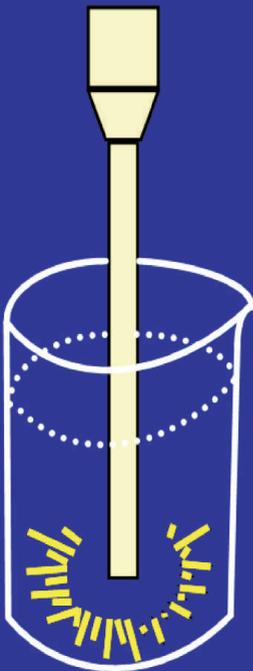


Energia ultra-sônica: uma ferramenta em ciência do solo



$$EA = \frac{P \times t}{V}$$

Onde:

EA: Energia aplicada ($J mL^{-1}$)

P: Potencia (W)

T: tempo de sonificação (s)

V: volume da suspensão (mL)



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1517-5111

Maio, 2005

Documentos 139

Energia ultra-sônica: uma ferramenta em ciência do solo

Marcos Aurélio Carolino de Sá
José Maria de Lima

Planaltina, DF
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina - DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Normalização bibliográfica: *Hozana Alvares de Oliveira*

Marilaine Schaun Pelufê

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Jaime Arbués Carneiro

1ª edição

1ª impressão (2005): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação na publicação.

Embrapa Cerrados.

S111e Sá, Marcos Aurélio Carolino de.

Energia ultra-sônica: uma ferramenta em ciência do solo / Marcos Aurélio Carolino de Sá, José Maria de Lima. – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005.

29 p. – (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 139)

1. Solo. 2. Energia. 3. Ultra-som. I. Lima, José Maria de. II. Título. III. Série.

631.4 - CDD 21

Autores

Marcos Aurélio Carolino de Sá

Eng. Agrôn., Dr., Embrapa Cerrados,
carolino@cpac.embrapa.br

José Maria de Lima

Eng. Agrôn., Ph.D., Universidade Federal de Lavras -
UFLA - Departamento de Ciência do Solo
Cx. Postal 37, CEP 37200-000 - Lavras, MG
jmlima@ufla.br

Apresentação

Nesta publicação, abordou-se a energia ultra-sônica e suas aplicações em ciência do solo, com base em levantamento bibliográfico sobre o assunto. Considerando que informações acerca desse tema, em língua portuguesa, são relativamente escassas, os autores trataram-no de maneira clara e ilustrada e em linguagem simples e objetiva, direcionada não apenas a pesquisadores, mas também a extensionistas, estudantes e técnicos. A princípio, a energia ultra-sônica era utilizada apenas para dispersão do solo e avaliação da textura, procedimento esse ainda bastante utilizado em outros países. Entretanto, sua aplicação em ciência do solo é mais ampla, podendo ser utilizada na avaliação da estabilidade de agregados e até estimativa da erodibilidade para alguns solos. Para tanto, podem ser utilizadas curvas de desagregação/dispersão do solo ou mesmo níveis de energia preestabelecidos. A grande vantagem em relação aos métodos tradicionais, como o peneiramento via úmida, é a quantificação da energia necessária para desagregação do solo, o que torna essa ferramenta promissora.

Roberto Teixeira Alves
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução	9
Princípio da dispersão por ultra-som	10
Energia emitida	12
Avaliação da estabilidade de agregados	14
Estimativa da erodibilidade com base na estabilidade de agregados	22
Considerações finais	23
Referências	24
Abstract	29

Energia ultra-sônica: uma ferramenta em ciência do solo

Marcos Aurélio Carolino de Sá
José Maria de Lima

Introdução

A energia ultra-sônica vem sendo utilizada há muitos anos na indústria química e farmacêutica no preparo de emulsões, polimerização de substâncias e aceleração de reações químicas. Na indústria mecânica, ela vem sendo empregada na limpeza de peças e bicos injetores, em pesquisas biológicas, no rompimento de membranas celulares visando ao isolamento de organelas, extração de toxinas, enzimas e vírus de tecidos, bem como material orgânico.

Em ciência do solo, há registro do uso de ultra-som desde 1923 ([WATSON, 1971](#)), sendo efetivamente utilizada a partir da segunda metade do século XX, conforme trabalhos de [Edwards e Bremner \(1967\)](#) e [Saly \(1967\)](#), nos quais se constatou, como vantagem, a dispersão total do solo sem o uso de dispersantes químicos ([CHRISTENSEN, 1992](#)). Atualmente, a energia ultra-sônica tem sido utilizada para os mais variados propósitos, como exemplo, avaliação da textura do solo ([VITORINO et al., 2001](#)); extração de argila para análises mineralógicas ([SÁ, 2002](#)); estudo da matéria orgânica em diferentes frações de agregados ([CHRISTENSEN, 1985, 1986, 1987](#); [ROSCOE et al., 2000](#)) e em seu fracionamento propriamente dito (EDWARDS; BREMNER, 1967; GREGORICH et al., 1988; MORRA et al., 1991); para a avaliação de grau de salinização (MULYAR; MINKIN, 1993); estudos de atividade enzimática e conteúdo de ATP no solo (DE CESARE et al., 2000) e na

avaliação da estabilidade de agregados ([NORTH, 1976, 1979](#); [FULLER; GOH, 1992](#); [RAINE; SO, 1993, 1994](#); [TIPPKÖTTER, 1994](#); [BARRAL et al., 1998](#); [SÁ et al., 1999](#); [CERDÀ, 2000](#); [SÁ et al., 2000b, 2002](#)), tendo sido inclusive propostos modelos para estimativa da erodibilidade do solo a partir da estabilidade de agregados determinada por ultra-som ([SÁ, 2002](#); [SÁ et al., 2004](#)).

Esta revisão teve por objetivo apresentar informações sobre a utilização da energia ultra-sônica como ferramenta em ciência do solo, enfocando principalmente a determinação da estabilidade de agregados.

