

# ADEQUAÇÃO DE MÉTODOS INDIRETOS PARA ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE DE SOLOS COM HORIZONTE B TEXTURAL NO BRASIL<sup>(1)</sup>

J.J.G.S.M. MARQUES<sup>(2)</sup>, N. CURI<sup>(3)</sup>, M.M. FERREIRA<sup>(3)</sup>, J.M. LIMA<sup>(3)</sup>,  
M.L.N. SILVA<sup>(4)</sup> & M.A. CAROLINO de SÁ<sup>(2)</sup>

## RESUMO

O conhecimento da erodibilidade dos solos (fator K) é de fundamental importância para a aplicação da equação universal de perdas de solo (EUPS). O objetivo deste trabalho foi verificar a adequação de diferentes métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural (Bt) de várias regiões geográficas do Brasil. Coletaram-se amostras superficiais de 22 solos com Bt, cujo fator K foi determinado diretamente no campo. Realizaram-se diversas análises químicas e físicas, de modo que o fator K pudesse ser estimado por treze diferentes métodos indiretos. Correlacionaram-se os valores dos fatores K medidos no campo com os obtidos indiretamente. Verificou-se que nenhum dos métodos indiretos testados é adequado para a estimativa do fator K de todo o conjunto de solos com Bt estudados.

**Termos de indexação:** erosão, fator K, equação universal de perdas de solo.

**SUMMARY:** *ADEQUACY OF INDIRECT METHODS TO ESTIMATE THE ERODIBILITY OF SOILS WITH ARGILLIC HORIZON IN BRAZIL*

*The assessment of the soil erodibility (K-factor) is essential for using the universal soil loss equation. The objective of this paper was to verify the adequacy of different indirect methods to estimate the K-factors of soils with argillic horizon from diverse geographic regions of Brazil. Superficial samples of 22 soils bearing argillic horizon were collected. The K-factors measured directly in the field of all these soils are already known. Several chemical and physical analyses were performed in order to calculate the K-factor by 13 indirect methods. The calculated K-factors were correlated with the direct K-factor value. It was verified that none of the indirect methods tested is suitable for estimating the K-factor of all studied soils with argillic horizon in Brazil.*

*Index terms: erosion, K-factor, USLE.*

<sup>(1)</sup> Parte da Dissertação de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Lavras (MG). Recebido para publicação em julho de 1996 e aprovado em maio de 1997.

<sup>(2)</sup> Aluno de Mestrado do CPGSNP - Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG).

<sup>(3)</sup> Professor, UFLA - Departamento de Ciência do Solo, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq.

<sup>(4)</sup> Pesquisador, EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22460-000 Rio de Janeiro (RJ).

## INTRODUÇÃO

A equação universal de perdas de solo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) é amplamente utilizada, principalmente nos EUA (Renard et al., 1994). Além dessa, existe uma série de modelos baseados em processos físicos, entre os quais a WEPP, que são opostos ao empirismo da USLE. No entanto, esses parecem não ser tão eficientes e práticos quanto a USLE, devido ao grande número de informações necessárias para o bom funcionamento do modelo (Renard et al., 1994).

A erodibilidade do solo, que representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas (Lal, 1988), é o fator que tem despertado maior interesse na pesquisa de erosão do solo propriamente dita, por ser, obviamente, relacionado ao solo e, portanto, variar significativamente de solo para solo. Para que fosse possível utilizar a erodibilidade do solo como um fator da USLE, foi preciso impor-lhe algumas restrições (Bryan et al., 1989). Assim, a erodibilidade do solo (fator K) foi redefinida como a quantidade de solo perdido em dada área por unidade do índice de erosividade adotado, nas condições padrão (Wischmeier & Smith, 1978). O fator K medido no campo (método direto), por meio de chuvas simuladas ou naturais, é considerado o valor que verdadeiramente reflete a erodibilidade do solo, tal como ela é compreendida na USLE. No entanto, o método direto, além de necessitar de determinações morosas e de alto custo, principalmente quando medido mediante chuvas naturais, requer também rigorosa padronização.

As equações que permitem estimar o fator K são desenvolvidas, geralmente, por meio de regressões múltiplas entre o fator K medido diretamente no campo e os atributos do solo, quando apresentam boa correlação, podendo, assim, fornecer o fator de erodibilidade do solo (fator K) para uso na USLE. Essas equações, porém, não refletem, obrigatoriamente, relações de causa e efeito, mas podem ser empregadas, desde que forneçam valores próximos aos medidos diretamente (Römken, 1987).

O mais conhecido método indireto para estimativa do fator K é o nomograma proposto por Wischmeier et al. (1971). Na sua elaboração, foram incluídos, predominantemente, solos de textura média do Meio-Oeste dos EUA. Talvez por isso, tem sido freqüentemente observada sua inadequação às condições brasileiras (Henklain & Freire, 1983; Silva et al., 1986; Denardin, 1990; Lima, 1991; Silva, 1994; Silva et al., 1994). Respostas positivas à utilização desse modelo são menos freqüentes (Silva et al., 1986; Campos Filho et al., 1992). Tendo em vista a inaplicabilidade do método de Wischmeier et al. (1971) ao Brasil, outros métodos indiretos ou adaptações do mesmo têm sido testados (Lima et al., 1990; Denardin, 1990; Silva, 1994; Silva et al., 1994), os quais ainda necessitam de revalidação dos resultados. Mesmo métodos desenvolvidos e/ou adaptados às condições brasileiras

(Denardin, 1990; Lima et al., 1990) não podem ser empregados sem restrições (Silva et al., 1994).

Com base no exposto, este trabalho teve por objetivo comparar diferentes métodos indiretos de avaliação da erodibilidade com o valor do fator K medido diretamente no campo, para solos com horizonte B textural de diferentes regiões do Brasil.

