fe, Al e Si de baixa cristalinidade, em que a 1 g de TFSA (passado em peneira de 100 mesh) foram adicionados 50 mL do reagente de Tann (ácido oxálico + oxalato de amônio,  $\text{pH}=3$ ) e o sobrenadante utilizado para determinar Fe, Al e Si. A determinação do Si apenas no extrato do oxalato justifica-se pela participação dessas formas menos cristalinas de Si na formação e estabilização de horizontes cimentados. O Fe e Al foram determinados por espectrometria de absorção atômica e o Si por espectrometria de plasma produzido por acoplamento indutivo (ICP-AES).

O fracionamento das substâncias húmicas foi realizado de acordo com a solubilidade em meio ácido e alcalino. A separação dessas substâncias foi feita em AF, AH e HU, de acordo com método descrito por Benites et al. (2003), em que 1 g de TFSA foi colocado em contato com 10 mL de NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , por 24 h. Após esse período, as amostras foram centrifugadas. A fração precipitada, insolúvel em meio alcalino (HU), foi levada à estufa para secar. No intuito de separar as frações húmicas do sobrenadante obtido anteriormente foi adicionado  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 20 %, a fim de ajustar o pH para próximo de 2. Esse extrato acidificado permaneceu em repouso por 18 h, para a decantação da fração AH. Posteriormente, o sobrenadante foi filtrado em membrana de  $0,45 \mu\text{m}$  no sistema de filtração a vácuo para separar as frações AF (solúvel em meio ácido) e AH (insolúvel em meio ácido). A determinação do teor de C orgânico (CO) nas frações AF, AH e HU foi realizada, conforme proposto por Benites et al. (2003). Esse fracionamento foi realizado apenas nos horizontes A, B e C, excluindo-se os horizontes E de todos os perfis, por esses apresentarem teores de CO muito baixos. Já o C orgânico total (COT) foi determinado por oxidação via úmida com dicromato de potássio em todos os horizontes (Embrapa, 1997).

Nas amostras armazenadas sob refrigeração, fez-se a extração da solução do solo por agitação,

centrifugação e filtração do extrato na relação solo:água 1:0,5 (Rhoades, 1982; Thibault & Sheppard, 1992; Gomes et al., 2010). Nos extratos, realizaram-se as análises de C orgânico solúvel em água (COS) em analisador automático do tipo TOC, marca Elementar, modelo Vario Cube; pH; Fe e Al determinados por absorção atômica e Si, misturando-se 5 mL de extrato aquoso com 0,5 mL de solução sulfomolibdica a 7,5 %. Após 10 min de descanso, foi acrescentado 1 mL de solução de ácido tartárico a 20 % e após mais 5 min adicionaram-se 5 mL de solução de ácido ascórbico a 0,3 %. Depois de 1 h, realizou-se a leitura do Si em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm, em razão da indisponibilidade de ICP-AES na unidade da Embrapa onde essa análise foi feita.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Frações húmicas e C orgânico solúvel (COS)

As porcentagens de C nas frações AF, AH e HU são apresentadas no quadro 3. De modo geral, houve tendência de acúmulo das frações húmicas, principalmente AF, nos horizontes espódicos de cada perfil. Nos horizontes apenas com caráter dúrico ou cimentação forte (Bm) dos perfis EKo e RQo, os teores de C orgânico total (COT) estão deplecionados relativamente aos horizontes sobrepostos, o que já era esperado, considerando-se a cor daqueles horizontes (10YR 7/2 e 7/3). O perfil RQo apresenta no seu horizonte com características iluviais ou de acúmulo (BhE) o menor teor de COT, se comparado aos teores de todos os outros horizontes espódicos, mesmo aquele com subscrito "s", onde ocorreu menor acúmulo de COT iluvial (Quadro 2, horizonte BhE de cor úmida 10YR 4/2).

Os valores da relação  $(\text{AH}+\text{AF})/\text{CO}$  foram menores nos horizontes superficiais em relação aos horizontes espódicos dentro de cada perfil, em conformidade com o processo de podzolização presente em todos os solos estudados. A diferença não foi tão clara para o perfil EKo [horizontes espódicos com relações  $(\text{AH}+\text{AF})/\text{CO} < 0,3$ ] e, de forma geral, não tão expressiva como as encontradas por Gomes et al. (1998) em Espodosolos do Quaternário [horizonte espódico com relação  $(\text{AH}+\text{AF})/\text{CO} > 0,8$ ]. Nos horizontes com caráter dúrico, no caso do perfil ESKo, associados ao subscrito "s", e dos perfis EKo e RQo, a relação  $(\text{AH}+\text{AF})/\text{CO}$  voltou a diminuir relativamente aos horizontes espódicos sobrepostos (todos com subscrito "h"). Tal fato pode ser explicado pelos menores teores de AF e AH presentes nesses horizontes, o que torna a relação baixa.

O comportamento da relação  $\text{AH}/\text{AF}$  foi variável. Entre os horizontes superficiais, só foi menor que a unidade no perfil ESKo ( $\text{AH}/\text{AF} = 0,87$ ). A relação  $\text{AH}/\text{AF}$  foi muito elevada no horizonte espódico do perfil EKg. O horizonte espódico (Bh) desse perfil coincide

**Quadro 3. Teores de C nas frações ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU) dos horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B e C); C orgânico total do solo (COT); valores de pH e teores de C orgânico solúvel (COS) no extrato solo:água (1:0,5); e relação do COS com o COT dos diferentes solos estudados**

| Hor.        | COT                | AF | AH | HU | AH/AF | (AH+AF)/COT | pH  | COS                 | (COS/COT)x100 |
|-------------|--------------------|----|----|----|-------|-------------|-----|---------------------|---------------|
|             | g kg <sup>-1</sup> | %  |    |    |       |             |     | mg kg <sup>-1</sup> | %             |
| Perfil EKo  |                    |    |    |    |       |             |     |                     |               |
| A           | 9,3                | 6  | 12 | 82 | 2,03  | 0,18        | 5,4 | 20,6                | 0,2           |
| E           | 4,6                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 5,7 | 9,0                 | 0,2           |
| BE          | 12,8               | 17 | 10 | 73 | 0,55  | 0,27        | 5,5 | 10,5                | 0,1           |
| Bh1         | 19,1               | 20 | 8  | 72 | 0,41  | 0,28        | 5,6 | 10,4                | 0,1           |
| Bh2         | 15,1               | 15 | 8  | 77 | 0,55  | 0,23        | 5,8 | 7,1                 | 0,1           |
| Bm          | 4,6                | 17 | 1  | 82 | 0,08  | 0,18        | 6,1 | 4,4                 | 0,1           |
| Perfil EKg  |                    |    |    |    |       |             |     |                     |               |
| Ap          | 8,1                | 8  | 21 | 71 | 2,65  | 0,29        | 6,1 | 17,61               | 0,2           |
| E           | 0,6                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 6,3 | 7,3                 | 1,3           |
| Bh          | 21,5               | 5  | 45 | 50 | 8,89  | 0,50        | 5,0 | 24,6                | 0,1           |
| Perfil RQo  |                    |    |    |    |       |             |     |                     |               |
| Ap          | 10,4               | 9  | 19 | 72 | 2,09  | 0,28        | 6,4 | 15,4                | 0,2           |
| EA1         | 3,5                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 5,7 | 4,7                 | 0,1           |
| EA2         | 5,2                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 5,7 | 5,2                 | 0,1           |
| E           | 2,9                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 6,2 | 2,4                 | 0,1           |
| BhE         | 5,2                | 49 | 23 | 28 | 0,46  | 0,72        | 6,2 | 2,6                 | 0,1           |
| Bm          | 3,5                | 46 | 13 | 41 | 0,27  | 0,59        | 5,8 | 3,0                 | 0,1           |
| Perfil ESKo |                    |    |    |    |       |             |     |                     |               |
| Ap          | 7,0                | 11 | 10 | 79 | 0,87  | 0,21        | 5,3 | 26,55               | 0,4           |
| E           | 5,2                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 4,7 | 13,4                | 0,3           |
| Bh          | 11,6               | 37 | 63 | 0  | 1,73  | 1,00        | 4,7 | 20,3                | 0,2           |
| Bhsx        | 25,5               | 45 | 8  | 47 | 0,19  | 0,53        | 5,4 | 8,9                 | 0,0           |
| Bsm         | 12,8               | 48 | 1  | 51 | 0,01  | 0,49        | 5,8 | 6,6                 | 0,1           |
| C           | 0,6                | nd | nd | nd | nd    | nd          | 6,2 | 3,2                 | 0,5           |