Princípio da dispersão por ultra-som

Para a sonificação¹, uma quantidade de solo é colocada em um recipiente com água e submetida a determinado nível de energia. A quebra dos agregados é causada pela cavitação, ou seja: a formação de bolhas de ar na água pelas ondas de energia ultra-sônica. Essa cavitação ocorre principalmente na superfície dos agregados e em suas linhas de fraqueza ([TIPPKÖTTER, 1994](#)) e pode ser dividida em três etapas: nucleação (formação de bolhas microscópicas), crescimento e implosão (colapso) das bolhas ([CHRISTENSEN, 1992](#)). O colapso das bolhas de ar na superfície e nas linhas de fraqueza dos agregados causa a desagregação e a dispersão das partículas.

A energia aplicada na amostra que é função do tempo de sonificação produz a desagregação, culminando com a dispersão total do solo. Na [Figura 1](#), encontra-se um esquema típico de um sonificador de haste, ilustrando a cavitação gerada pela emissão da energia aplicada por meio da ponta da haste.

¹ O termo "sonificação" vem sendo utilizado em diversos trabalhos publicados em língua portuguesa ([SÁ et al., 1999, 2000b](#); [VITORINO et al., 2001](#); [ROSCOE; MACHADO, 2002](#); [SÁ et al., 2002](#)) e diz respeito à submissão de uma suspensão de solo em água à vibração por energia ultra-sônica, em aparelhos chamados vibradores ultra-sônicos ou "sonificadores". Entretanto, no sistema de busca do Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa, quarta edição, 2004 disponível no endereço <http://www.academia.org.br/>, as palavras "sonificação", "sonificador" e "sonificar" não são registradas, sendo registrado apenas o verbo "sonicar", cujo significado não é descrito. Sendo assim, na presente publicação, serão adotados os termos "sonificação" "sonificador" e "sonificar", em concordância com os trabalhos já publicados.

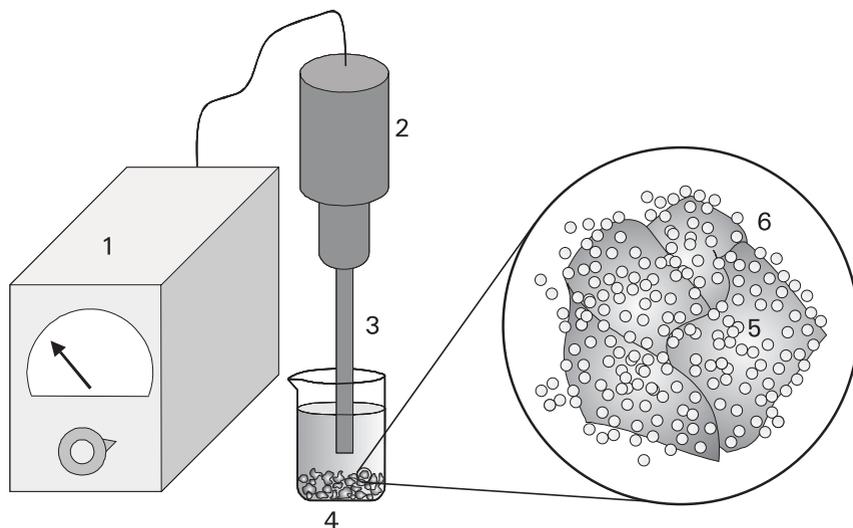


Figura 1. Esquema de um sonificador de haste e da destruição dos agregados de solo, causada pela cavitação. 1. Gerador; 2. Conversor; 3. Haste; 4. Béquer com água e solo (agregados); 5. Agregado sofrendo o efeito da cavitação; 6. Cavitação (bolhas de ar, formadas na água por efeito do ultra-som).

Existem basicamente dois tipos de sonificadores: tipo tanque (banho) e tipo haste. O primeiro tem-se mostrado menos eficiente na dispersão de material de solo ([EDWARDS; BREMNER, 1967](#); [GENRICH; BREMNER, 1972](#)); segundo Weissler e Hine (1962), citados por [Christensen \(1992\)](#), isso ocorre por que em sonificadores tipo tanque, a cavitação não é uniforme em todo o recipiente, chegando a ser cem vezes menor nas extremidades do tanque do que no centro dele. Por sua vez, sonificadores tipo haste têm a desvantagem de contaminar a amostra com titânio, material do qual é constituída a haste e que é liberado em consequência do seu desgaste, durante a sonificação. Conforme observado por [Busacca et al. \(1984\)](#), isso pode se tornar inconveniente caso a sonificação seja um pré-tratamento para análises químicas ou mineralógicas quando o objetivo for a determinação de minerais contendo titânio.

Esse desgaste da haste influencia a eficiência da sonificação. [Hinds e Lowe \(1980\)](#) observaram que, após 70 horas de uso, a haste do sonificador sofreu severo desgaste, reduzindo em 60% a energia emitida, comparativamente a uma haste nova. Entretanto, a mesma haste desgastada, quando polida em um torno, passou a emitir uma energia somente 13% menor que a haste nova.

[Raine e So \(1994\)](#), estudando diversos fatores que afetam a eficiência da dispersão por ultra-som, constataram que ela decresce com o aumento da temperatura da suspensão solo-água, o que diminui a cavitação. Por sua vez, a eficiência aumenta com a concentração de gás dissolvido na suspensão e com a profundidade de inserção da haste do aparelho no recipiente. Esse aumento de temperatura é devido à absorção de som pelo líquido ([SALY, 1967](#)). Para evitar efeitos indesejáveis da alta temperatura, ela deve ser mantida abaixo dos 35°C, segundo [Raine e So \(1994\)](#) ou 40°C, segundo [Christensen \(1985\)](#) e [Gregorich et al. \(1989\)](#), o que pode ser alcançado com a utilização de banho de gelo ou jaqueta de água.

De acordo com [Saly \(1967\)](#), a exposição ao ultra-som não destrói as partículas elementares do solo, promovendo apenas a quebra dos agregados, limpando a superfície das partículas maiores e separando os fragmentos finos dos mais grosseiros. Isso foi também observado por [Busacca et al. \(1984\)](#) e [Morra et al. \(1991\)](#). Ademais, a granulometria do material não influencia o conteúdo de energia dissipada em uma suspensão solo-água, segundo [Raine e So \(1993\)](#).