## MATERIAL E MÉTODOS

Coletaram-se amostras do horizonte A de 22 solos cujo fator K foi determinado diretamente no campo. O valor do fator K, medido diretamente, a classificação e a localização dos solos estudados encontram-se no quadro 1. Alguma discordância entre a classificação dos solos desse quadro 1 e a apresentada nos trabalhos em que o fator K foi originalmente publicado se deve a mudanças nos critérios de classificação. Neste trabalho, usou-se a proposta por Camargo et al. (1987), baseando-se na descrição morfológica e em resultados analíticos. Os valores do fator K determinados sob chuvas simuladas diferem dos originais devido à correção proposta por Denardin (1990). A figura 1 mostra a distribuição dos solos estudados no Brasil.

Na fração TFSA, realizou-se a análise granulométrica pelo método da pipeta (Day, 1965), empregando-se a dispersão da amostra em suspensão com água, com e sem NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>.

A proporção de agregados menores que 0,25 mm, também chamada de índice de instabilidade (El-Swaify & Dangler, 1977), foi determinada através de peneiramento úmido, sem pré-umedecimento e descontando-se a contribuição da fração areia



Figura 1. Distribuição dos solos estudados no território brasileiro.

**Quadro 1. Classificação, localização, fator K (K obs.) e fonte do fator K dos solos estudados**

Nº	Classificação	Localização	K obs.	
			t h (MJ mm) <sup>-1</sup>	Fonte
1	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico Tb plíntico A fraco textura arenosa/argilosa fase caatinga hiperxerófila relevo plano	Quixadá (CE)	0,008	1
2	Podzólico amarelo eutrófico Tb A moderado textura arenosa/média fase caatinga hipoxerófila relevo plano	Fortaleza (CE)	0,045	1
3	Podzólico vermelho-escuro distrófico Ta A moderado textura média/argilosa fase campo relevo ondulado	Santa Maria (RS)	0,024	2
4	Podzólico vermelho-escuro distrófico Tb A moderado textura média/argilosa fase campo relevo ondulado	Eldorado do Sul (RS)	0,034	3
5	Podzólico vermelho-amarelo distrófico Tb câmbico A moderado textura argilosa/muito argilosa fase floresta tropical subperenifólia relevo suave ondulado	Viçosa (MG)	0,027	4
6	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico Tb A moderado textura média fase floresta tropical subperenifólia/subcaducifólia relevo suave ondulado	Alagoa Grande (PB)	0,032	5
7	Podzólico vermelho-escuro eutrófico Tb plíntico A proeminente textura média/argilosa fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado	Itapororoca (PB)	0,018	5
8	Bruno não cálcico A moderado planossólico textura média fase floresta tropical caducifólia relevo suave ondulado	Gurinhém (PB)	0,032	5
9	Solonetz-solodizado Ta A moderado textura arenosa/argilosa fase caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado	Boa Vista (PB)	0,012	6
10	Bruno não cálcico A fraco textura média fase caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado	Patos (PB)	0,008	7
11	Podzólico vermelho-escuro eutrófico Tb A fraco textura média fase caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado	Patos (PB)	0,004	6
12	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico Tb A fraco textura média/argilosa fase caatinga hipoxerófila relevo suave ondulado	Tavares (PB)	0,025	7
13	Podzólico vermelho-escuro eutrófico Tb A moderado textura média/argilosa fase caatinga hipoxerófila relevo suave ondulado	Teixeira (PB)	0,008	7
14	Podzólico vermelho-amarelo álico Ta A proeminente textura média fase floresta tropical subperenifólia/subcaducifólia relevo suave ondulado	Alagoa Nova (PB)	0,031	5
15	Bruno não cálcico A fraco textura média/argilosa fase caatinga hipoxerófila relevo suave ondulado	Casserengue (PB)	0,009	6
16	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico Tb A proeminente textura média fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado	Glória do Goitá (PE)	0,014	8
17	Podzólico vermelho-amarelo álico Ta A moderado textura argilosa/muito argilosa fase floresta tropical perenifólia relevo forte ondulado	Morretes (PR)	0,004	9
18	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico Tb A moderado textura argilosa/muito argilosa fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado	Sete Lagoas (MG)	0,033	10
19	Podzólico vermelho-escuro álico Ta A moderado textura média/argilosa fase campo relevo ondulado	Santa Maria (RS)	0,032	3
20	Podzólico vermelho-escuro eutrófico Ta A moderado textura arenosa/média fase floresta latifoliada tropical relevo suave ondulado a ondulado	Pindorama (SP)	0,004	11
21	Podzólico vermelho-amarelo eutrófico Tb A chernozêmico textura argilosa fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado	Mococa (SP)	0,023	12
22	Podzólico vermelho-escuro eutrófico Tb A moderado textura média/argilosa fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado	Itaguaí (RJ)	0,028	13

<sup>(1)</sup>Silva (1994). <sup>(2)</sup>Dal Conte (1982). <sup>(3)</sup>Levien, citado por Denardin (1990). <sup>(4)</sup>Resck et al. (1981). <sup>(5)</sup>Rodrigues do Ó (1986). <sup>(6)</sup>Silva & Andrade (1994). <sup>(7)</sup>Silva et al. (1986). <sup>(8)</sup>Campos Filho et al. (1992). <sup>(9)</sup>EMBRAPA-CNPQ (informação pessoal do pesquisador G.R. Curcio). <sup>(10)</sup>Marques (1996). <sup>(11)</sup>Carvalho et al. (1994). <sup>(12)</sup>Carvalho et al. (1989). <sup>(13)</sup>Leprun, citado por Denardin (1990).

(usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>) de tamanho superior ao da peneira em que os agregados ficaram retidos (0,25 mm), conforme Kemper & Rosenau (1986). As classes de estrutura e permeabilidade foram codificadas de acordo com Wischmeier et al. (1971), com base na descrição geral do perfil dos solos e na descrição morfológica do horizonte A. Assim, a estrutura foi codificada em: (a) muito pequena granular = 1; (b) pequena granular = 2; (c) média a grande granular = 3; e (d) blocos, laminar ou maciça = 4. A permeabilidade foi codificada em: (1) rápida = 1; (2) moderada a rápida = 2; (3) moderada = 3; (4) lenta a moderada = 4; e (5) lenta = 5.

