

Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil



DOCUMENTOS 342

**Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de
uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil**

*Josiléia Acordi Zanatta
Bruno Bordron
Wilson Anderson Holler
Marcos Fernando Glück Rachwal
Luiz Marcelo Brum Rossi
Rosana Clara Victoria Higa*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba,
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR, Brasil
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da
Embrapa Florestas

Presidente

Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-Presidente

José Elidney Pinto Júnior

Secretária-Executiva

Elisabete Marques Oaida

Membros

Annette Bonnet

Cristiane Aparecida Fioravante Reis

Guilherme Schnell e Schühli

Krisle da Silva

Marcelo Francia Arco-Verde

Marcia Toffani Simão Soares

Marilice Cordeiro Garrastazu

Valderêa Aparecida de Sousa

Supervisão editorial

José Elidney Pinto Júnior

Revisão de texto

José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica

Francisca Rasche

Projeto gráfico da coleção

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica

Neide Makiko Furukawa

Foto capa

Josiléia Acordi Zanatta

1ª edição

Versão digital (2020)

Todos os direitos reservados.

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Florestas

Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de uso do solo
envolvendo plantações florestais no Brasil. [recurso eletrônico] /
Josiléia Acordi Zanatta ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas,
2020.
24 p. : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958
; 342)

Modo de acesso: World Wide Web:
<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

1. Estoque de carbono. 2. Emissões de gases de efeito estufa. 3.
Floresta plantada. 4. *Pinus* ssp. 5. *Eucalyptus* ssp. 6. *Acacia mearnsii*. I.
Zanatta, Josiléia Acordi. II. Bordron, Bruno. III. Holler, Wilson Anderson.
IV. Rachwal, Marcos Fernando Glück. V. Rossi, Luiz Marcelo Brum. VI.
Higa, Rosana Clara Victoria. VII. Série.

CDD (21. ed.) 674.098173

Autores

Josiléia Acordi Zanatta

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Bruno Bordron

Biológo, doutor em Recursos Florestais, consultor do Ministério da Ciência e Tecnologia, Comunicação e Inovação (MCTIC) e da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Wilson Anderson Holler

Engenheiro cartógrafo, mestre em Desenvolvimento de Tecnologia, analista da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Marcos Fernando Glück Rachwal

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Luiz Marcelo Brum Rossi

Engenheiro Florestal, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Rosana Clara Victoria Higa

Engenheira-agrônomo, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora aposentada da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Apresentação

O uso e a mudança no uso do solo têm efeitos diretos e indiretos sobre a cobertura vegetal e, portanto, podem afetar os estoques de carbono do solo, alterando o equilíbrio entre o sequestro e as taxas de perdas de carbono. Com aproximadamente dez milhões de hectares no Brasil, as florestas plantadas representam um sumidouro de carbono importante no inventário nacional de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Para estimativa dos estoques de carbono do setor de reflorestamento, o Brasil adota um índice de alteração de estoques de carbono do solo (IAC) de 0,673, originalmente indicado para culturas agrícolas. Esse fator penaliza os plantios florestais sugerindo que mais de 30% do carbono armazenado no solo é perdido pela conversão de uso. Muitos estudos nacionais questionam essa perda acentuada de carbono pelas florestas plantadas e, portanto, é importante mensurar o impacto das conversões de uso do solo envolvendo florestas plantadas sobre os estoques de carbono do solo, visando propor um novo índice de alteração de carbono para este setor. Para tanto, analisou-se um conjunto de 41 estudos realizados no País, que contabilizaram estoques de carbono no solo em plantios florestais, implantados após a retirada de vegetação nativa de floresta ou campo, pastagem ou agricultura. Esses estudos estão distribuídos em 41 municípios do Brasil e contemplam plantios de eucaliptos, pinus e acácia-negra. A base de dados abrangeu nove estados (RS, SC, PR, SP, ES, MG, BA, PA e MS), cuja área de florestas plantadas soma, atualmente, mais de 8,6 milhões de hectares. A análise realizada indica ganho de 11% no estoque de carbono do solo para plantios de eucalipto em áreas originalmente de um campo nativo e pastagens, e uma perda média de 13% no estoque de carbono do solo para plantios de pinus, independente do uso anterior. Baseado nesse conjunto de dados, a média do IAC do solo para plantios de pinus e eucalipto no Brasil é 0,95, indicando perdas menos intensas do que as consideradas no último inventário nacional publicado em 2016, e sugerindo a necessidade de atualização do IAC para florestas plantadas. A adoção de valores que refletem a realidade nacional quanto aos aspectos de sequestro de carbono é essencial para a confiabilidade dos dados nacionais oficiais de emissões e remoções de gases de efeito estufa, pois estes orientam a elaboração e execução das políticas públicas de controle e mitigação das mudanças climáticas, agregando melhorias contínuas às ferramentas de gestão dessas políticas, como o inventário nacional apresentado pela Comunicação Nacional de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa.

Marcílio José Thomazini

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Florestas

Sumário

Introdução.....	9
Métodos.....	10
Resultados.....	11
Discussão	18
Conclusões.....	19
Agradecimentos.....	20
Referências	20

Introdução

O impacto da mudança de uso do solo sobre os estoques de carbono no solo é um dos aspectos históricos relacionado à dinâmica de ocupação das terras agrícolas no Brasil, que reflete na capacidade de mitigação de gases de efeito estufa (GEE), afetando as agendas político-ambiental nacional e internacional (Lal, 2005; Ostle et al., 2009; Higa et al., 2017). O ciclo do carbono está intimamente relacionado às mudanças climáticas. Internacionalmente, a política do clima é discutida nas convenções do clima da ONU que anualmente revisa e estimula os países a promoverem ações de mitigação das mudanças do clima. O Brasil é signatário da Convenção do Clima desde a sua entrada em vigor e, por isso, tem o compromisso de reportar periodicamente o conjunto das suas emissões e remoções de GEE, por meio da Comunicação Nacional de Emissões e Remoções de GEE (Brasil, 2010; Brasil, 2016a). Atualmente, equipes técnicas do País estão trabalhando para finalizar a quarta comunicação, que deverá ser publicada em 2021, baseada no guia metodológico do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC na sigla em Inglês – acrônimo de Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2006).

Na ausência de índices, coeficientes técnicos e fatores de emissão gerados localmente para estimativa das emissões de GEE, o guia metodológico do IPCC indica o uso de valores padrão globais ou regionais que, por vezes, não representam as condições edafoclimáticas e de manejo dos sistemas de produção brasileiros, como observado por Jantalia et al. (2008), Simon et al. (2018) e Fialho et al. (2019). Assim, é importante a geração de fatores de emissão de GEE locais para uso nas estimativas e inventários nacionais, bem como em instrumentos e documentos oficiais de reporte de emissões e remoções de GEE, como o Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene), o BUR (Relatório de Atualização Bi-anual) e a Comunicação Nacional. Esses instrumentos e documentos também são a forma pela qual o Brasil comprova o cumprimento dos compromissos assumidos perante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Entre os compromissos, destacam-se as Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas (Namas), que estabeleceram a redução da emissão de GEE de 36% a 38%, com base nas emissões projetadas para 2020 e as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), que estabelecem reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e em 43% até 2030, ambos em relação aos níveis de 2005 (Brasil, 2016b).