A energia ultra-sônica é mais eficiente para dispersão total do solo do que a agitação mecânica ([SALY, 1967](#)), mesmo sem o uso de dispersantes químicos ([EDWARDS; BREMNER, 1967](#); [GENRICH; BREMNER, 1972](#)). [SÁ et al. \(1999\)](#) também constataram este fato, no entanto, observaram que não há relação entre a agitação mecânica e a dispersão por ultra-som, pois esta última é função de características do solo, como mineralogia e teor de matéria orgânica. Os autores mostraram que os horizontes A e B de um solo mais intemperizado, rico em óxidos de ferro e alumínio (Latossolo), requerem 463 J mL⁻¹ para se atingir um nível de dispersão semelhante à agitação mecânica, enquanto um solo menos intemperizado, de mineralogia mais caulínica (Nitossolo), requer apenas 367 e 230 J mL⁻¹, nos horizontes A e B respectivamente. Entretanto, [Vitorino et al. \(2001\)](#) mostraram que essa energia pode ser reduzida para 109,1 J mL⁻¹ quando se usa dispersante químico durante a sonificação, independente da mineralogia ou do teor de matéria orgânica da amostra de solo.

Energia emitida

O nível de energia indicado no medidor de sonificadores geralmente não equivale à energia realmente aplicada à solução pela ponta da haste do aparelho ([ELLIOTT; CAMBARDELLA, 1991](#)). [North \(1976\)](#) propôs um método para calibração e quantificação da energia gasta na dispersão de agregados, baseado em

técnicas calorimétricas. Entretanto, seu trabalho foi criticado por [Koenigs \(1978\)](#), tanto pela forma de se calcular a energia quanto pelo uso de dispersante químico, que mascara o efeito do ultra-som. [Raine e So \(1993\)](#) aperfeiçoaram a metodologia proposta por North, tornando possível o cálculo da energia efetivamente gasta para dispersão dos agregados, expressa em joules por massa de solo ($J g^{-1}$).

De acordo com [Raine e So \(1993\)](#), quando a energia ultra-sônica é aplicada a uma suspensão solo-água, essa energia será igual ao somatório das energias absorvidas por vários componentes do sistema, mais a energia perdida, conforme expresso pela equação 1:

$$EA = E_h + E_c + E_t + L \quad (1)$$

Onde:

EA é a energia aplicada;

E_h é a energia consumida no aquecimento da suspensão;

E_c é a energia perdida por condução;

E_t é a energia perdida pela transmissão de ondas de energia para o sistema;

L é a energia efetivamente consumida para desagregação e dispersão.

Segundo [Raine e So \(1993\)](#), a maior parte da energia aplicada é consumida no aquecimento da suspensão. A energia perdida por condução é bem menor que a energia para aquecimento, e a energia perdida por transmissão é desprezível. Apenas pequena parte é efetivamente consumida para desagregação e dispersão do material de solo (L). A metodologia de [Raine e So \(1993\)](#), embora trabalhosa, permite o cálculo dessa energia (L), com margem de erro menor que 10%.

Outra maneira mais simples de se relacionar energia ultra-sônica com dispersão consiste em expressar a energia efetivamente aplicada pelo aparelho à suspensão solo-água (EA) em joules por volume ($J mL^{-1}$), calculada conforme a equação (2). Neste caso, é quantificada a energia total aplicada à suspensão, com base na potência real emitida pelo aparelho, em watts, obtida por calibração. Esse critério foi adotado em diversos trabalhos ([CHRISTENSEN; SORENSEN, 1985](#); [CHRISTENSEN, 1985, 1986, 1987](#); [GREGORICH et al., 1989](#); [FULLER; GOH, 1992](#); [FULLER et al., 1995](#); [ERIKSEN et al., 1995](#); [SÁ et al., 1999, 2000b, 2002](#); [ROSCOE, 2002](#)).

$$EA = \frac{P_c \cdot t_s}{v} \quad (2)$$

Onde:

EA é a energia aplicada à suspensão ($J \text{ mL}^{-1}$);

P_c é a potência emitida pelo aparelho, obtida por calibração (W);

t_s é o tempo de sonificação (s);

v é o volume da suspensão (mL).

O procedimento para calibração da potência emitida pelo aparelho, baseado em técnicas calorimétricas, é descrito detalhadamente em duas publicações ([SÁ et al., 2000a, 2001](#)). Em geral, os mostradores dos aparelhos superestimam a potência aplicada, quando comparado com a potência obtida pela calibração. [Gregorich et al. \(1988\)](#) observaram que o mostrador fornecia uma potência 2,61 vezes maior do que a potência calibrada. [Fuller e Goh \(1992\)](#) observaram que esse valor era de 2,70 vezes. [Sá et al. \(2000b\)](#) notaram que essa superestimação pode variar de 1,73 a 2,67 vezes. Essa diferença pode ser atribuída, principalmente, ao desgaste da haste pelo uso, cuja perda de potência não é registrada pelos mostradores.

Avaliação da estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados do solo depende das forças que ligam as partículas da natureza e a magnitude das forças desagregantes aplicadas aos agregados ([FULLER; GOH, 1992](#); [BEARE; BRUCE, 1993](#)). Para que esse parâmetro tenha significado prático, as forças responsáveis pela desintegração da massa de solo, empregadas na determinação da estabilidade de agregados em laboratório, devem ser semelhantes àquelas que atuam no campo ([ANGULO et al., 1984](#)).

Em um dos métodos clássicos de avaliação da estabilidade de agregados do solo, o do peneiramento úmido de [Yoder \(1936\)](#) e suas modificações ([KEMPER; CHEPIL, 1965](#); [KEMPER; ROSENAU, 1986](#); [POJASOK; KAY, 1990](#)), o resultado é expresso em diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e porcentagem de agregados estáveis, ou seja, agregados que resistiram ao peneiramento. Todavia, o nível de energia aplicado nesse método é desconhecido ([FULLER; GOH, 1992](#)), sendo difícil relacioná-lo com as energias que causam a desagregação do solo no campo (como, por exemplo, impacto das gotas de chuva e enxurrada). Por sua vez, nos métodos em que é medida a resistência do agregado ao impacto de gotas ou chuva simulada ([MCCALLA, 1944](#);

[MAZURAK; MOSHER, 1968](#); [BRUCE-OKINE; LAL, 1975](#); [ANGULO et al., 1984](#); [FARRES; COUSEN, 1985](#)), é possível identificar a relação entre a energia cinética de impacto da gota (J) e a quebra dos agregados. Entretanto, esses testes são operacionalmente limitados para análises mais rotineiras ([RAINE; SO, 1993](#), [SÁ et al., 2000b](#)) por serem muito trabalhosos.