Hor.: horizonte.

com a profundidade de flutuação do lençol freático. Essa maior relação está bem relatada para pacotes quartzosos de ambientes hidromórficos em planícies costeiras dos trópicos (Farmer et al., 1983b; Gomes et al., 1998). Os ácidos orgânicos mobilizados a partir da superfície e deslocados com a água que percola no perfil (Buurman & van Reeuwijk, 1984) se polimerizariam a AH nos horizontes Bh (com a presença do lençol freático) (Holzhey et al., 1975; Bonifacio et al., 2006).

O decréscimo da relação AH/AF do horizonte B mais superficial para o mais profundo ocorreu no perfil ESKo e em parte no perfil EKo. Esse decréscimo é contabilizado pela maior mobilidade do AF em relação ao AH, permitindo que os AFs estejam presentes em maior proporção nas partes inferiores dos horizontes espódicos (Skjemstad et al., 1992a,b; Gomes et al., 1998; Benites et al., 2003). No Espodossolo com hidromorfismo coincidente com o horizonte Bh (perfil EKg) não foi possível observar a ocorrência ou não

dessa tendência, em razão da impossibilidade de se coletar subamostras mais profundas do horizonte B espódico no perfil encharcado. Todavia, Farmer et al. (1983b) afirmaram que Espodossolos hidromórficos de planícies costeiras não devem apresentar esse tipo de tendência, com os AFs sofrendo constante polimerização a AHs na matriz do horizonte Bh, como também constatado por Holzhey et al. (1975).

À exceção do perfil RQo, solo intermediário para Espodossolo (podzolização incipiente), o COS decresceu da superfície em direção ao horizonte eluvial ou de perda (E) e voltou a crescer nos horizontes iluviais (B) (Quadro 3).

Os teores de COS dentro de cada perfil sempre foram maiores nos horizontes superficiais (A, Ap e AE), com exceção do perfil EKg, que apresentou maior valor no horizonte Bh (24,63 mg kg<sup>-1</sup>). A influência da cobertura vegetal (floresta, coco e eucalipto) (Quadro 1) não seguiu um padrão de comportamento em relação aos teores de COS, mesmo dos horizontes superficiais,

em concordância com a modelagem proposta por Moore (1989).

O valor de  $(\text{COS}/\text{COT}) \times 100$  decresceu da superfície e do horizonte eluvial (E) em direção aos horizontes iluviais espódicos em todos os perfis (Quadro 3). Esse comportamento é típico de solos onde o processo de podzolização é atuante (Bergelin et al., 2000; Hees et al., 2000).

### Dinâmica de Fe, Al e Si

As extrações de Fe e Al por DCB ( $\text{Fe}_d$  e  $\text{Al}_d$ ), oxalato ( $\text{Fe}_o$  e  $\text{Al}_o$ ) e pirofosfato ( $\text{Fe}_p$  e  $\text{Al}_p$ ), nos perfis EKO e ESKo para Fe e Al mais o perfil RQo para o Al, apresentaram tendência de acumulação nos horizontes iluviais (espódicos), relativamente aos horizontes eluviais (E) (Quadro 4), concordando com os resultados obtidos para Espodosolos sob restingas brasileiras (Gomes et al., 1998; Moura Filho, 1998; Gomes et al., 2007; Coelho et al., 2010) e para Espodosolos associados à Formação Barreiras

(Oliveira et al., 2010). Os teores de Al predominaram sobre os de Fe nos três tipos de extrações, o que também foi constante nos trabalhos dos mesmos autores citados anteriormente.

A acumulação foi muito mais tênue no perfil com hidromorfismo coincidente com o horizonte B espódico (perfil EKg), principalmente nas diferentes extrações de Fe, o que pode ser explicado pelo fato de o Fe sofrer o processo de redução em ambientes anóxicos, tornando-o apto a movimentar-se e sair do sistema (Farmer et al., 1983b; Oliveira et al., 2010). O Neossolo Quartzarênico espódico (perfil RQo) não apresentou acumulação de Fe, mas os teores das diferentes extrações de Al do horizonte BhE, que adjetivam esse solo de espódico, foram claramente superiores aos do horizonte E.

Os perfis EKO e, principalmente, ESKo (Espodosolo Ferrihumilúvico) foram os que evidenciaram maiores valores das diferentes extrações de Fe dos horizontes espódicos. Os horizontes espódicos (Bh) do perfil EKO

**Quadro 4. Teores de metais nos extratos de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio ( $\text{Fe}_d$  e  $\text{Al}_d$ ), pirofosfato de sódio ( $\text{Fe}_p$  e  $\text{Al}_p$ ), oxalato ácido de amônio ( $\text{Fe}_o$ ,  $\text{Al}_o$  e  $\text{Si}_o$ ) e aquoso ( $\text{Fe}_h$ ,  $\text{Al}_h$  e  $\text{Si}_h$ ), nos horizontes dos perfis dos solos estudados**

