

# SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

## PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DE SOLOS INCUBADOS COM RESÍDUO ALCALINO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE<sup>(1)</sup>

J. A. ALBUQUERQUE<sup>(2)</sup>, J. ARGENTON<sup>(3)</sup>, E. C. FONTANA<sup>(4)</sup>,  
F. S. COSTA<sup>(3)</sup> & T. D. RECH<sup>(5)</sup>

### RESUMO

A indústria de celulose e papel descarta toneladas de resíduos com composição química variada. Certos resíduos estão sendo utilizados por produtores rurais para correção da acidez do solo, pois apresentam hidróxido em sua composição. Contudo, nenhum critério é adotado para quantificar a dose a ser utilizada, bem como para sua reaplicação, o que pode acarretar problemas de dispersão da argila, redução da estabilidade dos agregados e desbalanço de nutrientes, comprometendo, dessa forma, propriedades físicas e químicas dos solos. O objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físicas e químicas de dois solos incubados com resíduo alcalino (dregs) da indústria de celulose. Foram utilizadas amostras da camada superficial de um Latossolo Bruno distrófico e de um Cambissolo Húmico aluminico incubadas com doses de resíduo alcalino equivalentes a 0, 12, 25, 35 e 50 % de carbonato de cálcio necessário para elevar o pH da camada de 0-20 cm para 6,0. Foram analisados: a estabilidade de agregados, argila dispersa em água, cátions trocáveis, pH e o ponto de efeito salino nulo (PESN). O resíduo alcalino reduziu o teor e a saturação por alumínio e aumentou o pH e os teores de cálcio, magnésio, potássio e sódio trocáveis. Aumentou o potencial elétrico negativo de ambos os solos, mas reduziu o grau de floculação da argila apenas do Cambissolo Húmico aluminico. Nesse solo, o grau de floculação foi negativamente relacionado com o potencial elétrico negativo ( $r = -0,93^{**}$ ). A redução do grau de floculação da argila se deve, provavelmente, à maior repulsão das partículas que apresentam carga variável com o pH. A estabilidade dos agregados não foi alterada pela adição do resíduo alcalino.

**Termos de indexação:** acidez do solo, estabilidade de agregados, floculação da argila.

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em junho de 2001 e aprovado em agosto de 2002.

<sup>(2)</sup> Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). E-mail: a2ja@cav.udesc.br

<sup>(3)</sup> Mestrando em Ciência do Solo, CAV-UDESC.

<sup>(4)</sup> Aluno do Curso de Agronomia, CAV-UDESC.

<sup>(5)</sup> Pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. Rua Emiliano Ramos 342, CEP 88502-215 Lages (SC). E-mail: tassio@epagri.rct-sc.br

**SUMMARY: PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS INCUBATED WITH ALKALINE RESIDUE OF THE CELLULOSE INDUSTRY**

*The cellulose and paper industry discards residues of varied chemical composition on a large scale. Some of these residues are being used by farmers for the adjustment of soil acidity, since they contain hydroxide. However, there are no recommendations on quantities or reapplications. Possible consequences are clay dispersion, reduction of the aggregate stability and the imbalance of nutrients, degrading the physical and chemical soil properties. This study evaluated the physical and chemical properties of two soils incubated with alkaline residues (dregs) from the cellulose industry. Soil samples from the surface layer of a Latossolo Bruno and a Cambissolo Húmico were incubated with alkaline residue rates that provided 0, 12, 25, 35 and 50 % of the necessary calcium carbonate to elevate the pH (in the 0-20 cm layer) to 6.0. The aggregate stability, clay dispersed in water, exchangeable cations, pH and point of zero salt effect (PZSE) were determined. The alkaline residue reduced aluminum and increased pH, calcium, magnesium, potassium, and sodium contents. It increased the negative electric surface potential of both soils, but reduced the clay flocculation rate only in the Cambissolo Húmico. In this soil, the flocculated clay was negatively related with the negative electric surface potential ( $r = -0.93^{**}$ ). The reduction of the clay flocculation rate was probably due to higher repulsive forces among soil particles that present variable-charges, according to the pH. The aggregate stability was not altered by the alkaline residue application.*

*Index terms: soil acidity; aggregate stability, clay flocculation.*

## INTRODUÇÃO

A indústria de celulose recupera apenas parte dos reagentes envolvidos nos processos de transformação da madeira em celulose, gerando, assim, diversos resíduos. O licor verde, solução aquosa de carbonato e sulfeto de sódio, é transformado em licor branco, rico em NaOH. Durante o processo de clarificação do licor verde, são separadas, por sedimentação, as impurezas, tais como: carbono não queimado, ferro, sílica, cálcio, alumina, magnésio e sulfetos, denominadas "dregs", um resíduo alcalino, sólido, de cor escura. Esse resíduo é lavado e processado em filtro a vácuo, para remover o máximo possível de álcali e água, e, posteriormente, ser depositado em silos ou aterros de resíduos. Os agricultores situados próximos a essas indústrias utilizam esse resíduo, que tem um baixo custo de aquisição, como corretivo da acidez do solo. Entretanto, não existem critérios bem definidos das doses e formas de aplicação, tornando seu uso um risco para o ambiente, uma vez que tais resíduos podem acarretar problemas de dispersão da argila, diminuição da estabilidade dos agregados e desbalanço de nutrientes do solo, comprometendo, dessa forma, algumas propriedades físicas e químicas.

