

Comissão 2.4 - Química do solo

DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NO RIO GRANDE DO SUL

Charlotte Wink⁽¹⁾, Dalvan José Reinert^{(2)*}, Carlos Gustavo Tornquist⁽³⁾ e Ivo Ribeiro Silva⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Mato Grosso, *Campus* Universitário de Sinop, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽⁴⁾ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: dalvan@ufsm.br

RESUMO

A expansão de plantações de eucalipto no sul do Brasil na última década, especialmente em áreas com campos naturais, potencialmente altera a dinâmica do carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo. Objetivou-se testar o modelo *Century 4.5* na simulação das mudanças de estoques de COT e NT na camada superficial (0,0-0,2 m) do solo, em povoamentos de *Eucalyptus* sp. com diferentes idades em três municípios no RS. Áreas adjacentes com campos naturais foram usadas para estimar os estoques originais de COT e NT desses locais. O modelo *Century 4.5* apresentou bom ajuste na simulação do estoque de COT no solo, com valores similares entre os simulados e observados, podendo ser empregado na simulação da dinâmica da matéria orgânica no campo natural e nas plantações de eucalipto dos diferentes locais estudados. Para o estoque de NT do solo, mesmo com as alterações de parâmetros, o modelo *Century 4.5* não conseguiu simular esse estoque do solo com eficácia e acurácia estatística aceitável.

Palavras-chave: matéria orgânica do solo, modelo *Century*, silvicultura.

Recebido para publicação em 3 de abril de 2014 e aprovado em 6 de julho de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbc20140182

ABSTRACT: CARBON AND NITROGEN DYNAMICS UNDER EUCALYPTUS PLANTATIONS IN SOUTHERN BRAZIL

The expansion of eucalyptus plantations in southern Brazil, especially over regions with natural grasslands, which occurred in the last decade potentially changes total organic carbon and nitrogen in soil. The aim of this study was to test the Century model 4.5 in the simulation of changes in inventories of TOC and TN in the surface layer (0.0-0.2 m) soil in *Eucalyptus* sp. com different ages in three municipalities in Rio Grande do Sul State, Brazil. Areas adjacent to grasslands were used to estimate the original stocks of TOC and TN these sites. The Century model 4.5 showed a good adjustment in the simulation of the soil TOC stock, with similar values of simulated and observed, and can be used to simulate organic matter dynamics in pasture and in eucalyptus plantations. Even with changes of parameters, the model failed to simulate the TN stocks with acceptable statistical accuracy and efficiency.

Keywords: soil organic matter, Century model, silviculture.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, no Brasil, a expansão das áreas produtivas com plantações de espécies exóticas tem ganhado interesse, impulsionando o diversificado mercado florestal nacional. O gênero *Eucalyptus*, por seu rápido desenvolvimento, sua adaptação às variadas condições edafoclimáticas e sua ampla utilização associada aos fatores favoráveis à silvicultura em larga escala, tem motivado a implantação desses cultivos florestais em áreas de campo (Pillon et al., 2008). Nos últimos cinco anos, as espécies desse gênero apresentaram área produtiva superior a 4,0 milhões de hectares, representando crescimento de 2,5 % em relação a 2010 (Abraf, 2011).

A conversão de áreas nativas em cultivadas, principalmente com plantios de espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* em campos naturais no sul do Brasil, e o impacto sobre a dinâmica da matéria orgânica (MO) têm provocado interesse científico quanto às potenciais alterações na dinâmica do carbono orgânico total (COT) e do nitrogênio total (NT) do solo. O potencial de incremento de C no solo das plantações ocorre pelo constante aporte de serapilheira e reciclagem radicular, que regula os níveis de MO (Barreto et al., 2008), uma vez que a biomassa será provavelmente removida no final do ciclo de cultivo (seis a oito anos). No entanto, essas mudanças podem provocar a degradação do solo em razão das alterações no aporte orgânico, como verificado em monocultivos de eucalipto implantados em pradarias no Uruguai (Céspedes-Payret et al., 2012).

Para representar a complexidade dessa dinâmica, utilizam-se atualmente os modelos de simulação como o RothC e o Century. O “Modelo Century de Matéria Orgânica do Solo” permite simular os ciclos biogeoquímicos do C, N, P e S, bem como da água em ecossistemas naturais e cultivados (NREL, 2013), avaliando as mudanças de uso e o manejo de solos (Smith et al., 1997). É o modelo mais utilizado no estudo da dinâmica

do COT (Parton et al., 1987; Metherell et al., 1993). No Brasil, muitas aplicações do modelo já foram realizadas em ambientes agrícolas (Leite et al., 2004; Oliveira, 2005; Lopes et al., 2008; Tornquist et al., 2009; Lopes et al., 2010) e em florestas nativas (Amazônia), convertidas em áreas de pastagens com gramíneas exóticas, como a *Brachiaria* sp. (Cerri et al., 2004; 2007a,b).

Na conversão de áreas nativas em plantações comerciais de eucalipto, o emprego do modelo Century na simulação do estoque de C é mais restrito, como retratado por Lima et al. (2011), em Minas Gerais. Portanto, pela abrangência científica do emprego do modelo em diferentes cenários cultivados no Brasil e expansão do mercado florestal, constatou-se uma carência de dados conclusivos sobre a dinâmica do C e N nas diferentes regiões do país, o que reafirma o interesse e a necessidade em quantificar melhor esses estoques associados a plantios comerciais de *Eucalyptus* no contexto do bioma Pampa, carecendo do ajustamento do modelo a essa realidade.