As análises do complexo sortivo, pH (em água e em KCl 1 mol L<sup>-1</sup>), matéria orgânica, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, extraídos pelo ataque sulfúrico, foram feitas segundo Vettori (1969) e Embrapa (1979), determinando-se Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, extraídos pelo ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) da fração argila, segundo Mehra & Jackson (1960). A determinação do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - DCB foi feita por meio de absorção atômica e do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - DCB, pelo método do aluminon (McKeague, 1978), sendo a destruição do citrato obtida por meio da combinação dos métodos de McKeague (1978) e Camargo et al. (1986). O teor de SiO<sub>2</sub> - DCB foi obtido segundo Weaver et al. (1968). Todas as análises químicas e físicas foram efetuadas com quatro repetições.

Foram testados treze métodos indiretos de avaliação do fator K da USLE. As equações tiveram seus coeficientes corrigidos para que recebessem os valores das variáveis e fornecessem o do fator K em unidades S.I. Portanto, em todas as equações, o fator K tem como unidade t h (MJ mm)<sup>-1</sup> e as variáveis, o mesmo significado. As equações utilizadas foram as seguintes:

#### 1) Wischmeier et al. (1971)

Método desenvolvido para solos de textura média do Meio-Oeste dos EUA:

$$K = 1,451 \times 10^{-10}(120-MO)M^{1,14} + 0,0043 (S-2) + 0,0033 (P-2) \quad (1)$$

onde: MO é o teor de matéria orgânica (g kg<sup>-1</sup>); M, a soma dos teores de silte (g kg<sup>-1</sup>) e areia muito fina (g kg<sup>-1</sup>) multiplicados por 1.000 menos o teor de argila (g kg<sup>-1</sup>), sendo a análise granulométrica feita com uso de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante; S e P são os códigos referentes à estrutura e à permeabilidade (sem unidade).

#### 2) Lima et al. (1990)

Adaptação do método anterior para latossolos brasileiros:

$$K = 1,451 \times 10^{-10} (120-MO) Ma^{1,14} + 0,0043 (S-2) + 0,0033 (P-2) \quad (2)$$

onde: Ma tem o mesmo significado que M, porém a dispersão foi feita somente com água.

#### 3) Denardin (1990)

Método para solos do Brasil:

$$K = 0,006084P + 8,34286 \times 10^{-4}MO - 1,1616 \times 10^{-4} Al - 3,776 \times 10^{-5} PART \quad (3)$$

onde: Al é o teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da fração TFSA extraído pelo ataque sulfúrico (g kg<sup>-1</sup>) e PART, percentagem de partículas de diâmetro compreendido entre 0,5 e 2 mm (g kg<sup>-1</sup>), usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>.

#### 4) Denardin (1990)

Método para solos do Brasil e dos EUA:

$$K = 7,48 \times 10^{-8}M + 0,00448059P - 0,0631175DMP + 1,039657 \times 10^{-6}PROD \quad (4)$$

onde: DMP é o diâmetro médio ponderado da fração menor que 2 mm (mm), PROD é o produto do teor de matéria orgânica (g kg<sup>-1</sup>) pela quantidade de partículas de diâmetro entre 0,1 e 2 mm (g kg<sup>-1</sup>). Em todos os casos, a análise granulométrica foi feita usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>.

#### 5) Roloff & Denardin (1994)

Método para solos do Estado do Paraná:

$$K = 0,0049P + 3,31 \times 10^{-5}Mm^{0,5} \quad (5)$$

onde: Mm é o teor de silte (g kg<sup>-1</sup>) multiplicado pela soma de silte e areia fina (g kg<sup>-1</sup>), sendo a análise granulométrica feita usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>.

#### 6) Roloff & Denardin (1994)

Método para solos do Estado do Paraná:

$$K = 1,038 \times 10^{-4}Mm^{0,5} - 4,54 \times 10^{-5} Al \quad (6)$$

#### 7) Roloff & Denardin (1994)

Método para solos com horizonte B textural do Estado do Paraná:

$$K = 9,17 \times 10^{-5}Mm^{0,5} - 5,26 \times 10^{-5}Fe + 1,76 \times 10^{-5}AF \quad (7)$$

onde: Fe é o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da fração TFSA extraído pelo ataque sulfúrico (g kg<sup>-1</sup>), e AF, o de areia fina (g kg<sup>-1</sup>), usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>.

#### 8) Römken et al. (1977)

Método para subsolos argilosos dos EUA:

$$K = 2,371 \times 10^{-7} M - 0,008 \quad (8)$$

#### 9) Römken et al. (1977)

Método para subsolos argilosos dos EUA:

$$K = 5 \times 10^{-4} + 3,0291 \times 10^{-7} M - 0,00142Fe_d + Al_d \quad (9)$$

onde: Fe<sub>d</sub> + Al<sub>d</sub> é a soma dos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extraídos pelo DCB (g kg<sup>-1</sup>).

#### 10) Römken et al. (1977)

Método para subsolos argilosos dos EUA:

$$K = 0,1027 - 1,2 \times 10^{-4} ARG \quad (10)$$

onde: ARG é o teor de argila dispersa com NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> (g kg<sup>-1</sup>).

### 11) Römken et al. (1977)

Método para subsolos argilosos dos EUA:

$$K = 0,0423 + 2,634 \times 10^{-7}M - 0,0019Fe_d + Al_d - 0,011Si_d \quad (11)$$

onde: Si<sub>d</sub> é teor de SiO<sub>2</sub> extraído pelo DCB (g kg<sup>-1</sup>).

### 12) El-Swaify & Dangler (1977)

Método para solos do Havai (EUA) quando secos:

$$K = 0,0017 + 1,449 \times 10^{-4}MQ + 2,371 \times 10^{-7}MH - 2,268 \times 10^{-4}SUS - 0,041pH_{KCl} + 0,0361pH_{\text{água}} \quad (12)$$

onde: MQ é o índice de instabilidade (g kg<sup>-1</sup>), MH, a quantidade de areia maior que 0,1 mm (g kg<sup>-1</sup>) multiplicada pela soma dos teores de silte (g kg<sup>-1</sup>) e areia muito fina (g kg<sup>-1</sup>), usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>; SUS, a soma dos teores de silte e argila, dispersos em água (g kg<sup>-1</sup>), pH<sub>KCl</sub>, o pH do solo em solução KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, e pH<sub>água</sub>, o pH do solo em água.