O setor de florestas plantadas foi inserido em ambos os compromissos citados anteriormente como estratégia para a mitigação da emissão de GEE, principalmente devido ao seu armazenamento de carbono (C), na forma de biomassa. Porém, estudos mais recentes têm destacado a capacidade de plantios florestais contribuírem para o acúmulo de carbono no solo (Veloso-Gomes et al., 2018). Esse acúmulo é definido como a transferência de CO₂ atmosférico para o solo, através das plantas via resíduos vegetais e outros compostos orgânicos, como exsudatos radiculares, que são armazenados e retidos no solo como parte da matéria orgânica do solo (Lal et al., 2015). O acúmulo de carbono no solo, além da mitigação de GEE, está associado a uma série de benefícios na fertilidade do solo tais como: ciclagem de nutrientes, atividade biológica, melhoria das propriedades físicas, armazenamento de água entre outras (Rangel et al., 2008; Campanha et al., 2009).

A Orientação de Boas Práticas do IPCC (Penman; Kikan, 2003) e as Diretrizes Nacionais de Inventário de GEE (IPCC, 2006) fornecem recomendações sobre métodos e valores padrão para estimar os estoques de carbono no solo, em três níveis de complexidade. O método mais simples (tier 1) utiliza valores médios de fatores de mudança de estoque para grandes ecorregiões do mundo, tier 2 usa valores nacionais específicos, enquanto o tier 3 adota modelagem de alta resolução com fatores específicos para cada país (Cardinael et al., 2018). O Brasil, no inventário nacional de

emissões e remoções antrópicas de GEE vem usando uma mescla do tier 1 e 2 (Brasil, 2016a). O valor padrão usado para alteração do carbono do solo com a mudança de uso do solo de qualquer ecossistema transformado em floresta plantada é 0,673, o que corresponde a uma diminuição de 32,7% no estoque de carbono no solo (Brasil, 2015).

A perda de carbono orgânico do solo pela conversão da vegetação original em uso cultivado é bem conhecida (Post; Kwon, 2000). No entanto, trabalhos realizados no Brasil têm indicado que a perda de carbono pela conversão para florestas plantadas é menor do que a estimada pelo índice de 0,673 adotado pelo País no último inventário nacional de emissões e remoções de GEE (Mafra et al., 2008; Fialho; Zinn, 2014; Cassol et al., 2019) e, em alguns casos, pode até mesmo não existir (Maquere et al.; 2008; Veloso Gomes et al., 2018; James et al., 2019). O Brasil é o quarto país com maior área de floresta plantada no mundo (FAO, 2015) e, por isso, é essencial que tenha fatores e coeficientes técnicos para estimar a real contribuição dos plantios florestais no armazenamento de C no solo e, consequentemente, na mitigação das mudanças climáticas. O objetivo deste estudo foi mensurar o impacto das conversões de uso do solo envolvendo florestas plantadas, sobre os estoques de carbono do solo, com base em estudos realizados no Brasil e propor um novo índice de alteração de carbono do solo para este setor.

Métodos

Com base em trabalhos de pesquisa realizados no Brasil foram compiladas as informações sobre mudança do uso do solo e estoques de carbono do solo. Cada estudo foi caracterizado dentro das categorias de uso do solo, atual e original, bem como o seu histórico. Como uso atual, o foco foi nos plantios de *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp. e *Acacia mearnsii*. Para cada local de estudo, foi identificado o clima e o tipo de solo, enquanto os usos foram caracterizados quanto ao tempo de uso com o plantio florestal (ou de conversão) e a profundidade do solo para a qual foi registrado o estoque de carbono.

A pesquisa bibliográfica foi realizada por meio de base de dados online como Web of Science, Science Direct, Scielo (Brasil) e motores de busca (GoogleScholar), incluindo as palavras-chave “*Eucalyptus*”, “*Pinus*” “*Acacia mearnsii*”, “estoque de carbono no solo” e “Brasil”. Além disso, dissertações de mestrado e teses de doutorado foram procuradas em bibliotecas eletrônicas das universidades brasileiras, assim como trabalhos apresentados em anais de eventos técnico-científicos. Nenhuma restrição foi estabelecida em termos da idade dos estudos – pois o objetivo foi reunir uma boa cobertura geográfica do Brasil. Foram considerados os estudos que apresentaram, minimamente, os estoques de carbono do plantio florestal e do uso anterior. Para os estudos considerando teores de carbono e a densidade do solo, os estoques de carbono foram estimados pela relação de massa e volume.

O estoque de carbono orgânico atual do solo sob floresta plantada, na camada de 0-20 cm, foi dividido pelo estoque de carbono observado no uso anterior, gerando o índice de alteração dos estoques de carbono (IAC). O IAC nacional foi estimado pela média das médias dos índices dos agrupamentos que consideraram o uso anterior e a espécie cultivada atualmente. Valores de IACs específicos para cada categoria de clima e solo não foram estimados devido à baixa disponibilidade de estudos para algumas classes climáticas e ordens de solo. Os valores de IAC por categoria foram submetidos à análise estatística descritiva de média, desvio padrão, mediana e nível de confiança.

Resultados

A análise do uso anterior do solo das plantações florestais atuais, baseada nas transições adotadas pela Comunicação Nacional de Emissões e Remoções de GEE no Brasil (Brasil, 2016a), indicou que, no período de 1994-2010, as conversões predominantes foram de florestas nativas com 1,2 milhões de hectares e de pastagem (nativas e cultivadas) com 2,8 milhões de hectares (Tabela 1). A conversão de pastagens em plantios florestais em todos os períodos avaliados foi sempre maior que a conversão de floresta nativa para plantio florestal. No período entre 2002 e 2010, a conversão de pastagem cultivada para floresta plantada atingiu 53% da área total convertida para plantio florestal.

Tabela 1. Área convertida para uso com florestas plantadas nos biomas brasileiros, nos diferentes períodos.

Período	Origem da área florestada (x 1.000 ha)			
	Floresta nativa	Campo nativo	Pastagem cultivada	Agricultura
1994-2002	160	46	180	42
2002-2010	1.100	370	2.154	427

Fonte: adaptada de Brasil (2016).

