

## Aplicação do $^{137}\text{Cs}$ para mensuração de erosão no Agreste de Pernambuco

### Application of $^{137}\text{Cs}$ to measure erosion in the Agreste of Pernambuco

*Antônio Luiz Gonçalves Ferreira Júnior*  
Doutor pelo PROTEN-UFPE, Brasil  
[alferreira.jr@gmail.com](mailto:alferreira.jr@gmail.com)

*Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio*  
Professor Titular do PROTEN-UFPE, Brasil  
[esampaio@ufpe.br](mailto:esampaio@ufpe.br)

*Dário Costa Primo*  
Pesquisador PNPd/CAPES, Brasil  
[darioprime@gmail.com](mailto:darioprime@gmail.com)

#### Resumo

A erosão hídrica é um dos problemas ambientais mais severos, acarretando a perda das camadas superiores do solo e o assoreamento de cursos e reservatórios d'água. No semiárido do Nordeste brasileiro, embora a erosão resulte em prejuízos de proporções consideráveis, não há nenhum tipo de monitoramento para avaliar sua progressão. Uma das causas é o pequeno número de metodologias que conciliam validade dos resultados, amplitude das áreas monitoradas e baixos custos operacionais. Neste estudo, foi avaliada a viabilidade do uso da técnica do  $^{137}\text{Cs}$  em uma área do município de São Bento do Una, Pernambuco. Foram lançados quatro transectos, com retirada de amostras de solo em quatro pontos de cada um, em camadas de 3 cm de profundidade até 30 cm, para medição do  $^{137}\text{Cs}$  e da densidade. Os estoques de  $^{137}\text{Cs}$  variaram de 178 a 278  $\text{Bq m}^{-2}$  e a média no transecto controle, em área plana, foi igual às das três áreas em declive (230  $\text{Bq m}^{-2}$ ), invalidando estimativas de perdas por erosão. São estoques maiores que outros locais do Nordeste e menores que os de regiões brasileiras mais ao sul. Os resultados indicaram a necessidade de aprimorar a técnica para ser aplicada nas condições do semiárido nordestino.

**Palavras-chave:** Erosão do solo, Semiárido,  $^{137}\text{Cs}$ , Degradação Ambiental.

#### Abstract

Hydric erosion is one of the most severe environmental problems, leading to loss of the upper soil layers and sedimentation of water bodies. In the Brazilian Northeast, despite causing considerable damage, erosion is not monitored in any area. One of the reasons is the restricted number of methodologies that provide reliable results, cover extensive areas and are reasonably cheap. In this study, the feasibility of using the  $^{137}\text{Cs}$  technique in an area of São Bento do Una municipality, in Pernambuco state, was tested. Four transects were marked, and soil samples were collected in four points of each one, separating the soil in 3 cm deep layers down to 30 cm, to determine  $^{137}\text{Cs}$  and density. The  $^{137}\text{Cs}$  stocks varied from 178 to 278  $\text{Bq m}^{-2}$  and the average in the control transect, in a level area, was the same as in the three slope transects (230  $\text{Bq m}^{-2}$ ), preventing erosion from being calculated. These stocks are higher than those measured in other Northeastern places but lower than those in more southern Brazilian regions. The results indicate the need to refine the technique in order to be applied under the conditions of the semiarid Brazilian Northeast.

**Keywords:** Soil Erosion, Semiarid,  $^{137}\text{Cs}$ , Environmental Degradation.

## 1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um problema com acentuadas repercussões ambientais, econômicas e sociais (ANDRADE *et al.*, 2010). A perda das camadas superiores do solo leva a reduções da fertilidade e da capacidade de retenção de água, diminuindo a capacidade produtiva das terras e, conseqüentemente, a renda agrícola. As características naturais do semiárido do Nordeste brasileiro e as práticas agrícolas adotadas ao longo dos anos têm contribuído para agravar o problema da erosão e levar à deterioração das condições ambientais de boa parte da área.

