



## **Sequestro de carbono em solos da região Semiárida brasileira estimado por modelo de simulação em diferentes sistemas produtivos**

**Luiz Fernando Carvalho Leite<sup>1</sup>, Vanderlise Giongo Petrese<sup>2</sup>, Edvaldo Sagrilo<sup>1</sup>.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Embrapa Meio Norte, <sup>2</sup>Embrapa Semiárido  
Caixa Postal 001 – 64006-220 – Teresina-PI, Brasil  
E-mail: luizf@cpamn.embrapa.br

### **Resumo**

Os solos do semi-árido brasileiro têm sido submetidos a intenso processo de degradação e desertificação, devido à atividade agropastoril extensiva, calcada em sistemas de manejo convencionais, associada à substituição da vegetação nativa por culturas, principalmente por meio de queimadas e da retirada de madeira. Isto tem reduzido os estoques de carbono (C) no solo e aumentado a emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente CO<sub>2</sub>, para a atmosfera. Neste sentido, estratégias como a adoção de sistemas conservacionistas, baseados em menor ou nenhum revolvimento do solo, no aumento do aporte de resíduos vegetais e na rotação de culturas, além da implantação de pastagens e floresta, podem recuperar os estoques de C e mitigar as emissões de GEE. Para quantificar estas mudanças, em médio e longo prazos, têm sido utilizados modelos de simulação, como CENTURY e CQESTR, considerados essenciais para a elaboração de cenários sustentáveis e mitigadores de mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** caatinga, gases de efeito estufa, modelagem.

## Abstract

The soils of the Brazilian semi-arid have been submitted to the intense process of degradation and desertification due to extensive agropastoral activity based on traditional management systems, associated with the substitution of native vegetation by cultures, mainly by burning and the withdrawal of wood. This has reduced the stocks of carbon (C) in the soil and has increased the emission of greenhouse gases (GHG), especially CO<sub>2</sub>, for the atmosphere. In this way, strategies such as the adoption of conservationist systems, based on small or no revolving of the soil, on the increase of incorporation of plant residues and crop rotation, besides the implementation of pastures and forests, can recuperate the C stocks and mitigate the GHG emissions. To quantify these changes, in middle and long-term, simulation models such as CENTURY and CQESTR have been used, which are considered essential for the elaboration of sustainable and mitigating scenarios of climatic changes.

## Introdução

A região semi-árida cobre cerca de 40 % da superfície terrestre e contém mais de dois bilhões de pessoas. São áreas susceptíveis à desertificação, degradação do solo e seca e suas populações, os ecossistemas e agricultura extremamente vulneráveis às mudanças climáticas. A degradação e a agricultura podem atuar como fonte e dreno para vários gases atmosféricos de efeito estufa responsáveis pelo fenômeno de aquecimento global.

A contribuição da agricultura para aumento do efeito estufa inclui a liberação de gases por meio da oxidação do carbono do solo, emissões de metano provenientes de animais confinados e adubos orgânicos, e emissões de óxido nitroso a partir de fertilizantes nitrogenados, solos e resíduos animais (Lal, 2004). Nas regiões semi-áridas, estas emissões são associadas especialmente à remoção e subsequente queima da vegetação nativa e à erosão do solo, por meio da redução da produtividade primária, diminuindo o potencial do solo em estocar carbono e aumento das perdas diretas de matéria orgânica do solo.

Considerando-se que as perdas de carbono em regiões semi-áridas são associadas a perda da cobertura vegetal e erosão do solo, as estratégias de manejo que visem diminuir ou reverter estes processos podem aumentar o sequestro de carbono. Há diversas estratégias para

aumentar os estoques de carbono no solo, especialmente por meio do aumento da produção de biomassa, do aumento no suprimento de matéria orgânica e da redução da taxa de decomposição, representadas por práticas como plantio direto, cultura de cobertura, especialmente leguminosas e adubação orgânica (Leite et al., 2008; Smith, 2008).

Para melhor predição dos efeitos das mudanças no uso da terra sobre a dinâmica do carbono do solo, condição essencial na formulação de políticas ambientais, agrícolas, sociais e econômicas, nos últimos vinte anos tem sido recomendado o uso de modelos matemáticos. Estes modelos otimizam o entendimento da dinâmica do C do solo e são úteis no planejamento do uso da terra, na quantificação dos efeitos das mudanças ambientais, e no desenvolvimento de estratégias que mitiguem os efeitos negativos dessas mudanças.