Os 41 estudos compilados nesta análise foram desenvolvidos no Brasil e publicados no período de 2002 a 2019 (Tabelas 2, 3 e 4). Alguns estudos reportavam experimentos e avaliações em mais de um ambiente, o que totalizou 60 locais de comparação para eucalipto, 31 para pinus e 3 para acácia-negra. As conversões de uso do solo para plantio florestal tiveram origem na retirada da vegetação nativa de floresta (43), na substituição de campo nativo ou pastagem cultivada (46) e no uso agrícola (5). Os estudos estão distribuídos em 41 municípios do Brasil (Figura 1) e contemplam plantios de *Eucalyptus* (31), *Pinus* (12) e Acácia-negra (1). A base de dados abrangeu resultados para nove estados (RS, SC, PR, SP, ES, MG, BA, PA e MS), cuja área plantada com espécies florestais é 8,6 milhões hectares (IBGE, 2019). No entanto, a maioria das observações foram realizadas nos estados de Minas Gerais (13 estudos), Rio Grande do Sul (9 estudos), Santa Catarina (8 estudos) e São Paulo (7 estudos). Esses quatro Estados apresentavam em 2017 uma área plantada superior a 4,9 milhões de ha, sendo 3,8 milhões de ha com *Eucalyptus*, 1,1 milhões de ha com *Pinus* e 89,6 mil ha com *Acacia mearnsii* (concentrado no RS) e 106 mil ha com outras espécies (Ageflor, 2017; IBGE, 2017), o que reforça a representatividade da análise no setor florestal.

O índice de alteração de carbono para a conversão de uso floresta nativa para *Eucalyptus* variou de 0,66 a 1,30, com média de 0,93 e desvio padrão de 0,17 (Tabelas 2 e 5), indicando que a substituição de florestas nativas por plantações de *Eucalyptus* representa, na média, um decréscimo de 7% no estoque de carbono do solo. Um único valor de IAC de 2,33 foi desconsiderado na média por tratar-se de um outlier no conjunto de dados. Entre os valores, porém, os IAC gerados a partir de estudos localizados no Cerrado brasileiro apresentaram IAC superior (1,01) aos demais biomas (0,83 para Mata Atlântica e 0,81 para Amazônia). Na conversão de pastagem para plantio de eucalipto, onde se incluiu as conversões de campo nativo para fins desta análise, o IAC foi de 1,11 com desvio padrão de 0,19 (Tabelas 2 e 5), indicando um ganho de 11% nos estoques de carbono pela floresta plantada. Também na conversão de pastagem para eucalipto, é possível observar uma tendência de maior IAC no bioma Cerrado (1,18) se comparado ao IAC desta conversão no bioma Mata Atlântica (1,13) e no Pampa (0,99). A conversão de áreas de cultivos agrícolas para plantios de eucalipto apresentou IAC de 0,98, porém a partir de uma base de dados muito restrita (três observações).

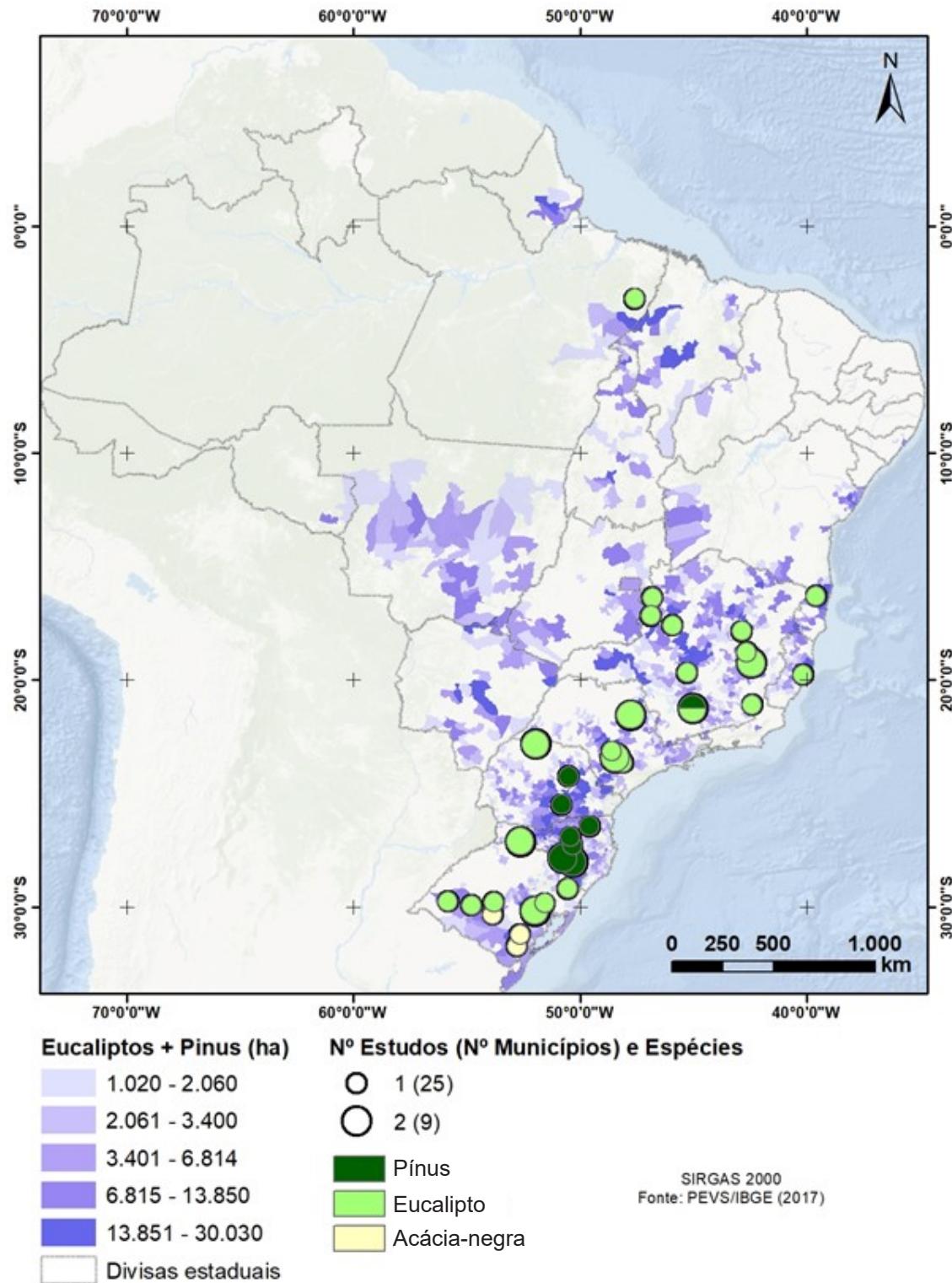


Figura 1. Localização dos estudos e grandes áreas de florestas plantadas no Brasil.

Tabela 2. Estoques de carbono (TOC) e índice de alteração dos estoques de carbono (IAC) para a camada de 0-20 cm, na conversão de floresta, pastagem e agricultura para plantios florestais de eucalipto no Brasil.

