

ÍNDICES DE ESTABILIDADE DE AGREGADOS E SUAS RELAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DE SOLO⁽¹⁾

J. M. REICHERT⁽²⁾, M. da VEIGA⁽³⁾ & M. S. V. CABEDA⁽⁴⁾

RESUMO

A estabilidade dos agregados da superfície do solo influencia consideravelmente as perdas de água e de solo sob chuva ou irrigação. O objetivo geral deste trabalho foi estabelecer relações entre índices de estabilidade de agregados, características de solo e parâmetros relacionados com a infiltração de água e erodibilidade em entressulcos de sete solos do Rio Grande do Sul. O experimento foi desenvolvido no laboratório de erosão do solo da UFRGS, em 1987-88. Os índices estudados incluíram a distribuição de tamanho de agregados a seco (DMPAS) e as estabilidades em água (DMPAA) e sob chuva (DMPAC, RAEC₁ e RAEC₂). Para a estabilidade sob chuva, uma chuva simulada de 85mm/h, durante 10min, foi aplicada sobre quatro frações de agregados, determinando-se o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados retidos nas peneiras. Foram estabelecidas relações entre a estabilidade sob chuva e a seco e os parâmetros de solo. Observou-se que o DMPAA não se correlacionou significativamente com nenhuma das características ou parâmetros de solo estudados, porque o método avalia apenas uma fração do solo e, possivelmente, a estabilidade tenha aumentado durante o armazenamento das amostras. O DMPAC foi o índice mais bem correlacionado com parâmetros de infiltração de água (tempo de início de escoamento, tempo de escoamento até taxa constante de infiltração e taxa constante de infiltração de água) e erodibilidade do solo (taxa de salpico e erodibilidade em entressulcos), porque o método simula as forças ocorrentes durante um evento pluvial. As características do solo que apresentaram melhor correlação com os índices de estabilidade de agregados (excetuando-se a estabilidade em água) foram o teor de areia (marcadamente areia média e fina), a retenção de água em baixos potenciais matriciais, um parâmetro textural, ferro amorfo, matéria orgânica e alumínio.

Termos de indexação: solo, agregação e erosão; infiltração de água; chuva simulada.

SUMMARY: AGGREGATE STABILITY INDICES AND THEIR RELATION TO SOIL PROPERTIES AND PARAMETERS

The aggregate stability of the soil surface considerably influences water and soil losses under rainfall or irrigation. The overall objective of this paper was to establish relationships among aggregate stability indices and soil properties as well as with water infiltration and interrill erodibility for seven soils from Rio Grande do Sul, Brazil. The experiment was

⁽¹⁾ Trabalho realizado com recursos da FINEP. Recebido para publicação em outubro de 1992 e aprovado em março de 1993.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, Estudante de Doutorado na Purdue University - National Soil Erosion Research Lab, CEP 49707-1196 West Lafayette (IN), USA.

⁽³⁾ Pesquisador da EPAGRI, Caixa Postal 791, CEP 89801-970 Chapecó (SC).

⁽⁴⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS).

conducted at the soil erosion laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul, in 1987-88. The aggregation indices were the size distribution of dry aggregates (MWDD), water-stability (MWDW) and rain-stability (MWDR, RAEC₁ and RAEC₂). To determine the aggregate stability under rainfall, a 10-min simulated rainfall at 85mm/h was applied to four soil aggregate fractions and the mean weight diameter (MWD) of the aggregates remaining on the sieves was determined. The results indicated that the MWDW was not significantly correlated with any of the soil properties or parameters evaluated, because the technique evaluates the stability of only a fraction of the whole soil and, possibly, due to the increase in stability during storage of the soil samples. The MWDR was the index best correlated with water infiltration (time to runoff initiation, time of runoff until steady-state infiltration and steady-state infiltration) and soil erosion (splash and interrill erodibility), because this technique simulates forces occurring during a rain storm. The soil properties best correlated with the aggregation indices (excluding the MWDW) were sand (particularly fine and medium sand), water retention at low matric potentials, a textural parameter, amorphous iron, organic matter and aluminum.

Index terms: soil, aggregation and erosion; water infiltration; simulated rainfall.