Nesse contexto, o objetivo foi avaliar a dinâmica do COT e NT em solos com plantações de *Eucalyptus* sp., no RS, utilizando o modelo Century 4.5.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado nos municípios de Manoel Viana (29° 34' S e 55° 35' W), Santa Maria (29° 30' S e 54° 15' W), na região da Depressão Central, e Triunfo (29° 56' S e 51° 43' W), na região da Serra do Sudeste, no Estado do Rio Grande do Sul. O clima das regiões é do tipo Cfa - Clima Subtropical Úmido, pela classificação de Köppen (Moreno, 1961). A região da Depressão Central apresenta temperatura média anual de 19,4 °C e precipitação pluvial anual em torno de 1.300 a 1.800 mm. A região da Serra do Sudeste

Quadro 1. Áreas amostrais de campo natural e plantações de eucalipto em diferentes localidades no Rio Grande do Sul

Uso	Sigla	Idade	Espaçamento (área)	Solo ⁽¹⁾	Local
		mês			
<i>Eucalyptus saligna</i>	Euc20	20	3 × 2 m (0,72 ha)	PVad	Santa Maria
<i>Eucalyptus grandis</i>	Euc44	44	3 × 1,5 m (0,225 ha)	PVad	Santa Maria
Campo natural	CN _{SM}	-	-	PVad	Santa Maria
<i>Eucalyptus</i> sp.	Euc180	180	2 × 1 m	PVd	Manoel Viana
<i>Eucalyptus</i> sp.	Euc240	240	3 × 2 m	PVd	Manoel Viana
Campo natural	CN _{MV}	-	-	PVd	Manoel Viana
<i>Eucalyptus grandis</i>	Euc120	120	-	PV	Triunfo
<i>Eucalyptus grandis</i>	Euc156	156	-	PV	Triunfo
Campo natural	CN _{Tr}	-	-	PV	Triunfo

⁽¹⁾ PVad: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico; PVd: Argissolo Vermelho Distrófico; e PV: Argissolo Vermelho.

apresenta temperatura média anual de 16,5 °C e precipitação pluvial anual em torno de 1.300 a 1.800 mm (Maluf, 2000). Foram avaliadas áreas de campo natural e plantações de *Eucalyptus* sp., descritas no quadro 1.

A plantação de *Eucalyptus saligna* Smith (20 meses) e a de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (44 meses) estão localizadas na Fepagro Florestas (Santa Maria), não recebendo desbaste ou desrama (Wink, 2013). O campo natural de Santa Maria (CN_{SM}) não recebeu qualquer tipo de manejo; no entanto, segundo Abrão et al. (1988), esse campo natural apresenta predomínio de espécies rizomatosas-estoloníferas de baixo porte, do gênero *Paspalum*, *Axonopus*, *Andropogon*, *Panicum* e *Aristida*, ou a incidência de espécies semiarbusculares, como vassouras do gênero *Baccharis*, *Sennecio* e *Aristida*. As plantações de *Eucalyptus* sp. (180 e 240 meses), localizadas em Manoel Viana, são de propriedade particular. O campo natural de Manoel Viana (CN_{MV}) recebe o pastejo bovino anualmente (Rosa, 2010). As plantações clonais comerciais de *Eucalyptus grandis* (120 e 156 meses), localizadas em Triunfo, no horto florestal de Colorado (Soares, 2009), tendo como vegetação de referência o campo natural (CN_{Tr}).

Inicialização, calibração e validação do modelo *Century*

O modelo *Century* foi desenvolvido e tem sido utilizado na simulação do COT até 0,20 m de profundidade, uma vez que o mesmo, segundo Metherell et al (1993), não simula a matéria orgânica em profundidade no solo e a alteração do parâmetro de profundidade não gera muito impacto sobre o modelo.

Na inicialização, utilizaram-se como variáveis de entrada os dados de clima, solo e planta, respectivamente para cada local. Para caracterizar o clima, utilizaram-se valores médios mensais de precipitação pluvial mensal (mm) e temperatura máxima e mínima (°C) de 1980 a 2010, em Santa Maria e Manoel Viana, e de 1998 a 2010, em

Triunfo, obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e ao Centro de Meteorologia aplicada da Fepagro. Para o solo, consideraram-se a granulometria, a densidade, o pH, o COT e o NT, sendo os estoques calculados em massa de solo equivalente, conforme Ellert e Bettany (1995). A capacidade de campo e o ponto de murcha de permanente foram estimados por Saxton et al. (1986) (Quadro 2). Para os dados de planta, utilizaram-se os valores originais do modelo, alterados a cada nova simulação.

A calibração é a etapa do ajustamento do modelo para que se tenha a coerência dos valores observados aos simulados de COT e NT, no campo natural e nas plantações de eucalipto. Inicialmente, o modelo foi executado por 3.000 anos (execução de equilíbrio), na condição original de cada campo natural (CN_{SM}, CN_{MV} e CN_{Tr}). Ao final, os estoques de COT e NT observados e simulados a 0,0-0,2 m foram comparados entre si. Na similaridade entre esses valores, procedeu-se à calibração das plantações de eucalipto com 44, 156 e 240 meses.

Os cenários das plantações de eucalipto utilizados nas simulações e na reconstituição, com base no histórico de uso e manejo realizado nos diferentes locais, estão representados no quadro 3. Na calibração, alteraram-se os valores de alguns parâmetros fixos das culturas, das árvores e dos parâmetros de cultivo (Quadro 4) (Wink, 2013).

O estoque de C na biomassa total nas plantações de eucalipto foi determinado pela soma do estoque de C acima (aérea) e abaixo (raízes) do solo. O estoque de C nas raízes foi estimado, considerando que a adição de matéria seca pelas raízes fosse de 20 % da biomassa total acima do solo (Gonçalves e Mello, 2000; Schumacher e Caldeira, 2004).

A validação do modelo foi realizada com dados de outras plantações de eucalipto (Euc20, Euc120 e Euc180), situadas nos mesmos locais, mas independentes dos utilizados na etapa de calibração.