Uso original ou anterior	Bioma	Clima	Local	Solo	TOC uso floresta plantada (Mg/ha)	TOC uso original (Mg/ha)	IAC	Referência
Floresta	Amazônia	Am	Paragominas, PA	Latossolo Amarelo	16,6	24,6	0,68	Lopes et al. (2015)
Floresta	Amazônia	Amw	Monte Dourado, PA	Argissolo	33,1	35,0	0,95	Beldini et al. (2009)
Floresta	Amazônia	Amw	Monte Dourado, PA	Latossolo	51,3	64,9	0,79	Beldini et al. (2009)
Floresta	Cerrado	Aw	João Pinheiro, MG	Latossolo (argiloso)	27,2	29,7	0,92	Zinn et al. (2002)
Floresta	Cerrado	Aw	João Pinheiro, MG	Latossolo(arenoso)	21,8	22,2	0,98	Zinn et al. (2011)
Floresta	Cerrado	Aw	João Pinheiro, MG	Neossolo	19,9	24,2	0,82	Zinn et al. (2002)
Floresta	Cerrado	Aw	Unaí, MG	Latossolo (argiloso)	27,7	29,5	0,94	Zinn et al. (2011)
Floresta	Cerrado	Aw	Unaí, MG	Latossolo (argiloso)	31,6	32,9	0,96	Zinn et al. (2011)
Floresta	Cerrado	Cfa	Itatinga, SP	Latossolo	51,5	46,2	1,11	James et al. (2019)
Floresta	Cerrado	Cfa	Lageado, SP	Latossolo	38,9	37,5	1,04	James et al. (2019)
Floresta	Cerrado	Cfa	Paracatu, MG	Latossolo Vermelho	34,5	35,1	0,98	Neves et al. (2002)
Floresta	Cerrado	Cwa	Bom Despacho, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	57,3	48,0	1,19	Demolinari et al. (2007)
Floresta	Cerrado	Cwa	Itamarandiba, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	46,0	44,0	1,05	Pulrolnik et al. (2009)
Floresta	Cerrado	Cwa	Luiz Antonio, SP	Neossolo Quartzarênico	24,8	36,5	0,68	Lima (2008)
Floresta	Cerrado	Cwa	Bocaiúva, MG	Latossolo	102,5	78,9	1,30	Fialho et al. (2019)
Floresta	Cerrado	Cwa	Bocaiúva, MG	Latossolo	94,5	78,9	1,20	Fialho et al. (2019)
Floresta	MA**	Aw	Belo Oriente, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	55,0	55,0	1,00	Rezende et al. (2007)
Floresta	MA	Aw	Sooretama, ES	Neossolo Quartzarênico	19,0	21,0	0,90	Schulthais (2009)
Floresta	MA	Cfa	Angatuba, SP	Latossolo	34,8	53,0	0,66	Sotomayor (2009)
Floresta	MA	Cfa	Chapecó, SC	Cambissolo típico	47,0	68,0	0,69	Sandi (2009)
Floresta	MA	Cwa	Luiz Antonio, SP	Latossolo (argiloso)	41,9	50,2	0,84	Lima (2008)
Floresta	MA	Cwa	Luiz Antonio, SP	Latossolo (argiloso)	42,5	50,0	0,85	Schulthais et al. (2007)
Floresta	MA	Cwa	Luiz Antonio, SP	Neossolo Quartzarênico	28,0	36,0	0,78	Schulthais et al. (2007)
Floresta	MA	Cwb	Lavras, MG	Latossolo (argiloso)	58,0	62,0	0,94	Inácio (2009)
Floresta	Pampa	Cfa	Butiá, RS	Argissolo Vermelho-Amarelo	38,0	42,0	0,90	Teixeira et al. (2009)
Floresta	Pampa	Cfa	Colorado, RS	Argissolo Vermelho	28,0	12,0	2,33*	Teixeira et al. (2009)
Média Floresta							0,93	
Pastagem	Cerrado	Cfa	Angatuba, SP	Neossolo Quartzarênico	19,9	18,7	1,06	Rufino (2009)
Pastagem	Cerrado	Cfa	Angatuba, SP	Neossolo Quartzarênico	25,3	18,7	1,35	Rufino (2009)
Pastagem	Cerrado	Cfa	Itatinga, SP	Latossolo Vermelho-Amarelo	33,9	23,3	1,45	Maquere et al. (2008)
Pastagem	Cerrado	Cfa	Itatinga, SP	Latossolo Vermelho-Amarelo	30,0	23,3	1,29	Maquere et al. (2008)
Pastagem	Cerrado	Cfa	Paracatu, MG	Latossolo Vermelho distrófico	34,5	30,0	1,15	Neves et al. (2002)

Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil

Continua...

Tabela 2. Continuação...

Uso original ou anterior	Bioma	Clima	Local	Solo	TOC uso floresta plantada (Mg/ha)	TOC uso original (Mg/ha)	IAC	Referência
Pastagem	Cerrado	Cwa	Três Lagoas, MS	Neossolo Quartzarênico	16,8	22,0	0,76	Teixeira et al. (2019)
Pastagem	MA	Aw	Aracruz, ES	Argissolo Amarelo	23,1	17,8	1,30	Pegoraro et al. (2014)
Pastagem	MA	Aw	Belo Oriente, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	40,0	36,4	1,10	Lima (2004)
Pastagem	MA	Aw	Belo Oriente, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	39,5	36,4	1,09	Lima (2004)
Pastagem	MA	Aw	Belo Oriente, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	46,0	36,4	1,26	Lima (2004)
Pastagem	MA	Aw	Belo Oriente, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	45,7	36,4	1,26	Lima (2004)
Pastagem	MA	Aw	Belo Oriente, MG	Latossolo Vermelho-Amarelo	49,0	36,4	1,35	Lima (2004)
Pastagem	MA	Aw	Muriaé, MG	Argissolo Vermelho-Amarelo	49,9	49,7	1,00	Vicente (2016)
Pastagem	MA	Aw	Muriaé, MG	Argissolo Vermelho-Amarelo	43,8	49,7	0,88	Vicente (2016)
Pastagem	MA	Af	Eunápolis, BA	Argisolo Amarelo	25,0	28,0	0,89	Silva (2008)
Pastagem	MA	Af	Eunápolis, BA	Argisolo Amarelo	38,2	28,0	1,36	Silva (2008)
Pastagem	MA	Cfa	Angatuba, SP	Latossolo	34,8	32,4	1,08	Sotomayor (2009)
Pastagem	MA	Cfa	Itapetininga, SP	Neossolo Quartzarênico	25,5	18,7	1,36	Rufino (2009)
Pastagem	MA	Cfb	São Francisco Paula, RS	Cambissolo Húmico	80,0	105,0	0,76	Klug (2014)
Pastagem	MA	Cwa	Virginópolis, MG	Latossolo Vermelho	61,2	55,5	1,10	Lima (2004)
Pastagem	MA	Cwa	Virginópolis, MG	Latossolo Vermelho	69,7	55,5	1,26	Lima (2004)
Pastagem	MA	Cwa	Virginópolis, MG	Latossolo Vermelho	53,2	55,5	0,96	Lima (2004)
Pastagem	MA	Cwa	Virginópolis, MG	Latossolo Vermelho	71,3	55,5	1,28	Lima (2004)
Pastagem	Pampa	Cfa	Alegrete, RS	Argissolo Vermelho	35,0	32,0	1,09	Santos et al. (2009; 2013)
Pastagem	Pampa	Cfa	Manoel Viana, RS	Argissolo Vermelho	33,3	35,4	0,94	Wink et al. (2015)
Pastagem	Pampa	Cfa	Manoel Viana, RS	Argissolo Vermelho	32,9	35,4	0,93	Wink et al. (2015)
Pastagem	Pampa	Cfa	Santa Maria, RS	Argissolo Vermelho-Amarelo	31,9	30,8	1,03	Wink et al. (2015)
Pastagem	Pampa	Cfa	Santa Maria, RS	Argissolo Vermelho-Amarelo	27,5	30,8	0,89	Wink et al. (2015)
Pastagem	Pampa	Cfa	Santa Maria, RS	Argissolo Vermelho	24,0	30,0	0,80	Wink (2009)
Pastagem	Pampa	Cfa	Triunfo, RS	Argissolo Vermelho	38,0	35,0	1,09	Soares (2009)
Pastagem	Pampa	Cfa	Triunfo, RS	Argissolo Vermelho	40,0	35,0	1,14	Soares (2009)
Média Pastagem							1,11	
Agricultura	MA	Cwa	Lavras, MG	Latossolo Vermelho	55,8	50,2	1,11	Rangel e Silva (2007)
Agricultura	MA	Cwa	Lavras, MG	Latossolo Vermelho	55,8	52,0	1,07	Rangel e Silva (2007)
Agricultura	Pampa	Cfa	Barra do Ribeiro, RS	Cambissolo	35,0	46,0	0,76	Soares (2009)
Média Agricultura							0,98	
Média geral							1,02	