Os resíduos alcalinos da indústria de celulose possuem capacidade de elevar o pH, graças à presença de hidróxido; no entanto, apresentam sódio em sua composição. Os solos com elevada percentagem de sódio trocável são susceptíveis ao selamento superficial e erosão hídrica. Segundo Miller & Baharuddin (1986), Shainberg & Singer

(1988) e Nelson et al. (1998), teores elevados de sódio e baixa concentração do eletrólito aumentam a argila dispersa em água e a viscosidade da água, modificações que, conforme Keren et al. (1988), reduzem a condutividade hidráulica do solo. A dispersão promovida pelo sódio é maior quando a concentração do eletrólito é baixa (Agassi et al., 1981; Miller et al., 1990; Sumner, 1992).

Na formação de compostos orgânico-minerais em solos, nos quais os minerais e substâncias orgânicas revelam um excesso de carga negativa, o teor e o tipo de cátion adicionado deve ser considerado. Quando a carga do contra-íon é monovalente e a concentração do eletrólito é baixa, a espessura da dupla camada elétrica aumenta e com isso a repulsão eletrostática entre partículas é maior. Contrariamente, quando a carga do contra-íon é polivalente e a concentração do eletrólito é alta, a espessura da dupla camada elétrica diminui, favorecendo as forças atrativas de curto alcance e de pontes de cátions, que podem resultar na união entre partículas carregadas negativamente (Van Olphen, 1977; McBride, 1989). Os efeitos de atração e repulsão que variam com a valência e a concentração do eletrólito são muito importantes (Miller et al., 1990), principalmente no processo de agregação, na formação de selo superficial e quando o solo é utilizado para descartar resíduos.

A formação de selo superficial, responsável pela redução da infiltração de água no solo, é devida a dois mecanismos: (a) dispersão física dos agregados do solo, causada pela ação do impacto das gotas de chuva, e (b) dispersão química, que depende da

percentagem de sódio trocável no solo e da concentração eletrolítica da solução do solo (Agassi et al., 1981). O selamento superficial, formado pelo preenchimento dos poros da camada superior do solo por finas partículas oriundas da dispersão de agregados, reduz a infiltração de água no solo (McIntyre, 1958; Agassi et al., 1981; Reichert & Norton, 1995) e aumenta a erosão hídrica (Reichert & Norton, 1994).

A estabilidade estrutural depende da mineralogia, textura, proporção e concentração de cátions, substâncias orgânicas, sílica, óxidos e hidróxidos. Reichert & Norton (1996), utilizando resíduos industriais, ricos em sulfatos e óxidos de cálcio, em solos de carga variável, encontraram aumento na infiltração e redução na erosão em alguns solos, porém em outros os resultados foram contrários. Em solos com carga permanente, o uso desse resíduo diminuiu a dispersão de argila, o selamento superficial, o escoamento de água e a erosão hídrica (Reichert & Norton, 1994), resultado também observado por Ben-Hur et al. (1992) com a aplicação de gesso em solos da África do Sul que apresentam distinta mineralogia.

Para identificar as possíveis limitações do uso do resíduo alcalino e a melhor forma de sua utilização, faz-se necessário estudar os seus efeitos sobre o solo, principalmente a quantificação de doses apropriadas e as alterações causadas nas propriedades físicas e químicas do solo.

Neste estudo, a hipótese é que a utilização de resíduo alcalino no solo modifica o pH, a composição química e reduz a estabilidade de agregados e o grau de floculação da argila. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar mudanças nas propriedades físicas e químicas do Latossolo Bruno distrófico e Cambissolo Húmico aluminico, submetidos à aplicação de doses crescentes de resíduo alcalino.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação, no Centro de Ciências Agroveterinárias da

Universidade do estado de Santa Catarina – UDESC, Lages (SC). As amostras do Latossolo Bruno distrófico e Cambissolo Húmico aluminico (EMBRAPA, 1999), coletadas no município de Lages, foram peneiradas em malha de 8 mm e acondicionadas em colunas de PVC de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro, com densidade de 0,90 Mg m<sup>-3</sup>, constituindo as unidades experimentais. O resíduo utilizado neste estudo foi coletado no depósito da empresa por meio de trator com pá carregadeira até completar 5 m<sup>3</sup>, dos quais foram coletadas oito subamostras que compuseram a amostra para determinações químicas. Para determinar os cátions totais presentes no resíduo, a amostra foi aquecida em mufla a 550 °C, e as cinzas foram digeridas com ácido clorídrico concentrado. A determinação dos cátions totais e dos trocáveis do resíduo foi realizada conforme método de Tedesco et al. (1995) (Quadro 1).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco doses do resíduo alcalino e duas profundidades de amostragem na coluna, com quatro repetições.