Quadro 2. Propriedades dos solos, na profundidade de 0,0-0,2 m, utilizadas nas simulações com o modelo Century 4.5

Uso do solo ⁽¹⁾	Areia total	Silte	Argila	Ds ⁽²⁾	pH(H ₂ O)	CC ⁽³⁾	PMP ⁽⁴⁾	COT ⁽⁵⁾	NT ⁽⁶⁾
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³		Mg ha ⁻¹	
Euc20	661,9	201,4	136,7	1,48	4,87	0,22	0,09	31,89	2,84
Euc44	651,8	181,6	166,7	1,57	4,40	0,23	0,10	27,50	2,60
CN _{SM}	664,6	162,3	173,1	1,48	4,91	0,23	0,10	30,82	2,62
Euc180	603,7	209,3	186,9	1,57	4,50	0,24	0,11	33,26	2,83
Euc240	602,7	177,1	220,2	1,57	4,28	0,25	0,12	32,92	2,69
CN _{MV}	635,6	192,7	171,7	1,49	5,18	0,23	0,10	35,43	3,62
Euc120	475,9	160,4	363,7	0,85	4,40*	0,33	0,17	33,93	2,23
Euc156	444,5	186,4	369,1	0,73	4,45*	0,35	0,19	29,80	2,04
CN _{Tr}	433,6	152,5	413,9	0,93	4,59*	0,36	0,19	32,49	2,38

⁽¹⁾ CN_{SM}, CN_{MV} e CN_{Tr}: campo natural de Santa Maria, Manoel Viana e Triunfo, RS, respectivamente; Euc20: *Eucalyptus saligna*, com 20 meses; Euc44: *E. grandis*, com 44 meses; Euc180: *E. sp.*, com 180 meses; Euc240: *E. sp.*, com 240 meses; Euc120: *E. grandis*, com 120 meses; e Euc156: *E. grandis*, com 156 meses. ⁽²⁾ Ds: densidade do solo. ⁽³⁾ CC: capacidade de campo. ⁽⁴⁾ PMP: ponto de murcha permanente. ⁽⁵⁾ COT: carbono orgânico total. ⁽⁶⁾ NT: nitrogênio total. *: valores considerados a 0,0-0,1 m.

Quadro 3. Cenário das plantações de eucalipto com 20 (Euc20), 44 (Euc44), 120 (Euc120), 156 (Euc156), 180 (Euc180) e 240 (Euc240) meses, no RS, utilizadas nas simulações com o modelo Century 4.5

Cenário (período) ⁽¹⁾	Descrição
Euc20 (2006 a 2008)	Roçada mecânica em toda área; e preparo do solo: escarificação com escarificador de uma haste inclinada do tipo “jumbo” e passagem de grade niveladora ou grade de disco <i>off-set</i> ou em “V”
Euc44 (2004 a 2008)	Roçada mecânica em toda área; e preparo do solo com rotativa a 0,15 m de profundidade, somente na linha de plantio
Euc120 (1995 a 2005)	Preparo do solo: cultivo mínimo; e nunca foram cortados
Euc156 (1992 a 2005)	Preparo do solo: cultivo mínimo; e nunca foram cortados
Euc180 (1993 a 2008)	Preparo do solo: cultivo mínimo; e recebeu intervenção de desbaste
Euc240 (1988 a 2008)	Preparo do solo: cultivo mínimo; e recebeu intervenção de desbaste

⁽¹⁾ Euc20: *Eucalyptus saligna*, com 20 meses; Euc44: *E. grandis*, com 44 meses; Euc180: *E. sp.*, com 180 meses; Euc240: *E. sp.*, com 240 meses; Euc120: *E. grandis*, com 120 meses; e Euc156: *E. grandis*, com 156 meses.

Análise das simulações

A *performance* do modelo foi avaliada pelas variáveis COT e NT, utilizando a análise de falta de ajuste (LOFIT), a raiz quadrada do erro médio (RQEM) e o coeficiente de correlação entre valores simulados e observados (Smith et al., 1997). O estoque de carbono na biomassa total, na madeira sem casca e nas folhas simulados pelo modelo também foram comparados aos valores observados, considerando a amplitude de até dois desvios em relação à média dos valores observados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do modelo Century 4.5

Na simulação de equilíbrio, o estoque de C da biomassa aérea do campo, durante uma estação de crescimento (setembro a agosto), foi de 3 a 4 Mg ha⁻¹. O C simulado na biomassa aérea do campo foi similar

ao campo natural de Santa Maria no mês (fevereiro-março) de pico máximo da produção (2,8 Mg ha⁻¹). O C simulado na biomassa subsuperficial foi três a quatro vezes superior ao C na parte aérea de campos sulinos, conforme relatado por Fidelis et al. (2009). Para o campo limpo e campo sujo, no cerrado brasileiro, Batlle-Bayer et al. (2010) também registraram um estoque de C na biomassa abaixo do solo, em média, três vezes superior a biomassa acima do solo.

A adição anual de C do campo natural de Manoel Viana foi superior à adição de 8,66 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, estimada por Weber (2010). No campo natural de Santa Maria, essa foi superior à adição estimada por Oliveira (2005), de 6,89 Mg ha⁻¹ ano⁻¹; e a ao campo natural de Triunfo, superior à adição de 5,99 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, estimada por Fernandes (2002). No entanto, os valores simulados neste estudo são similares aos valores calculados a partir da taxa de crescimento da massa seca de pastagens naturais sob diferentes níveis de pressão de pastejo (1,8 a 7,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), representativos para a região da Depressão Central do RS (Escosteguy, 1990).