*Valor não considerado na média.** Mata Atlântica.

Tabela 3. Estoques de carbono (TOC) e índice de alteração dos estoques de carbono (IAC) para a camada de 0-20 cm, na conversão de floresta, pastagem e agricultura para plantios florestais de pinus no Brasil

Uso original ou anterior	Bioma	Clima	Local	Solo	TOC uso floresta plantada (Mg/ha)	TOC uso original (Mg/ha)	IAC	Referência
Floresta	Cerrado	Aw	Uberlândia, MG	Latossolo	24,4	27,8	0,88	Zinn et al. (2002)
Floresta	MA*	Cfa	Lages, SC	Cambissolo Háplico	55,0	50,5	1,09	Dick et al. (2008)
Floresta	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Neossolo/Cambissolo	63,3	75,7	0,84	Primieri et al. (2017)
Floresta	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Neossolo/Cambissolo	68,1	75,7	0,90	Primieri et al. (2017)
Floresta	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Nitossolo Háplico	70,7	76,8	0,92	Mafra et al. (2008)
Floresta	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Nitossolo Háplico	75,6	76,8	0,98	Mafra et al. (2008)
Floresta	MA	Cfb	Rio Negrinho, SC	Cambissolo Húmico	89,0	72,0	0,81	Veloso Gomes et al. (2018)
Floresta	MA	Cfb	Rio Negrinho, SC	Cambissolo Húmico	89,0	86,0	0,97	Veloso Gomes et al. (2018)
Floresta	MA	Cfb	Santa Cecília, SC	Cambissolo Húmico	63,0	69,0	0,91	Roters (2016)
Floresta	MA	Cfb	São Cristovão do Sul, SC	Cambissolo Húmico	108,0	104,0	1,04	Roters (2016)
Floresta	MA	Cfb	Telêmaco Borba, PR	Latossolo Vermelho	43,7	72,0	0,61	Ibarr (2016)
Floresta	MA	Cfb	Telêmaco Borba, PR	Latossolo Vermelho	39,9	72,0	0,55	Ibarr (2016)
Floresta	MA	Cfb	Telêmaco Borba, PR	Latossolo Vermelho	35,0	72,0	0,49	Ibarr (2016)
Floresta	MA	Cfb	Telêmaco Borba, PR	Latossolo Vermelho	44,3	72,0	0,61	Ibarr (2016)
Floresta	MA	Cfb	Telêmaco Borba, PR	Latossolo Vermelho	38,6	72,0	0,54	Ibarr (2016)
Floresta	MA	Cwa	Lavras, MG	Argissolo	50,2	58,3	0,86	Zinn et al. (2014)
Floresta	MA	Cwa	Itabira, MG	Argissolo	98,1	150,4	0,65	Zinn et al. (2014)
Média Floresta								0,80
Pastagem	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Neossolo/Cambissolo	63,3	70,7	0,89	Primieri et al. (2017)
Pastagem	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Neossolo/Cambissolo	68,1	70,7	0,96	Primieri et al. (2017)
Pastagem	MA	Cfb	Campo Belo do Sul, SC	Nitossolo Háplico	99,6	73,8	1,35	Mafra et al. (2008)
Pastagem	MA	Cfb	São Francisco Paula, RS	Cambissolo Húmico	72,0	105,0	0,69	Klug (2014)
Pastagem	MA	Cfb	Ponte Alta, SC	Cambissolo Húmico	43,7	62,5	0,70	Cassol et al. (2019)
Pastagem	MA	Cfb	Ponte Alta, SC	Cambissolo Húmico	64,5	88,5	0,73	Cassol et al. (2019)
Pastagem	MA	Cfb	Ponte Alta, SC	Cambissolo Húmico	52,1	62,5	0,83	Cassol et al. (2019)
Pastagem	MA	Cfb	Ponte Alta, SC	Cambissolo Húmico	72,9	88,5	0,82	Cassol et al. (2019)
Pastagem	MA	Cfb	Ponte Alta, SC	Cambissolo Húmico	73,0	62,5	1,17	Cassol et al. (2019)
Pastagem	MA	Cfb	Ponte Alta, SC	Cambissolo Húmico	111,4	88,5	1,26	Cassol et al. (2019)
Pastagem	MA	Cfb	Capão Alto, SC	Nitossolo	63,2	62,7	1,01	Santos et al. (2009)
Pastagem	MA	Cwa	Lavras, MG	Latossolo	104,3	124,2	0,84	Zinn et al. (2014)
Média Pastagem								0,94
Agricultura	MA	Cwa	Lavras, MG	Latossolo Vermelho	51,0	50,2	1,02	Rangel e Silva (2007)
Agricultura	MA	Cwa	Lavras, MG	Latossolo Vermelho	51,0	52,0	0,98	Rangel e Silva (2007)
Média Agricultura								1,00
Média geral								0,87

* Mata Atlântica.