| Hor.        | $\text{Fe}_d$      | $\text{Fe}_o$ | $\text{Fe}_p$ | $\text{Fe}_h$       | $\text{Al}_d$      | $\text{Al}_o$ | $\text{Al}_p$ | $\text{Al}_h$       | $\text{Si}_o$      | $\text{Si}_h$       |
|-------------|--------------------|---------------|---------------|---------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|             | g kg <sup>-1</sup> |               |               | mg kg <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> |               |               | mg kg <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> | mg kg <sup>-1</sup> |
| Perfil EKO  |                    |               |               |                     |                    |               |               |                     |                    |                     |
| A           | 0,17               | 0,10          | 0,08          | 0,24                | 0,40               | 0,58          | 0,56          | 1,49                | 0,03               | 0,05                |
| E           | 0,31               | 0,26          | 0,16          | 0,08                | 0,61               | 0,92          | 0,47          | 1,01                | 0,16               | 0,05                |
| BE          | 0,65               | 0,92          | 1,28          | 0,04                | 5,21               | 6,16          | 5,06          | 0,95                | 0,18               | 0,05                |
| Bh1         | 0,43               | 0,70          | 0,30          | 0,03                | 10,04              | 16,75         | 10,81         | 0,47                | 0,34               | 0,03                |
| Bh2         | 0,30               | 0,52          | 0,22          | 0,01                | 8,85               | 15,36         | 16,16         | 0,02                | 0,54               | 0,03                |
| Bm          | 0,74               | 0,87          | 1,04          | 0,01                | 3,55               | 13,96         | 2,59          | 0,00                | 0,58               | 0,40                |
| Perfil EKg  |                    |               |               |                     |                    |               |               |                     |                    |                     |
| Ap          | 0,02               | 0,04          | 0,02          | 0,06                | 0,06               | 0,05          | 0,06          | 0,08                | 0,00               | 1,23                |
| E           | 0,00               | 0,00          | 0,00          | 0,02                | 0,00               | 0,01          | 0,00          | 0,00                | 0,00               | 1,45                |
| Bh          | 0,01               | 0,02          | 0,04          | 0,06                | 1,05               | 1,13          | 1,03          | 0,48                | 0,00               | 0,05                |
| Perfil RQo  |                    |               |               |                     |                    |               |               |                     |                    |                     |
| Ap          | 0,06               | 0,05          | 0,06          | 0,03                | 0,18               | 0,31          | 0,25          | 0,28                | 0,29               | 0,00                |
| EA1         | 0,04               | 0,05          | 0,04          | 0,01                | 0,40               | 1,03          | 0,72          | 0,72                | 0,76               | 0,00                |
| EA2         | 0,08               | 0,08          | 0,07          | 0,00                | 2,29               | 7,81          | 2,42          | 0,00                | 3,47               | 0,00                |
| E           | 0,02               | 0,04          | 0,04          | 0,00                | 0,84               | 2,38          | 1,33          | 0,00                | 0,95               | 0,00                |
| BhE         | 0,00               | 0,04          | 0,03          | 0,01                | 2,11               | 7,31          | 2,42          | 0,00                | 2,19               | 0,08                |
| Bm          | 0,00               | 0,03          | 0,02          | 0,00                | 3,84               | 10,86         | 3,25          | 0,00                | 5,07               | 0,20                |
| Perfil ESKo |                    |               |               |                     |                    |               |               |                     |                    |                     |
| Ap          | 0,06               | 0,05          | 0,04          | 0,07                | 0,35               | 1,72          | 0,73          | 0,94                | 2,79               | 0,05                |
| E           | 0,01               | 0,01          | 0,02          | 0,09                | 0,08               | 0,10          | 0,13          | 0,47                | 0,22               | 0,00                |
| Bh          | 0,15               | 0,14          | 0,13          | 0,01                | 1,20               | 2,05          | 1,14          | 0,53                | 1,43               | 0,03                |
| Bhsx        | 5,32               | 3,79          | 7,33          | 0,01                | 20,91              | 24,99         | 7,18          | 0,30                | 10,40              | 0,18                |
| Bsm         | 15,97              | 9,31          | 9,12          | 0,01                | 21,42              | 40,24         | 11,83         | 0,35                | 44,85              | 0,26                |
| C           | 13,05              | 0,62          | 1,97          | 0,01                | 2,98               | 4,64          | 1,09          | 0,00                | 1,40               | 0,05                |

Hor.: horizonte.

não apresentaram influência perceptível dessa acumulação de Fe na sua morfologia (Quadro 2), uma vez que comparado aos teores de Fe do perfil ESKo seus teores foram menores. Nos horizontes iluviais e naquele cimentado do perfil EKO e no horizonte Bhsx do perfil ESKo, os teores de  $Fe_o$  foram superiores ao de  $Fe_d$ . Esse fato pode estar relacionado com uma possível superestimativa dessa relação por causa de os teores geralmente muito baixos de  $Fe_d$  terem influenciado na sua determinação no extrato do DCB, a exemplo do registrado por Carvalho Filho et al. (2011) para Mn.

O Si extraído com oxalato ( $Si_o$ ) não apresentou acúmulo no Espodosolo com hidromorfismo (perfil EKg). Os perfis EKO, RQo e ESKo evidenciaram acumulação relativa de  $Si_o$ , variando bastante quanto à magnitude dos teores encontrados (de  $0,34 \text{ g kg}^{-1}$  do horizonte Bh1 do perfil EKO a  $44,85 \text{ g kg}^{-1}$  do horizonte Bsm do perfil ESKo) (Figura 2).

Nos horizontes dúricos não espódicos dos perfis EKO e RQo, o  $Al_o$  se destacou relativamente ao  $Al_d$  e  $Al_p$ . Nesses dois horizontes, o  $Si_o$  também se acumulou, mas de forma muito mais efetiva no horizonte Bm do perfil RQo. No horizonte dúrico e espódico Bsm do perfil ESKo, todas as formas extraídas de Fe, Al e Si apresentaram teores maiores que os horizontes acima (Bhsx) e abaixo (C). Os resultados encontrados

reforçaram a importância das formas menos cristalinas de Al na gênese de fragipãs e horizontes dúricos de solos dos Tabuleiros Costeiros (Araújo Filho, 2003; Lima Neto et al., 2010), mas também deixaram claro que as formas menos cristalinas de Si participam do processo em grau variado. O Si, atuante na gênese desses horizontes, pode ter sua origem nessas formas menos cristalinas de Si. Apesar da elevada estabilidade da caulinita nesses sistemas, tem sido registrada na literatura uma possível contribuição do Si originado da dissolução da caulinita de solos (Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos), que cercam essas áreas de depressões da paisagem, sugerindo seu transporte lateral (Moreau et al., 2006; Oliveira et al., 2010).

Nos extratos solo:água, muitos horizontes não apresentaram teores detectáveis ( $<0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de Fe, Al e Si ( $Fe_h$ ,  $Al_h$  e  $Si_h$ ). Para a maior parte dos solos, a tendência foi de decréscimo dos teores de metais com o aprofundamento do perfil, não apresentando associação dessas extrações com os horizontes espódicos. Exceção a essa regra ocorreu nos teores de  $Al_h$  dos horizontes espódicos com hidromorfismo do perfil EKg. Nos horizontes com caráter dúrico dos perfis EKO, RQo e ESKo e mesmo no horizonte Bshx do perfil ESKo, os teores de  $Si_h$  também foram superiores aos dos horizontes subjacentes. Para