Quadro 4. Valores originais e alterados de alguns parâmetros da cultura, das árvores, dos parâmetros fixos e de cultivo do campo natural e dos plantios de eucalipto, no RS

Parâmetro da cultura			
Tratamento ⁽¹⁾	Parâmetro	Valor original	Valor utilizado
CN _{SM}	<i>prdx (1)</i>	0,50	0,50
CN _{MV}	<i>prdx (1)</i>	0,50	0,49
CN _{Tr}	<i>prdx (1)</i>	0,50	0,41
Parâmetro da árvore			
Euc44, Euc156 e Euc240	<i>ffrac (1,1)</i>	0,25	0,20
	<i>ffrac (2,1)</i>	0,30	0,35
	<i>ffrac (3,2)</i>	0,10	0,05
	<i>tfrten (1)</i>	0,35	0,60
	<i>tfrten (2)</i>	0,25	0,40
	<i>tfrtcw (1)</i>	0,35	0,60
	<i>tfrtcw (2)</i>	0,25	0,40
	<i>maxlai</i>	2,50	4,00
	<i>forrtf (1)</i>	0,50	0,30
	<i>swold</i>	0,00	4,00
Euc44 e Euc240	<i>wdlig (2)</i>	0,28	0,30
	<i>prdx (2)</i>	0,50	7,00
Euc156	<i>ffrac (1,2)</i>	0,25	0,20
	<i>ffrac (2,2)</i>	0,30	0,35
	<i>prdx (2)</i>	0,50	6,00
	<i>ffrac (1,2)</i>	0,25	0,02
Euc156	<i>ffrac (2,2)</i>	0,30	0,09
	<i>ffrac (4,2)</i>	0,30	0,79
	Parâmetro fixo		
CN _{MV}	<i>varat2 (1,1)</i>	12	8
	<i>varat3 (1,1)</i>	6	3
CN _{Tr}	<i>varat2 (1,1)</i>	12	19
	<i>varat3 (1,1)</i>	6	13
Euc156	<i>varat2 (1,1)</i>	12	19
	<i>varat3 (1,1)</i>	6	13
Euc240	<i>varat2 (1,1)</i>	12	15
	<i>varat3 (1,1)</i>	6	9
Parâmetro de cultivo			
Preparo do solo	Parâmetro	Valor original	Valor utilizado
Cultivo mínimo (Chisel plow2)*	<i>cultra (1)</i>	0,50	0,90
	<i>cultra (2)</i>	0,30	0,10
	<i>cultra (3)</i>	0,40	0,20
	<i>cultra (4)</i>	0,30	0,10
	<i>cultra (5)</i>	0,30	0,20
	<i>cultra (7)</i>	0,70	0,25

CN_{SM}, CN_{MV} e CN_{Tr}: campo natural de Santa Maria, Manoel Viana e Triunfo, RS, respectivamente; Euc 44: *E. grandis*, com 44 meses; Euc156: *E. grandis*, com 156 meses; e Euc240: *E. sp.*, com 240 meses. * Somente para Triunfo, RS.

O estoque de COT do solo simulado foi coerente aos dados observados nos diferentes campos naturais, em razão da alteração do parâmetro de cultura, como o *prdx*. Para o estoque de NT, no campo natural de Manoel Viana e Triunfo, foram alterados parâmetros fixos relacionados à máxima relação C:N do material que entra no compartimento passivo e lento da matéria orgânica. Para o campo natural de Santa Maria, não se realizou a alteração desses parâmetros, uma vez que o modelo obteve boa estimativa para o NT.

Na calibração das plantações de eucalipto, o estoque de C na biomassa total e na madeira, simulado pelo modelo, foi similar aos valores observados quando avaliado pela amplitude de até dois desvios-padrão em relação à média dos valores observados. A exceção ocorreu para o estoque de C nas folhas nas plantações senis (Euc156 e Euc240), em que as estimativas do modelo ficaram superestimadas, em relação aos dados observados, mesmo com a alteração nos parâmetros das florestas (Figura 1).

Entretanto, o teste F para a significância do LOFIT na calibração do modelo indicou que o erro total dos valores simulados para o estoque de C na biomassa total, na madeira (sem casca) e nas folhas é significativamente menor que o erro inerente aos valores observados nas plantações de eucalipto (Euc44, Euc156 e Euc240), indicando que os valores simulados não diferiram dos valores observados. Para a RQEM, o estoque de C simulado na biomassa total e nos compartimentos dessa biomassa nas plantações de eucalipto se encontra no intervalo de confiança aceitável (RQME_{95%}). Isso demonstra que as modificações dos parâmetros fixos e das árvores do modelo *Century* 4.5 foram condizentes à estimativa do C nos compartimentos da biomassa florestal, nos locais de estudo.

O estoque de COT do solo simulado na calibração dessas plantações florestais tende a ser similar aos dados observados (Quadro 5).

Esses resultados foram possíveis pela aceitação dos novos valores de “*prdx2*”, que foram de 7,0, para o Euc44 e Euc240; e de 6,0, para o Euc156. Além disso, especialmente na plantação de eucalipto Euc156, alteraram-se parâmetros relacionados às frações de C nos diferentes compartimentos (“*ffrac*.**”). Para isso, considerou-se que 79 % desse estoque se concentravam no tronco (madeira e casca); 4 % na copa (folhas e galhos); e 17 % nas raízes. Esses valores também são similares aos reportados por Gatto et al. (2011), de que no mínimo, 65 % do C está na madeira, 13 % na copa e 22 % nas raízes. Para as plantações de eucalipto Euc44 e Euc240, foram feitas pequenas alterações desses parâmetros, uma vez que o estoque de C simulado foi coerente aos dados observados. O índice de área foliar na floresta madura (“*maxlai*”) foi alterado para 4,0. Esse valor é superior à média de 2,86 (variação de 1,7 a 4,3) de plantações de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* com sete anos, registradas por Xavier et al. (2002) no Espírito Santo, e superior ao índice de área foliar média (2,55), reportada por Viera et al. (2013) em plantações de *E. urophylla* × *E. globulus* com 10 anos, em espaçamento 3,5 × 2,5 m, em Eldorado do Sul, RS. Entretanto, esse valor é similar à variação de 2,7 a 4,6, obtida para o *E. urograndis* com 18 anos, observado por Viera (2007). Nas plantações de eucalipto localizadas em Triunfo, também foram modificados os parâmetros relativos ao cultivo mínimo do solo (*CULT.100*), objetivando reduzir as perdas de matéria orgânica e C pelo preparo do solo. Contudo, mesmo alterando os parâmetros que envolvem a entrada de material orgânico nos compartimentos lento e passivo [*varat2(1,1)* e *varat3(1,1)*], o valor do estoque de NT do solo simulado foi superior aos valores observados. Especialmente para o Euc156, realizando alterações no valor dos parâmetros, o valor simulado para o estoque de NT visualmente foi insignificante. Desse modo, sugere-se o desenvolvimento de outros estudos de investigação da dinâmica de NT em solos com plantações de eucalipto.