Apesar da importância da erosão, não há nenhum monitoramento de sua progressão na região e há pouquíssimas medidas efetuadas, todas em áreas muito pequenas, em geral bem menores que um hectare, e por tempo limitado, raramente ultrapassando uma dezena de anos (SAMPAIO *et al.*, 2003). A causa desta carência de dados são as dificuldades metodológicas da implementação de medidas. As medidas diretas em geral são feitas em parcelas de poucos m<sup>2</sup>, delimitadas por muretas e instrumentalizadas para a coleta contínua de todo o solo carregado pela água, com determinações após cada um ou poucos eventos de chuva (COGO, 2003). O enorme custo de mão-de-obra tem limitado muito sua implementação na região (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005; BEZERRA; CANTALICE, 2006; SILVA *et al.*, 1999; SILVA, 2000). As medições indiretas, incluindo a técnica do <sup>137</sup>Cs, seriam uma alternativa.

A técnica de medição indireta pelo <sup>137</sup>Cs apresenta como principal vantagem a facilidade em campo, exigindo apenas a coleta de solo em cada ponto amostral, sem necessidade de qualquer instalação prévia ou equipamento especializado (POMERAI, 2006). Como ela baseia-se na deposição de <sup>137</sup>Cs por testes e acidentes nucleares (*fallout*), tem sido mais empregada no hemisfério norte (ZAPATA; AGUDO, 2000), onde os testes e acidentes foram mais frequentes, resultando em radiatividades iniciais mais altas nos solos que no hemisfério sul (BACCHI, 2005). A retirada das camadas de deposição permite uma medida indireta da erosão, se os valores da radiatividade inicial do <sup>137</sup>Cs puderem ser estimados, o que se faz coletando solo em pontos de referência em áreas teoricamente sem erosão ou outras perturbações desde a época dos últimos testes e acidentes nucleares, em meados do século passado (ANDRELLI *et al.* 2003).

No Brasil, algumas medidas de erosão com o método de <sup>137</sup>Cs têm sido feitas (GUIMARÃES, 1988; BACCHI *et al.*, 2000; CORRECHEL, 2003; ANDRELLI *et al.* 2003;), incluindo na região Nordeste (SAKAI, 1977; FRAGA; SALCEDO, 2004; SANTOS, 2004). As limitações podem estar relacionadas principalmente à falta de uniformidade na deposição do <sup>137</sup>Cs, à variação na intensidade da adsorção do radionuclídeo às partículas de argila e à dificuldade de distinguir a natureza e origem do deslocamento do solo (PARSONS; FOSTER, 2011). Em

Pernambuco, um trabalho iniciou a determinação do estoque de  $^{137}\text{Cs}$  em áreas de referência (ANTUNES *et al.*, 2010).