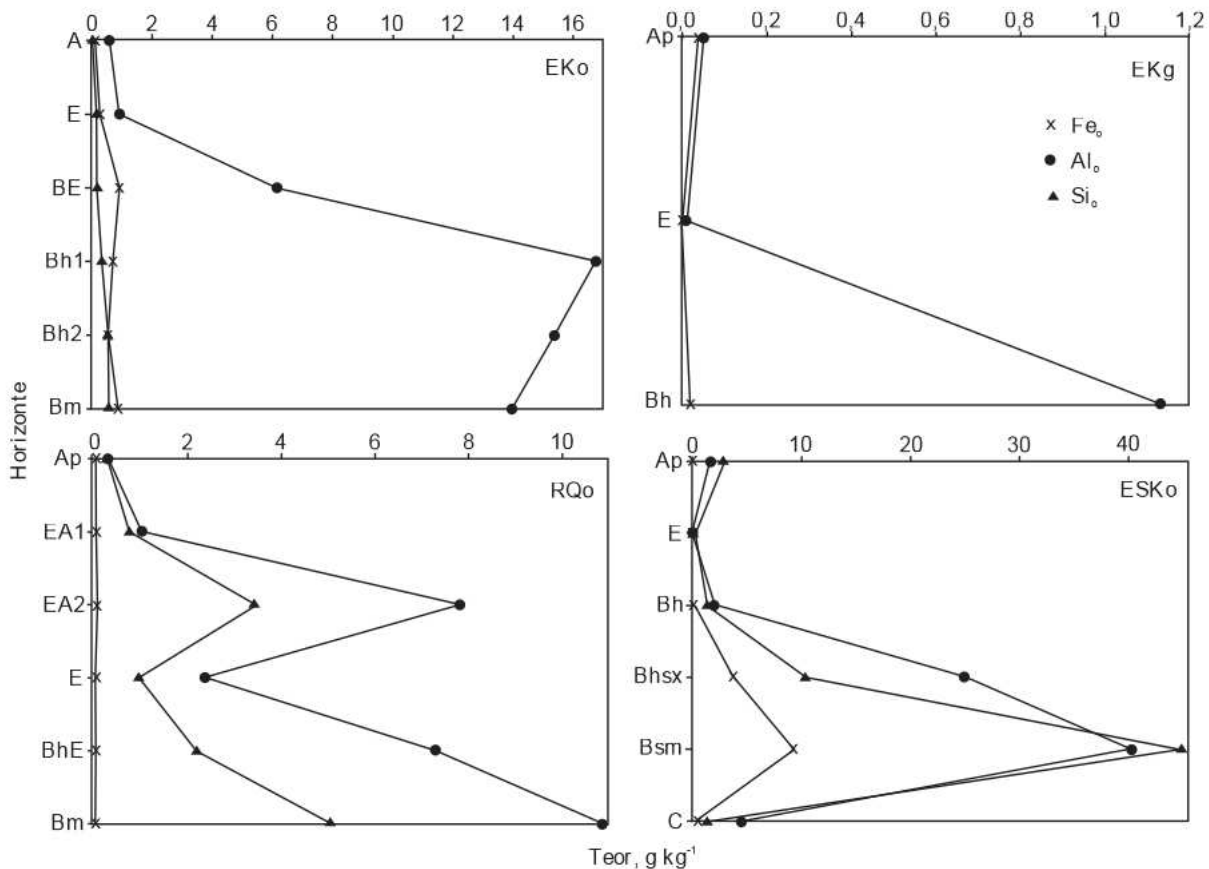


Figura 2. Teores de Fe, Al e Si extraídos pelo oxalato nos horizontes genéticos dos solos estudados.



ambas as situações, o resíduo dessas frações de mínima retenção e conseqüente máxima mobilidade pode estar contribuindo para a formação de complexos orgânicos ou inorgânicos, potenciais agentes do processo de cimentação.

### Relações entre metais e compartimentos do C orgânico do solo

Nos dois perfis onde os teores de Fe foram relevantes (EKo e, principalmente, ESKo), o comportamento das relações  $Fe_o/Fe_d$  e  $Fe_p/Fe_o$ , dos horizontes espódicos, foi distinto (Quadro 5). O perfil EKo (Espodossolo Humilúvico), que não possui horizonte espódico com subscrito "s", apresentou relações mais baixas, principalmente a relação  $Fe_p/Fe_o$  ( $< 0,5$ ). No perfil ESKo (Espodossolo Ferrihumilúvico), as relações  $Fe_p/Fe_o$  foram  $> 0,9$  para os três horizontes B, evidenciando a dominância de complexos Fe-húmus entre as formas de Fe de pior grau de cristalinidade. A relação  $Fe_o/Fe_d$  foi em geral  $> 1,0$ , o que evidencia maior contribuição de formas menos cristalinas de Fe nos perfis EKo e ESKo.

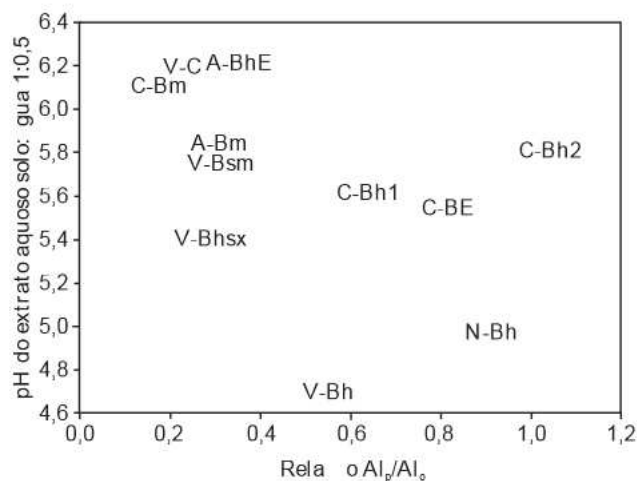
**Quadro 5. Relação dos teores de Fe e Al pelos diferentes extratores<sup>(1)</sup> utilizados, inclusive em relação ao carbono orgânico (CO)**

| Hor.        | $Fe_o/Fe_d$ | $Fe_p/Fe_o$ | $Al_o/Al_d$ | $Al_p/Al_o$ | $CO/(Al_p + Fe_p)$ |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
| Perfil EKo  |             |             |             |             |                    |
| A           | 0,59        | 0,80        | 1,45        | 0,97        | 34,82              |
| E           | 0,84        | 0,62        | 1,51        | 0,51        | 19,04              |
| BE          | 1,42        | 1,39        | 1,18        | 0,82        | 5,05               |
| Bh1         | 1,63        | 0,43        | 1,67        | 0,65        | 3,92               |
| Bh2         | 1,73        | 0,42        | 1,74        | 1,05        | 2,08               |
| Bm          | 1,18        | 1,20        | 3,93        | 0,19        | 3,37               |
| Perfil EKg  |             |             |             |             |                    |
| Ap          | 2,00        | 0,50        | 0,83        | 1,20        | 261,84             |
| E           | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | -                  |
| Bh          | 2,00        | 2,00        | 1,08        | 0,91        | 45,94              |
| Perfil RQo  |             |             |             |             |                    |
| Ap          | 0,83        | 1,20        | 1,72        | 0,81        | 84,06              |
| EA1         | 1,25        | 0,80        | 2,58        | 0,70        | 10,57              |
| EA2         | 1,00        | 0,88        | 3,41        | 0,31        | 4,78               |
| E           | 2,00        | 1,00        | 2,83        | 0,56        | 4,83               |
| BhE         | 0,00        | 0,75        | 3,46        | 0,33        | 4,82               |
| Bm          | 0,00        | 0,67        | 2,83        | 0,30        | 2,40               |
| Perfil ESKo |             |             |             |             |                    |
| Ap          | 0,83        | 0,80        | 4,91        | 0,42        | 20,87              |
| E           | 1,00        | 2,00        | 1,25        | 1,30        | 83,96              |
| Bh          | 0,93        | 0,93        | 1,71        | 0,56        | 21,66              |
| Bhsx        | 0,71        | 1,93        | 1,20        | 0,29        | 5,35               |
| Bsm         | 0,58        | 0,98        | 1,88        | 0,29        | 1,77               |
| C           | 0,05        | 3,18        | 1,56        | 0,23        | 0,64               |