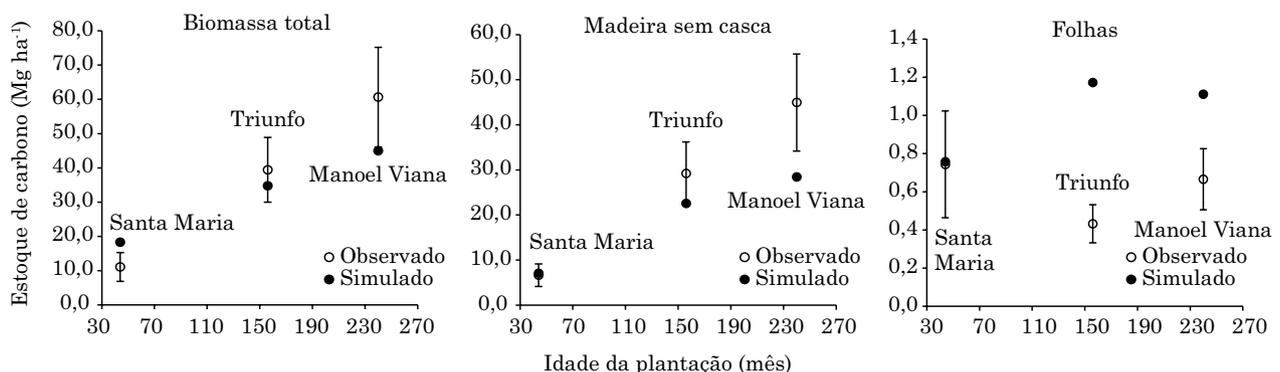


Figura 1. Estoque de carbono observado e simulado durante a calibração do Modelo *Century* 4.5: na biomassa total (acima e abaixo do solo); na madeira sem casca; e nas folhas das plantações de eucalipto de Santa Maria (Euc44), Triunfo (Euc156) e de Manoel Viana (Euc240), RS. Barras verticais: desvio-padrão em relação à média dos valores observados.

Os resultados estatísticos do teste F para a significância do LOFIT na calibração do modelo, mostraram que o erro total dos valores simulados para os estoques de COT e NT do solo, no campo natural e nas plantações de eucalipto, são significativamente menores que o erro inerente aos valores observados, indicando que os valores simulados não diferem dos valores observados. Para a RQEM, pode-se afirmar que o estoque de COT simulado se encontra no intervalo de confiança aceitável (RQME₉₅ %), tanto para o campo natural quanto para as plantações de eucalipto. Isso indica que as modificações realizadas nos parâmetros fixos do modelo e das árvores foram condizentes na estimativa do C nos compartimentos da biomassa florestal, bem como com a dinâmica do C do solo, nos diferentes locais. Para o estoque de NT, encontraram-se resultados do RQEM diferenciados. Pelos resultados, os estoques de NT do solo simulado nas plantações de eucalipto não se encontraram dentro do intervalo de confiança aceitável (RQME₉₅ %). Apenas a estimativa do NT do solo nos campos natural pode ser considerada adequada.

A correlação dos dados simulados durante a calibração do modelo Century 4.5 aos dados observados foi boa para o estoque de COT do solo no campo nativo (1,00) e nas plantações de eucalipto (0,84). O campo nativo apresentou boa correlação para o estoque de NT do solo (0,96). O peculiar a ser destacado é a obtenção de uma correlação negativa para o estoque do NT do solo (-0,26) na calibração das plantações de eucalipto. No modelo *Century*, a disponibilidade de N é influenciada pela qualidade do *litter*, taxa de decomposição, quantidade de N imobilizada e entrada externa de N, incluindo a deposição atmosférica, fixação biológica e fertilização. Desse modo, sua disponibilidade interfere a produção de plantas, que regula a entrada de C no sistema, de acordo com a máxima relação C:N

(Peltoniemi et al., 2007). Assim, o valor registrado em plantações jovens pode ser explicado pelos teores de compostos de fácil degradação e menores, aos de difícil degradação. As plantas mais jovens possuem baixo teor de lignina, com pouca contribuição ao acúmulo de matéria orgânica, liberando o N, em um prazo bem menor (Gonçalves et al., 2002).

Validação do modelo *Century 4.5*

Na validação do modelo, a estimativa do estoque de C na biomassa total (Figura 2) nas plantações de eucalipto senis (Euc120 e Euc180) foi coerente aos dados observados considerando a amplitude de variação aceitável de até dois desvios-padrão em relação à média dos valores observados.

No entanto, o modelo apresentou sensibilidade para estimar o estoque de C na biomassa total em plantações com menos de 10 anos de idade e nos diferentes compartimentos da biomassa, nas diferentes plantações, como exemplo, na madeira sem casca em plantações jovens (Euc20) e nas folhas em plantações senis (Euc120 e Euc156).