INTRODUÇÃO

As forças responsáveis pela desagregação do solo podem ser divididas em: (a) abrasão por implementos de cultivo; (b) impacto de água (gotas de chuva) e cisalhamento pela água (escoamento), e (c) entrada de água nos agregados (Kemper, 1965). O método de peneiramento em água simula adequadamente condições de irrigação em sulcos, na qual ocorrem umedecimento dos agregados e forças de cisalhamento (Kemper & Chepil, 1965), mas não simula a desagregação por impacto de gotas de chuva (Glanville & Smith, 1988), que é a causa primária da erosão hídrica em regiões de clima úmido.

A energia cinética (KE) da chuva tem sido o principal parâmetro usado para descrever o potencial da chuva em causar desestruturação de agregados na superfície e erosão do solo. Rosewell (1986) mostrou que a KE máxima foi marcadamente similar para diferentes locais do mundo, sendo da ordem de 0,25 a 0,29MJ/ha.mm, para intensidades maiores que 50mm/h. Kinnel (1987) concluiu que a KE máxima era governada pela instabilidade inerente de gotas de chuva de maior diâmetro. Gotas grandes têm maior probabilidade de superar a resistência das unidades estruturais, sendo, provavelmente, a causa do maior rompimento de agregados (Loch, 1989).

Assim, para avaliar o comportamento da superfície do solo sob chuva, o método lógico de umedecimento é aplicar chuva simulada com uma intensidade e distribuição de tamanho de gotas (energia) similares à de uma chuva natural ou simulada de interesse.

Este trabalho objetivou comparar diferentes índices de estabilidade de agregados, desenvolver um método de determinação da estabilidade de agregados sob chuva simulada e relacionar a estabilidade de agregados com características de solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Solos – Amostras de sete solos do Rio Grande do Sul foram coletadas na superfície (0-15cm) de perfis cobertos por vegetação nativa ou gramíneas (Quadro 1). Em laboratório, as amostras (800 a 1.000kg por solo) foram secas ao ar livre, destorroadas cuidadosamente e tamisadas em peneira com abertura de diâmetro de malha de 10mm. Essas amostras permaneceram armazenadas em sacos plásticos por um ano, até a realização dos testes de estabilidade de agregados (presente artigo), infiltração de água (Reichert et al., 1992) e erosão em entressulcos (Veiga et al., 1993), utilizando subamostras. Os valores de parâmetros e características físicas e químicas referidas nos qua-

Quadro 1. Classificação taxonômica e classe textural da amostra superficial dos solos estudados

Símbolo	Unidade taxonômica		Classe textural
	Brasileira ⁽¹⁾	USDA ⁽²⁾	
BA	Brunizém avermelhado	Argiudoll	Argilo-siltoso
LBd	Latossolo bruno distrófico	Haplohumox	Argiloso
LRd	Latossolo roxo distrófico	Haplorthox	Argiloso
V	Vertissolo	Paleudert	Argiloso
PAd	Podzólico vermelho-amarelo distrófico	Paleudult	Franco-arenoso
PEa	Podzólico vermelho-escuro álico	Palehumult	Franco-argiloarenoso
PA	Podzólico vermelho-amarelo	Paleudalf	Franco-arenoso

⁽¹⁾ BRASIL (1973); ⁽²⁾ ESTADOS UNIDOS (1960).

dros 4 e 5, bem como os respectivos métodos de determinação, são mencionados em Veiga et al. (1993).

Distribuição de tamanho de agregados do solo seco ao ar livre – Foram utilizados aproximadamente 1.000g de amostra com agregados menores que 10mm, divididas em três subamostras. Estas foram colocadas sobre um jogo de quatro peneiras com aberturas de malha, de cima para baixo, de 4,76; 2,00; 1,00 e 0,25mm, e agitadas manualmente no sentido horizontal até que todo o material com diâmetro menor do que a abertura da malha passasse pela peneira. Posteriormente, foi determinada a massa de agregados e de partículas unitárias retidas em cada peneira, somando-se todas as subamostras. Em seguida, procedeu-se à destruição dos agregados e à exclusão das partículas primárias com diâmetro maior do que a abertura da malha da peneira na qual foram retidas, determinando-se a massa somente dos agregados. A partir disso, foi calculada a razão de agregados encontrados em cada uma das classes em relação à massa total de agregados colocada inicialmente no topo do jogo de peneiras.