Tabela 4. Estoques de carbono (TOC) e índice de alteração dos estoques de carbono (IAC) para a camada de 0-20 cm, na conversão de floresta, pastagem e agricultura para plantios florestais de acácia-negra no Brasil.

Uso original ou anterior	Bioma	Clima	Local	Solo	TOC uso floresta plantada (Mg/ha)	TOC uso original (Mg/ha)	IAC	Referência
Pastagem	Pampa	Cfa	Canguçu, RS	Cambissolo Háplico	44,0	40,5	1,09	Kohler et al. (2016)
Pastagem	Pampa	Cfa	Canguçu, RS	Cambissolo Háplico	48,0	44,0	1,09	Kohler et al. (2016)
Pastagem	Pampa	Cfa	Cerrito, RS	Cambissolo Háplico	49,0	46,0	1,07	Kohler et al. (2016)
Média geral							1,08	

Tabela 5. Estatística descritiva para o índice de alteração de carbono do solo nas conversões de uso envolvendo florestas plantadas.

Descriptor	Uso anterior com florestais nativas		Uso anterior com pastagens nativas ou cultivadas			Uso anterior com agricultura	
		Uso atual	
	Eucalipto	Pinus	Eucalipto	Pinus	Acácia	Eucalipto	Pinus
Média	0,93	0,80	1,11	0,94	1,08	0,98	1,00
Desvio padrão	0,17	0,19	0,19	0,22	0,01	0,19	0,03
Mediana	0,94	0,86	1,09	0,87	1,09	1,07	1,00
Nível de confiança	0,07	0,10	0,06	0,11	0,03	0,48	0,23
Número de observações	25	17	31	12	03	03	02

Em estudos com plantios de pinus, as conversões oriundas de formações florestais nativas gerou um IAC de 0,80 e desvio de 0,19 (Tabelas 3 e 5). Ou seja, nesta conversão de uso do solo há perda, em média, de 20% do estoque de carbono no solo. É importante apontar que houve predomínio de estudos na Mata Atlântica e apenas um estudo foi observado no Cerrado, com IAC de 0,88. Quando os plantios de pinus foram feitos sobre área anteriormente com pastagem (nativas ou cultivadas), o IAC foi 0,94 e desvio padrão de 0,22 (Tabelas 3 e 5), índice superior ao observado anteriormente para conversões de florestas nativas para pinus, mas ainda indicando perdas de carbono pela presença do pinus. A entrada do pinus em área de agricultura indicou um IAC de 1,0, mas com baixo número de observações e de nível de confiança (Tabela 5).

Para os plantios de *Acacia mearnsii* só foram observados estudos em substituição à pastagem, mas precisamente campo nativo (Tabela 4). O IAC para plantios de acácia-negra foi 1,08 com desvio de 0,01 (Tabela 5), oriundos da comparação de três locais no RS. O número limitado de observações e de abrangência dos resultados, certamente, não permite que essa estimativa possa ser considerada confiável para uso em documentos oficiais.

Considerando as conversões de uso do solo mais importantes, dada à representatividade de área e número de estudos compilados, as conversões de florestas nativas e de pastagens para *Eucalyptus* e *Pinus* geraram um IAC médio para o Brasil de 0,95 (Figura 2). Apesar dos ganhos observados com entrada de eucalipto sobre pastagens, na média geral, o plantio florestal reduz em 5% os estoques de carbono do solo. Considerando apenas as conversões de eucalipto e pinus originadas de formações florestais nativas, o IAC foi 0,87, indicando perda de 13% nos estoques de carbono do solo, enquanto na conversão de pastagem para plantios florestais (eucalipto e pinus) há um ganho de 2% (IAC 1,02) (Figura 2).

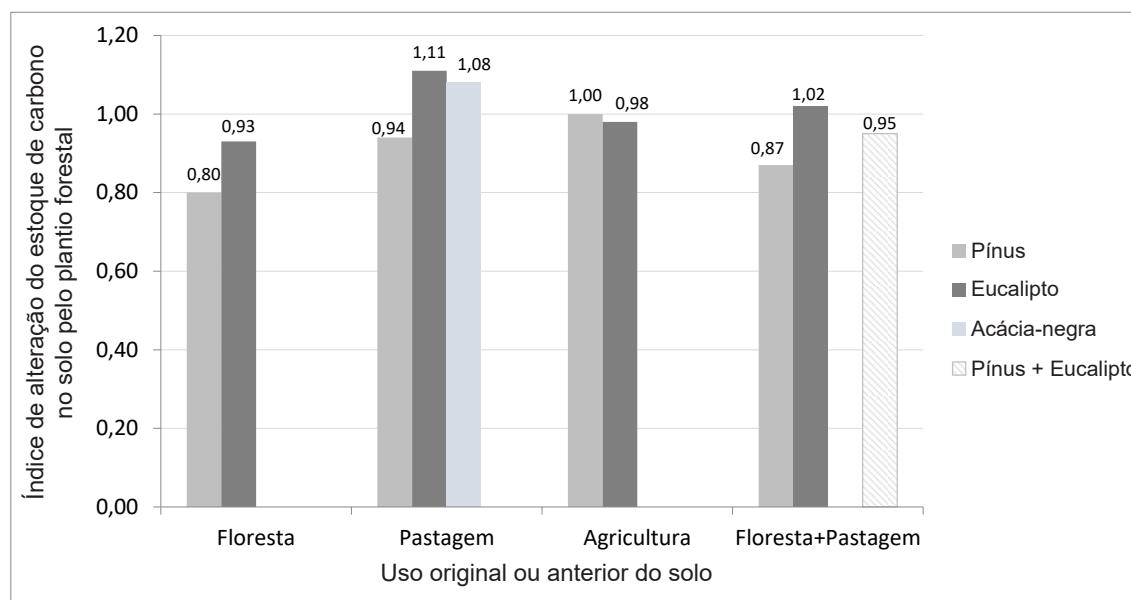


Figura 2. Índices de alteração do estoque de carbono no solo pela conversão de uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil.

Discussão

A conversão de uso do solo para florestas plantadas é acompanhada por mudanças nas propriedades e processos do solo, o que pode ser responsável por mudanças no estoque de carbono do solo (Scott et al., 1999). Plantações florestais altamente produtivas podem sequestrar grandes quantidades de CO₂ atmosférico na biomassa vegetal (Zinn et al., 2011). Embora seja esperado um aumento no carbono orgânico do solo, em consequência dessas plantações (Zinn et al., 2011), vários fatores como o uso anterior do solo, o clima, espécies de árvores, idade do plantio, práticas silviculturais e também a textura do solo podem influenciar o conteúdo de carbono no solo (Paul et al., 2002; Caldeira et al., 2003; Jandl et al., 2007; Shi; Cui, 2010; Denardin et al., 2014). Nesta análise, percebe-se como o uso anterior do solo e a espécie florestal atual determinaram a magnitude das perdas ou ganhos nos estoques de carbono pelos plantios florestais.