Entretanto, o teste F para a significância do LOFIT na validação do modelo indicou que o erro total dos valores simulados para o estoque de C na biomassa total, na madeira (sem casca) e nas folhas nas plantações de eucalipto (Euc20, Euc120 e Euc180) é significativamente menor que o erro inerente aos valores observados, ou seja, os valores simulados não diferem dos valores observados. Para a RQEM, o estoque de C simulado na biomassa total e nos compartimentos das plantações de eucalipto (Euc20, Euc120 e Euc156) se encontra no intervalo de confiança aceitável (RQME₉₅ %). Esses resultados estatísticos demonstraram que as modificações realizadas nos parâmetros fixos e das árvores do modelo *Century 4.5* foram condizentes à dinâmica do C nos compartimentos

Quadro 5. Estoque de carbono orgânico total (COT) e do nitrogênio total (NT) observado e simulado a 0,0-0,20 m de profundidade do solo, nas plantações de eucalipto de Santa Maria (Euc44, Euc20), Manoel Viana (Euc240, Euc180) e Triunfo (Euc156, Euc120), no RS, durante a calibração e validação do Modelo *Century 4.5*

Valor	Calibração					
	<i>E. grandis</i> , 44 meses (Euc44)		<i>E. saligna</i> , 156 meses (Euc156)		<i>E. sp.</i> , 240 meses (Euc240)	
	COT	NT	COT	NT	COT	NT
	Mg ha ⁻¹					
Simulado	27,03	3,02	31,79	3,47	32,04	3,54
Observado	27,50	2,60	29,80	2,04	32,92	2,69
	<i>E. grandis</i> , 20 meses (Euc20)		<i>E. saligna</i> , 120 meses (Euc120)		<i>E. sp.</i> , 180 meses (Euc180)	
	COT	NT	COT	NT	COT	NT
	Mg ha ⁻¹					
Simulado	27,70	3,00	31,00	3,44	31,33	3,47
Observado	31,89	2,84	33,93	2,23	33,26	2,83

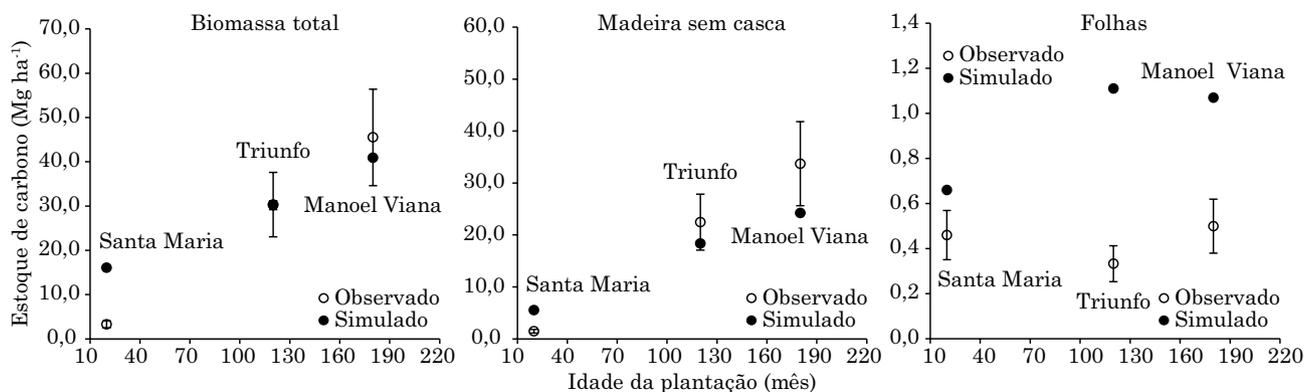


Figura 2. Estoque de carbono observado e simulado durante a validação do Modelo *Century 4.5*: na biomassa total (acima e abaixo do solo); na madeira sem casca; e nas folhas das plantações de eucalipto de Santa Maria (Euc20), Triunfo (Euc120) e Manoel Viana (Euc180), RS. Barras verticais: desvio-padrão em relação à média dos valores observados.

da biomassa florestal dos diferentes locais de estudo, refletindo que o modelo conseguiu de certo modo captar o crescimento das árvores. Portanto, avaliar a estimativa do estoque de C na biomassa das plantações de eucalipto depende da escolha do método estatístico utilizado para essa comparação, uma vez que o modelo *Century 4.5* apresentou sensibilidade para estimar esse estoque na biomassa total em plantações com menos de 10 anos de idade. Isso comprova que o emprego do modelo melhor representa as mudanças de uso do solo no período de décadas. Essa sensibilidade de certo modo também foi observada na estimativa do estoque de C nos compartimentos individuais, especialmente madeira e folhas, nas diferentes idades das plantações.

O estoque simulado de COT do solo na validação do modelo foi visualmente similar aos dados observados nas plantações de eucalipto (Euc20, Euc120 e Euc180) (Quadro 5). Para o estoque simulado de NT do solo, não foi possível obter um bom ajustamento apenas na plantação Euc120. Isso provavelmente está associado aos resultados obtidos na parametrização da plantação de eucalipto Euc156, a qual é utilizada como base para o ajustamento desse local. Assim, sugere-se que novos ensaios no monitoramento da dinâmica do estoque de NT do solo sejam realizados nesse local, a fim de melhorar o ajustamento do modelo *Century 4.5* para emprego nas estimativas do impacto das plantações de eucalipto.