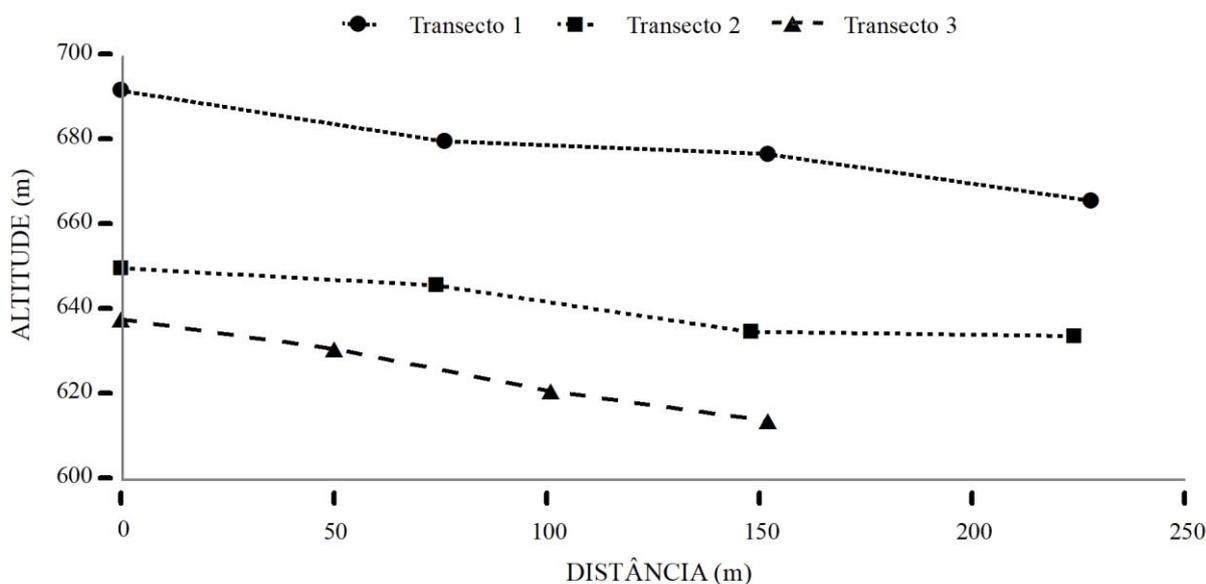
Dada a importância da erosão e a necessidade de refinar a metodologia para o Nordeste, os objetivos deste trabalho foram: definir os estoques de  $^{137}\text{Cs}$  em área situada na bacia hidrográfica do Rio Una para estimar as taxas de perda ou ganho de solo por erosão e estabelecer a correlação entre parâmetros químicos do solo e a atividade do  $^{137}\text{Cs}$  como indicador de erosão na bacia do rio Una

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA, em São Bento do Una (em torno de 08°31'22" sul, 36°26'40" oeste e 645 m de altitude). O clima predominante é do tipo BSh, conforme classificação de Köppen, com evapotranspiração potencial anual de 1048 mm e precipitação média de 700 mm.

Foram selecionadas quatro áreas e, em cada uma, foram definidos quatro pontos para a coleta de amostras de solo, seguindo transectos. Das quatro áreas, uma era coberta com vegetação nativa (controle) e três eram utilizadas em atividades agrícolas (transectos I, II e III). A área controle é plana, estava ocupada com vegetação nativa de porte arbóreo-arbustivo, sem sinais aparentes de perturbação, e há cerca de 40 anos não vinha sendo utilizada para nenhuma atividade que envolvesse remoção e/ou queima desta vegetação, plantio ou outras intervenções que movimentassem o solo. Nesta área, os quatro pontos foram distribuídos aleatoriamente. As áreas dos transectos vinham sendo plantadas anualmente com sorgo, milho, feijão e palma, depois de aradas, gradeadas e adubadas. Todas três eram áreas em declive, sendo os comprimentos das rampas nos transectos I e II um pouco maiores que o do transecto III, com declives semelhantes (52 a 56 m), embora em altitudes ligeiramente diferentes (Figura 1). Os quatro pontos de coleta nestes transectos corresponderam a topo (P1), encosta superior (P2), encosta inferior (P3) e final do declive (P4).

Em cada ponto foram retiradas amostras de solo para detecção da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  e para determinação da densidade do solo. As amostras foram coletadas em trincheiras de 40 x 40 cm, recolhendo-se todo o solo de camadas de 3 cm até 30 cm de profundidade. Na parte lateral da trincheira foram retiradas amostras indeformadas, com o coletor de Uhland, para determinação da densidade (EMBRAPA, 1997).



**Figura 1** – Pontos de coleta de solos, ao longo de três transectos, em áreas com cultivo anual precedido de aração e gradagem, em São Bento do Una, Pernambuco. Os pontos em altitudes decrescentes correspondem a topo, encosta superior, encosta inferior e final do declive.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm. Foram, então, analisadas quanto à textura, pH, concentrações de carbono, cálcio, magnésio, potássio, sódio e alumínio (EMBRAPA, 1997) e atividade do  $^{137}\text{Cs}$  (BAJRACHARYA *et al.*, 1998). A textura foi determinada pelo método do hidrômetro; o pH potenciometricamente, em água, na relação 1:2,5; o carbono orgânico pelo método de Walkley-Black de oxidação com dicromato de potássio; cálcio e magnésio por espectrometria de absorção atômica, após extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; potássio e sódio, por fotometria de chama, após extração com a solução duplo-ácida de Mehlich 1; e alumínio pelo método volumétrico por titulação com hidróxido de sódio, após extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>.