Em agosto de 1999, o resíduo, após seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm, foi aplicado na superfície do solo nas colunas, para simular seu uso em sistemas sem mobilização do solo, nas doses equivalentes a 0, 12, 25, 35 e 50 % de CaCO<sub>3</sub>, necessário para elevar o pH da camada de 0-20 cm até 6,0 (CFS/RS-SC, 1995). A umidade do solo foi mantida entre 60 e 80 % da capacidade de campo, pela adição de água destilada.

Após um período de dois meses, foram coletadas amostras nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, para analisar: a estabilidade de agregados (Kemper & Chepil, 1965), em subamostras compreendidas entre 4,76 e 8,00 mm de diâmetro, sendo os resultados expressos pelo diâmetro médio ponderado (DMP); o pH em água, os teores de K, Na, Ca, Mg e Al trocáveis (Tedesco et al., 1995). A soma dos cátions trocáveis resultou na CTC efetiva. Para obter o grau de floculação e a distribuição do tamanho de partículas, determinada pelo método da pipeta (Gee & Bauder,

**Quadro 1. Atributos químicos do resíduo e atributos químicos e físicos dos solos utilizados**

	K	Na	Ca	Mg	Al	pH	Argila	Silte	Areia
	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						g kg <sup>-1</sup>		
Resíduo <sup>(1)</sup>	1,0	2,7	3,0	0,3	0	9,8			
Resíduo <sup>(2)</sup>	10	171	512	120	0				
Latossolo <sup>(3)</sup>	0,44	0,02	5,1	2,6	0,4	5,3	514	390	96
Cambissolo <sup>(3)</sup>	0,29	0,02	0,9	0,6	4,4	5,1	340	370	290

<sup>(1)</sup> Cátions trocáveis (Tedesco et al., 1995). <sup>(2)</sup> Teores totais na cinza do resíduo após combustão seca a 550 °C (Tedesco et al., 1995).

<sup>(3)</sup> Cátions trocáveis (Tedesco et al., 1995) e granulometria (Gee & Bauder, 1986).

1986), foram utilizados dispersante químico (NaOH) e água.

O ponto de efeito salino nulo (PESN) do Latossolo Bruno distrófico foi obtido por Albuquerque et al. (2000), enquanto o do Cambissolo Húmico alumínico foi obtido segundo EMBRAPA (1997). A partir dos valores de pH e PESN, foi calculado o potencial elétrico superficial ( $\Psi_0$ ), segundo Raij & Peech (1972), utilizando-se a equação simplificada de Nerst [ $\Psi_0 = 59,1 * (\text{PESN} - \text{pH})$ ] em mV.

Os dados foram submetidos à análise da variância e, quando houve diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5 %. Procedeu-se à análise de regressão entre os atributos avaliados, obtendo-se o coeficiente de correlação de Pearson.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos químicos de ambos os solos foram influenciados tanto pelas doses de resíduo quanto pela profundidade de amostragem (Quadro 2). No período experimental, na camada de 0-5 cm, a aplicação do resíduo na superfície das colunas, à exceção do Mg no Latossolo, aumentou os teores de K, Na, Ca e Mg, CTC, pH e a saturação por Na e reduziu os teores e a saturação por Al. Na camada de 5-10 cm, o resíduo aumentou os teores e a saturação por Na e CTC e diminuiu os teores e a saturação por Al.

O aumento dos cátions trocáveis em ambos os solos deveu-se à composição química do resíduo. Como a CTC efetiva é calculada pela soma dos cátions trocáveis, observou-se aumento deste atributo em ambas as camadas; na camada de 5-10 cm, tal acréscimo deveu-se ao aumento do sódio trocável e não necessariamente ao das cargas negativas, já que o pH não foi alterado.

Como o resíduo foi aplicado na superfície, a maior dose de resíduo aumentou o pH do solo de 5,3 para 6,8, no Latossolo, e de 5,2 para 7,3, no Cambissolo, o que pode dispersar argila, favorecer a formação de selo superficial e reduzir a infiltração de água. A aplicação superficial de resíduo não alterou o pH na profundidade de 5-10 cm, em virtude do curto tempo de realização do experimento.

O teor inicial de Al, na profundidade de 0-5 cm, foi de 0,43 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> no Latossolo, e de 3,99 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> no Cambissolo. Com a aplicação de resíduo alcalino na dose equivalente a 12 % no Latossolo e de 25 % de CaCO<sub>3</sub> no Cambissolo, a quantidade de alumínio foi de 0,03 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, reduzindo sua participação na CTC efetiva dos solos. Na profundidade de 5-10 cm, assim como para o pH, a adição de resíduo não alterou os teores de alumínio (Quadro 2).