Considerando os resultados estatísticos relacionados à validação do modelo, pode-se verificar pelo teste F, para a significância do LOFIT, que o erro total dos valores simulados para o estoque de COT e NT do solo nas plantações de eucalipto foram significativamente menores que o erro inerente aos valores observados. Os valores simulados não diferiram dos valores observados, indicando que o modelo pode ser empregado para avaliar o estoque desses elementos em plantações de eucalipto. Para a RQEM, pode-se afirmar que o estoque de COT do solo simulado se encontra dentro do intervalo

de confiança aceitável (RQME_{95%}) para as plantações de eucalipto. Lima et al. (2011) também registraram uma boa estimativa para os valores simulados aos observados do estoque de COT no solo em plantações de eucalipto pelo modelo *Century 4.0*, em Minas Gerais.

Para o estoque simulado de NT do solo nas plantações de eucalipto durante a validação do modelo, segundo os resultados do RQEM, esse não se encontra dentro do intervalo de confiança aceitável (RQME_{95%}). Isso já era esperado, uma vez que os resultados estatísticos obtidos na estimativa do estoque de NT durante a calibração do modelo nas plantações de eucalipto não foram diferentes. Desse modo, reafirma-se a necessidade de um monitoramento temporal do NT em solos cultivados com plantações de eucalipto, uma vez que o ciclo do N é de maior complexidade, contemplando processos dinâmicos e influenciados por diversos fatores, que muitas vezes não conseguem ser completamente elucidados em termos matemáticos. De acordo com Weber (2010), isso pode estar associado à sensibilidade do N frente à qualidade do resíduo adicionado ao solo e dos seus processos serem dependentes dos microrganismos do solo, não reportados pela modelagem, o que justificaria a razão pela qual a maioria dos trabalhos de estudos da dinâmica da matéria orgânica do solo só contemple as simulações do estoque de C no solo. Entretanto, Chiti et al. (2010) registraram ajuste para o estoque de NT do solo nas simulações com o modelo *Century 4.5*, em florestas mediterrâneas e montanhosas na Itália.

Quanto à correlação, nas plantações de eucalipto, observou-se significância apenas para o estoque de COT do solo (1,00) durante a validação do modelo. Valores positivos de coeficiente de correlação entre dados simulados e observados, no emprego do modelo *Century* também foram registrados em cronosequência na Amazônia, quando da substituição

da floresta nativa por pastagem (Cerri et al., 2007a). Para esses autores, o modelo pode ser utilizado para simulações de pastagens no trópico e nas regiões temperadas, enfatizando que é necessário avaliar as diferenças de mudanças da matéria orgânica do solo em razão das características peculiares de cada local.

Para o estoque simulado de NT do solo nas plantações de eucalipto, obteve-se uma correlação negativa (-0,45) na validação do modelo comparado aos resultados observados. As particularidades identificadas nas simulações do estoque de NT do solo indicaram uma melhor investigação, ou seja, mais estudos no que diz respeito à compreensão dos fenômenos relacionados à dinâmica do N ou revisão mais detalhada do modelo confrontado à parametrização e validação nesse tipo de plantio florestal.

CONCLUSÃO

O modelo *Century* 4.5 foi eficiente na simulação do estoque de carbono orgânico total, na camada de 0,0-0,2 m, quando comparado aos dados observados, podendo assim ser recomendado para simular a dinâmica da matéria orgânica das diferentes plantações de eucalipto avaliadas. No entanto, mesmo com a alteração de alguns parâmetros, o modelo não conseguiu estimar valores aceitáveis para o estoque de nitrogênio total, quando comparado aos dados observados nessas mesmas plantações florestais.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante o doutorado no Brasil. À CAPES, pelo apoio financeiro na realização do doutorado-sanduíche. Às Dr^a Suzana Ferreira da Rosa e Dr^a Emanuelle Soares, por cederem os dados de solo referente aos plantios florestais avaliados nos municípios de Manoel Viana e Triunfo, RS, respectivamente.

REFERÊNCIAS

Abrão PUR, Gianluppi D, Azolim MAD. Levantamento semidetalhado dos solos da estação experimental de silvicultura de Santa Maria. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas de Recursos Naturais Renováveis; 1988. (Publicação IPRNR, 21).

Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - Abraf. Anuário Estatístico da Abraf 2012 ano base 2011. Brasília, DF: 2011.

Barreto PAB, Gama-Rodrigues EF, Gama-Rodrigues AC, Barros NF, Fonseca S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em sequência de idades. R Bras Ci Solo. 2008;32:611-9.

Battle-Bayer L, Batjes NH, Bindraban OS. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: a review. Agric Ecosyst Environ. 2010;137:47-58.

Cerri CEP, Easter M, Paustian K, Killian K, Coleman K, Bernoux M, Fallon P, Powlson DS, Batjes N, Milne E, Cerri CC. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequence from the Brazilian Amazon with Roth C and Century models. Agric Ecosyst Environ. 2007a;122:46-57.

Cerri CEP, Easter M, Pasutian K, Killian K, Coleman K, Bernoux M, Fallon P, Powlson DS, Batjes NH, Milne E, Cerri CC. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. Agric Ecosyst Environ. 2007b;122:58-72.

Cerri CEP, Paustian K, Melillo JM, Cerri CC. Modeling changes in soil organic matter Amazon forest to pasture conversion with the Century model. Global Change Biol. 2004;10:815-32.

Céspedes-Payret C, Piñero G, Gutiérrez O, Panario D. Land use change in temperate grassland soil: afforestation effects on chemical properties and their ecological and mineral implications. Sci Total Environ. 2012;438:549-57.

Chiti T, Papale D, Smith P, Dalmonech D, Matteucci G, Yeluripati J, Rodeghiero M, Valentini R. Predicting changes in soil organic carbon in Mediterranean and alpine forests during the Kyoto Protocol commitment periods using the Century model. Soil Use Manage. 2010;26:475-84.

Ellert BH, Bettany JR. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting managements regimes. Can J Soil Sci. 1995;75:529-38.