Os efeitos diretos e indiretos da espécie florestal sobre a cobertura vegetal da área certamente é um dos fatores que modifica a dinâmica e os estoques de carbono do solo, alterando o equilíbrio entre as taxas de sequestro e de perdas de carbono (Ontl et al., 2012; Ostle et al., 2009). Inúmeras razões podem ser destacadas para explicar o decréscimo dos estoques de carbono quando áreas de florestas nativas são convertidas em plantios florestais: menor aporte de resíduos vegetais pelo cultivo florestal, principalmente na fase inicial (Barros et al., 2017), revolvimento do solo para a implantação do cultivo, o que determina a ruptura de agregados e liberação de carbono protegido fisicamente (Qu et al., 2019), aumento da atividade microbiana decompositora devido à maior oxigenação e temperatura do solo e menor ciclagem da serapilheira devido à maior recalcitrância do material vegetal, especialmente das acículas de pinus (Vogelmann et al., 2015).

Semelhante ao observado nesse estudo, Guo e Gifford (2002) reportaram que a conversão de uso de solo de pastagem ou mata nativa para plantações de coníferas (*Pinus*) reduziu significativamente o estoque de C no solo. Esses autores observaram uma redução do estoque de carbono do solo de 12% a 15% quando floresta nativa ou pastagem foi convertida para plantações de pinus. Por outro lado, quando árvores não coníferas foram cultivadas em substituição ao sistema nativo, menor impacto foi observado sobre o carbono do solo. Os autores argumentam que o *pinus* tem características que dificultam a contribuição para a formação da matéria orgânica do solo, entre essas, a recalcitrância de suas acículas, devido à elevada relação C/N (> 40) como já mencionada, a repelência à água (Vogelmann et al., 2015), presença de inibidores químicos como polifenóis (Krishna; Mohan, 2017) e ausência de macrofauna ativa sobre acículas (Zinn et al., 2002). Por outro lado, algumas espécies como a acácia-negra, devido à qualidade superior da serapilheira que aporta nitrogênio no sistema, podem favorecer a formação de biomassa vegetal e liberação de exsudatos radiculares que estimulam a atividade biológica, afetando positivamente o estoque de carbono no solo (Lugo; Brown, 1993; Jandl et al., 2007; Shi; Cui, 2010), principalmente quando inserida em ambiente pobre quimicamente, como campos nativos não manejados e pastejados.

O histórico do uso do solo é um fator que pode influenciar os estoques de C armazenado no solo (Scott et al., 1999). Assim, deduz-se que a condição das pastagens (degradada ou produtiva), quando substituída pelo plantio florestal, determina a magnitude das mudanças no estoque de carbono. Há estudos que encontraram incremento nos estoques de carbono pelo uso com floresta plantada após pastagens (Shi; Cui, 2010), ausência de diferença (Guo; Gifford, 2002; Laclau, 2003; Wu et al., 2004), mas também há um número bastante razoável de estudos que indicam uma diminuição do estoque de C pelo reflorestamento, em áreas de pastagens (Turner; Lambert, 2000; Paul et al., 2002; Scott et al., 2006). Essas diferenças, normalmente, podem ser atribuídas às condições de produtividade e manejo das pastagens. Pastagens produtivas normalmente apresentam altos es-

toques de C no solo devido à dinâmica de produção primária líquida (elevado aporte de biomassa vegetal e altas densidades de raízes na parte superior do solo). Portanto, o reflorestamento sobre esse tipo de pastagem pode levar à ausência de alterações (Guo; Gifford, 2002) ou mesmo à uma diminuição nos estoques de C no solo (Turner; Lambert, 2000).

Contudo, as plantações florestais no Brasil avançaram sobre área de pastagens que, na sua maioria, apresentavam baixo rendimento, com algum grau de degradação (Dias Filho, 2014) ou mesmo em campo nativo com baixa capacidade de suporte. Essa condição pode explicar o ganho de carbono no solo observado após a implantação de eucalipto quando convertido de pastagens, assim como observaram Shi e Cui (2010). Além disso, quando a conversão para plantio florestal é oriunda de pastagem cultivada, isso já pressupõe que houve outras conversões de uso nessa área, e que a floresta plantada não foi o primeiro uso agrícola.

Deng et al. (2016) realizaram uma meta-análise após levantamento de 103 estudos internacionais, oriundos de 29 países, sobre as variações no estoque de C no solo em função da mudança de uso. Os autores reportaram perdas de mais de $0,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para conversões de florestas nativas para plantios florestais, enquanto a conversão de pastagem em plantios promoveu uma mudança positiva, mas não significativa no estoque de C do solo. Esse comportamento também foi observado por Powers et al. (2011) para a região tropical, quando observaram perdas de 15% a 18% nos estoques de carbono nas conversões de florestas primárias e savanas para plantios florestais, enquanto o estabelecimento de plantações de árvores sob áreas previamente cultivadas com pastagens ou agricultura proporcionou aumento nos estoques de carbono.

Resultados similares foram encontrados por outro estudo de meta-análise (Guo; Gifford, 2002). Ambas as meta-análises não são representativas da realidade florestal do Brasil, pelo reduzido número de estudos ($n = 10$) e pela concentração desses estudos na região Norte do País ($n = 6$), cuja área de plantios florestais representa menos de 7% da área plantada no Brasil (IBGE, 2019), e por possuírem condições de solos e clima muito específicas. Apesar disso, os resultados encontrados foram semelhantes aos observados na base de dados aqui apresentada, principalmente quando as conversões de uso do solo são de formações florestais nativas para plantios florestais.

Conclusões

O estudo da dinâmica das mudanças de uso do solo permite concluir que plantios florestais podem contribuir com armazenamento do carbono no solo, dependendo do uso anterior e da espécie florestal cultivada.

Na conversão de pastagens nativas e cultivadas para florestas plantadas de eucalipto foi observado aumento de 11% no estoque de carbono do solo (camada de 0-20 cm) com índice de alteração de carbono de 1,11. Contudo, quando a conversão foi de pastagens para plantios de pinus, houve perdas da ordem de 6% com índice de alteração do carbono de 0,94. A conversão de formações florestais nativas para florestas plantadas de pinus e eucalipto reduziu em 13% o estoque de carbono no solo, na camada de 0-20 cm, com índice de alteração do estoque de carbono de 0,87.