A determinação da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  foi feita por espectrometria gama, usando-se um detector de raios gama (HPGe). O canal e a energia do  $^{137}\text{Cs}$  foram definidos a partir do ajuste da curva de calibração do equipamento, utilizando-se uma pastilha de  $^{137}\text{Cs}$  enriquecida. A eficiência de contagem do detector de germânio foi determinada em uma amostra de solo que havia sido misturada à solução aquosa, com atividade conhecida de 30,7 kBq L<sup>-1</sup>, obtida do IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro). Todas as amostras de solo tinham 1,7 Kg e foram contadas por 24 horas, ajustando-se o canal dos pulsos à energia de 661,6 keV. Não foi feita correção pelo decaimento radioativo, dado que o período entre a fase de coleta das amostras e o início das análises foi pequeno em relação à meia vida do radionuclídeo (30,2 anos). A eficiência de detecção foi determinada a partir da equação de Kachanoski e De Jong (1984).

A densidade do solo foi usada para converter as concentrações em estoques de  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) e de carbono ( $\text{kg m}^{-2}$ ). Como as atividades do  $^{137}\text{Cs}$  nas camadas abaixo de 18 cm foram na sua grande maioria nulas ou então muito baixas, os resultados desta e das demais análises foram apresentados apenas para camadas até esta profundidade.

Os dados dos estoques foram submetidos a análise de variância, com delineamento fatorial de  $5 \times 6$ , correspondendo a cinco áreas (controle e topo, encosta superior, encosta inferior e final do declive nos transectos inclinados) e seis profundidades do solo (0-3; >3-5; >6-9; >9-12; >12-15; e .15-18 cm). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de probabilidade de 5%. Os dados dos estoques também foram correlacionados com as variáveis químicas e físicas do solo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas efetivas de  $^{137}\text{Cs}$  foram feitas em todas as camadas de 3 cm de espessura, até a camada de 15 a 18 cm de profundidade, em todos os pontos de coleta, correspondendo a estoques de  $^{137}\text{Cs}$  acima de  $15 \text{ Bq m}^{-2}$  naquelas camadas que apresentaram atividade (Tabela 1). Em apenas duas amostras, na camada de 18 a 21 cm de profundidade, houve medidas ligeiramente acima do nível de detecção do pico específico de radiação do  $^{137}\text{Cs}$ , que corresponderiam a estoques abaixo de  $1 \text{ Bq m}^{-2}$ . Assim, embora contabilizados nos estoques totais, foi descartada a apresentação, na Tabela 1, de estoques nas camadas abaixo da 15-18 cm, sendo nulos em sua quase totalidade. Nas camadas até 18 cm, o único padrão claro de variação dos estoques foram os valores significativamente menores nas duas camadas mais profundas (Tabela 1). O estoque total na área controle foi igual ao estoque total médio das áreas cultivadas ( $230 \text{ Bq m}^{-2}$ ), que variaram de 169 a  $278 \text{ Bq m}^{-2}$ , sem diferença significativa. Brown *et al.* (1981) sugeriram que a movimentação do  $^{137}\text{Cs}$  para as camadas mais profundas ocorre mais como consequência da sedimentação do que da lixiviação. Nas encostas, o revolvimento do solo com a preparação para o plantio pode ter sido responsável pela distribuição irregular entre as camadas da diversas áreas (Tabela 1), mas com as médias de todas elas semelhantes no grupo até 12 cm de profundidade ( $42.6$  a  $49.8 \text{ Bq m}^{-2}$ ) e nas duas camadas de 12 a 18 cm ( $21,8$  e  $22,2 \text{ Bq m}^{-2}$ ). Na área controle, sem registro de revolvimento do solo, a causa não é muito clara. A única evidência de movimentação, não antrópica, seria a presença de muitas formigas na área, que podem ter carregado partículas de solo tanto para cima quanto para baixo. Apesar de ter-se evitado marcar os pontos de coleta onde havia evidências de caminhos e saídas de galerias feitos por formigas, não se pode descartar a hipótese de que tenha havido maior movimentação em anos passados. Também pode ter havido plantio na área controle anterior aos 40 anos de registro, que ainda seria posterior a muitos eventos de liberação de  $^{137}\text{Cs}$  na atmosfera (ZAPATA; AGUDO, 2000; BACCHI, 2005). Estes resultados ilustram a dificuldade de