A estabilidade de agregados tem sido também determinada pela sonificação. Alguns autores ([NORTH, 1976, 1979](#); [RAINE; SO, 1993](#); [TIPPKÖTTER, 1994](#); [SÁ et al., 1999](#); [CERDÀ, 2000](#); [SÁ et al., 2002](#)) apresentaram os resultados em curvas características de desagregação de solos, obtidas pela aplicação de níveis de energia ultra-sônica, nos quais ocorre desde a separação de agregados maiores em agregados menores até a dispersão total da amostra. Mais detalhes sobre essas curvas serão comentados mais adiante. Outros autores ([BARRAL et al., 1998](#); [SÁ et al., 2000b, 2002](#)) utilizam níveis isolados de energia, comparando os solos quanto ao teor de argila dispersa ou índices de dispersão.

Diferentes fontes imprimem energia que causa desagregação do solo no campo (por exemplo: chuva, vento, operações de preparo do solo). O nível de energia é relativamente baixo comparado à energia ultra-sônica para dispersão total do solo. Sendo assim, um índice de estabilidade que leve em conta a dispersão total por ultra-som, fornece poucas informações sobre a energia de agregação capaz de resistir à energia imposta por chuva, vento ou operações de manejo ([NORTH, 1979](#); [RAINE; SO, 1993](#); [SÁ et al., 2000b, 2002](#)).

Contudo, na literatura, não há padronização quanto aos níveis de energia utilizados, forma de se expressar a energia aplicada nem quanto à maneira de se medir a desagregação. [Tippkötter \(1994\)](#) expressou a desagregação com base na diminuição de mesoagregados (0,06-2,00 mm) com o aumento do tempo de sonificação. Outros autores ([NORTH, 1979](#); [GREGORICH et al., 1988](#); [RAINE; SO, 1993](#)) expressaram a desagregação com base no aumento de argila dispersa em relação ao tempo de sonificação. Isso foi possível por que os autores trabalharam com solos de clima temperado cuja suspensão, após sonificada, permanecia dispersa durante várias horas. Entretanto, [Sá et al. \(1999\)](#) encontraram dificuldade para expressar a desagregação de um Latossolo com base na quantidade (ou proporção) de argila dispersa. Tendo esse solo alto índice de floculação logo após a sonificação, o material dispersado tende a se flocular, sendo impossível sua separação por sedimentação, com base na lei de Stokes. A utilização de dispersantes, mesmo depois da sonificação, não é recomendada em estudos desta natureza, sendo um dos fatos que motivou a crítica

de [Koenigs \(1978\)](#) ao trabalho de [North \(1976\)](#), uma vez que parte da argila pode se dispersar não apenas por efeito do ultra-som, mas também do dispersante.

Sendo assim, visando à padronização na determinação da estabilidade de agregados por ultra-som, [Sá et al. \(1999\)](#) propuseram que os resultados fossem expressos em índices de dispersão (equação 3) que podem ser utilizados independentemente do tipo de solo e comparados isoladamente ou plotados em curvas.

$$ID = \frac{\text{silte} + \text{argila (g)}}{\text{amostra original (5 g)}} \quad (3)$$

em que:

silte + argila = (amostra original de 5 g) - resíduo

Para tanto, amostras de 5 g de agregados são colocadas em béquer de 250 mL, e o volume de água é completado para 200 mL, sendo submetidas a vários tempos de sonificação que expressam diferentes níveis de energia. Logo após a sonificação, a amostra é passada em peneira de malha 0,053 mm. O material retido na peneira, constituído de partículas isoladas e/ou agregados (resíduo), é secado em estufa por 24 horas a 105°C e pesado para obtenção, por diferença, dos teores de silte + argila ou agregados de tamanho correspondente (que passaram através da peneira).

Os índices de dispersão podem ser normalizados (IDN) para os ID máximos obtidos pela equação 4:

$$IDN = ID / ID \text{ máximo} \quad (4)$$

O ID terá seu valor máximo limitado pelos teores totais de silte + argila e representa o efeito da estabilidade de agregados mais granulometria, enquanto IDN terá seu valor máximo = 1, independente do teor de silte + argila do solo, representando, portanto, apenas o efeito da desagregação. Assim, os índices de dispersão podem ser comparados dentro de cada nível de energia ([SÁ et al., 2002](#)) ou podem ser plotados em curvas de dispersão, conforme [Sá et al. \(1999\)](#), plotando-se no eixo das abscissas (**X**) a energia aplicada, em J mL⁻¹ e no eixo das ordenadas (**Y**), os índices de dispersão, normalizados ou não, ajustando-se modelos do tipo **Y = X/(a + bX)**. A relação entre os parâmetros **b/a** da equação de ajuste foi chamada pelos autores de "índice de desagregação" e expressa a estabilidade de agregados com base no comportamento das curvas de dispersão. Quanto menor o valor desse índice, menor a desagregação do solo,

sendo os agregados mais estáveis. Esse índice, juntamente com índices de dispersão obtidos em diferentes níveis de energia, é utilizado como variável para determinação da erodibilidade do solo, conforme [Sá \(2002\)](#).

O esquema de uma curva de dispersão pode ser visto na Figura 2. [Sá et al. \(2002\)](#) propuseram que, na construção das curvas, deve-se isolar o efeito do manuseio da amostra na desagregação (Figura 2A). Para tanto, é determinado o “tempo zero de sonificação” que consiste apenas em colocar as amostras no béquer, completar o volume para 200 mL de água destilada e passar imediatamente pela peneira, a fim de quantificar a desagregação causada apenas pelo manuseio. Exemplo real pode ser visto na [Figura 3](#), em que o solo de Eldorado do Sul, RS sofreu menos com o manuseio da amostra, comparado ao solo de Itapororoca - PB.