Há grande acervo de simuladores para avaliação da dinâmica de C e N para estudos de emissão de gases de efeito estufa provenientes do setor agropecuário e florestal. Simuladores como o ROTHC, CENTURY ou EPIC, têm sido muito utilizados para estimar seqüestro de C em diversos agroecossistemas, a maior parte em regiões temperadas, com poucos trabalhos em ambientes tropicais e quase nenhum em regiões semi-áridas (Farage et al., 2007). No entanto, pela complexidade dos modelos incorporados a esses simuladores vários pesquisadores estão sendo motivados a criarem modelos mais simples, como aquele disponibilizado no simulador CQESTR avaliado também, principalmente em regiões temperadas e no cerrado brasileiro (Leite et al., 2009).

Estoques de carbono em regiões semi-áridas medidos no solo e estimados por modelos de simulação

As plantas absorvem CO<sub>2</sub> a partir da atmosfera e o incorporam na biomassa por meio do processo fotossintético. Parte deste carbono retorna para atmosfera, no entanto, a outra parte, quando mantida acima e abaixo do solo, na forma de biomassa viva ou morta, passa a constituir um excelente reservatório de carbono. Dessa biomassa morta, uma fração é incorporada ao solo na forma de húmus, aumentando o reservatório de carbono orgânico do solo.

A biomassa vegetal por unidade de área em regiões semi-áridas é considerada baixa, (aproximadamente 6 kg/m<sup>2</sup>) comparados aos demais ecossistemas terrestres (em torno de 10-

18 kg/m<sup>2</sup>). No entanto, a elevada área superficial dessa região propicia um significativo papel no seqüestro de carbono. A Tabela 1 contém os estoques de carbono armazenado nas regiões semi-áridas de diversas partes do mundo as quais, respondem por 1/3 das reservas globais de carbono.

**Tabela 1** Estoques de carbono em regiões áridas do mundo (adaptado de Trumper et al., 2008)

Região	Estoque total de C por região (Gt)	Estoques de C em regiões semi-áridas (Gt)	Participação dos estoques de C em regiões áridas (%)
América do Norte	388	121	31
Groelândia	5	0	0
América Central e Caribe	16	1	7
América do Sul	341	115	34
Europa	100	18	18
Euroasia Norte	404	96	24
África	356	211	59
Oriente Médio	44	41	94
Sul da Ásia	54	26	49
Ásia Oriental	124	41	33
Sudeste Asiático	132	3	2
Austrália/Nova Zelândia	85	68	80
Pacífico	3	0	0
Total	2053	743	36

Em especial, os solos das regiões semi-áridas apresentam, geralmente, baixos estoques de carbono em decorrência, especialmente da limitada disponibilidade de água e reduzida produtividade primária, a principal fonte do carbono orgânico do solo. Condições extremas tornam as regiões semi-áridas um ecossistema frágil e com solos suscetíveis à degradação pelo manejo intensivo das terras, superpastoreio e uso do fogo. Estes solos têm uma cobertura global de > 60 milhões de km<sup>2</sup> (FAO, 2000) o que representa grande quantidade de áreas degradadas. Por outro lado, estratégias de manejo conservacionistas, que propiciem a melhoria da fertilidade do solo, o aumento da capacidade de retenção de umidade e a redução da erosão, podem recuperar estes solos e simultaneamente, aumentar seu potencial para seqüestro de carbono.

Há grande interesse em determinar o potencial de seqüestro de carbono em áreas sob

diferentes estratégias de manejo. Tiessen et al., (1998) revisaram dados de estoques de carbono e de biomassa em diferentes sistemas de manejo, especialmente em áreas de cerrado e caatinga, na África e no nordeste do Brasil. Os autores observaram que o seqüestro de carbono na região semi-árida depende do aumento na produção de culturas sob sistema de rotação adequado e diminuição do processo de queima da biomassa. O uso de fertilizantes também é necessário para melhorar a produtividade, no entanto, as condições socioeconômicas dos produtores impedem a adoção dessa prática, resultando, portanto, em ações limitadas para aumento dos estoques de carbono. Lal (2001) estimou para as regiões semi-áridas um potencial de sequestro de carbono de 0.4 a 0.6 Gt de carbono por ano, desde que, os solos erodidos e degradados fossem recuperados.