O grau de floculação (GF) da argila para o Latossolo não diferiu entre as doses de resíduo; no

entanto, foi maior na profundidade de 5-10 cm (Figura 1). Para o Cambissolo, o GF diminuiu com o aumento das doses de resíduo na camada de 0-5 cm, atribuído ao alto teor de sódio no resíduo (Quadro 1 e Figura 2), que aumentou significativamente a participação desse elemento no complexo de troca do solo (Quadro 2) e favoreceu a repulsão entre partículas. Na amostra sem resíduo, o maior grau de floculação do Cambissolo em comparação ao Latossolo, pode ser devido ao elevado teor de alumínio (Quadro 2), que promove a floculação entre as partículas (Sumner, 1992).

Foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre os atributos do Cambissolo Húmico alumínico para a camada de 0-5 cm, visando explicar a redução do grau de floculação. Com exceção da estabilidade dos agregados (DMP), todos os atributos apresentaram relação com o grau de floculação, destacando-se o teor e a saturação por sódio, o teor de cálcio, o pH e a CTC (Quadro 3). Esses atributos também apresentaram correlação significativa entre si, o que dificulta identificar quais aqueles modificados pela adição de resíduo que promoveram a dispersão da argila. De modo geral, o aumento das cargas negativas, do teor e da saturação por sódio reduz o grau de floculação, uma vez que aumenta a espessura da dupla camada elétrica.

Na camada de 0-5 cm, a saturação por sódio aumentou significativamente nos dois solos, alcançando 3,8 % no Latossolo, e 5,9 % no Cambissolo, na maior dose de resíduo utilizada (Quadro 2). O sódio dispersa a argila, pois é um elemento monovalente e com grande raio hidratado e, em grande quantidade, torna os solos mais susceptíveis ao selamento superficial, reduz a infiltração de água e aumenta a erosão hídrica (Agassi et al., 1981; Miller & Baharuddin, 1986).

O ponto de efeito salino nulo (PESN) do Latossolo foi de 3,77 (Albuquerque et al., 2000) e do Cambissolo de 3,0. Portanto, apresentam carga líquida negativa no pH natural do solo. A adição do resíduo aumentou o potencial elétrico negativo das partículas do Latossolo e do Cambissolo (Figura 3), em decorrência da adsorção de hidroxilas na superfície dos minerais e da ionização de radicais carboxílicos da matéria orgânica (Stevenson, 1994), mas reduziu o grau de floculação da argila apenas na camada de 0-5 cm no Cambissolo Húmico alumínico (Figura 4). Nesse solo, o Al e H foram neutralizados com o resíduo alcalino, reduzindo seu efeito floculante no solo. Albuquerque et al. (2000), estudando um Latossolo Bruno, e Morelli & Ferreira (1987), um Latossolo Roxo, observaram que o aumento da carga líquida negativa promovido pela calagem reduziu o grau de floculação da argila.

A alteração no grau de floculação da argila pela elevação do pH pode ser amenizada com o aumento da concentração de eletrólito. Miller et al. (1990) observaram, em solos caulíníticos, que a adição de

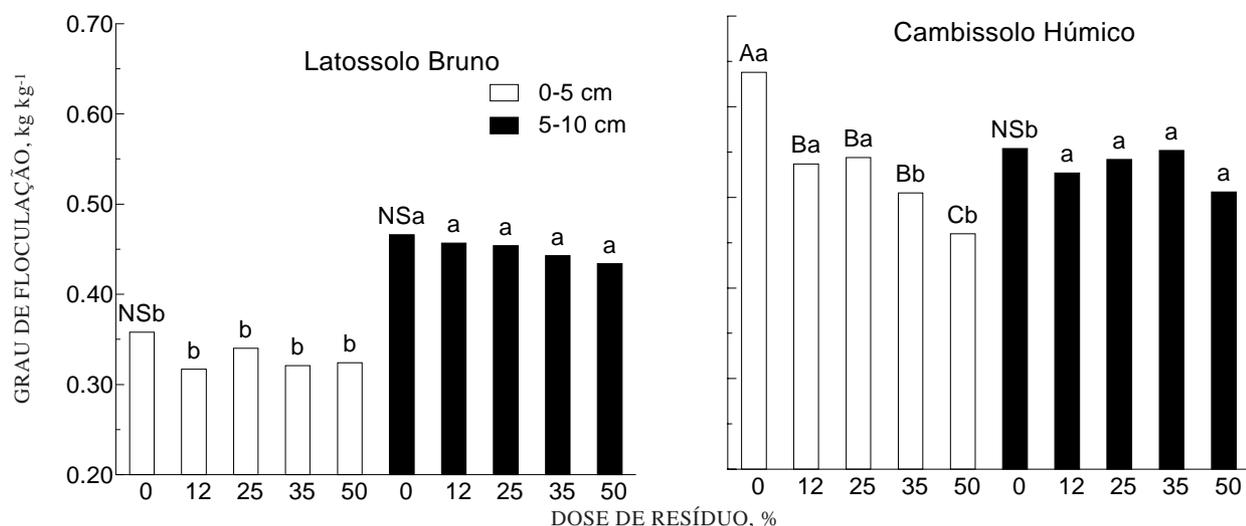
**Quadro 2. Teores de potássio, sódio, cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC, cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), saturação por alumínio (m, %), pH e saturação por sódio (V Na, %) após a incubação do Latossolo Bruno distrófico e do Cambissolo Húmico aluminico com resíduo “dregs” com doses equivalentes a 0, 12, 25, 35 e 50 % de CaCO<sub>3</sub> do recomendado para elevar o pH do solo a 6,0**