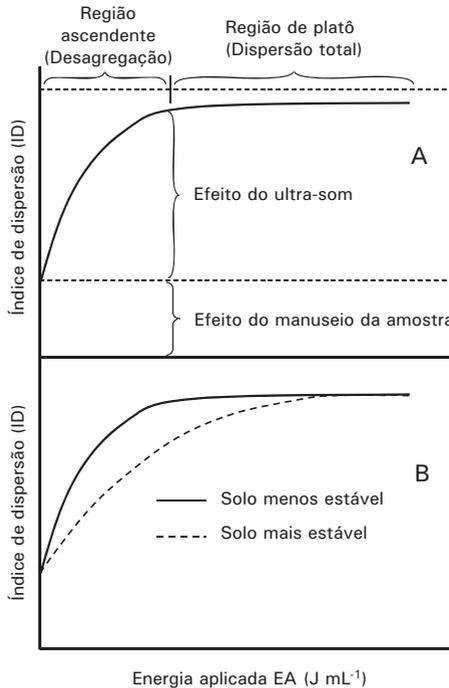


Figura 2. Curvas de dispersão hipotéticas, mostrando o efeito do manuseio da amostra e o efeito de níveis crescentes de energia ultra-sônica na desagregação até a dispersão total (A) mostrando, também, o comportamento de um solo mais estável comparado a um menos estável (B), considerando que ambos possuem o mesmo teor de silte mais argila.

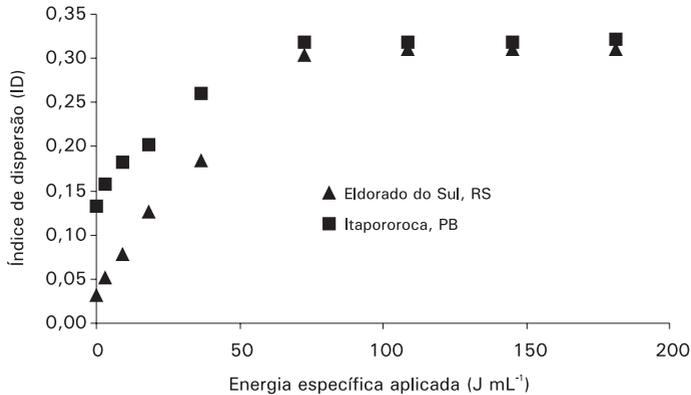


Figura 3. Curvas de dispersão mostrando o efeito do manuseio da amostra em amostras de horizonte A de dois Argissolos Vermelhos, com teor de silte + argila aproximados, um de Eldorado do Sul, RS e outro de Itapororoca, PB.

Fonte: [Sá \(2002\)](#).

A curva possui um formato hiperbólico, com uma região ascendente, na qual ocorre a desagregação em função da energia aplicada, e uma região de platô, em que o solo já está totalmente disperso ([Figura 2A](#)). Entretanto, é importante observar que, nessa curva, é considerado como “dispersão total” o ponto onde o patamar é atingido, mesmo que ainda existam na suspensão microagregados de tamanho silte. [Roscoe \(2002\)](#) aplicou o mesmo conceito, porém, ajustou dois modelos lineares na mesma curva, um para a região de desagregação e outro para a região de platô na qual o solo já se encontra totalmente disperso.

Quando, em determinado solo, há agregados mais estáveis, será necessário maior nível de energia para se atingir o platô da curva (dispersão total), comparado a um solo menos estável ([Figura 2B](#)). Isso pode ser visualizado comparando-se as curvas ou as relações entre os parâmetros b/a (Índice de desagregação) para os modelos ajustados, conforme discutido anteriormente.

Na [Figura 4 A](#), observam-se diferenças nos patamares das curvas que podem ser atribuídas a diferenças em textura e estabilidade de agregados, comparando-se solos hipotéticos com 50% e 80% de silte mais argila. Quando os índices de dispersão são normalizados ([Figura 4 B](#)), ambos os solos atingem o patamar com $IDN = 1$.

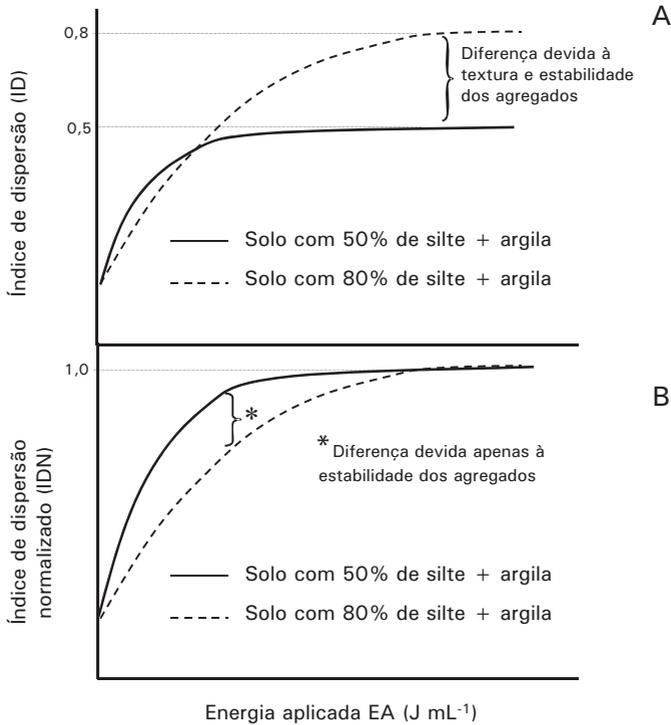


Figura 4. Curvas de dispersão hipotéticas, comparando um solo com 50% de silte mais argila e outro com 80% de silte mais argila, mostrando o efeito da textura mais estabilidade de agregados – dados não normalizados (A) e o efeito da estabilidade de agregados – dados normalizados (B).