A distribuição de tamanho de agregados secos ao ar livre foi expressa em termos de diâmetro médio ponderado (DMPAS), determinado pela fórmula:

$$DMPAS = \sum_{i=1}^5 (D_i \times R_i) \quad (1)$$

onde:

i = número de classe: $10 > i_1 \geq 4,76$; $4,76 > i_2 \geq 2,00$; $2,00 > i_3 \geq 1,00$; $1,00 > i_4 \geq 0,25$ e $i_5 < 0,25$ mm;

D_i = diâmetro médio de agregados retidos na peneira de classe i , onde $D_5 = 0,125$ mm e $D_1 = 7,38$ mm;

R_i = razão entre a massa de agregados dentro da classe e a massa total de agregados.

Estabilidade de agregados em água – Colocaram-se agregados com diâmetro entre 4,76 e 10mm, sobre o jogo de quatro peneiras (especificadas acima), o qual foi agitado verticalmente em água durante 15 minutos, como descrito por Kemper & Chepil (1965).

O diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água (DMPAA) foi determinado pela equação:

$$DMPAA = \sum_{i=1}^5 (D_i \times R_i) \quad (2)$$

onde:

i , D_i e R_i são equivalentes aos descritos na equação (1).

Estabilidade de agregados sob chuva – Foi utilizado o material fracionado no jogo de quatro peneiras, com exceção das partículas de solo que passavam pela peneira de 0,25mm de abertura (i_5).

De cada classe de agregados, colocaram-se 25g dentro da peneira de diâmetro inferior da classe (4,76, 2,00, 1,00 e 0,25mm). Cada peneira foi colocada dentro de um pote de plástico, para evitar perdas por salpico de agregados maiores que a abertura de malha da respectiva peneira, durante a aplicação da chuva.

A chuva, com intensidade de 85mm/h, foi aplicada durante 10min, usando-se um simulador de chuvas semelhante ao descrito por Meyer & Harmon (1979), equipado com bico Veejet 80-150. No bico, colocado 3,1m acima da peneira, a pressão de saída foi de 41N/m². Nessas condições, para Meyer & Harmon (1979), independentemente da intensidade aplicada, a distribuição de tamanho de gotas produzidas pelo bico é semelhante àquela de uma chuva natural entre 26 e 51mm/h. Segundo esses autores, para a altura e pressão referidas, o bico produz uma energia cinética de 0,275MJ/ha.mm, a qual está dentro dos limites sugeridos por Rosewell (1986), que é semelhante à de chuvas naturais com intensidade maiores que 25mm/h.

Terminada a chuva, procedeu-se a uma leve agitação das peneiras dentro de um recipiente com água, para que somente os agregados e partículas primárias de solo de diâmetro maior do que a abertura da malha da peneira ficassem nela retidos. Esse material foi seco em estufa, determinando-se sua massa. A fração de agregados estáveis sob chuva (após descontadas as partículas unitárias), dentro de cada classe, corresponde à razão entre a massa de agregados retidos na peneira após a chuva e a massa de agregados colocada na peneira antes da chuva (corrigida conforme a umidade). Os agregados (e partículas unitárias) com diâmetro menor que 0,25mm foram considerados 100% estáveis sob chuva.

O diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva (DMPAC) foi calculado pela equação:

$$DMPAC = \sum_{i=1}^5 (D_i \times R_i \times FE_i) \quad (3)$$

onde:

i , D_i e R_i são equivalentes aos descritos na equação (1);

FE_i = fração estável sob chuva da classe i .

Razão de agregados estáveis sob chuva (RAEC₁ e RAEC₂)

$$RAEC_1 = DMPAC/DMPAS \quad (4)$$

$$RAEC_2 = \sum_{i=1}^5 (R_i \times FE_i) \quad (5)$$

onde:

R_i e FE_i são equivalentes aos descritos nas equações (1) e (3).