obtenção de amostras controle, sem dúvida uma das limitações da metodologia de determinação da erosão pela técnica de  $^{137}\text{Cs}$ .

**Tabela 1** – Estoques de  $^{137}\text{Cs}$  em camadas de diferentes profundidades do solo (cm), em área plana de controle e ao longo de declives, em três transeptos, em São Bento do Una, Pernambuco.

Transepto	Posição	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	0-18
-----Bq m <sup>-2</sup> -----								
Controle	topo	26	48	48	50	30	28	230
Declives	topo	59	67	61	44	34	12	278
	encosta superior	55	58	59	59	23	12	265
	Encosta inferior	41	29	44	27	12	17	169
	Final do declive	37	44	37	34	12	40	205
Média		42.6a	49.2a	49.8a	43.2a	22.2b	21.8b	229.4

Considerando que a distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  ficou restrita aos 18 cm superficiais, indicando pouco ou nenhum deslocamento abaixo deste limite, poder-se-ia usar o estoque total para fazer estimativas de perda e/ou ganho de solo, como tem sido feito em vários estudos (WALLING & HE, 1997; BACCHI, 2000; ZHANG *et al.*, 2003; SANTOS, 2004; FRAGA; SALCEDO, 2004). Entretanto, a ausência de diferenças significativas entre áreas invalida a possibilidade deste cálculo.

Pode-se também anexar o valor deste estoque total ao de outras áreas, de modo a ir compondo um quadro de sua distribuição em espaços maiores. Isto permite estabelecer padrões geográficos, como o já conhecido de maiores deposições no hemisfério norte que no sul (BACCHI, 2005). Outros aspectos, tais como os padrões de influência da chuva e as características do solo podem ter alguma interferência, porém faltam estudos que asseverem tal relação.

O estoque total na área parece estar em torno de 230 Bq m<sup>-2</sup>, o valor na área controle e a média dos transectos onde houve cultivo. Entretanto, poderia subir a 278 Bq m<sup>-2</sup>, o maior valor, encontrado no topo das encostas, ou descer a 169 Bq m<sup>-2</sup>, o menor valor de estoque, na encosta inferior do declive. É possível que este estoque mais baixo, embora não diferindo significativamente dos outros, tenha sido influenciado por alguma perda por erosão. Esta faixa de valores é mais que o dobro da encontrada em três áreas controle de Pernambuco (Antunes *et al.* 2010), embora os estoques estivessem distribuídos na mesma profundidade do solo (0 a 18 cm). Também foi maior que os valores registrados na Paraíba, por Santos (2004) e por Fraga e Salcedo (2004), e na Bahia, por Sakai (1978), mas estes vieram predominantemente de áreas sujeitas à erosão. Por outro lado, foram um pouco inferiores aos estoques em locais em São Paulo (BACCHI *et al.* 2000; GUIMARÃES, 1998; CORRECHEL, 2003) e Paraná (ANDRELLO *et al.* 2003) e bem inferiores à maior parte dos valores do hemisfério norte (RITCHIE; McCARTY, 2003; ZHANG *et al.*, 2003; YANG *et al.*, 2006). A maior deposição de  $^{137}\text{Cs}$  no hemisfério norte que no sul tem sido comprovada por diversas pesquisas (WALLING; QUINE, 1992; BACCHI, 2005).