Dados reais podem ser observados na [Figura 5](#), na qual são comparados, a título de exemplo, um solo de Santa Maria, RS e um solo de Sete Lagoas, MG, com teores de silte + argila de 50% a 90% respectivamente. Nota-se que neste caso, o efeito do manuseio da amostra (a zero de energia) deve ser observado nos dados não normalizados ([Figura 5 A](#)), na qual se constata que nos solos existem curvas semelhantes. Se forem observados dados normalizados ([Figura 5 B](#)), a diferença apresentada no nível zero de energia é devida à normalização dos dados, conforme equação 5. Contudo, nas [Figuras 5 A](#) e [5 B](#), observa-se que no solo de Santa Maria há agregados menos estáveis, pois sua curva atinge o patamar em níveis mais baixos de energia, enquanto o outro solo ainda está na região ascendente.

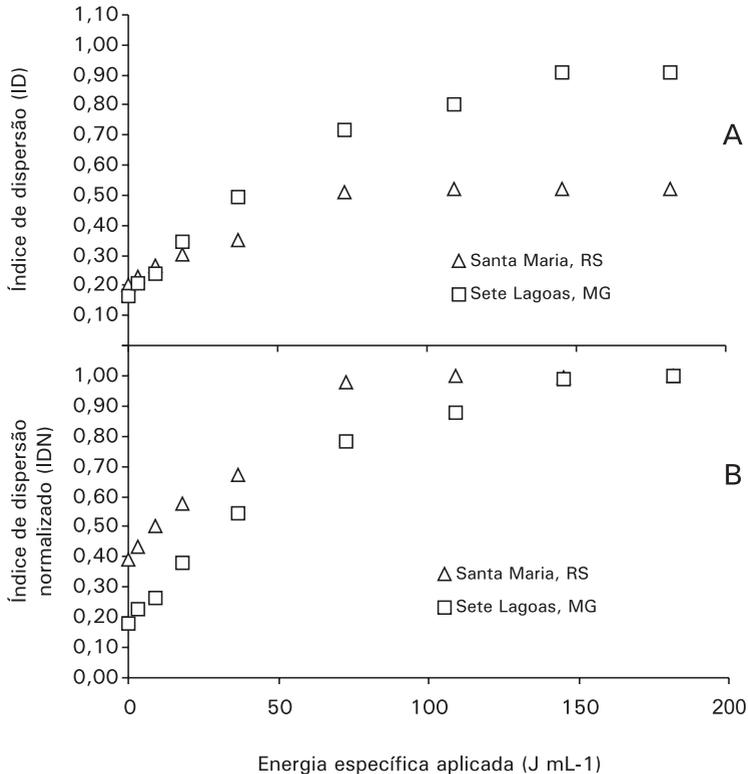


Figura 5. Curvas de dispersão do horizonte A, de dois solos com horizonte B textural: dados não normalizados em que se observa o efeito da textura mais estabilidade de agregados (A) e dados normalizados, em que se observa apenas o efeito da estabilidade de agregados (B). Fonte: [Sá \(2002\)](#).

De acordo com [Sá et al. \(1999\)](#), as curvas de dispersão são específicas para cada tipo de solo e, dentro de cada solo, são específicas para cada horizonte, pois além da textura, estas são influenciadas pela mineralogia e pelo teor de matéria orgânica, fatores importantes na agregação do solo. Na [Figura 6](#), podem ser observadas curvas de dispersão dos horizontes A e B de dois solos: um Latossolo e um Nitossolo. Observa-se que os horizontes A apresentaram curvas semelhantes, influenciadas pela matéria orgânica, enquanto o horizonte B do Latossolo (rico em gibbsita) apresentou agregados mais estáveis que o horizonte B do Nitossolo (relativamente mais rico em caulinita).

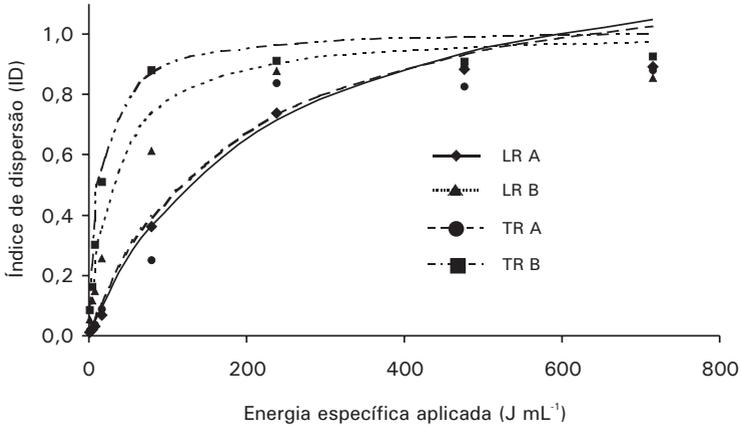


Figura 6. Curvas de dispersão de um Latossolo Vermelho distroférrico, (Latosolo Roxo) horizontes A (LR A) e B (LR B) e de um Nitossolo Vermelho Eutroférrico típico (Terra Roxa estruturada) horizontes A (TR A) e B (TR B).

Fonte: [Sá et al. \(1999\)](#).

Para um mesmo solo e num mesmo horizonte (mesma textura e mineralogia), as curvas de dispersão são influenciadas pelo uso/manejo, conforme demonstrado por [Sá et al. \(2002\)](#). Isso pode ser observado na [Figura 7](#), na qual se nota que para um Latossolo sob diferentes tipos de uso, as curvas (índices de dispersão) originam-se aproximadamente no mesmo ponto, distanciando-se e tendendo a convergir para um mesmo patamar (região de platô). Esse patamar é limitado pelo teor de silte + argila, no qual ocorre o máximo efeito de dispersão, enquanto os efeitos do uso/manejo são verificados na região ascendente da curva, na qual ocorre a desagregação. Sob mata nativa, este solo apresenta agregados tão estáveis que, no intervalo estudado (0 a 181,4 J mL⁻¹) a curva foi praticamente linear, sem demonstrar tendência à estabilização, como nos demais usos.