Análises estatísticas – Foram efetuadas análises de correlação linear entre características e parâmetros do solo e os índices de estabilidade de agregados, bem como entre índices de estabilidade de agregados e alguns parâmetros relacionados à infiltração de água no solo e à erodibilidade do solo. O teste de Tukey ao nível de 5% foi utilizado na comparação de médias dos índices de estabilidade de agregados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Índices de estabilidade de agregados

Foram estudadas três formas de determinação da estabilidade de agregados. O peneiramento a seco deu origem ao diâmetro médio ponderado de agregados do solo seco ao ar (DMPAS); o peneiramento em água originou o diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água (DMPAA) e, da aplicação de chuva simulada sobre as classes de agregados obtidas no peneiramento a seco, obteve-se o diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva (DMPAC). Este método, desenvolvido pelos autores, difere daqueles de Young (1984) e Glanville & Smith (1988) basicamente porque: (a) a estabilidade de diferentes frações do solo é testada e (b) o peneiramento em água após a aplicação da chuva não é utilizada. Ademais, duas formas de associação da distribuição de tamanho de agregados a seco com a estabilidade sob chuva deram origem aos índices $RAEC_1$ e $RAEC_2$.

Todas as formas de determinação da estabilidade de agregados apresentaram baixo coeficiente de variação, mesmo tendo sido utilizado um pequeno número de repetições (Quadro 2). Com o DMPAS não foi possível efetuar a análise da variância, em função de não haver repetições controladas (as amostras foram acumuladas para posterior pesagem). Mesmo assim, houve diferença numérica no índice entre os solos.

O diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água (DMPAA) apresentou pouca variação entre os solos, excetuando-se o podzólico vermelho-amarelo (PA). Possivelmente, o armazenamento das amostras tenha afetado a estabilidade dos agregados, que, conforme Kemper & Koch (1966), aumenta com o tempo de armazenamento das amostras. Outrossim, apenas a estabilidade de uma fração (4,76–10mm) do solo é testada pelo método, como descrito em Kemper & Chepil (1965). Para obter resultados realísticos, a estabilidade do solo composto de diferentes diâmetros deveria ser avaliada. Neste sentido, Boodt et al. (1974) observaram que a estabilidade de agregados foi correlacionada com a perda de solo somente quando a estabilidade de todo o solo era considerada.

O diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva (DMPAC), por sua vez, apresentou diferença significativa entre os solos. Este método foi desenvolvido em face da necessidade de se obter um índice de estabilidade de agregados que estimasse o efeito das gotas da chuva sobre a superfície do solo, para correlacionar com parâmetros como taxa de infiltração, selamento superficial e erodibilidade do solo determinados com chuva simulada. Neste sentido, Kemper (1965) e Glanville & Smith (1988) ponderam que, se a força de desintegração dos agregados na superfície é o impacto da gota em condições de campo, é desejável um método envolvendo gotas de chuva simulada para determinar a estabilidade dos agregados.

As razões de agregados estáveis sob chuva ($RAEC_1$ e $RAEC_2$) também apresentaram diferenças significativas entre os solos, sendo que, em termos absolutos, a $RAEC_2$ apresentou menor variação (Quadro 2). Isso porque, diferentemente do cálculo do $RAEC_1$, não foi incluído o diâmetro médio da classe, o qual amplia a magnitude do efeito das classes de maior diâmetro sobre o índice.

Quadro 2. Valores dos índices de estabilidade de agregados dos solos estudados

Solo	Índice de estabilidade				
	DMPAS ⁽¹⁾	DMPAA ⁽²⁾	DMPAC ⁽³⁾	$RAEC_1$ ⁽⁴⁾	$RAEC_2$ ⁽⁴⁾
	cm				
BA	3,34	6,78a	2,91a	0,87a	0,89a
LBd	2,65	6,87a	2,27b	0,86ab	0,89a
LRd	3,44	6,61a	2,08b	0,60cd	0,70c
V	3,75	6,39a	2,74a	0,73bc	0,78b
PAd	2,07	6,75a	0,82c	0,39e	0,60e
PEa	2,00	6,47a	0,97c	0,49de	0,69d
PA	2,18	4,80b	0,28d	0,13f	0,43f
Coefficiente de variação (%)		5,09	5,52	5,38	1,82

⁽¹⁾ Sem repetição. DMPAS: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis a seco. ⁽²⁾ Três repetições. DMPAA: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água. ⁽³⁾ Duas repetições. DMPAC: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva. ⁽⁴⁾ Duas repetições. $RAEC$: razão de agregados estáveis sob chuva. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