A menor precipitação total anual pode, também, ser uma das razões da menor deposição nas regiões tropicais secas do Nordeste brasileiro, como a área de São Bento do Una, no Agreste Pernambucano, com chuva média de 700 mm ano<sup>-1</sup>, que nas áreas mais ao sul. É importante salientar que a concentração das chuvas em poucos meses do ano e em eventos esporádicos, como ocorre no semiárido nordestino, também pode contribuir para a menor deposição, principalmente quando tenha havido defasagem grande entre a liberação do <sup>137</sup>Cs na atmosfera e os eventos de chuva que o arrastariam para o solo.

Os estoques também são afetados pela capacidade de retenção dos solos, que é influenciada principalmente pelas proporções de argila (TAMURA, 1964; ZAPATA; AGUDO, 2000; MABIT; BERNARD, 1998; NAKAMURU *et al.*, 2007; DU; WALLING, 2011) e de matéria orgânica (VERITY; ANDERSON, 1990; RITCHIE; McCARTY, 2003, LIANG *et al.*, 2009). Os solos de todas as áreas eram muito arenosos (Tabela 2) e tinham baixas concentrações de carbono (Tabela 3); portanto, baixa capacidade de retenção. Isto poderia ser uma outra causa da ausência de decréscimos consistentes das concentrações de <sup>137</sup>Cs nas diferentes camadas dos solos deste trabalho. Entretanto, não justificaria menores estoques totais, já que abaixo de 18 cm de profundidade havia ausência de <sup>137</sup>Cs

**Tabela 2** – Granulometria do solo nas camadas superficial (0 a 9 cm) e subsuperficial (9 a 18 cm), em área plana de controle e ao longo de declives, em três transeptos, em São Bento do Una, Pernambuco.

Transepto	Posição	0-9 cm			9-18 cm		
		Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
-----g kg <sup>-1</sup> -----							
Controle	topo	754	173	73	752	168	80
Declives	topo	737	790	73	723	197	80
	encosta superior	787	160	53	783	154	63
	encosta inferior	810	143	47	796	147	57
	final do declive	774	153	73	786	147	67

Comparando os solos dos diversos pontos dos transectos, na área controle as concentrações de carbono e também de Ca, além do pH, foram mais altos que nos transectos das encostas (Tabela 2). Ao longo das encostas, houve tendência a menores concentrações de Ca e de C nos pontos coletados na encosta inferior e no final do declive e de P no final do declive, tanto na camada superficial (0 a 9 cm de profundidade) quanto na subsuperficial (9 a 18 cm). Como é usual, as concentrações tenderam a ser mais altas na camada superficial que na subsuperficial, possivelmente por causa da reciclagem natural da vegetação (RITCHIE; McCARTY, 2003) e apesar do revolvimento periódico do solo. Entretanto, as concentrações de C e outros parâmetros químicos do solo não foram correlacionados com os estoques de <sup>137</sup>Cs, o que já foi registrado em algumas outras

áreas, fora da região (VERITY ; ANDERSON, 1990; MABIT ; BERNARD 1998; NI ; ZHANG, 2007).

**Tabela 3** – Características químicas do solo nas camadas superficial (0 a 9 cm) e subsuperficial (9 a 18 cm), em área plana de controle e ao longo de declives, em três transeptos, em São Bento do Una, Pernambuco.

Transecto	Posição	pH	P	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup> + Mg <sup>+2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	C
			mg dm <sup>-3</sup>	-----		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----		g kg <sup>-1</sup>
0-9 cm									
Controle	topo	6,2	23	0,14	0,13	8,2	6,3	0,1	26,9
Declives	topo	5,7	22	0,25	0,21	3,4	2,1	0,1	10,3
	encosta superior	5,8	43	0,28	0,15	3,6	2,2	0,1	11,7
	encosta inferior	5,8	43	0,31	0,25	2,5	1,5	0,2	6,8
	final do declive	5,5	15	0,08	0,40	3,4	1,5	0,1	6,9
9-18 cm									
Controle	topo	6,6	7	0,09	0,16	4,3	2,7	0,1	11,2
Declives	topo	5,5	13	0,04	0,20	3,2	2,0	0,2	7,1
	encosta superior	5,7	36	0,05	0,06	3,5	2,0	0,1	9,9
	encosta inferior	5,4	14	0,06	0,24	2,6	1,4	0,3	4,5
	final do declive	5,3	6	0,38	0,08	2,8	1,3	0,2	5,3