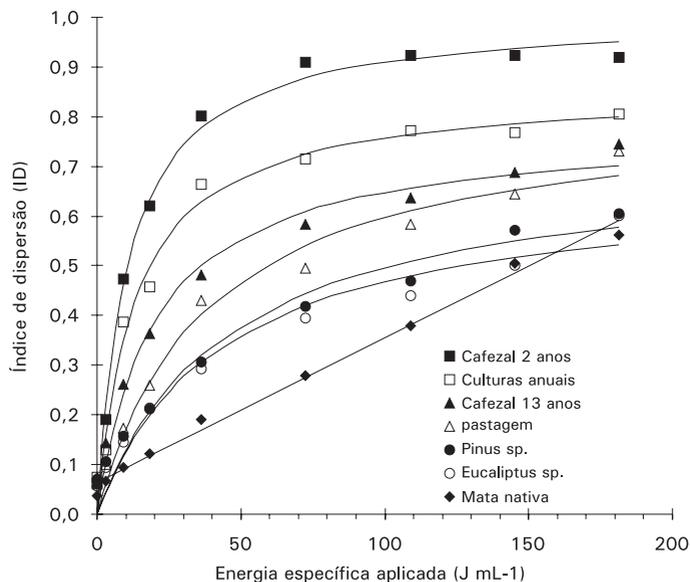


Figura 7. Curvas de dispersão do horizonte A de um Latossolo Vermelho distroférico, (Latosolo Roxo) sob diferentes condições de uso.

Fonte: [Sá et al. \(2002\)](#).

Estimativa da erodibilidade com base na estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados influencia vários aspectos relativos ao encrostamento, infiltração de água e erosão do solo ([RAINE; SO, 1993](#)). No entanto, sob chuvas fortes, a enxurrada pode ocorrer mesmo sem o encrostamento, transportando, até mesmo, fragmentos grosseiros e agregados maiores. Dessa forma, um único método de avaliação da estabilidade de agregados é insuficiente para explicar o processo erosivo ([LE BISSONNAIS, 1996](#)). Mesmo assim, alguns autores encontraram boas correlações entre estabilidade de agregados medida por peneiramento úmido ou impacto de gotas e a erodibilidade do solo ([ANGULO, 1983](#); [EGASHIRA et al., 1983](#)).

Outros autores ([MARQUES et al., 1997](#); [SILVA et al., 1999](#)) propuseram modelos para estimativa da erodibilidade (Fator K da Equação Universal de Perdas de Solo) que utilizam, como variáveis, atributos químicos, mineralógicos e físicos, entre esses últimos, diâmetro médio geométrico de agregados entre

4,76 e 7,93 mm. O uso de tantas variáveis é justificado pelo fato de a erodibilidade ser fator complexo que depende da interação entre vários atributos relacionados à permeabilidade e a resistência à desagregação ([SILVA et al., 1999](#)). Contudo, fica difícil estabelecer uma relação de causa-efeito entre as variáveis utilizadas nos modelos e a erodibilidade ([MARQUES et al., 1997](#); [SILVA et al., 1999](#)).

Estudando a relação entre a desagregação por ultra-som e a erodibilidade de 21 solos brasileiros com horizonte B textural, [Sá et al. \(2004\)](#) propuseram quatro modelos para estimativa da erodibilidade com base em desagregação por ultra-som e alguns atributos dos solos. Um dos modelos estima a erodibilidade ($r^2 = 0,85^{**}$) com base apenas em índices de dispersão, normalizados ou não, de agregados da fração < 2 mm. O modelo foi testado em um solo cuja erodibilidade conhecida (determinada diretamente no campo) é 0,032 t h (MJ mm)⁻¹ e a estimada pelo modelo, 0,038 t h (MJ mm)⁻¹. Entretanto, mais estudos são necessários para sua validação.

Considerações Finais

A energia ultra-sônica vem sendo utilizada há muitos anos em ciência do solo para diversas finalidades. Ao longo deste trabalho, demonstrou-se o potencial dessa energia para determinação da estabilidade de agregados cuja utilização é mais recente, principalmente, no Brasil. Sua grande vantagem, além da praticidade, é o conhecimento da energia necessário para a desagregação em diferentes níveis, até a dispersão total. A estabilidade de agregados medida dessa forma permite não somente avaliar o efeito do uso do solo na estabilidade de agregados, mas também estimar a erodibilidade (fator K da Equação Universal de Perdas de Solo) para solos com horizonte B textural.

Entretanto, há, ainda, muito por estudar sobre essa ferramenta. Pesquisas ainda são necessárias visando comparar essa metodologia com outras já conceituadas, no estudo de tipos de uso/manejo para diferentes solos, bem como sua relação com a erodibilidade para outras classes de solo.

Referências

ANGULO, J. R. **Relações entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros**. 1983. 154 f. Dissertação (Mestrado em Conservação do solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ANGULO, R. J.; ROLOFF, G.; SOUZA, M. L. P. Correlação entre diferentes formas de determinação e representação da estabilidade e resistência dos agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 7-12, jan./abr. 1984.

BARRAL, M. T.; ARIAS, M.; GNÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 261-272, 1998.

BEARE, M. H.; BRUCE, R. R. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1, p. 87-104, Mar. 1993.

BRUCE-OKINE, E.; LAL, R. Soil erodibility as determined by raindrop technique. **Soil Science**, Baltimore, v. 119, n. 2, p. 149-157, Feb. 1975.

BUSACCA, A. J.; ANIKU, J. E.; SINGER, M. J. Dispersion of soils by an ultrasonic method that eliminates probe contact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 5, p. 1125-1129, Sept./Oct. 1984.

CERDÀ, A. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p. 159-166, 2000.

CHRISTENSEN, B. T. Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish Arable soils by ultrasonic dispersion and gravity sedimentation. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Copenhagen, v. 35, n. 2, p. 175-187, 1985.

CHRISTENSEN, B. T. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 4, p. 429-435, July/Ago. 1987.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v. 20, p. 2-76, 1992.

CHRISTENSEN, B. T. Straw incorporation and soil organic matter in macro-aggregates and particle size separates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 125-135, Mar. 1986.

CHRISTENSEN, B. T.; SORENSEN, L. H. The distribution of native and labelled carbon between soil particle size fractions isolated from long-term incubation experiments. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 36, n. 2, p. 219-229, June 1985.