Entre os índices de estabilidade de agregados, o DMPAC foi o que melhor se correlacionou com o tempo de início de escoamento de água, tempo de escoamento até taxa constante de infiltração, taxa constante de infiltração, taxa média de salpico de partículas (Reichert et al., 1992) e erodibilidade em entressulcos (Veiga et al., 1993) (Quadro 3). Este índice também foi o que melhor se correlacionou com o diâmetro médio ponderado de agregados do solo perdido por erosão nos testes com chuva simulada, demonstrando estimar adequadamente o efeito da chuva sobre os agregados do solo.

O quadro 3 também mostra que os índices RAEC₁ e RAEC₂, comparados com o DMPAC, não melhoraram a acurácia na predição daqueles parâmetros, além de serem altamente correlacionados entre si e com o DMPAC.

Correlação entre índices de estabilidade de agregados e características e parâmetros do solo

Nos quadros 4 e 5, pode ser observado que o DMPAA não apresentou correlação significativa (5%) com nenhum dos parâmetros estudados, pois praticamente não houve variação deste índice entre os solos que apresentavam ampla variação em características físicas e químicas. Os demais índices apresentaram correlação significativa com várias características, havendo significância ao nível de 1% em alguns casos.

Os comentários a seguir excluem o DMPAA, salvo referência explícita, em face da ausência de correlação

significativa com as características e parâmetros estudados.

Frações texturais - Entre as principais frações de tamanho de partículas, a areia apresentou a melhor correlação com os índices de estabilidade, sendo negativa e significativa ao nível de 1% na maioria dos casos (Quadro 4). Este resultado comprova o efeito negativo da fração areia na formação e estabilização dos agregados.

O teor de argila correlacionou-se significativamente com os índices que envolveram aplicação de chuva simulada. Entre as frações de areia, as que apresentaram melhor correlação foram a areia média e a areia fina que, individualmente ou somadas, apresentaram correlação significativa ao nível de 1% na maioria dos casos. Essas duas classes de areia revelaram a maior participação porcentual nos solos (Veiga et al., 1993).

O coeficiente de correlação positivo entre teor de silte e índices de estabilidade de agregados pode estar relacionado ao fato de os solos com altos teores desta fração também apresentarem alto teor da fração argila (Veiga et al., 1993).

Argila e silte dispersos em água - Os parâmetros que envolvem dispersão de argila e de silte (ADA, ASDA e RASDA) apresentaram correlações significativas somente em alguns casos (Quadro 4). ADA e ASDA apresentaram correlações positivas com a estabilidade de agregados, contrariamente ao que se poderia esperar, já que uma maior dispersão das

Quadro 3. Matriz de correlação entre índices de agregação e correlação destes com parâmetros relacionados à infiltração de água e erodibilidade do solo

Índice ou parâmetro ⁽¹⁾	Índice de estabilidade				
	DMPAS	DMPAA	DMPAC	RAEC ₁	RAEC ₂
DMPAS	1,00	-	-	-	-
DMPAA	0,30	1,00	-	-	-
DMPAC	0,87**	0,61	1,00	-	-
RAEC ₁	0,65	0,77*	0,93**	1,00	-
RAEC ₂	0,56	0,79*	0,89**	0,99***	1,00
Tempo de início de escoamento					
em solo seco	0,45	0,40	0,67	0,66	0,66
em solo úmido	0,54	0,45	0,74	0,74	0,73
Tempo de escoamento até taxa constante de infiltração					
em solo seco	0,76*	0,43	0,89**	0,83*	0,78*
em solo úmido	0,95**	0,45	0,95**	0,81*	0,73
Taxa constante de infiltração					
em solo seco	-0,27	-0,20	-0,40	0,07	0,12
em solo úmido	-0,15	-0,14	0,07	0,16	0,19
Taxa média de salpico	-0,79*	-0,76*	-0,95**	-0,95**	-0,89**
Erodibilidade em entressulcos	-0,70	0,72	-0,89**	-0,89**	-0,86*
DMPA perdidos por erosão	0,79*	0,58	0,93**	0,87**	0,84*

⁽¹⁾ DMPAS: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis a seco; DMPAA: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água; DMPAC: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva; RAEC: razão de agregados estáveis sob chuva.