Escosteguy CMD. Avaliação agrônômica de uma pastagem natural sob níveis de pressão de pastejo [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1990.

Fernandes FF. Uso do modelo Century para o estudo da dinâmica do carbono orgânico de solos do Rio Grande do Sul [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2002. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/nrb=000408837&loc=2004&l=457f10d6a66eaa10>.

Fidelis A, Appezzato-da-Gloria B, Pfadenhauer J. A importância da biomassa e das estruturas subterrâneas nos Campos sulinos. In: Pillar VDP, Müller SC, Castilhos ZMS, Jacques AVA, editores. Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Brasília, DF: Ministério da Agricultura; 2009. p.88-100.

Gatto A, Barros NF, Novais RF, Silva IR, Leite HG, Villani EMA. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto região centro-leste do estado de Minas Gerais. R Árvore. 2011;35:895-905.

Gonçalves JLM, Mello SLM. O sistema radicular das árvores. In: Gonçalves JLM, Benedetti V, editores. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF; 2000. p.219-68.

Gonçalves JLM, Stape JL, Wickert MCP, Gava JL. Manejo de resíduos vegetais e preparo solo. In: Gonçalves JLM, Stape JL, editores. Conservação e cultivo de solos para plantações florestais. Piracicaba: IPEF; 2002. p.130-204.

Leite LFC, Mendonça ES, Machado PLOA, Fernandes Filho EI, Neves JCL. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. Geoderma. 2004;120:283-95.

Lima AMN, Silva IR, Stape JL, Mendonça ES, Novais RF, Barros NF, Neves JCL, Paul K, Schultais F, Polglase P, Raison J, Soares EMB. Modeling changes in organic carbon stocks for distinct soils

- in southeastern Brazil after four *Eucalyptus* rotations using the century model. *R Bras Ci Solo*. 2011;35:833-47.
- Lopes F, Merten GH, Mielniczuk J, Torquinst CG, Oliveira ES. Simulação da dinâmica do carbono numa microbacia rural pelo Modelo Century. *Pesq Agropec Bras*. 2008;43:745-53.
- Lopes F, Mielniczuk J, Oliveira ES, Torquinst CG. Evolução do uso do solo em uma área piloto na região de Vacaria, RS. *R Bras Eng Agric Amb*. 2010;14:1038-44.
- Maluf JRT. Nova classificação climática do estado do Rio Grande do Sul. *R Bras Agrometeorol*. 2000;8:141-50.
- Metherell AK, Harding LA, Cole CV, Parton WJ. CENTURY Soil organic matter model environment. Fort Collins: Great Plains System Research Unit; 1993. (Technical Report, 4).
- Moreno JA. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura; 1961.
- Natural Resource Ecology Laboratory - NREL. Century 4. [Acesso em 15 jul. 2013]. Disponível em: <http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>.
- Oliveira ES. Uso do modelo Century no estudo da dinâmica do nitrogênio em um Argissolo do Rio Grande do Sul [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11314/000611424.pdf?sequence=1>.
- Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, Ojima DS. Analysis of factors controlling soil organic levels of grassland in the Great Plains. *Soil Sci Soc Am J*. 1987;51:1173-9.
- Peltoniemi M, Thürig E, Ogle S, Palosuo T, Schrumpp M, Wutzler T, Butterbach-Bahl K, Chertov O, Komarov A, Mikhailov A, Gärdenäs A, Perry C, Liski J, Smith P, Mäkipää R. Models in Country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica*. 2007;41:575-602.
- Pillon CN, Santos DC, Lima CLR, Dupont PB. Monitoramento de um Argissolo Vermelho sob produção de eucalipto de treze e vinte anos. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; 2008. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 71).
- Rosa SF. Propriedades físicas e químicas de um solo arenoso sob o cultivo de *Eucalyptus* spp [dissertação]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2010. Disponível em: http://coral.ufsm.br/ppgef/pdf/DM/DM_Suzana_Ferreira_da_Rosa.pdf.
- Saxton KE, Rawls WJ, Romberger JS, Papendick RI. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci Soc Am J*. 1986;50:1031-6.
- Schumacher MV, Caldeira MVW. Quantificação de biomassa em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. com diferentes idades. *Biomassa Energia*. 2004;1:381-91.
- Smith P, Smith JU, Powlson DS, McGill WB, Arah JRM, Chertov OG, Coleman K, Franko U, Frolking S, Jenkinson DS, Jensen LS, Kelly RH, Klein-Gunnewiek H, Komarov AS, Li C, Molina JAE, Mueller T, Parton WJ, Thornley JHM, Whitmore AP. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*. 1997;81:153-225.
- Soares EMB. Frações da matéria orgânica e composição molecular de substâncias húmicas de solos sob cultivo em biomas distintos [tese]. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; 2009. Disponível em: http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_busca/processaArquivo.php?
- Tornquist CG, Mielniczuk J, Cerri CEP. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. *Soil Till Res*. 2009;105:33-43.
- Viera M, Schumacher MV, Trüby P, Araújo EF. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul-RS. *Ecol Nutr Flor*. 2013;1:1-13.
- Viera M. Avaliação da biomassa e nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus saligna* SM. e *Eucalyptus urograndis* no município de Pinheiro Machado, RS [Relatório de estágio supervisionado]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2007.
- Weber MA. Parametrização e validação do ciclo do carbono e do nitrogênio do modelo Century 4.5 com experimentos de longa duração em um Argissolo do sul do Brasil [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000764117&loc=2011&l=5cf2ad7034a85898>.
- Wink C. Dinâmica do carbono e nitrogênio em Argissolos com plantações de *Eucalyptus* sp. [tese]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2013.
- Xavier AC, Soares JV, Almeida AC. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo do seu ciclo de crescimento. *R Árvore*. 2002;26:421-7.