### 13) El-Swaify & Dangler (1977)

Método para solos do Havai (EUA):

$$K = 0,0052 + 4,1 \times 10^{-5}MQ + 5,66 \times 10^{-7}MH + 2,44 \times 10^{-4}V - 3,4 \times 10^{-5}SI - 1,08 \times 10^{-4}AA \quad (13)$$

onde: V é a saturação por bases a pH 7 (%), SI, o teor de silte (g kg<sup>-1</sup>), e AA, a soma dos teores das areias de diâmetro acima de 0,1 mm (g kg<sup>-1</sup>). SI e AA foram obtidos usando-se NaOH 1 mol L<sup>-1</sup>.

Para a comparação dos métodos (direto x indiretos), efetuaram-se correlações de Pearson entre os valores de K medidos no campo (K obs.) e os avaliados pelos diferentes métodos indiretos (K est.) (Denardin, 1990). Essas correlações foram testadas quanto à sua significância pelo teste t ao nível de 5%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tentou-se seguir fielmente os métodos originais, o que nem sempre foi possível. Os modelos originais muitas vezes não fornecem informações que possibilitariam sua reprodução analítica, ou distanciam-se demasiado dos procedimentos comumente usados nos laboratórios nacionais, o que dificulta sua adoção como procedimento de rotina. Em virtude disso, foram necessárias algumas alterações nos procedimentos analíticos originais, visando torná-los facilmente reproduzíveis. Os quadros 2 e 3 contêm os resultados analíticos dos parâmetros dos solos empregados nos métodos indiretos de avaliação da erodibilidade.

Uma vez que as equações de estimativa da erodibilidade não expressam relações causais, é difícil

**Quadro 2. Teor de matéria orgânica (MO), análise granulométrica com dispersante químico, parâmetro M e códigos S (estrutura) e P (permeabilidade) dos solos estudados**

Solo	MO	Análise granulométrica (NaOH 1 mol L <sup>-1</sup> )							M <sup>(6)</sup>	S <sup>(7)</sup>	P <sup>(8)</sup>
		AMG <sup>(1)</sup>	AG <sup>(2)</sup>	AM <sup>(3)</sup>	AF <sup>(4)</sup>	AMF <sup>(5)</sup>	Silte	Argila			
Nº		g kg <sup>-1</sup>							g <sup>2</sup> kg <sup>-2</sup>		
1	9	43	134	192	328	132	60	111	170.688	4	2
2	7	40	106	208	388	70	46	142	995.280	3	2
3	22	4	45	134	199	97	303	218	312.800	4	4
4	26	127	157	147	206	69	150	144	187.464	4	3
5	24	20	132	138	138	53	141	378	120.668	4	3
6	24	57	189	188	194	50	160	162	175.980	3	4
7	12	18	50	116	265	217	144	190	292.410	2	5
8	22	65	140	119	209	126	196	145	275.310	4	5
9	7	16	97	180	316	160	120	111	248.920	4	5
10	16	66	143	149	233	96	153	160	209.160	4	3
11	16	57	137	135	199	87	194	191	227.329	4	3
12	16	72	113	140	217	110	142	206	200.088	4	2
13	19	53	120	128	183	79	129	308	143.936	4	1
14	29	76	213	139	149	51	123	249	130.674	4	5
15	12	23	45	60	278	259	202	133	399.687	4	3
16	3	46	171	179	192	69	117	226	143.964	3	3
17	48	14	47	69	89	39	367	375	253.750	4	2
18	36	22	21	19	33	16	365	524	181.356	3	2
19	16	5	87	230	279	81	106	212	147.356	4	4
20	10	0	6	147	531	132	75	109	184.437	1	2
21	22	52	155	123	147	55	150	318	139.810	4	3
22	21	43	171	169	178	61	110	268	125.172	3	3

<sup>(1)</sup>AMG = areia muito grossa. <sup>(2)</sup>AG = areia grossa. <sup>(3)</sup>AM = areia média. <sup>(4)</sup>AF = areia fina. <sup>(5)</sup>AMF = areia muito fina. <sup>(6)</sup>M = (AMF + Silte)(1.000 - Argila). <sup>(7)</sup>1 = muito pequena granular; 2 = pequena granular; 3 = média a grande granular; 4 = blocos, laminar ou maciça. <sup>(8)</sup>1 = rápida; 2 = moderada a rápida; 3 = moderada; 4 = lenta a moderada; 5 = lenta.

precisar os motivos que levaram aos resultados obtidos. Na análise das figuras 2 a 4, fica claro que, à exceção dos métodos de Römken et al. (1977) e El-Swaify & Dangler (1977), os modelos forneceram valores aproximadamente dentro da faixa em que naturalmente ocorrem para esse grupamento de solos [0,004 a 0,045 t h (MJ mm)<sup>-1</sup>]. Nas figuras 2 a 4, encontram-se os coeficientes de correlação entre os valores do fator K observados e os estimados por método.

A maioria dos trabalhos que ressalta a inadequação do modelo de Wischmeier et al. (1971) o faz para latossolos (Henklain & Freire, 1983; Lima, 1991; Silva et al., 1994). Atribui-se a inadequação desse modelo aos baixos teores de silte dos solos mais intemperizados (Denardin, 1990). Assim, havia a possibilidade de ser esse modelo adequado para solos não tão intemperizados, tais como os com horizonte Bt, o que foi corroborado por Silva et al. (1986) e Campos Filho et al. (1992). Entretanto, tal possibilidade não se verificou neste trabalho (Figura 2a) nem nos de Denardin (1990) e Silva (1994). Embora, em condições equiparáveis, os solos com Bt tenham textura menos argilosa que os latossolos, mormente no horizonte superficial, seu teor em silte não é alto (Quadro 2), o que fez com que o parâmetro M médio fosse igual a 198.668 g<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>, bem abaixo, portanto, do mínimo necessário para uma boa estimativa do fator K (300.000 g<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>) (Silva et al., 1994).