Atributo	Profundidade	Dose (% CaCO <sub>3</sub> )				
		0	12	25	35	50
cm						
Latossolo Bruno distrófico						
K <sup>+</sup>	0-5	0,46 Ba	0,56 Ba	0,69 Aa	0,75 Aa	0,75 Aa
	5-10	0,42 Aa	0,44 Ab	0,45 Ab	0,46 Ab	0,46 Ab
Na <sup>+</sup>	0-5	0,02 Da	0,16 Ca	0,32 Ba	0,36 Ba	0,47 Aa
	5-10	0,01 Ba	0,02 Bb	0,03 Bb	0,04 Bb	0,07 Ab
Ca <sup>2+</sup>	0-5	5,4 Ca	6,6 Ba	7,8 Aa	8,2 Aa	8,5 Aa
	5-10	4,7 Aa	4,4 Ab	4,3 Ab	4,4 Ab	5,6 Ab
Mg <sup>2+</sup>	0-5	2,8 Aa	2,7 Aa	2,8 Aa	2,8 Aa	2,7 Aa
	5-10	2,2 Ab	2,2 Ab	2,4 Aa	2,1 Ab	2,6 Aa
Al <sup>3+</sup>	0-5	0,43 Aa	0,03 Bb	0,02 Bb	0,05 Bb	0,08 Bb
	5-10	0,36 Aa	0,50 Aa	0,43 Aa	0,31 Aa	0,38 Aa
CTC	0-5	9,2 Ea	10 Da	11 Ca	12 Ba	12 Aa
	5-10	7,7 Bb	7,5 Bb	7,5 Bb	7,3 Bb	9 Ab
m	0-5	4,6 Aa	0,2 Bb	0,2 Bb	0,4 Bb	0,6 Bb
	5-10	4,7 Aa	6,7 Aa	5,6 Aa	4,3 Aa	4,2 Aa
pH	0-5	5,3 Da	6,0 Ca	6,3 Ba	6,5 Ba	6,8 Aa
	5-10	5,3 Aa	5,5 Ab	5,5 Ab	5,5 Ab	5,4 Ab
V Na	0-5	0,2 Da	1,5 Ca	2,8 Ba	3,0 Ba	3,8 Aa
	5-10	0,1 Ca	0,3 BCb	0,4 ABb	0,5 ABb	0,7 Ab
Cambissolo Húmico aluminico						
K <sup>+</sup>	0-5	0,29 Ca	0,34 BCa	0,52 Ba	0,58 Aa	0,67 Aa
	5-10	0,29 Aa	0,28 Aa	0,27 Ab	0,29 Ab	0,29 Ab
Na <sup>+</sup>	0-5	0,02 Ea	0,23 Da	0,41 Ca	0,58 Ba	0,74 Aa
	5-10	0,01 Ca	0,03 BCb	0,04 CBb	0,06 ABb	0,09 Ab
Ca <sup>2+</sup>	0-5	1,1 Ea	5,1 Da	6,6 Ca	8,1 Ba	9,0 Aa
	5-10	0,7 ABb	0,6 Bb	0,7 ABb	1,0 Ab	0,9 ABb
Mg <sup>2+</sup>	0-5	0,8 Ba	1,4 Aa	1,5 Aa	1,6 Aa	1,5 Aa
	5-10	0,5 Ab	0,5 Ab	0,5 Ab	0,6 Ab	0,5 Ab
Al <sup>3+</sup>	0-5	3,99 Aa	0,34 Bb	0,03 Bb	0,06 Bb	0,07 Bb
	5-10	4,91 Aa	4,16 Aa	4,31 Aa	4,64 Aa	4,59 Aa
CTC	0-5	6,1 Ea	7,4 Da	9,0 Ca	11 Ba	12 Aa
	5-10	6,4 Ba	5,6 Bb	5,8 Bb	6,6 Ab	6,3 Ab
m	0-5	65 Ab	4,6 Bb	0,3 Bb	0,5 Bb	0,5 Bb
	5-10	77 Aa	75 Ba	75 Ba	71 Ca	72 Ca
pH	0-5	5,2 Ea	5,8 Da	6,5 Ca	6,8 Ba	7,3 Aa
	5-10	5,0 Aa	5,0 Ab	5,0 Ab	4,9 Ab	5,0 Ab
V Na	0-5	0,3 Da	3,2 Ca	4,5 Ba	5,3 Aa	5,9 Aa
	5-10	0,2 Da	0,5 Cb	0,7 BCb	0,9 Bb	1,4 Ab

Letras maiúsculas comparam médias entre doses e minúsculas comparam médias entre profundidades. Letras diferentes indicam diferença significativa (Tukey a 5%).

gesso aumentou a floculação da argila, quando a concentração de cálcio no solo variou de 0,5 para 1,5 cmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. Constataram, também, que, com o aumento da percentagem de sódio trocável ou do pH da suspensão, a concentração crítica de cálcio para flocular a argila era maior. Isso indica que a adição