Farage et al. (2007), estudaram em solos de três regiões tropicais de clima semi-árido da África e América Latina, sob cultivo agrícola, o potencial de seqüestro de carbono utilizando os simuladores ROTH-C e CENTURY. As áreas sob estudo foram selecionadas para proporcionar ampla representação geográfica, contrastando clima e precipitação, históricos de cultivo e diferentes práticas de manejo do solo. De forma geral, foram avaliados os seguintes sítios: a) Sudão, na Região de Bara, norte da Província de Kordofan, com vegetação nativa consistindo de campos de Savana com gramíneas e sistemas agrícolas baseados no cultivo de milho, sésamo e melancia, com uso exclusivo de enxadas e fogo para controle de espécies invasoras; b) Norte da Nigéria, Zona do Tumbau, com sistemas de integração lavoura-pecuária envolvendo o consórcio de leguminosas como o feijão-caupi, além do uso de compostos orgânicos e eventualmente, adubos inorgânicos; c) Argentina, Monte Redondo, Província de Tucuman, com sistemas de cultivo sob plantio direto e convencional sob rotação de culturas durante 7 anos, seguido de um período de 4 anos sob pastagem. Os modelos ROTH-C e CENTURY foram inicialmente parametrizados com base nos sistemas naturais predominantes e parametrizados com base nos cenários agrícolas existentes em cada um dos sítios selecionados, permitindo inferir sobre o potencial de seqüestro ou emissão de carbono em cada caso.

Houve diferenças substanciais na capacidade de estocar carbono, entre os sistemas adotados nos três sítios selecionados. Tais diferenças evidenciaram a possibilidade de se converter os solos de fontes, para potenciais drenos líquidos de carbono, a partir de pequenas alterações na

estrutura nos sistemas de cultivo atuais. Observou-se a possibilidade de se obter taxas anuais de seqüestro de carbono, variando de 0,08 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, com o simulador ROTH-C a até 0,17 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> com o simulador CENTURY, num horizonte de 50 anos (na Argentina, com aplicação de 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> de composto orgânico por cultivo e adubação verde em sistema de plantio direto) . As práticas mais efetivas para o acúmulo de carbono no solo foram, portanto, aquelas que maximizaram o aporte de matéria orgânica, particularmente por meio do uso de compostos orgânicos (0,09 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e da presença de árvores no ambiente (0,15 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), além da ausência de revolvimento do solo (0,04 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Estes valores estão de acordo com as taxas de seqüestro de carbono obtidas para as condições de lavouras de sequeiro obtidas em outros estudos. Tal fato, associado à grande área disponível para cultivo nas regiões semi-áridas, passíveis de terem seus sistemas melhorados, representa um potencial considerável de seqüestro de carbono em termos globais. O autor ainda sumarizou os dados obtidos nos três sítios cujas médias dos diferentes sistemas estão na Tabela 2.

**Tabela 2.** Comparação do efeito de práticas de manejo do solo, na média anual de seqüestro de carbono (Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) em solos de três agroecossistemas de regiões semi-áridas, no período de 50 anos (adaptado de Faregia et al., 2007).

Locais	Adição/mudança nas práticas em uso			
	Compostos orgânicos (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )		2 anos sob pousio com pastejo	Adubação química
	1,5	3		
Nigéria	0,026 r	0,052 r	0,004 r	-0,062 r
	0,026 c	0,122 c	0,01 c	-0,138 c
Argentina *	0,026 r	0,052 r	0 c	-0,122 r
	0,062 c	0,120 c	0,006 r	0,038 c
Sudão	0,018 r	0,039 r	-0,008 r	0,006 r
	0,028 c	0,050 c	0,004 c	0,017 c
Média	0,023 r	0,048 r	0,001 r	-0,059 r
	0,049 c	0,097 c	0,005 c	-0,053 c

Os termos “r” e “c” referem-se aos modelos ROTH-C e CENTURY, respectivamente.

\* Sistema de preparo convencional.