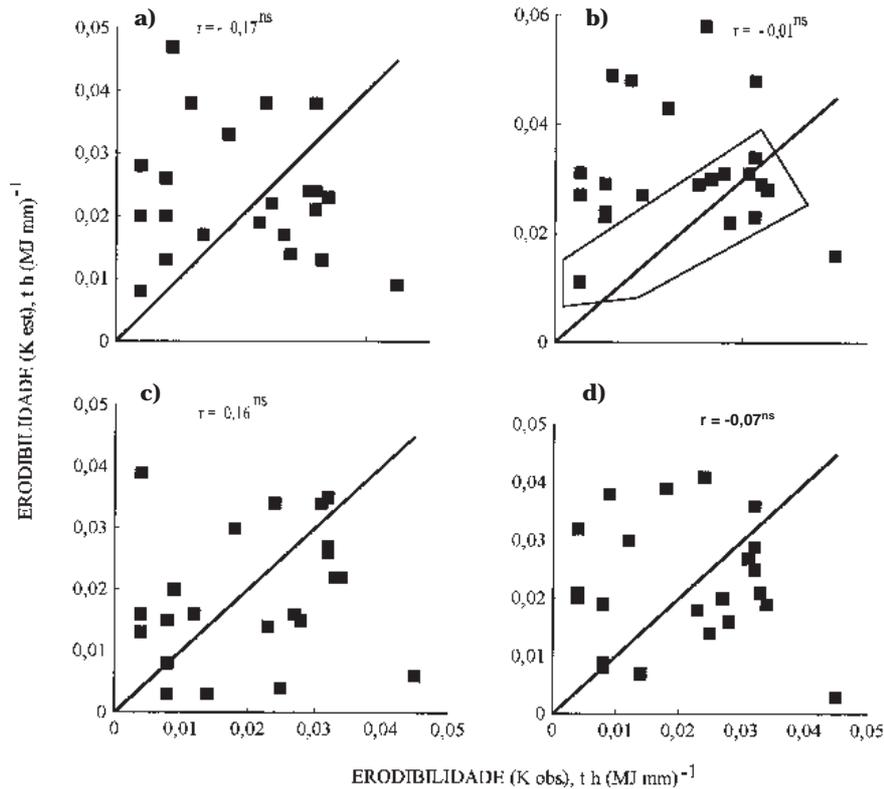
O método proposto por Lima et al. (1990) para estimativa da erodibilidade fundamenta-se no fato que,

em latossolos, as partículas de argila floculadas apresentam comportamento semelhante ao do silte e da areia muito fina, afetando o comportamento dos latossolos ante ao processo erosivo. Assim, ao fazer a dispersão do solo usando-se água, obtêm-se, comumente, maiores teores de partículas com diâmetro correspondente ao silte e areia muito fina e menores de argila. O parâmetro Ma, como depende do teor de silte e areia muito fina, aumenta, portanto, várias vezes com a utilização de água como dispersante, podendo ficar acima de 300.000 g<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup> (Lima et al., 1990; Silva et al., 1994). Contudo, neste trabalho, não foi observada a adequação desse modelo (Figura 2b), o que está de acordo com Silva et al. (1994). Como se pode visualizar na figura 2b, houve aumento nos valores da erodibilidade, em comparação com o método anterior (Figura 2a), sem que esses valores tivessem correlação com o K observado. A inadequação desse método pode ser creditada ao baixo índice de floculação dos solos estudados, sendo que, mesmo dispersos em água, poucos apresentaram Ma acima de 300.000 g<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup> (Quadro 3). Não obstante, os solos cujos fatores K estimados mais se aproximavam dos observados (Figura 2b, polígono marcado) possuíam a relação Ki (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) igual a 1,97 ± 0,13, enquanto, nos demais, essa relação valia 2,28 ± 0,26, havendo diferença estatística significativa (teste t 1%). Apesar dos resultados de Silva et al. (1994), o método de Lima et al. (1990) talvez seja adequado para solos mais intemperizados (baixo Ki), independentemente de sua classificação, tendo, assim, uma abrangência superior à proposta originalmente.

**Quadro 3. Teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extraídos pelo ataque sulfúrico (AS) e pelo ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), teor de SiO<sub>2</sub> extraído pelo DCB, índice de instabilidade (MQ), análise granulométrica utilizando água, parâmetro Ma, pH em KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e em água e saturação por bases a pH 7 (V) dos solos estudados**

Solo	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		MQ	Análise gran. (água)			Ma <sup>(2)</sup>	pH		V
	AS	DCB	DCB	AS	DCB		AMF <sup>(1)</sup>	Silte	Argila		KCl	H <sub>2</sub> O	
Nº	g kg <sup>-1</sup>									g <sup>2</sup> kg <sup>-2</sup>			%
1	11	2	2	40	4	516	120	103	70	207.390	5,3	6,4	75
2	10	0	3	51	2	412	75	110	74	171.310	4,3	5,6	56
3	30	15	5	64	6	408	108	451	68	520.988	4,2	5,4	57
4	20	6	3	59	6	64	80	181	36	251.604	3,8	5,6	62
5	63	25	3	147	15	25	29	382	331	274.959	4,4	5,4	42
6	40	14	3	75	3	147	58	182	150	204.000	7,1	7,7	89
7	15	7	4	69	15	307	197	233	109	383.130	4,2	5,1	31
8	30	4	3	59	5	224	158	246	61	379.356	4,7	5,6	77
9	20	3	2	51	4	333	175	177	51	334.048	4,5	5,8	68
10	39	10	4	72	4	229	95	169	101	237.336	5,3	5,8	83
11	55	13	4	98	4	209	94	208	151	256.398	5,7	6,1	79
12	28	10	4	119	2	344	116	205	138	276.702	5,9	6,5	82
13	56	14	6	108	19	155	95	215	190	251.100	5,1	5,6	70
14	18	4	5	82	9	132	54	194	137	214.024	4,1	4,8	24
15	29	4	3	51	8	552	292	174	90	424.060	4,9	5,3	67
16	28	10	5	82	5	163	75	196	130	235.770	5,0	5,4	56
17	46	31	7	96	12	39	53	408	238	351.282	4,0	4,7	38
18	66	34	10	161	12	75	22	486	396	306.832	4,6	5,8	64
19	25	12	5	64	3	139	95	181	64	258.336	4,0	4,6	13
20	23	4	2	43	3	65	132	87	58	206.298	4,5	4,9	42
21	86	16	6	129	13	232	57	244	168	250.432	4,6	5,3	52
22	52	16	6	110	4	72	64	192	150	217.600	4,7	5,4	53