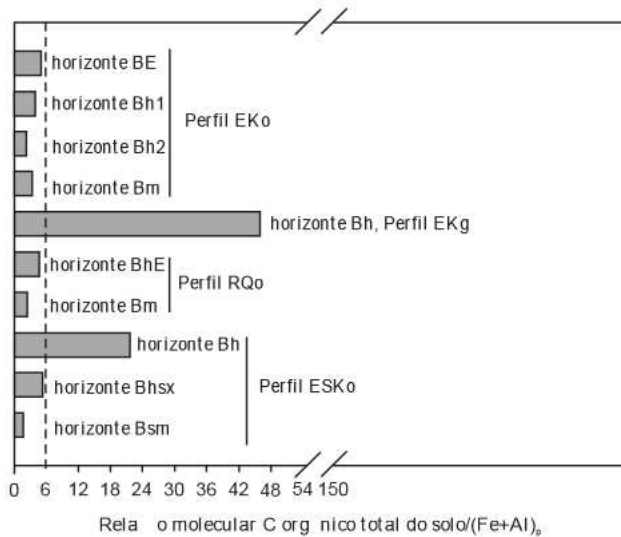
<sup>(1)</sup> p: pirofosfato de sódio; d: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; e o: oxalato ácido de amônio.

Os perfis de Espodossolos Humilúvicos (EKo e EKg) apresentaram, nos seus horizontes espódicos, a maior parte das relações  $Al_o/Al_d$  e  $Al_p/Al_o$  próximas ou acima da unidade, um reflexo do Al intensamente associado a compostos orgânicos (Shoji et al., 1982). Os horizontes iluviais dos perfis ESKo (Espodossolo Ferrihumilúvico) e RQo (Neossolo Quartzarênico espódico), principalmente nas relações  $Al_p/Al_o$ , evidenciaram valores mais baixos ( $< 0,6$ ), indicando a possibilidade da ocorrência simultânea de complexos Al-húmus e materiais inorgânicos de pior grau de cristalinidade contendo Al nesses solos. Além disso, a relação  $Al_p/Al_o$  dos horizontes B e C dos solos indicou tendência inversa àquela do pH da solução do solo (Figura 3), reforçando o relacionamento entre a formação de compostos orgânico-metais e as faixas ideais de pH (Shoji & Fugiwara, 1984), onde o pH mais elevado aumenta a solubilidade dos compostos orgânicos e, conseqüentemente, a disponibilidade de sítios para adsorção de Al.

Na relação  $CO/(Al_p + Fe_p)$ , voltou a prevalecer a influência do regime hidromórfico do horizonte espódico do perfil EKg: o valor da relação foi bem mais elevado do que nos outros perfis estudados (Figura 4). Os baixos teores de Fe que deixam o sistema, em razão do processo de redução e da predominância da fração AH sobre AF (relações  $AH/AF > 1$ ) desse horizonte, ajudam a explicar tais valores elevados dessa relação, uma vez que os AHs são precipitados mais facilmente pelo Al (metal predominante nesse horizonte) do que os AFs (Skjemstad, 1992). Pode-se pressupor que uma fração de AF esteja saindo do sistema ou sendo precipitada em horizontes ainda mais profundos do perfil (não avaliados), considerando a baixa



**Figura 3. Dispersão de pontos entre a relação  $Al_p/Al_o$  e o pH da solução do solo de horizontes iluviais e C dos perfis estudados ( $r = -0,611$ ,  $p < 0,05$ ). Primeira parte da legenda representa o perfil do solo - C: Coruripe floresta (EKo), N: Neópolis coco (EKg), A: Acajutiba eucalipto (RQo), V: Nova Viçosa eucalipto (ESKo). Segunda parte da legenda significa o horizonte genético do solo.**



**Figura 4. Relação molecular C orgânico total e soma das extrações de Fe e Al extraídos por pirofosfato de sódio  $[CO/(Fe+Al)_p]$  de horizontes iluviais (espódicos e cimentados) dos solos estudados. A linha tracejada corresponde ao valor mínimo (= 6) da relação, conforme proposto por Monka & Buurmann (1982), em que a matéria orgânica ainda estaria apta a reter íons metálicos.**

disponibilidade de metais (Al) para favorecer sua precipitação (Gomes et al., 1998). O mesmo raciocínio ajuda a explicar os teores de COS mais elevados desses horizontes (Quadro 3), disponibilizados na solução do solo por causa da carência de metais.

O perfil ESKo (Espodossolo Ferrihumilúvico) apresentou decréscimo da relação  $CO/(Al_p+Fe_p)$  em profundidade dos seus horizontes espódicos (respectivamente 21,66; 5,35; e 1,77 nos horizontes Bh, Bhxs e Bsm). De qualquer forma, os horizontes espódicos ou intermediários para eles dos perfis EKO, RQo e ESKo (excetuando o seu horizonte Bh) apresentaram valores da relação  $CO/(Al_p+Fe_p)$  suficientemente baixos (< 6), supondo que estejam sobrando íons metálicos em relação ao teor de CO desses mesmos horizontes (Higashi et al., 1981; Mokma & Buurman, 1982); ou seja, a matéria orgânica presente nesses horizontes teria esgotado sua capacidade complexante. Entretanto, Skjemstad (1992) apresentou que para baixas relações C orgânico/Al, a máxima floculação ocorreu em  $pH > 5$ , ocorrente nos horizontes citados (Quadro 3). Por fim, as relações AH/AF mais estreitas desses horizontes (menores que a unidade, novamente excetuando-se o horizonte Bh do perfil ESKo), ajudam a alterar para baixo o limite pela qual a relação C orgânico/metal ainda estaria apta a mobilizar íons metálicos em solução (Gomes et al., 1998). Assim, relações  $CO/(Al_p+Fe_p)$  baixas ocorreram nos horizontes iluviais de solos intermediários para Espodossolos Humilúvicos (perfil

RQo), Espodossolo Ferrihumilúvico (ESKo) e Espodossolo Humilúvico (EKO), diferentemente do encontrado para Espodossolos do litoral paulista por Coelho et al. (2010), onde essas baixas relações estiveram associadas apenas à presença de horizontes espódicos com subscrito “s”.