#### 4. CONCLUSÕES

O estoque total de <sup>137</sup>Cs na área controle, coberta com vegetação preservada e supostamente sem movimentação do solo, foi semelhante ao estoque médio nas áreas em declive e com cultivo anual precedido de aração e gradagem (230 Bq m<sup>-2</sup>). Nestas áreas cultivadas, os estoques variaram de 278 a 168, sem diferença significativa. A ausência de diferença significativa impediu a estimativa de perdas por erosão. Os estoques foram maiores que os determinados em outros locais do Nordeste e menores que os de regiões mais ao sul. Portanto, a aplicação da técnica do <sup>137</sup>Cs precisa ser melhor aprimorada, com valores de referência na região Nordeste determinados em maior número de locais.

A atividade do <sup>137</sup>Cs nos diferentes pontos de coleta e camadas do solo não se correlacionou com as variáveis químicas e físicas do solo.

**REFERÊNCIAS**

- ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 153-160, 2005.
- ANDRADE, A. G.; FREITAS, P. L.; LANDERS, J. Aspectos gerais do manejo e conservação do solo e da água e as mudanças ambientais. In: PRADO, R. B.; TURRETA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010.
- ANDRELLO, A. C.; APPOLONI, C. R., GUIMARÃES, M. F. Uso do céσιο 137 para avaliar taxas de erosão em cultura de soja, café e pastagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 223-229, 2003.
- ANTUNES, P. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; FERREIRA JÚNIOR, A. L. G.; GALINDO, I. C. L.; SALCEDO, I. H. Distribuição de <sup>137</sup>Cs em três solos representativos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 935-943, 2010.
- BAJRACHARYA, R. M.; LAL, R.; KIMBLE, J. M. Use of radioactive fallout caesium-137 to estimate soil erosion on three farms in west-central Ohio. **Soil Science**, v. 163, p. 133-141, 1998.
- BACCHI O. O. S.; REICHARD, K.; SPAROVEK, G.; RANIERI, S. B. L. Soil erosion evaluation in a small watershed in Brazil through <sup>137</sup>Cs fallout redistribution analysis and conventional models **Acta Geologica Hispanica**, v. 35, n. 3-4, p. 251-259, 2000.
- BACCHI, O. **Análise da redistribuição do “fallout” do <sup>137</sup>Cs e avaliação da erosão do solo**. CENA/USP, 2005. <<http://docslide.com.br/documents/analise-da-redistribuicao-do-falloutdo-137cs-e-avaliacao-da-erosao-do-solo.html>>. Acesso em: 16 mar. 2016.
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições e cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 565-573, 2006.
- BROWN R. B., CUTSHALL N. H.; KING, G. F. Agricultural erosion indicated by <sup>137</sup>Cs redistribution: II. Estimates of erosion rates. **Soil Science Society of America Journal** v. 45, p. 1191-1197, 1981.
- COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 743-753, 2003.
- CORRECHEL, V. **Avaliação de Índices de Erodibilidade do Solo através da técnica da análise da redistribuição do “fallout” do <sup>137</sup>Cs**. 2003. 99 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- DU, P.; WALLING, D. E. Using <sup>137</sup>Cs measurements to investigate the influence of erosion and soil redistribution on soil properties. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 69, n. 5, p.717-26, 2011.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212p.

FRAGA, V. S.; SALCEDO, I. H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. **Soil Science Society American Journal**, v. 68, p. 215-224, 2004.

GUIMARÃES, M. F.  **$^{137}\text{Cs}$  da precipitação radioativa (“fallout”) no estudo da erosão e sedimentação de solo.** 1988. 136 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

KACHANOSKI, R. G.; DE JONG, E. Predicting the temporal relationship between soil caesium-137 and erosion rate. **Journal of Environment Quality**, v. 13, p. 301-304, 1984.