*, ** e *** significativos (sete pares) a 5, 1 e 0,1% respectivamente.

partículas primárias geralmente resulta em menor estabilidade de agregados. As correlações encontradas estão, provavelmente, relacionadas a grande variação nos teores de argila e de silte dos solos estudados, onde teores relativamente altos de ADA e ASDA não necessariamente estão associados a uma alta razão de dispersão dessas partículas (%ADA/%argila ou %ASDA/%argila + silte). Este comportamento é confirmado pelas correlações entre a RASDA e os índices de estabilidade dos agregados, que são negativas em todos os casos, mas significativas apenas para os índices RAEC₁ e RAEC₂.

O parâmetro textural P apresentou correlação significativa ao nível de 5% com o DMPAS e de 1% com o DMPAC, RAEC₁ e RAEC₂ (Quadro 4) e entre as diferentes características e parâmetros, foi o que apresentou a maior correlação com o DMPAA. Isso demonstra a potencialidade de seu uso para estimar a estabilidade de agregados, pois nele está contemplada a razão de dispersão de argila mais silte (de importância para as frações argila e silte), bem como o teor de areia e o diâmetro médio ponderado da fração areia (de importância para a fração areia).

Umidade gravimétrica retida em diferentes potenciais matriciais - Houve alta correlação entre a

umidade gravimétrica retida nos potenciais menores que 10kPa e os índices de estabilidade dos agregados (Quadro 4). Essa correlação foi maior com o DMPAC. A relação entre umidade gravimétrica retida em baixos potenciais matriciais e os índices de estabilidade de agregados é nitidamente indireta, já que maior retenção de água está associada a maior teor de argila e de matéria orgânica no solo. Este parâmetro, no entanto, apresentou correlação melhor do que a argila e a matéria orgânica individualmente, constituindo-se, por isso, num bom parâmetro para estimar a estabilidade dos agregados.

Cátions trocáveis - As melhores correlações foram encontradas entre cálcio e magnésio trocáveis, soma de bases trocáveis (S), capacidade de troca de cátions em pH do solo (CTC) e em pH 7 (T) e o DMPAS (Quadro 5). Isso concorda com a clássica teoria de Russel (1934) sobre a formação de agregados, a qual afirma que agregados se formam somente com partículas com considerável CTC (e alta área superficial específica), e a resistência dos agregados formados depende da natureza dos cátions trocáveis. O índice DMPAC apresentou correlação significativa com potássio, CTC e valor T.

Quadro 4. Coeficientes de correlação entre índices de estabilidade de agregados⁽¹⁾ e algumas características e parâmetros físicos dos solos estudados

Característica/parâmetro	DMPAS	DMPAA	DMPAC	RAEC ₁	RAEC ₂
Fração textural					
Argila	0,74	0,56	0,83*	0,82*	0,78*
Silte	0,67	0,21	0,71	0,56	0,54
Areia	-0,88**	-0,52	-0,97**	-0,89**	-0,85*
Areia muito grossa	-0,36	0,24	-0,29	-0,23	-0,20
Areia grossa	-0,68	-0,30	-0,73	-0,70	-0,67
Areia média	-0,84*	-0,62	-0,97**	-0,94**	-0,90**
Areia fina	-0,86*	-0,48	-0,96**	-0,87**	-0,81*
Areia muito fina	-0,65	-0,52	-0,62	-0,50	-0,48
Areia média + fina	-0,87*	-0,57	-0,99**	-0,93**	-0,88**
ADA	0,96**	0,48	0,90**	0,74	0,68
ASDA	0,89**	0,28	0,76*	0,56	0,50
RASDA	-0,32	-0,58	-0,66	-0,81*	-0,82*
Parâmetro textural P	-0,82*	-0,74	-0,98**	-0,94**	-0,90**
Umidade gravimétrica retida no potencial matricial (kPa)					
-6	0,77*	0,31	0,86*	0,78*	0,74
-10	0,85*	0,37	0,94**	0,84*	0,84*
-30	0,86*	0,47	0,98**	0,90**	0,86*
-100	0,86*	0,48	0,98**	0,90**	0,86*
-300	0,86*	0,49	0,98**	0,91**	0,87*
-900	0,87**	0,52	0,98**	0,92**	0,87*
-1500	0,86*	0,53	0,98**	0,92**	0,88**

⁽¹⁾ DMPAS: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis a seco; DMPAA: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água; DMPAC: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva; RAEC: razão de agregados estáveis sob chuva. ADA: argila dispersa em água; ASDA: argila + silte dispersos em água; RASDA: razão de dispersão de argila + silte; Parâmetro textural P: RASDA x (%areia/DMPareia).