### O processo de Podzolização

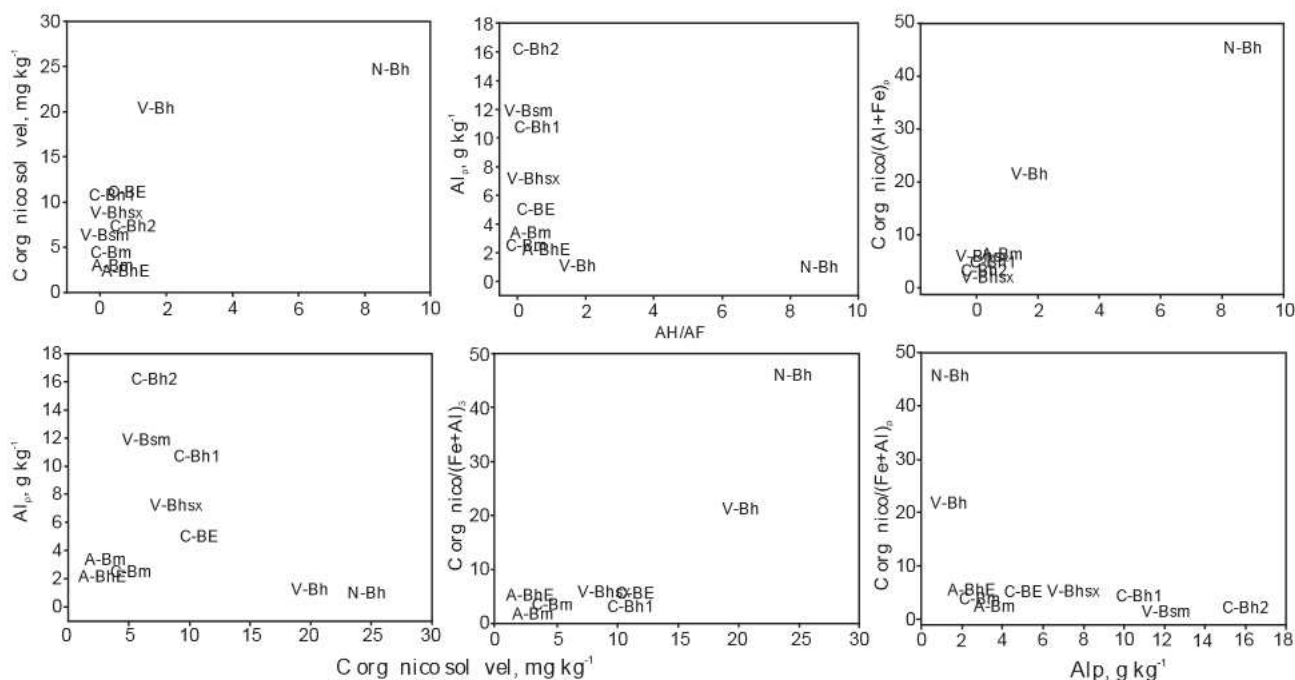
O aumento, dentro de cada perfil de solo, de C orgânico e metais extraídos por ditonito, oxalato e pirofosfato (teores de Al e, por vezes, Fe e Si), dos horizontes iluviais espódicos, relativamente aos horizontes eluviais, comprovou o processo de podzolização inferido pela morfologia de campo (Quadro 2) em todas as situações. Além disso, todos os solos apresentaram relações  $(AH+AF)/CO$  mais elevadas nos horizontes iluviais espódicos relativamente aos horizontes superficiais, dentro de cada perfil.

As condições de paisagem e material de origem são aquelas consideradas relevantes ao processo de podzolização nos trópicos, como: relevo plano e, ou, suavemente abaciado; material de origem arenoquartzoso (inerte); e camadas de impedimento em subsuperfície, representadas por uma conjugação de horizontes cimentados e lençol freático suspenso (Gomes et al., 2007; Oliveira et al., 2010; Silva et al., 2012). O processo em si se sobrepõe em grande parte ao encontrado para Podzois não boreais, por Sauer et al. (2007) e definidos por Buurman & Jongmans (2005), envolvendo materiais de origem pobres, matéria orgânica recalcitrante e translocação de complexos Fe-húmus e Al-húmus. O papel desempenhado pelos compostos inorgânicos amorfos, se presentes, é pouco significativo na translocação de metais, se comparado aos complexos envolvendo matéria orgânica.

A mineralogia da fração argila desses solos é representada basicamente por caulinita e quartzo (Silva et al., 2012), constituindo sistema mineralógico muito simples e de baixa atividade.

A presença ou ausência de hidromorfismo coincidente com o horizonte espódico separou os solos em dois grupos distintos para vários atributos: relação AH/AF, COS,  $Al_p$  e relação  $CO/(Fe+Al)_p$  (Figura 5). É fácil observar o distanciamento dos horizontes Bh do perfil EKg para todos os outros, com o horizonte Bh do perfil ESKo também se destacando, mas de forma mais branda, o que pode estar indicando períodos de excesso de água coincidentes com a profundidade de ocorrência desse horizonte genético.

Além disso, o solo com hidromorfismo associado ao horizonte espódico (perfil EKg) apresentou teores de Fe desprezíveis para os três extratores testados e nele os complexos Al-húmus são dominantes, corroborando dados de Takahashi et al. (1995) e Coelho et al. (2010). As condições de excesso de água estagnada desse horizonte Bh reduzem o Fe, o que torna esse metal apto a se movimentar e sair do sistema (Farmer et al., 1983b).



**Figura 5** Dispersão de pontos entre a relação ácido húmico/ácido fúlvico (AH/AF), carbono orgânico solúvel (COS), Al extraído pelo pirofosfato de sódio ( $Al_p$ ) e relação carbono orgânico total/Fe e Al extraídos pelo pirofosfato de sódio [ $CO/(Fe+Al)_p$ ] de amostras dos horizontes iluviais e C estudados. Primeira parte da legenda representa o perfil do solo - C: Coruripe floresta (EKO), N: Neópolis coco (EKg), A: Acajutiba eucalipto (RQo) e V: Nova Viçosa eucalipto (ESKo). Segunda parte exhibe o horizonte genético do solo.

Entre os solos sem hidromorfismo associado ao horizonte espódico (perfis EKO, RQo e ESKo), os teores extraídos de Fe só foram desprezíveis no horizonte iluvial (intermediário para Bh) do perfil RQo, que apresenta podzolização apenas incipiente (Neossolo Quartzarênico espódico). Teores de Fe só foram suficientemente altos para refletir morfologias que caracterizam o subscrito “s” nos horizontes espódicos do perfil ESKo (Figura 6). Assim, a presença dos complexos de Al foi mais cosmopolita e ocorreu em maiores quantidades do que as dos complexos de Fe (Coelho et al., 2010).