<sup>(1)</sup> AMF = areia muito fina. <sup>(2)</sup> Ma = (AMF + Silte) (1.000 - argila).



**Figura 2. Relação entre o K estimado (K est.) pelos métodos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) e o K observado (K obs.). O traço contínuo representa a linha 1:1 (ns = não significativo).**

Os métodos de Denardin (1990), para solos do Brasil e para solos do Brasil e dos EUA, também não foram adequados para a estimativa da erodibilidade dos solos estudados (Figuras 2c, d). Embora fosse esperado melhor desempenho deles, Silva et al. (1994) também chegaram ao mesmo resultado. O método 4 (Figura 2d) apresentou maior dispersão dos dados, o que é compreensível, pois se baseia nos atributos de 77 solos, sendo, menos da metade, solos brasileiros (46 são oriundos dos EUA), o que o torna inadequado ao Brasil. O método usado para a análise granulométrica por Denardin (1990) preconiza o uso de agitação lenta por 16 horas, enquanto o utilizado neste trabalho e no de Silva et al. (1994) emprega agitação rápida por 20 minutos. Denardin (1990) também se afastou do procedimento convencional ao fazer a determinação do C orgânico em amostras previamente moídas em almofariz e passadas em peneira de malha de 0,117 mm. Embora esses fatos possam ter contribuído para a diferença encontrada nos valores de erodibilidade estimados de K, não é essa a principal explicação para a falta de correlação. Possivelmente, ela esteja mais associada à inclusão, neste estudo, de solos que, não tendo sido pesquisados por Denardin (1990), apresentaram K estimados muito distantes dos observados. Os solos de número 2 e 17 tipificam isso, com K est., pelo método 3, iguais a 0,006 e 0,039  $t h (MJ mm)^{-1}$ , e K obs. iguais a 0,045 e 0,004  $t h (MJ mm)^{-1}$  respectivamente. Silva et al. (1994) apontam o pequeno número de parâmetros envolvidos nesses métodos como uma de suas limitações.

Também os de Roloff & Denardin (1994) não forneceram resultados satisfatórios (Figuras 3a, b, c); visando desenvolver métodos que permitissem estimar a erodibilidade de solos do Paraná, retrabalharam os dados de Denardin (1990), de modo a excluir os solos que tivessem atributos pouco comuns aos ocorrentes no Paraná. Dessa forma, foram geradas quatro equações de previsão da erodibilidade, entre elas uma específica para solos com Bt. Entretanto, mesmo essa equação apresentou grande dispersão de pontos, estando sujeita aos mesmos comentários feitos para as equações de Denardin (1990). É de notar que mesmo o solo número 17, de Morretes (PR), tem seu fator K observado igual a 0,004  $t h (MJ mm)^{-1}$ , bem distante daquele estimado pelas equações [K est. pelo método 7 igual a 0,037  $t h (MJ mm)^{-1}$ ].

Os modelos de Römken et al. (1977) apresentaram resultados muito insatisfatórios, produzindo até mesmo valores de K negativos (Figuras 4a, b, c, d). Denardin (1990) também chegou a idênticos resultados. Um dos motivos que levou a isso pode ter sido o método usado por eles para a análise granulométrica, que implicou na destruição prévia de vários agentes agregantes ( $CaCO_3$ , matéria orgânica e óxidos de Fe) e a utilização de carbonato de sódio como dispersante (Denardin, 1990), sendo grande a diferença entre esse método e o usado neste trabalho. Os modelos de Römken et al. (1977), excetuando-se o método 10 (Figura 4c), são fundamentados nos altos coeficientes de correlação entre a variável M e a erodibilidade. Contudo, essa elevada correlação não se verificou

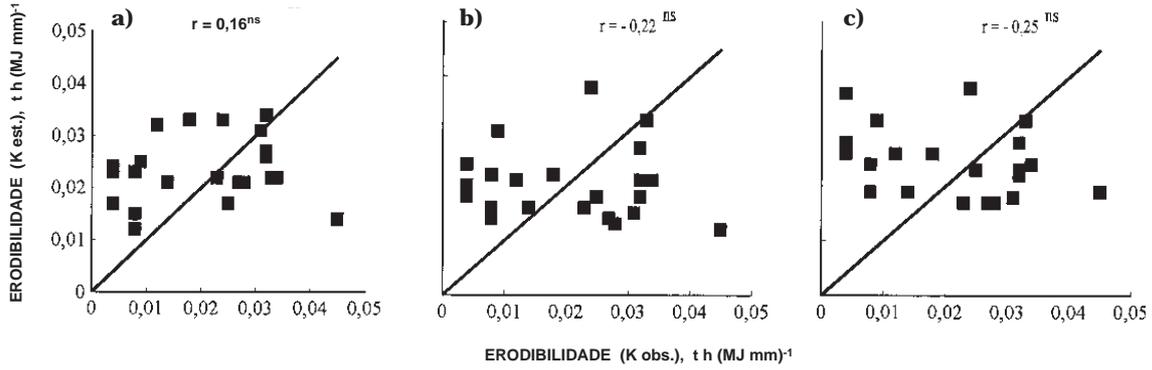


Figura 3. Relação entre o K estimado (K est.) pelos métodos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e o K observado (K obs.). O traço contínuo representa a linha 1:1 (ns = não significativo).