* e ** significativos (sete pares) a 5 e 1% respectivamente.

Óxidos de ferro e de alumínio - Os teores de óxidos de ferro e de alumínio apresentaram correlações positivas, embora nem sempre significativas, com todos os índices de estabilidade de agregados (Quadro 5). O teor de alumínio extraído por HCl apresentou correlação significativa com os índices de agregação obtidos a partir da aplicação de chuva, enquanto os teores de ferro extraídos com CDB ou HCl 6N não apresentaram correlações significativas com nenhum dos índices de estabilidade de agregados. Esses resultados concordam com os de Desphande et al. (1964), os quais concluíram que óxidos de ferro estão presentes normalmente na forma de cristais discretos e não cimentam partículas de solo, enquanto óxidos de alumínio formam interestratificações com minerais de argila e agem como material cimentante, agregando partículas de solo.

O ferro amorfo (extraído por oxalato de amônio) apresentou correlação significativa ao nível de 1% com o DMPAS e o DMPAC, concordando com resultados de Kemper & Koch (1966) em solos do Oeste dos Estados Unidos. Segundo esses autores, solos com altos teores de ferro apresentaram aproximadamente 100% de estabilidade de agregados, determinada pelo método por eles proposto. Schahabi & Schwertmann

(1970) mostraram que óxidos de ferro com baixa cristalinidade e alta solubilidade em oxalato foram os mais eficientes na agregação de um solo siltoso formado em "loess".

Composição química total - O silício foi o único elemento a apresentar correlação negativa com os índices de estabilidade de agregados, em função de estar presente em grande parte na fração areia e esta também apresentar correlação negativa (Quadro 5). O teor de alumínio total apresentou correlação significativa com os índices que envolvem aplicação de chuva, a exemplo do que ocorreu com o alumínio extraído por HCl 6N. O cálcio e o magnésio total comportaram-se de forma semelhante ao trocável, provavelmente por estes elementos estarem predominantemente na forma trocável.

O carbono orgânico apresentou correlação positiva e significativa com todos os índices de estabilidade de agregados (Quadro 5). Segundo Tisdall & Oades (1982), a matéria orgânica atua na formação e estabilização de agregados, pois polímeros orgânicos ligam-se às superfícies inorgânicas através de cátions polivalentes e polímeros hidroximetálicos.

Quadro 5. Coeficientes de correlação entre índices de estabilidade de agregados⁽¹⁾ e algumas características químicas dos solos estudados

Característica	DMPAS	DMPAA	DMPAC	RAEC ₁	RAEC ₂
Cátions trocáveis					
Ca	0,85*	0,15	0,74	0,51	0,44
Mg	0,84*	0,16	0,73	0,50	0,44
K	0,71	0,16	0,77*	0,63	0,58
Mn	0,35	0,27	0,54	0,52	0,53
Al	-0,09	0,25	0,21	0,43	0,46
S	0,85*	0,16	0,74	0,52	0,45
CTC	0,84*	0,20	0,78*	0,58	0,52
Al + H	0,06	0,06	0,22	0,34	0,32
T	0,83*	0,17	0,78*	0,59	0,52
Óxidos de ferro e de alumínio extraídos por					
Fe Oxalato	0,90**	0,24	0,90**	0,76*	0,68
Fe HCl	0,51	0,50	0,65	0,68	0,66
Fe CDB	0,44	0,53	0,58	0,64	0,63
Al HCl	0,50	0,56	0,78*	0,87**	0,87*
Al CDB	0,47	0,51	0,49	0,70	0,72
Composição química total					
Si	-0,68	-0,25	-0,65	-0,56	-0,49
Al	0,71	0,65	0,85*	0,87*	0,84*
Fe	0,52	0,51	0,62	0,65	0,62
Ca	0,84*	0,17	0,75*	0,53	0,47
Mg	0,81*	0,18	0,74	0,55	0,49
Mn	0,57	0,04	0,67	0,62	0,60
Carbono orgânico	0,75*	0,36	0,87**	0,80*	0,76*

⁽¹⁾ DMPAS: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis a seco; DMPAA: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água; DMPAC: diâmetro médio ponderado de agregados estáveis sob chuva; RAEC: razão de agregados estáveis sob chuva.