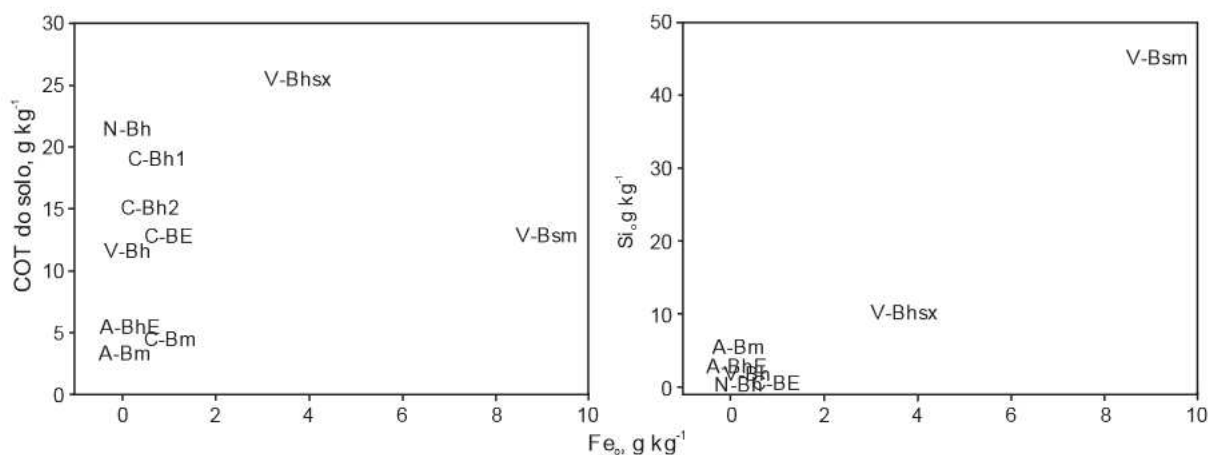
A presença de apenas um perfil com subscrito “s” entre os solos estudados não permitiu maiores inferências e os teores desprezíveis de Fe extraídos nos horizontes com hidromorfismo indicaram a ausência de Espodossolos com subscrito “s” em tais horizontes, o que também foi enfatizado por Coelho et al. (2010). No perfil ESKo (Espodossolo Ferrihumilúvico) apareceram diferenças substanciais entre os teores de Fe e Al extraídos por ditionito, oxalato e pirofosfato e teores relativamente elevados de  $Si_o$ , dentro de cada horizonte iluvial, quando comparados com os horizontes espódicos dos outros solos. Esses dados sugeriram a presença, concomitante aos complexos metal-húmus, de complexos inorgânicos, preferencialmente de pior grau de cristalinidade, em razão do efeito inibidor da matéria orgânica na cristalização de óxidos (Schwertmann, 1988; Kämpf

et al., 2009). Não necessariamente esses complexos participaram de forma efetiva no processo de mobilização e translocação de metais (Sauer et al., 2007), mas se fazem presentes nos horizontes Bshx e Bsm do perfil ESKo.

Os atributos estudados evidenciaram que horizontes espódicos de solos dos Tabuleiros Costeiros podem ser quimicamente similares aos de solos sob restinga (Gomes et al., 1998; Coelho et al., 2008). O maior diferencial está na presença constante de horizontes cimentados coincidindo ou logo abaixo do horizonte espódico nos solos dos Tabuleiros Costeiros, o que implica que esses sistemas são mais fechados, têm maior tempo de residência da água da chuva e, consequentemente, apresentam maior risco de anoxia às plantas mais sensíveis.

## CONCLUSÕES

1. O aumento dos teores de C orgânico, Fe e Al pelos diferentes extratores nos horizontes iluviais de cada solo, relativamente aos horizontes eluviais, refletem a morfologia de campo e reforçam a importância do processo de podzolização nos solos estudados, que é apenas incipiente no perfil de Neossolo Quartzarênico espódico.



**Figura 6.** Dispersão de pontos entre Fe extraído por oxalato ácido de amônio ( $Fe_o$ ) e C orgânico total do solo (COT) e Si extraído por oxalato ácido de amônio ( $Si_o$ ) de amostras dos horizontes iluviais e C estudados. Primeira parte da legenda representa o perfil do solo – C: Coruripe floresta (Eko), N: Neópolis coco (EKg), A: Acajutiba eucalipto (RQo) e V: Nova Viçosa eucalipto (ESko). Segunda parte da legenda retrata o horizonte genético do solo.

2. Os complexos Al-húmus dominam inteiramente a matriz dos horizontes iluviais com hidromorfismo. Esses são basicamente isentos de formas extraíveis de Fe e apresentam relações AH/AF e C orgânico/(Fe+Al)<sub>p</sub> muito maiores que os horizontes iluviais dos outros solos estudados (sem hidromorfismo associado aos horizontes iluviais).

3. Os solos sem hidromorfismo associado aos horizontes iluviais variam quanto à influência das diferentes formas de Fe. O perfil de Espodosolo Ferrihumilúvico é o único, dos quatro estudados, que possui horizontes espódicos com subscrito “s” e, portanto, onde os teores de Fe extraídos refletiram-se diferencialmente na morfologia.

## LITERATURA CITADA

- ARAÚJO FILHO, J.C. Horizontes cimentados em Argissolos e Espodosolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja no Nordeste do Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2003. 223p. (Tese de Doutorado)
- BENITES, V.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MENDONÇA, E.S. & MARTIN NETO, L. Caracterização da matéria orgânica e micromorfologia de solos sob campos de altitude no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (MG). R. Bras. Ci. Solo, 25:661-674, 2001.
- BENITES, V.M.; MÁDARI, B. & MACHADO, P.L.O.A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado e de baixo custo. Rio de Janeiro, Embrapa, 2003. 7p. (Comunicado Técnico, 16)
- BERGELIN, A.; HEES, P.A.W.van; WAHLBERG, O. & LUNDSTRÖM, U. The acid-base properties of high and low molecular weight organic acids in soil solutions of podzolic soils. Geoderma, 94:223-235, 2000.
- BONIFACIO, E.; SANTONI, S.; CELI, L. & ZANINI, E. Spodosol-Histosol evolution in the Krkonose National Park (CZ). Geoderma, 131:237-250, 2006.
- BUOL, S.W.; HOLE, F.D. & McCracken, R.J. Soil genesis and classification. 2.ed. Ames, Iowa States University Press, 1980. 404p.
- BUURMAN, P. & JONGMANS, A.G. Podzolization and soil organic matter dynamics. Geoderma, 125:71-83, 2005.
- BUURMAN, P. & van REEUWIJK, L.P. Proto-imogolite and the process of podzol formation: A critical note. J. Soil Sci., 35:447-452, 1984.
- CARVALHO FILHO, A.; CURTI, N.; MARQUES, J.J.G.S.M.; SHINZATO, E.; FREITAS, D.A.F.; JESUS, E.A. & MASSAHUD, R.T.R. Óxidos de manganês em solos do Quadrilátero Ferrífero (MG). R. Bras. Ci. Solo, 35:793-804, 2011.
- COELHO, M.R. Caracterização e gênese de Espodosolos da Planície Costeira do Estado de São Paulo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2008. 270p. (Tese de Doutorado)
- COELHO, M.R.; VIDAL-TORRADO, P.; PÉREZ, X.L.O.; MARTINS, V.M. & VÁZQUEZ, F.M. Química e gênese de solos desenvolvidos sob vegetação de restinga no Estado de São Paulo. R. Bras. Ci. Solo, 34:1951-1964, 2010.
- CORRÊA, M.M.; KER, J.C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURTI, N. & TORRES, T.C.P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. R. Bras. Ci. Solo, 32:297-313, 2008.
- DE CONINCK, F. Major mechanisms in formation of spodic horizons. Geoderma, 24:101-128, 1980.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1)