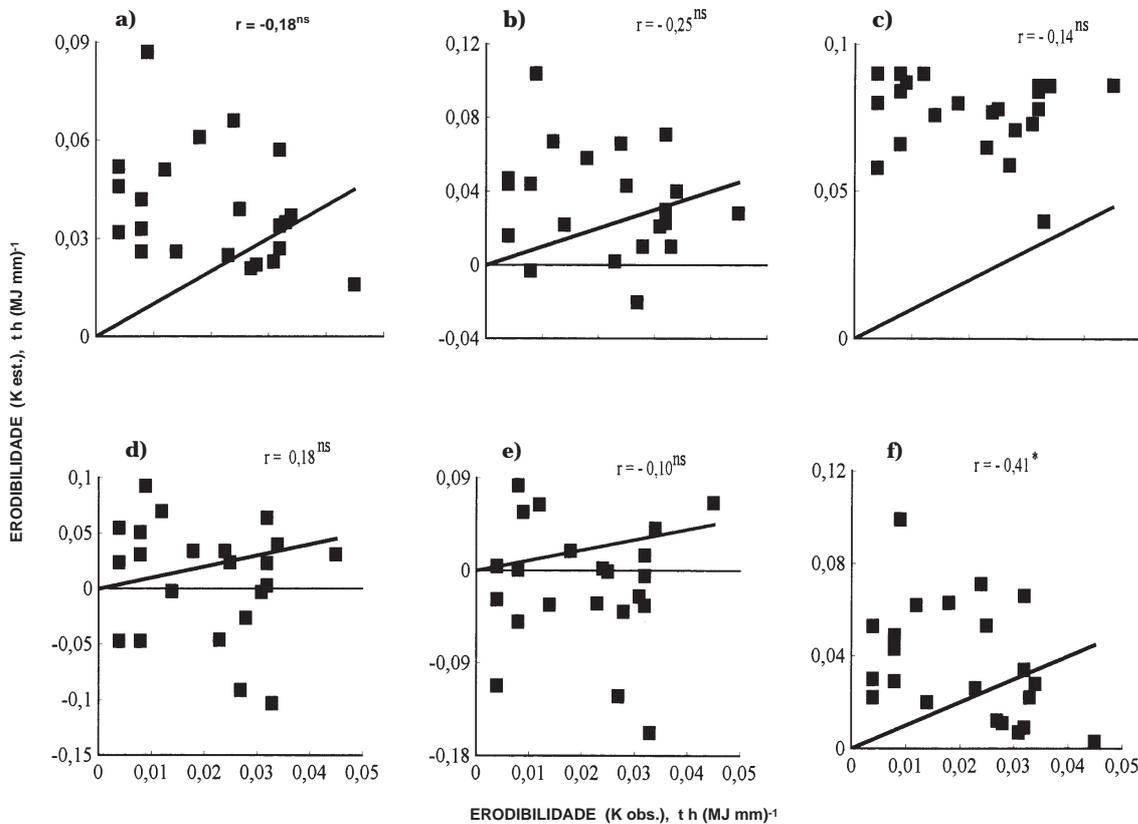


Figura 4. Relação entre o K estimado (K est.) pelos métodos 8 (a), 9 (b), 10 (c), 11 (d), 12 (e) e 13 (f) e o K observado (K obs.). O traço contínuo representa a linha 1:1 (\* = significativo ao nível de 5%; ns = não significativo).

neste trabalho ( $r = -0,14$ , não significativo). A inclusão dos teores de  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , extraídos pelo DCB nessas equações, baseia-se no efeito agregante que essas frações teriam no solo, porém o DCB extrai também formas não tão efetivas na agregação das partículas, sendo esse um dos motivos de sua inadequação a solos brasileiros (Denardin, 1990). Provavelmente, entretanto, a razão principal do pouco sucesso desses modelos seja o fato de terem sido gerados para subsolos (o horizonte A foi, propositadamente,

removido) com altos teores de silte e argila, os quais diferem, substancialmente, da maioria dos horizontes superficiais dos solos aqui estudados (Quadros 2 e 3).

À semelhança dos demais, os métodos de El-Swaify & Dangler (1977) forneceram valores estimados sem relação com a erodibilidade observada (Figuras 4e, f). Não houve diferença entre as três formas de representar o índice de instabilidade, por isso somente foram mostrados os valores de K referentes ao índice MQ determinado sem pré-umedecimento (Quadro 3).

O método 12 (Figura 4e) chegou a fornecer valores negativos para o fator K. Isso é compreensível, pois essa equação foi desenvolvida com valores de K determinados por meio de chuvas simuladas estando o solo inicialmente seco (El-Swaify & Dangler, 1977). O método sugerido por El-Swaify & Dangler (1977), para quantificação da variável SUS, foi considerado de reprodução difícil, sendo, por isso, alterado. Obviamente, isso implicou no aumento da imprecisão do método, ainda que, por si só, seja insuficiente para explicar a grande divergência de resultados. O método 13 (Figura 4f) não fornece resultados negativos, mas superestima em demasia a erodibilidade dos solos. As diferenças metodológicas na análise granulométrica e na determinação da saturação por bases contribuíram para a ineficiência do modelo, mas, possivelmente, a inadequação do modelo se ache mais ligada aos solos usados por El-Swaify & Dangler (1977). Dos doze solos por eles estudados (todos de regiões tropicais), apenas dois (ultissolos) podem ser considerados semelhantes aos deste trabalho; os demais (oxissolos, inceptissolos, vertissolos e aridissolos) possuem atributos extremamente diversos e, por conseguinte, grande variedade de comportamento ante à erosão.

Como se pode verificar nas figuras 2 a 4, praticamente todos os solos têm sua erodibilidade corretamente estimada por algum dos métodos. Contudo, não foi encontrado nenhum critério lógico-científico que justificasse a exclusão de certos solos e a recomendação de um dado método para outros.