DE CESARE, F.; GARZILLO, A. M. V.; BUONOCORE, V.; BADALUCCO, L. Use of sonication for measuring acid phosphatase activity in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 32, p. 825-832, 2000.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 47-63, 1967.

EGASHIRA, K.; KAETSU, Y.; TAKUMA, K. Aggregate stability as an index of erodibility of ando soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 29, n. 4, p. 473-481, 1983.

ELLIOTT, E. T.; CAMBARDELLA, C. A. Physical separation of soil organic matter. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 34, n. 1/4, p. 407-419, Feb. 1991.

ERIKSEN, J.; LEFROY, R. D. B.; BLAIR, G. J. Physical protection of soil organic's studied using acetylacetone extraction at various intensities of ultrasonic dispersion. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 27, n. 8, p. 1005-1010, Aug. 1995.

FARRES, P. J.; COUSEN, S. M. An improved method of aggregate stability measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 10, p. 321-329, 1985.

FULLER, L. G.; GOH, T. G. Stability-energy relationships and their application to aggregation studies. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 72, n. 4, p. 453-466, Nov. 1992.

FULLER, L. G.; GOH, T. G.; OSCARSON, D. W. Cultivation effects on dispersive clay of soil aggregates. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 75, n. 1, p. 101-107, Feb. 1995.

GENRICH, D. A.; BREMNER, J. M. A re-evaluation of the ultrasonic vibration method of dispersing soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 36, n. 6, p. 944-947, Nov./Dec. 1972.

GREGORICH, E. G.; KACHANOSKI, R. G.; VORONEY, R. P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, n. 3, p. 649-659, Sept. 1989.

GREGORICH, E. G.; KACHANOSKI, R. G.; VORONEY, R. P. Ultrasonic dispersion of aggregates: Distribution of organic matter in size fractions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 68, n. 2, p. 395-403, May 1988.

HINDS, A. A.; LOWE, L. E. The use of Ultrasonic probe in soil dispersion and the bulk isolation of organo-mineral complexes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 60, n. 2, p. 389-392, May 1980.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1965. v. 1, p. 499-509.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1986. v. 1, p. 425-442.

KOENIGS, F. F. R. Comments on the paper by P. F. North (1976). **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 29, n. 1, p. 117-124, Mar. 1978.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 425-437, Dec. 1996.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURTI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, D. F. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 457-465, jul./set. 1997.

MAZURAK, A. P.; MOSHER, P. N. Detachment of soil particles in simulated rainfall. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 32, n. 5, p. 716-719, Sept./Oct. 1968.

MCCALLA, T. M. Water drop method of determining the stability of soil structure. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 7, p. 209-214, 1944.

MORRA, M. J.; BLANK, R. R.; FREEBORN, L. L.; SHAFII, B. Size fractionation of soil organo-mineral complexes using ultrasonic dispersion. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, n. 4, p. 294-303, Oct. 1991.

MULYAR, I. A.; MINKIN, M. B. Use of ultrasound in the analysis of water extracts from soils. **Eurasian Soil Science**, Maryland, v. 24, n. 8, p. 119-124, 1993.

NORTH, P. F. Assessment of the ultrasonic method of determining soil structural stability in relation to soil management properties. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 463-472, Sept. 1979.

NORTH, P. F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 451-459, Dec. 1976.

POJASOK, T.; KAY, B. D. Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize the structural stability of moist aggregates. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 70, n. 1, p. 33-42, Feb. 1990.

RAINE, S. R.; SO, B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 249-259, June 1993.

RAINE, S. R.; SO, B. Ultrasonic dispersion of soil in water: The effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion. **Australian Journal of Soil Research**, London, v. 32, n. 6, p. 1157-1174, 1994.

ROSCOE, R. **Soil organic matter dynamics in a Cerrado Oxisol**. 2002. 156 p. Thesis (Ph.D.) - Wageningen University, Wageningen.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J. Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and $d^{13}C$ distribution in particle-size fractions. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, p. 445-454, Sept. 2000.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.

SÁ, M. A. C. **Energia ultra-sônica: uso e erodibilidade de solos**. 2002. 95 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SÁ, M. A. C.; LAGE, G.; LIMA, J. M. **Calibração da potência emitida pelo sonificador para uso em análises de solo**. Lavras: UFLA, 2001. 17 p. (Boletim agropecuário, 41).

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N.; MASSAROTO, J. A.; MARQUES, J. J. G. S. M. Estimativa da erodibilidade pela desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 691-699, jul. 2004.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; LAGE, G. Procedimento-padrão para medida da potência liberada pelo aparelho de ultra-som. Comunicação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 1, p. 300-306, jan./mar. 2000a.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; MELLO, C. R. Nível de energia ultra-sônica para o estudo da estabilidade de agregados de um Latossolo sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1649-1655, nov. 2002.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 9, p. 1825-1834, set. 2000b.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 525-531, jul./set. 1999.

SALY, R. Use of ultrasonic vibration for dispersing soil samples. **Soviet Soil Science**, Silver Spring, v. 11, p. 1547-1559, 1967.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2287-2298, dez. 1999.

TIPPKÖTTER, R. The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-200 μm). **Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Weinheim, v. 157, n. 6, p. 99-104, Apr. 1994.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N. Níveis de energia ultra-sônica na dispersão de argila em solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1330-1336, nov./dez. 2001.

WATSON, J. R. Ultrasonic vibration as a method of soil dispersion. **Soils and Fertilizers**, Wallingford, v. 34, p. 127-134, 1971.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion. **Journal of American Society of Agronomy**, Washington, v. 28, p. 337-351, 1936.

Ultrasonic Energy: a tool in soil science

Abstract - *Ultrasonic energy is a promising tool in Soil Science. Soil aggregates breakdown susceptibility may have a significant effect on a range of soil physical properties of agronomic importance such as physical properties and erodibility. Soil dispersion characteristic curves give important informations about soil aggregate stability, and are influenced by soil mineralogy, organic matter and soil use and management. Interpretation of dispersion curves and the use of dispersion index and normalized dispersion index for aggregate stability assessment and the use of these indexes to estimate soil erodibility in brazilian soils are discussed.*

Index terms: soil, aggregate stability, ultrasound, erodibility.