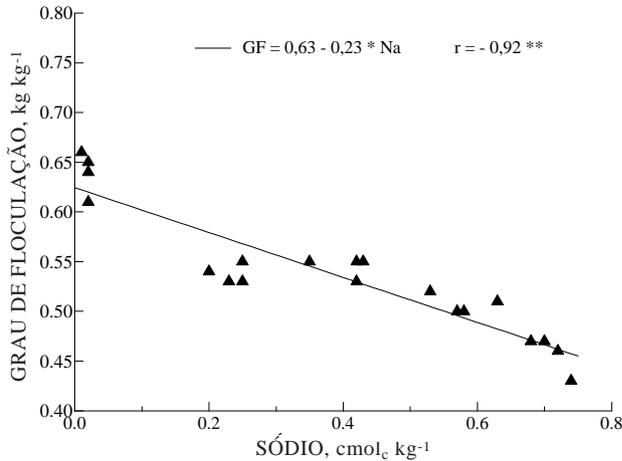
de resíduo alcalino favorece a dispersão da argila pelo aumento do teor de sódio, do pH e pela neutralização do Al trocável; no entanto, a elevação da concentração eletrolítica e a adição de cálcio e magnésio podem amenizar o efeito dispersante (Mc Bride, 1989; Miller et al., 1990).



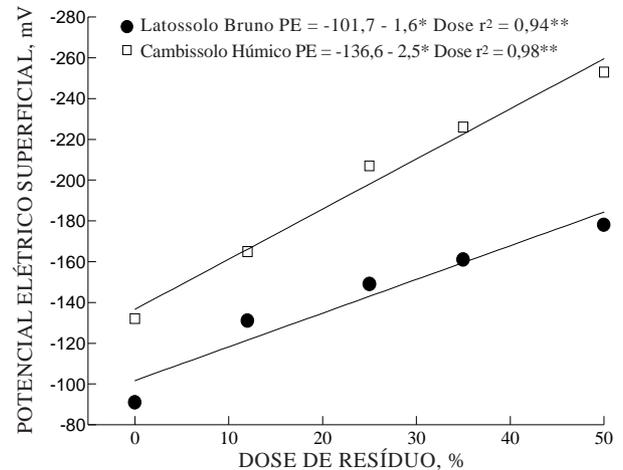
**Figura 1.** Grau de flocculação da argila (GF) do Latossolo Bruno distrófico e do Cambissolo Húmico aluminico, com a adição de resíduo alcalino (% equivalente de  $\text{CaCO}_3$ ), nas profundidades de 0 a 5 e 5 a 10 cm. Letras maiúsculas comparam doses em cada profundidade e minúsculas comparam profundidades em cada dose de resíduo. Letras diferentes indicam diferença significativa (Tukey a 5%). NS = diferença não significativa.

**Quadro 3.** Coeficientes de correlação de Pearson (r) e probabilidades (p) para potássio ( $\text{K}^+$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), diâmetro médio ponderado (DMP), grau de flocculação (GF), pH, capacidade de troca de cátions efetiva (CTC), saturação por sódio (V Na) e saturação por alumínio (m), para a camada de 0-5 cm do Cambissolo Húmico aluminico, após a incubação com resíduo alcalino com doses equivalentes a 0, 12, 25, 35 e 50 % de  $\text{CaCO}_3$  recomendado para elevar o pH do solo a 6,0