No Brasil, ainda são raros os trabalhos que visem determinar estoques de carbono em regiões semi-áridas, especialmente àqueles com uso de modelos de simulação. Em Petrolina, semi-árido pernambucano, conduziu-se um trabalho, com intuito de verificar as alterações nos estoques de carbono promovidas pelo processo de antropização no Bioma Caatinga. O estudo, realizado em 2009, avaliou o estoque de carbono orgânico total na Caatinga preservada, Caatinga alterada, pastagem com capim buffel e cultivo irrigado de mangueira, em um Argissolo Amarelo. O estoque de carbono do solo na Caatinga preservada foi significativamente superior aos demais sistemas de uso da terra até a profundidade de 10 cm. A Caatinga preservada, do estudo, possui uma área aproximada de 400 hectares. Essa área foi propriedade de pequenos agricultores que utilizavam as adjacências com agricultura de subsistência, por meio de cultivos de milho e feijão, assim como a criação de caprinos, ovinos e bovinos soltos na Caatinga. No ano de 1974, a área foi desapropriada e desde então, permaneceu cercada, sem haver intervenções antrópicas no seu ecossistema natural. A área de Caatinga alterada possui 76 hectares e foi desmatada no ano de 1983. O desmatamento foi realizado por meio de queimadas e roços. Após a retirada da mata nativa foi plantada uma coleção de algaroba (*Prosopis juliflora*). Para o trato cultural dessa área foram executados roços e capinas que se estenderam até o ano de 1989, com o abandono da área devido a coleção não ter se desenvolvido. Após este período a área foi abandonada contendo atualmente algumas árvores de algaroba e vegetação arbustiva. A área contendo capim Buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), possui 30 ha e foi implantada no ano de 1977, após a retirada da vegetação nativa da Caatinga. Nesta área nunca houve aplicação de corretivos e fertilizantes de solo, sendo conservada até hoje por meio de roços, realizados anualmente. A área irrigada com o cultivo de mangueira possui 1 ha e foi instalada em 2004. O desmatamento desta área ocorreu em 1998 e no período de 1999 a 2004 foi cultivada com culturas anuais. Para a profundidade de 10 a 20 cm a Caatinga preservada, a Caatinga alterada e o Buffel não diferem significativamente entre si, mas todos estes sistemas possuem um estoque de carbono orgânico total no solo superior ao sistema com mangueira (Tabela 3).

**Tabela 3.** Estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de uso da terra e profundidades de ARGISSOLO AMARELO Eutrófico latossólico textura média/argilosa, localizado em estações experimentais da Embrapa Semiárido, Petrolina – PE.

Profundidade	Caatinga	Caatinga	Buffel	Mangueira
	preservada	Alterada		
Carbono				
cm	----- Mg. ha <sup>-1</sup> -----			
0,0 - 2,5	4,54 a	2,20 bc	2,29 b	1,43 c
2,5 – 5,0	2,53 a	1,71 bc	1,87 b	1,22 c
5,0 – 7,5	1,99 a	1,61 ab	1,36 bc	1,01 c
7,5 – 10,0	1,71 a	1,51 a	1,31 a	0,85 b
10,0 – 15,0	2,48 a	2,82 a	2,26 a	1,33 b
15,0 – 20,0	2,23 a	2,41 a	1,82 a	1,08 b
0 – 20 cm	15,48	12,26	9,6	6,92

\*Médias seguidas por letras minúsculas distintas, na mesma linha, diferem pelo teste de Tukey(P≤ 0,05) (Giongo et al., 2010 dados não publicados)

O cultivo de mangueira diminuiu significativamente o estoque de carbono orgânico total em todas as profundidades (Tabela 3). As elevadas temperaturas e intensidade de insolação, características do clima semi-árido, associadas à alta disponibilidade de água, nos sistemas de cultivo da manga irrigada aumenta a entropia do sistema, favorecendo o estado de mínima energia e máxima desordem, implicando na redução do estoque de carbono.

Neste mesmo estudo, foram determinadas as taxas de seqüestro ou emissão de C-CO<sub>2</sub>, medidas e simuladas pelo CENTURY. Utilizou-se, para isso, a área de caatinga preservada, como referência, a profundidade de 0-20 cm e o fator de conversão para C-CO<sub>2</sub> de 3,67. Observou-se que houve emissões em todos os sistemas, variando-se de 0,43 (caatinga

alterada) a 6,28 (Mangueira)  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , indicando que nenhum dos manejos adotados tem sido eficiente em acumular carbono ao longo do tempo (Tabela 4). Valores muito maiores do sistema sob cultivo da Mangueira, estão associados ao curto espaço de tempo sob este manejo (6 anos), insuficiente ainda para contribuir com aporte significativo de biomassa, elevando como consequência, os estoques de carbono no solo.