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FARMER, V.C. Significance of the presence of allophane and imogolite in Podzol Bs horizons for podzolization mechanisms: A review. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 28:571-578, 1982.
- FARMER, V.C.; RUSSEL, J.D. & SMITH, B.F.L. Extraction of inorganic forms of translocated Al, Fe and Si from a Podzol Bs horizon. *J. Soil Sci.*, 34:571-576, 1983a.
- FARMER, V.C.; SKJEMSTAD, J.O. & THOMPSON, C.H. Genesis of humus B horizons in hydromorphic humus podzols. *Nature*, 304:342-344, 1983b.
- GOMES, J.B.V.; RESENDE, M.; REZENDE, S.B. & MENDONÇA, E.S. Solos de três áreas de restinga. II. Dinâmica de substâncias húmicas, ferro e alumínio. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:1921-1932, 1998.
- GOMES, F.H.; VIDAL-TORRADO, P.; MACÍAS, F.; GHERARDI, B. & PEREZ, X.L.O. Solos sob vegetação de restinga na Ilha do Cardoso (SP). I - Caracterização e classificação. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1563-1580, 2007.
- GOMES, J.B.V.; BARRETO, A.C.; MICHEREFF, M.; VIDAL, W.L.; COSTA, J.L. da S.; OLIVEIRA-FILHO, A.T. & CURI, N. Relações entre atributos do solo e atividade de formigas em restingas. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:67-78, 2010.
- HEES, P.A.W.van; LUNDSTRÖM, U.; STARR, M. & GIESLER, R. Factors influencing aluminium concentrations in soil solution from Podzols. *Geoderma*, 94:289-310, 2000.
- HIGASHI, T.; DE CONINCK, F. & GELAUE, F. Characterization of some spodic horizons of the Campine (Belgium) with dithionite-citrate, phyrophosphate and sodium hydroxide-tetraborate. *Geoderma*, 25:131-142, 1981.
- HOLZHEY, C.S.; DANIELS, R.B. & GAMBLE, E.E. Thick Bh horizons in the North Carolina Coastal Plain: II. Physical and chemical properties and rates of organic additions from surface sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39:1182-1187, 1975.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis. Advanced course. 2.ed. Madison, 1974. 895p.
- JANSEN, B.; NIEROP, K.G.J. & VERSTRATEN, J.M. Mechanisms controlling the mobility of dissolved organic matter, aluminium and iron in podzol B horizons. *Eur. J. Soil Sci.*, 56:537-550, 2005.
- KÄMPF, N.; CURI, N. & MARQUES, J.J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.573-610.
- LIMA NETO, J.A.; RIBEIRO, M.R.; CORREA, M.M.; SOUZA-JUNIOR, V.S.; ARAÚJO FILHO, J.C. & LIMA, J.F.W.F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolo e Argissolo dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:473-486, 2010.
- LUNDSTRÖM, U.S. The role of organic in the soil solution chemistry of a podzolized soil. *J. Soil Sci.*, 44:121-133, 1993.
- LUNDSTRÖM, U.S.; van BREEMEN, N. & BAIN, D.C. The podzolization process. A review. *Geoderma*, 94:91-107, 2000a.
- LUNDSTRÖM, U.S.; van BREEMEN, N.; BAIN, D.C.; HEES, P.A.W.van; GIESLER, R.; GUSTAFSSON, J.P.; ILVESNIEMI, H.; KARLTUN, E.; MELKERUD, P.A.; OLSSON, M.; RIISE, G.; WAHLBERG, O.; BERGELIN, A.; BISHOP, K.; FINLAY, R.; JONGMANS, A.G.; MAGNUSSON, T.; MANNERKOSKI, H.; NORDGREN, A.; NYBERG, L.; STARR, M. & STRAND, L.T. Advances in understanding the podzolization process resulting from a multidisciplinary study of three coniferus forest soils in the Nordic Countries. *Geoderma*, 94:335-353, 2000b.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 7:317-327, 1960.
- MOKMA, L. & BUURMAN, P. Podzols and podzolization in temperate regions. Wageningen, International Soil Museum, 1982. 126p. (ISM Monograph, 1)
- MOORE, T.R. Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, Westland, New Zealand. *Water Res. Res.*, 25:1321-1330, 1989.
- MOREAU, A.M.S.S.; COSTA, L.M.; KER, J.C. & GOMES, F.H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos dos Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:1021-1030, 2006.
- MOURA FILHO, G. Caracterização e uso de solos arenosos associados a foz do Rio São Francisco, no litoral sul de Alagoas. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 169p. (Tese de Doutorado)
- OLIVEIRA, A.P.; KER, J.C.; SILVA, I.R.; FONTES, M.P.F.; OLIVEIRA, A.P. & NEVES, A.T.G. Spodosols pedogenesis under Barreiras formation and sandbank environments in the south of Bahia. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:847-860, 2010.
- RHOADES, J.D. Soluble salts. In: PAGE, A.L., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1982. p.167-179. (Agronomy Monograph, 9)
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.
- SAUER, D.; SPONAGEL, H.; SOMMER, M.; GIANI, L.; JAHN, R. & STAHR, K. Review article podzol: Soil of the year 2007. A review on its genesis, occurrence, and functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 170:581-597, 2007.
- SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUKI, J.W.; GOODMAN, B.A. & SCHWERTMANN, U. eds. Iron in soils and clay minerals. Dordrecht, Reidel, 1988. p.267-308.
- SHOJI, S. & FUJIWARA, Y. Active aluminium and iron in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan: their forms, properties, and significance in clay weathering. *Soil Sci.*, 137:216-226, 1984.
- SHOJI, S.; FUJIWARA, Y. I. & SAIGUSA, M. Chemistry and clay mineralogy of Andosols, Brown forest soils, and Podzolic soils formed from recent Towada ashes, Northeastern Japan. *Soil Sci.*, 133:69-86, 1982.

- SILVA, E.A.; GOMES, J.B.V.; ARAÚJO FILHO, J.C.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. & CURI, N. Morphology, mineralogy and micromorphology of soils associated to summit depressions of the Brazilian Northeastern Coastal Plains. *Ci. Agrotec.*, 36:507-517p, 2012.
- SKJEMSTAD, J.O. Genesis of Podzols on Coastal Dunes in Southern Queensland. III. The role of aluminium-organic complexes in profile development. *Austr. J. Soil Res.*, 30:645-665, 1992.
- SKJEMSTAD, J.O.; FITZPATRICK, R.W.; ZARCINAS, B.A. & THOMPSON, C.H. Genesis of Podzols on coastal dunes in Southern Queensland. II.(Part I) Geochemistry and forms of elements as deduced from various soil extraction procedures. *Austr. J. Soil Res.*, 30:593-613, 1992a.
- SKJEMSTAD, J.O.; WATERS, A.G.; HANNA, J.V. & OADES, J.M. Genesis of Podzols on Coastal Dunes in Southern Queensland. IV. Nature of the organic fraction as seen by <sup>13</sup>C nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Austr. J. Soil Res.*, 30:667-681, 1992b.
- STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition and reactions*. New York, Wiley, 1982. 443p.
- TAKAHASHI, T.; FUKUOKA, T. & DAHLGREN, R.A. Aluminum solubility and release rates from soil horizons dominated by aluminum-humus complexes. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 41:119-131, 1995.
- THIBAUT, D.H. & SHEPPARD, M.I. A disposable system for soil pore-water extraction by centrifugation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23:1629-1641, 1992.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS/UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFLA/UFV. Levantamento pedológico de áreas da Aracruz Celulose S.A. nos estados do Espírito Santo, Bahia e Minas Gerais, e sua interpretação para o cultivo do eucalipto e para o ambiente em geral. Aracruz, ARCEL, 2004. CD ROM.
- WANG, C. Extractable Al, Fe and Mn (and Si if desired). In: McKEAGUE, J.A., ed. *Manual on soil sampling and methods of analysis*. 2.ed. Ottawa, Canadian Society of Soil Science, 1978. p.98-108.