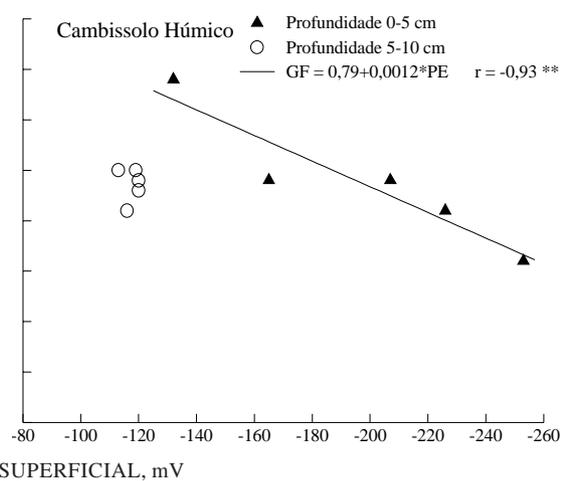
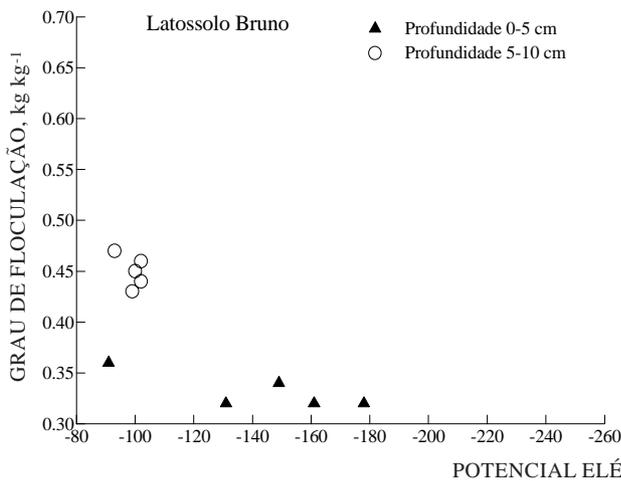
		K	Na	Ca	Mg	Al	DMP	GF	pH	CTC	V Na	m
K	r	1,00	0,87	0,82	0,66	-0,63	-0,12	-0,75	0,86	0,88	0,76	-0,61
	p		< 0,001	< 0,001	0,001	0,003	0,611	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,004
Na	r		1,00	0,96	0,82	-0,78	-0,13	-0,93	0,98	0,99	0,91	-0,77
	p			< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,577	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ca	r			1,00	0,93	-0,89	-0,11	-0,94	0,96	0,96	0,96	-0,89
	p				< 0,001	< 0,001	0,634	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Mg	r				1,00	-0,93	-0,08	-0,86	0,84	0,82	0,92	-0,94
	p					< 0,001	0,724	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Al	r					1,00	0,08	0,84	-0,78	-0,76	-0,96	0,99
	p						0,747	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
DMP	r						1,00	0,06	-0,14	-0,13	-0,10	0,06
	p							0,802	0,560	0,578	0,683	0,785
GF	r							1,00	-0,90	-0,92	-0,91	0,85
	p								< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
pH	r								1,00	0,98	0,89	-0,77
	p									< 0,001	< 0,001	< 0,001
CTC	r									1,00	0,89	-0,75
	p										< 0,001	< 0,001
V Na	r										1,00	-0,96
	p											< 0,001
m	r											1,00
	p											



**Figura 2. Relação entre sódio trocável e grau de floculação da argila das amostras da camada de 0-5 cm do Cambissolo Húmico aluminico submetidas a doses crescentes de resíduo alcalino da indústria de celulose. \*\* Significativo a 1 %.**



**Figura 3. Relação entre as doses aplicadas de resíduo alcalino (% equivalente de CaCO<sub>3</sub>) e o potencial elétrico superficial (PE), na camada de 0-5 cm, do Latossolo Bruno distrófico e Cambissolo Húmico aluminico. \*\* Significativo a 1 %.**

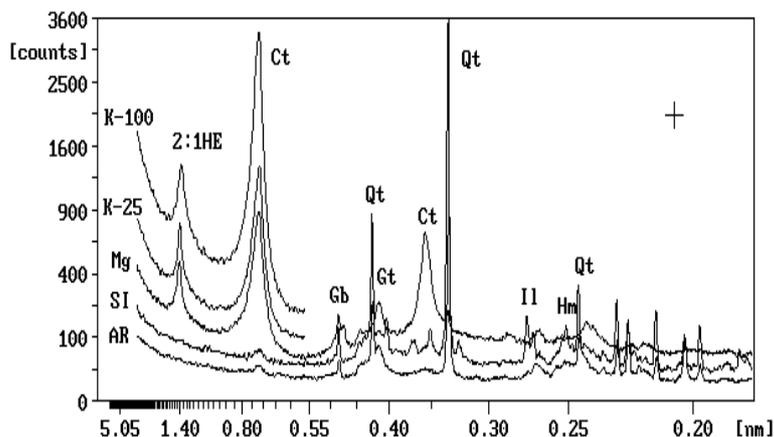


**Figura 4. Relação entre o potencial elétrico superficial (PE, mV) e o grau de floculação da argila do Latossolo Bruno distrófico e do Cambissolo Húmico aluminico submetidos a doses crescentes de resíduo alcalino da indústria de celulose. \*\* Significativo a 1 %.**

Em ambos os solos, a aplicação de doses crescentes do resíduo alcalino na superfície do solo não alterou a estabilidade dos agregados determinada pelo diâmetro médio ponderado. O diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados, considerando todas as doses do resíduo e as duas profundidades, foi de 4,86 mm para o Latossolo, e de 5,19 mm para o Cambissolo, o que representa agregados de alta estabilidade. O DMP máximo, determinado pelo método de Kemper & Chepil (1965), é de 6,88 mm, quando a amostra inicial é composta por agregados entre 4,76 e 8,00 mm, como utilizado neste estudo.

A elevada estabilidade dos agregados em ambos os solos e a resistência desses agregados após a aplicação do resíduo alcalino podem estar relacionadas

com a mineralogia, teor de carbono orgânico e textura desses solos. Constatou-se, pela análise mineralógica da fração argila do Latossolo Bruno distrófico, que a caulinita é o argilomineral predominante no solo. Em menor quantidade, ocorrem também argilominerais 2:1 com hidróxi-Al nas entrecamadas, gibbsita e goethita (Figura 5). É um solo, portanto, com predomínio de carga variável, dependente do pH. Segundo Almeida et al. (1997), o Cambissolo Húmico aluminico apresenta dominância absoluta de caulinita e pequena quantidade de micas, quartzo e argilominerais 2:1 com hidróxi-Al nas entrecamadas. Observa-se que os óxidos de ferro e alumínio estão presentes apenas no Latossolo Bruno.