## CONCLUSÃO

Nenhum dos métodos indiretos estudados se mostrou recomendável para a estimativa do fator K para todo o conjunto de solos com horizonte B textural do Brasil, utilizados neste estudo. Assim, sugere-se que sejam desenvolvidos métodos de avaliação do fator K especificamente para solos brasileiros com horizonte B textural.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores e professores D. Reinert (UFMS), E. Margolis (UFRPE), G.R. Curcio (EMBRAPA), I.B. Chaves e I.F. Silva (UFPB), J.R.C. Silva (UFC), L.H.C. Anjos (UFRRJ), M. Resende (UFV), N. Kämpf (UFRGS), R.C. Alvarenga (EMBRAPA) e S.C.F. Dechen (IAC), pelas amostras de solo gentilmente enviadas.

## LITERATURA CITADA

- BRYAN, R.B.; GOVERS, J. & POESEN, J. The concept of soil erodibility and some problems of assessment and application. *Catena*, Cremlingen, 16:393-412, 1989.
- CAMARGO, M.N.; KLAMT, E. & KAUFMANN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. *B. Inf. SBCS*, Campinas, 12:11-33, 1987.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, IAC, 1986. 94p. (Boletim técnico, 106)
- CAMPOS FILHO, O.R.; SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P. & LEPRUN, J.C. Erosividade da chuva e erodibilidade do solo no agreste de Pernambuco. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 27:1363-1370, 1992.
- CARVALHO, M.P.; CATANEO, A. & LOMBARDI NETO, F. Fator erosividade da chuva e enxurrada para chuvas individuais de Pindorama (SP). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., Florianópolis, 1994. Resumos. Florianópolis, SBCS, 1994. p.150-151.
- CARVALHO, M.P.; LOMBARDI NETO, F.; VASQUES FILHO, J. & CATANEO, A. Índices de erosividade da chuva correlacionados com as perdas de solo de um podzólico vermelho-amarelo eutrófico textura argilosa/muito argilosa de Mococa (SP): primeira aproximação do fator erodibilidade do solo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 13:237-242, 1989.
- DAL CONTE, F.M. Índice de erodibilidade de um solo podzólico vermelho-amarelo, determinado sob chuva simulada. Santa Maria, UFSM, 1982. 67p. (Dissertação de Mestrado)
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle - size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.545-566.
- DENARDIN, J.E. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba, ESALQ, 1990. 81p. (Tese de Doutorado)
- EL-SWAIFY, S.A. & DANGLER, E.W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, West Lafayette, 1976. *Proceedings*. Ankeny, SWCS, 1977. p.105-110.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS, 1979. n.p.
- HENKLAIN, J.C. & FREIRE, O. Avaliação do método nomográfico para determinação da erodibilidade de latossolos do Estado do Paraná. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 7:191-195, 1983.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.425-442.
- LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R., ed. *Soil erosion research methods*. Ankeny, Soil Water Conservation Society, 1988. p.141-160.
- LIMA, J.M.; CURI, N.; RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade em latossolos. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 14:85-90, 1990.
- LIMA, P.M.P. Índices de erodibilidade diretos e indiretos para dois latossolos do município de Lavras - Minas Gerais. *Ci. Prát.*, Lavras, 15:186-193, 1991.
- McKEAGUE, J.A. Manual on soil sampling and methods of analysis. Ottawa, CSSS, 1978. 212p.
- MARQUES, J.J.G.S.M. Estimativas e comparações dos fatores erosividade das chuvas e erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. Lavras, UFLA, 1996. 119p. (Dissertação de Mestrado)
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite - citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Min.*, Clarkson, 3:317-327, 1960.

- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; YODER, D.C. & McCOOL, D.K. RUSLE revised: status, questions, answers and the future. *J. Soil Water Cons.*, Ankeny, 49:213-220, 1994.
- RESCK, D.V.S.; FIGUEIREDO, M.S.; FERNANDES, B.; RESENDE, M. & SILVA, T.C.A. Erodibilidade de um podzólico vermelho-amarelo câmbico distrófico fase terraço, localizado na Zona da Mata (MG), determinada com simulador de chuva. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 5:7-14, 1981.
- RODRIGUES do Ó, N.C. Erodibilidade das principais classes de solo do Estado da Paraíba determinada por chuva simulada e método nomográfico. Areia, UFPB, 1986. 29p. (Dissertação de Graduação)
- ROLOFF, G. & DENARDIN, J.E. Estimativa simplificada da erodibilidade do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., Florianópolis, 1994. Resumos. Florianópolis, SBCS, 1994. p.150-151.
- RÖMKENS, M.J.M. The soil erodibility factor: a perspective. In: HARLIN, J.M. & BERARDI, G.M., eds., *Agricultural soil loss: processes, policies and prospects*. Boulder, Westview, 1987. p.125-149.
- RÖMKENS, M.J.M.; ROTH, C.B. & NELSON, D.W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 41:954-960, 1977.
- SILVA, I.F. & ANDRADE, A.P. Relatório de pesquisa sobre conservação do solo: 1977-1978. Areia, SUDENE/UFPB, 1994. v.1, n.p.
- SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P. & CAMPOS FILHO, O.R. Erodibilidade de seis solos do semi-árido paraibano obtida com chuva simulada e método nomográfico. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 10:283-287, 1986.
- SILVA, J.R.C. Erodibilidade dos solos do Ceará: distribuição espacial e avaliação de métodos para sua determinação (1ª aproximação). Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 1994. 60p. (Tese de Professor Titular)
- SILVA, M.L.N.; CURI, N.; OLIVEIRA, M.S.; FERREIRA, M.M. & LOMBARDI NETO, F. Comparação de métodos direto e indiretos para determinação da erodibilidade em latossolos sob cerrado. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 29:1751-1761, 1994.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura-Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24p. (Boletim técnico, 7)
- WEAVER, R.M.; SYERS, J.K. & JACKSON, M.L. Determination of silica in citrate-bicarbonate-dithionite extracts of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 32:497-501, 1968.
- WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B. & CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Cons.*, Ankeny, 26:189-193, 1971.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)