Similar exercício foi realizado em São João do Piauí, semi-árido piauiense, na área experimental da Embrapa Meio-Norte, constando-se dos sistemas Caatinga preservada, sistema de produção de grãos (milho/feijão/sorgo) sob preparo convencional há 14 anos, sistema de produção consorciado de grãos com mamona, implementado há 10 anos e sistema de produção com fruteiras, especialmente mangueira, conduzido há 14 anos, todos sob irrigação. Observaram-se emissões de carbono nos sistemas com grãos e mangueira, neste caso, similar ao observado em Petrolina, embora, de menor magnitude, tanto para os valores medidos quanto para aqueles simulados. O manejo dessas áreas, após a remoção da floresta nativa, no final da década de 50 e o longo período subsequente, até meados da década de 90, com cultivo exclusivo de milho com baixas produtividades e sem aporte orgânico, contribuíram para este resultado. Por outro lado, o sistema de produção de grãos consorciado com a mamona, mesmo com histórico similar aos outros sistemas, promoveu aumento da biomassa vegetal da parte aérea e de raízes (dados não mostrados) implicando em aumento do teor de matéria orgânica e em taxas de seqüestro de carbono de 3,55 (medido) e 3,27  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (simulado) (Tabela 5).

**Tabela 4** Estimativa de taxa de seqüestro (+) e emissão de C-CO<sub>2</sub> ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) em Argissolo Amarelo medida e simulada pelo CENTURY sob diferentes sistemas de manejo, em Petrolina-PE (dados não publicados).

Sistemas	Taxa de seqüestro (+) / Emissão (-)	
	Medido	Simulado
Caatinga alterada	-0,43	-0,58
Buffel	-0,65	-0,78
Mangueira	-5,23	-6,28

**Tabela 5** Estoques de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e estimativa de taxa de sequestro (+) e emissão (-) de  $\text{C-CO}_2$  ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) em um Neossolo Flúvico medidos e simulados pelo CENTURY sob diferentes sistemas de manejo, em São João do Piauí-PI (dados não publicados).

Sistemas	Estoques de C		Taxa de sequestro (+) / Emissão $\text{C-CO}_2$ (-)	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado
Caatinga Preservada	26,80	22,57	-	-
Grãos	23,84	21,30	-0,77	-0,33
Grãos+Mamona	36,50	31,50	+3,55	+3,27
Mangueira	22,41	19,70	-1,15	-0,75

### Considerações Finais

A região semi-árida tem baixos estoques de carbono, em função especialmente da baixa produtividade primária líquida, o que em última análise, tem sido decisivo para aparecimento de processos de degradação do solo. Além disso, a substituição da floresta nativa para agricultura, utilizando-se corte e queima, tem incrementado esta degradação, diminuindo ainda mais estes estoques e contribuindo subsequentemente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Neste sentido, nestas regiões, práticas de manejo sustentáveis, como o uso do plantio direto e de culturas de coberturas, especialmente leguminosas e composto orgânico, podem aumentar a produtividade das culturas e também da biomassa e incrementar os estoques de matéria orgânica do solo, impactando significativamente no potencial de sequestro de carbono.

### Referências bibliográficas

FARAGE P., ARDÖ J., OLSSON L., RIENZI E., BALL A. AND PRETTY J. The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil & tillage research*, v. 94, p. 457-472, 2007

FAO. Land Resource potential and constraints at regional and country levels. World Soil Resources Report 90. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome. 2000

LAL, R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change*, v. 51, p. 35–72, 2001

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* v. 304. p. 1623 – 1627, 2004

LEITE, L.F.C. "Matéria orgânica do solo: funções, interações e manejo" in idem *Matéria orgânica e organismos do solo*. Teresina; EDUFPI, 2008. 220 p.

LEITE, L.F.C. DORAISWAMY, P.C.; CAUSARANO, H.J.; GOLLANY, H.T.; MILAK, S.; MENDONÇA, E.S. Modeling organic carbon dynamics under no-tillage and plowed systems in tropical soils of Brazil using CQESTR. *Soil Tillage & Research*. v.102, p. 118-125, 2009.

Smith, P.; Fang, C.; Dawson, J.; Moncrieff, J. 2008. Impact of Global Warming on Soil Organic Carbon. *Advances in Agronomy*, v. 97, p. 1-43, 2008

Tiessen H., Feller C., Sampaio E. V. S. B. and Garin P. Carbon sequestration and turnover in semiarid savannas and dry forest. *Climatic Change* v. 40, p. 105-117, 1998.

Trumper, K. Ravilious, C. Dickson, B. Carbon in Drylands: Desertification, Climate Change and Carbon Finance. A UNEP-UNDP-UNCCD Technical Note for Discussions at CRIC 7, Istanbul, Turkey - 03-14 November, 2008.