**Figura 5.** Difratogramas de raios-X da fração argila orientada e das frações silte (SI) e areia (AR) em pó do Latossolo Bruno distrófico. A fração argila foi saturada com magnésio (Mg), potássio a 25 °C (K-25) e aquecida a 100 °C (K-100). 2:1HE = argilomineral do tipo 2:1; Ct = caulinita; Gb = gibbsita; Qt = goethita; Il = Ilmenita; Hm = Hematita). Espaçamento d em nm.

A mineralogia auxilia a explicar o comportamento dispersivo do Cambissolo Húmico e a manutenção do grau de floculação do Latossolo Bruno quando da adição do resíduo alcalino. Com a elevação do pH e, conseqüentemente, das cargas negativas, decresce o número de ligações entre as cargas positivas das bordas e as cargas negativas das faces da caulinita, argilomineral dominante no Cambissolo Húmico, favorecendo a dispersão da argila. Este processo não foi verificado no Latossolo Bruno, visto que, após a adição do resíduo alcalino e conseqüente elevação do pH, os óxidos de ferro e alumínio podem apresentar cargas positivas em sua superfície, evitando ou reduzindo a dispersão da argila (McBride, 1989).

## CONCLUSÕES

1. A adição de resíduo alcalino da indústria de celulose aumentou o pH e os teores de sódio, potássio e cálcio e reduziu os teores de alumínio na camada de 0-5 cm do Latossolo e do Cambissolo. O teor de sódio também aumentou na profundidade de 5-10 cm.

2. O grau de floculação diminuiu somente na camada de 0-5 cm no Cambissolo Húmico, porém a estabilidade dos agregados não foi alterada pela adição do resíduo alcalino.

3. A dispersão promovida pelo resíduo alcalino mostrou-se dependente da mineralogia dos solos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do CNPq, CAPES, EPAGRI, UDESC e indústria de papel e celulose KLABIN.

## LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R. & FONTANA, E.C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:295-300, 2000.
- ALMEIDA, J.A.; KÄMPF, N. & ALMEIDA, R. Caracterização mineralógica de Cambissolos originados de rochas pelíticas nos patamares do alto rio Itajaí e no planalto de Lages. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:181-190, 1997.
- AGASSI, M.; SHAINBERG, I. & MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:848-851, 1981.
- BEN-HUR, M.; STERN, R.; van der MERWE, A.J. & SHAINBERG, I. Slope and gypsum effects on infiltration and erodibility of dispersive and nondispersive soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1571-1576, 1992.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, 1995. 225p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- GEE, G.W. & BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1*, Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-412. (Agronomy, Monograph, 9)
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1*, Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510. (Agronomy, Monograph, 9)

- KEREN, R.; SHAINBERG, I. & KLEIN, E. Settling and flocculation value of sodium-montmorillonite particles in aqueous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:76-80, 1988.
- Mc BRIDE, M.B. Surface chemistry of soils minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.35-88.
- McINTYRE, D., S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 85:185-189, 1958.
- MILLER, W.P. & BAHARUDDIN, M.K. Relationship of soil dispersibility to infiltration and erosion of southeastern soils. *Soil Sci.*, 14:235-240, 1986.
- MILLER, W.P.; FRENKEL, H. & NEWMAN, K.D. Flocculation concentration and sodium/calcium exchange of kaolinitic soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:346-351, 1990.
- MORELLI, M. & FERREIRA, E.B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:1-6, 1987.
- NELSON, P.N.; BALDOCK, J.A. & OADES, J.M. Changes in dispersible clay content, organic carbon content, and electrolyte composition following incubation of sodic soil. *Aust. J. Soil Res.*, 36:883-897, 1998.
- RAIJ, B. van & PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 36:587-593, 1972.
- REICHERT, J.M. & NORTON D., L. Fluidized bed bottom-ash effects on infiltration and erosion of swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1483-1488, 1994.
- REICHERT, J.M. & NORTON, L.D. Surface seal micromorphology as affected by fluidized bed combustion bottom-ash. *Soil Technol.*, 7:303-31, 1995.
- REICHERT, J.M. & NORTON D., L. Fluidized bed combustion bottom-ash effects on infiltration and erosion of variable-charge soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:275-282, 1996.
- SHAINBERG, I. & SINGER, M.J. Drop impact energy-soil exchangeable sodium percentage interactions in seal formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1449-1452, 1988.
- STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York, John Wiley, 1994. 496p.
- SUMNER, M.E. The electrical double layer and clay dispersion. In: SUMNER, M.E. & STEWART, B.A., eds. *Advances in soil science: Soil crusting: chemical and physical processes*. Boca Raton, Lewis, 1992. 372p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. *Análise de solo, planta e outros materiais*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- Van OLPHEN, H. *An introduction to clay colloid chemistry*. 2.ed. New York, John Wiley, 1977. 318p.