* e ** significativos (sete pares) a 5 e 1% respectivamente.

CONCLUSÕES

1. O método de determinação da estabilidade de agregados sob chuva, concebido pelos autores, foi eficaz em estimar parâmetros relacionados à erodibilidade e infiltração de água no solo, pois o método simula as forças de impacto das gotas de chuva.

2. As características de solo mais bem correlacionadas com a distribuição de tamanho de agregados a seco foram teor de areia, retenção de água em baixos potenciais matriciais, ferro amorfo e cátions trocáveis (cálcio, magnésio, CTC e valores T e S).

3. As características mais bem correlacionadas com a estabilidade de agregados sob chuva foram o teor de areia (marcadamente a média e a fina), a retenção de água em baixos potenciais matriciais, o parâmetro textural P, ferro amorfo, matéria orgânica e alumínio total.

AGRADECIMENTO

A Elena Blume, pela revisão deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- BOODT, M. De.; VANDEVELDE, R. & GABRIELS, P. A quick laboratory method to study the dynamics of soil erosion. In: VORONIN, A.D. et al., eds. International Congress of Soil Science, 10th, Moscow, 12-20/8/1974, Transactions, Inst. Pochvovedeniya y Agrokhimii, 1974. v.11, p.96-104.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973. 431p. (Boletim técnico, 30)
- DESPHANDE, T.L.; GREENLAND, D.J. & QUIRK, J.P. Role of iron oxides in the bonding of soil particles. *Nature*, London, 201(4914):107-108, 1964.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Staff. Soil classification: a comprehensive system. 7th approximation. Washington, Soil Conservation System, 1960. 265p.
- GLANVILLE, S.J. & SMITH, G.D. Aggregate breakdown in clay soils under simulated rain and effects on infiltration. *Aust. J. Soil Sci.*, Victoria, 26(1):111-120, 1988.
- KEMPER, W.D. Aggregate stability. In: BLACK, C.A. et al., eds. *Methods of Soil Analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part.1, p.511-519.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK et al., eds. *Methods of Soil Analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part.1, p.499-510.
- KEMPER, W.D. & KOCH, E.J. Aggregate stability of soils from western portions of the United States and Canada. Washington, U.S. Depart. Agric., 1966. (Technical Bulletin, 1355)
- KINNEL, P.I.A. Rainfall energy in eastern Australia: intensity-energy relationships for Canberra, A.C.T. *Aust. J. Soil Res.*, Victoria, 25(4):547-553, 1987.
- LOCH, R.J. Aggregate breakdown under rain: its measurement and interpretation. New England (Australia), University of New England, 1989. 139p. (Thesis Ph.D)
- MEYER, L.D. & HARMON, W.C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslope. *Trans. ASAE*, St. Joseph, 22(1):100-103, 1979.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da & CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 16(3):289-298, 1992.
- ROSEWELL, C.J. Rainfall kinetic energy in eastern Australia. *J. Climate and Appl. Met.*, Boston, 25(11):1695-1701, 1986.
- RUSSEL, E.W. The interaction of clay with water and organic liquid as measured by specific volume changes and its relation to the phenomenon of crumb formation in soils. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, (Ser. A) 233:361-390, 1934.
- SCHAHABI, S. & SCHWERTMANN, U. Der Einfluß von synthetischen Einsenoxiden auf die Aggregation zweier Lößbödenhorizonte. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, Weinheim, 125(2):193-204, 1970.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, London, 33(2):141-163, 1982.
- VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. & REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 17(1):121-128, 1993.
- YOUNG, R.A. A method of measuring aggregate stability under waterdrop impact. *Trans. ASAE*, St. Joseph, 27(11):1351-1354.