LIANG, A. Z.; ZHANG, X. P.; YANG, X. M.; MCLAUGHLIN, N. B.; SHEN, Y.; & LI, W. F. Estimation of total erosion in cultivated Black soils in northeast China from vertical profiles of soil organic carbon. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 223–229, 2009.

MABIT, L.; BERNARD, C. Relationship between soil  $^{137}\text{Cs}$  inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed. **Sciences de La Terre et des Planets**, v. 327, p. 527-532, 1998.

NAKAMARU, Y.; ISHIKAWA, N. TAGAMI, K.; UCHIDA, S. Role of soil organic matter in the mobility of radiocesium in agricultural soils common in Japan. **Colloids and Surfaces**, v. 306, p. 111-117, 2007.

NI, S. J.; ZHANG J. H. Variation of chemical properties as affected by soil erosion on hillslopes and terraces. **European Journal of Soil Science**. v. 58, p. 1285-1292, 2007.

PARSONS, A. J. & FOSTER; I. D. L. What can we learn about soil erosion from the use of  $^{137}\text{Cs}$ , **Earth-Science Reviews**, v. 108, p. 101-113, 2011.

PORĘBA, G. J. Caesium-137 as a soil erosion tracer: A review. **Geochronometria**, v. 25, p. 37-46, 2006.

RITCHIE, J. C.; McCARTY, G.W.;  $^{137}\text{Cs}$  and soil carbon in a small agricultural watershed. **Soil & Tillage Research**. v. 69, p. 45–51, 2003.

SAKAI, T. **Distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  nos solos do estado da Bahia.** 1977. 70 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1977.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SAMPAIO, Y.; VITAL, T.; ARAÚJO, S. B.; SAMPAIO, G. R. Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência. 1. ed. Recife: Ed. UFPE, 2003. 202p.

SANTOS, A. C. **Redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em distintas profundidades e posições topográficas em solo sob pastagem e vegetação nativa.** 2004. 68 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SILVA, A. B., RESENDE, M.; SOUSA, A. R.; MARGOLIS, E. Mobilização do solo, erosão e produtividade de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 299-307, 1999.

SILVA, J. R. C. Erosão e produtividade do solo no semiárido. In: OLIVEIRA, T. S.; ASSIS JR.; R. N.; ROMERO, R. E.; SILVA, J. R. C. **Agricultura, sustentabilidade e o semiárido**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. cap. 10, p. 169-213.

TAMURA, T. Selective sorption reactions of caesium with soil minerals. **Nuclear Safety**, v. 5, p. 262-268, 1964.

VERITY, C. E.; ANDERSON, D. W. Soil erosion effects on soil quality and yield. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 702, p. 471. 1990.

WAALING, D. E.; QUINE, T. A. The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys. **Internacional Association of Hydrological Sciences**, v. 210, p. 143-152, 1992.

WALLING, D. E.; HE, Q. Use of fallout  $^{137}\text{Cs}$  in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains. **Catena**, v. 29, p. 263-282, 1997.

YANG, M. Y.; TIAN, J. L.; LIU, P. L. Investigating the spatial distribution of soil erosion and deposition in a small catchment on the Loess Plateau of China, using  $^{137}\text{Cs}$ . **Soil & Tillage Research**, v. 87, p. 186-193, 2006.

ZAPATA, F.; GARCÍA-AGUDO, E. Future prospects for the  $^{137}\text{Cs}$  technique for estimating soil erosion and sedimentation rates. **Acta Geologica Hispanica**, v. 5, n. 3-4, p. 197-205, 2000.

ZHANG, X.; ZHANG, Y., WEN, A.; FENG, M. Assessment of soil losses on cultivated land by using the  $^{137}\text{Cs}$  technique in the Upper Yangtze River Basin of China. **Soil & Tillage Research**, v. 69, p. 99-106, 2003.

Trabalho enviado em 28/02/2019

Trabalho aceito em 17/06/2019