Considerando as categorias de uso do solo com pinus e eucalipto oriundos da conversão de pastagens e de formações florestais nativas, e excluindo outras combinações cujos número de estudos foi reduzido, o índice médio de alteração do estoque de carbono do solo foi 0,95, o que é superior ao valor sugerido pelo guia do IPCC (2006). Esse resultado é uma primeira aproximação de um va-

lor de IAC para florestas plantadas no Brasil e necessita de melhorias como a inclusão de estudos considerando outros ambientes. Apesar disso, os valores de IAC dessa base de dados representa mais adequadamente o impacto das florestas plantadas sobre os estoques de carbono do solo no Brasil que o valor padrão do IPCC.

Os maiores ganhos e, ou as menores perdas nos estoques de carbono do solo pelas conversões de uso analisadas foram observadas na região do Cerrado, em florestas plantadas de eucalipto, o que merecem maiores investigações no sentido de elucidar esse processo.

Agradecimentos

Os dados e os resultados apresentados nessa publicação foram compilados e interpretados no âmbito do projeto da “Quarta Comunicação Nacional e dos Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção do Clima”, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, com apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, por meio dos recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente, aos quais oferecemos nossos agradecimentos.

Referências

AGEFLOR. Associação Gaúcha de Empresas Florestais. **Mapas**: a indústria de base florestal no Rio Grande do Sul 2017 (ano base 2016). Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<http://www.ageflor.com.br/noticias/biblioteca/mapas-a-industria-de-base-florestal-no-rs-2017>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

BARROS, N. F.; SCHUMACHER, M. V.; NEVES, J. C. L.; DE BARROS, N. F.; VALADARES, S. V. Tree Growth and nutrient dynamics in pine plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0160400, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160400>>.

BELDINI, T. P.; MCNABB, K. L.; LOCKABY, B. G.; SANCHEZ, F. G.; NAVEGANTES-CANCIO, O.; DE OLIVEIRA, R. C. The effect of plantation silviculture on soil organic matter and particle-size fractions in Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1593-1602, 2009. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600008>>.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Relatório de referência “Emissões de Gases do efeito estufa no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas: emissões de CO₂ pelo uso da terra, mudança do uso da terra e florestas”**. Brasília, DF, 2015. 342 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. **Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, 2016a.

BRASIL. República Federativa do Brasil. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada (NDC) para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, 2016b. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf>. Acesso em : 22 jun. 2020.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BARICELLO, L. R.; VOGEL, H. L. M. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 47-54, 2003.

CAMPANHA, M. M.; NOGUEIRA, R. da S.; OLIVEIRA, T. S. de; TEIXEIRA, A. dos S.; ROMERO, R. E. **Teores e estoques de carbono no solo de sistemas agroflorestais e tradicionais no semiárido brasileiro**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2009. 13 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Circular técnica, 42).

CARDINAEL, R.; UMULISA, V.; TOUDERT, A.; OLIVIER, A.; BOCKEL, L.; BERNOUX, M. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters*, v.13, n. 12, 2018.

CASSOL, P. C.; FACHINI, L.; MAFRA, A. L.; BRAND, M. A.; SIMONETE, M.; COIMBRA, J. L. M. Changes in organic carbon in soil of natural grassland converted to *Pinus taeda* plantations at three ages. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 2, p. 545-558, 2019. DOI: <<http://dx.doi.org/10.5902/198050986301>>.

DEMOLINARI, D. S. M.; SILVA, I. R.; VERGUTZ, L. T. N., N.; NOVAIS, R. F. Estoques de carbono e nitrogênio do solo sob povoamentos de eucalipto sob diferentes manejos na região do cerrado no centro-oeste de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., 2007, Gramado. *Proceedings*. Viçosa, MG: SBCS, 2007.

DENARDIN, R. B. N.; MATTIAS, J. L.; WILDNER, L. D. P.; NESI, C. N.; SORDI, A.; KOLLING, D. F.; BUSNELLO, F. J.; CERUTTI, T. Carbon stock in soil under different forest formations, Chapecó, Santa Catarina. *Ciência Florestal*, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014. DOI: <<http://dx.doi.org/10.5902/1980509813323>>.

DENG, L.; ZHU, G. Y.; TANG, Z. S.; SHANGGUAN, Z. P. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation*, v. 5, p. 127-138, 2016.

DIAS FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 402).

DICK, D. P.; ALMEIDA, H. C. A.; SILVEIRA, C. B.; ALMEIDA, D. Estabilidade de agregados e atributos químicos de um cambissolo sob florestamento de pinus no Sul do Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 27., 2008, Rio Janeiro. *Proceedings*. Viçosa, MG: SBCS, 2008. p.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global forest resources assessment 2015: how are the world's forests changing?** Rome, 2015

FIALHO, R. C.; ZINN, Y. L. Changes in soil organic carbon under eucalyptus plantations in Brazil: a comparative analysis. *Land Degradation & Development*, v.25, n. 5, p. 428-437, 2014. DOI: <<https://doi.org/10.1002/lrd.2158>>.

FIALHO, R. C.; TEIXEIRA, R. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; REIS, T. G.; SILVA, I. R. Fertilization and Irrigation Affect Soil Carbon under Eucalyptus Plantation in the Cerrado. *Floresta e Ambiente*, v. 26, n. 4, p. 1-10. 2019. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.067917>>.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002. DOI: <<https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>>.

HIGA, R. C. V.; ZANATTA, J. A.; RACHWAL, M. F. G. Plantações florestais comerciais e a mitigação na mudança do clima. In: OLIVEIRA, Y. M. M. D.; OLIVEIRA, E. B. D. (Ed.). **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 67-112. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1076153>>.

IBARR, M. A. **Estoque de carbono e fluxos de óxido nitroso e metano do solo em plantios de pinus e floresta nativa**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

INÁCIO, E. S. B. **Distribuição vertical de carbono orgânico em latossolo sob diferentes usos**. 2009. 102 f. Doutorado (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal da Lavras, Lavras.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e da silvicultura (PEVS)**: 2017. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/referencias/brasil/2017>>. Acesso em: 05 out. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)**: ano base 2018. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>>. Acesso em 05 maio. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

JANDL, R.; LINDNER, M.; VESTERDAL, L.; BAUWENS, B.; BARITZ, R.; HAGEDORN, F.; JOHNSON, D. W.; MINKKINEN, K.; BYRNE, K. A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, v. 137, n. 3-4, p. 253-268, 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>>.

JAMES, J. N.; GROSS, C. D.; DWIVEDI, P.; MYERS, T.; SANTOS, F.; BERNARDI, R.; FARIA, M. F. de; GUERRINI, I. A.; HARRISON, R.; BUTMAN, D. Land use change alters the radiocarbon age and composition of soil and water-soluble organic matter in the Brazilian Cerrado. *Geoderma*, v. 345, p. 38-50, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.019>>.

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 82, n. 2, p. 161-173, 2008. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s10705-008-9178-y>>.

KLUG, I. *Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude do Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações*. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

KOHLER, T. W.; KUNDE, R. J.; KELLING, P. M.; REIS, D. A.; MARTINAZZO, R. Estoques de carbono e de nitrogênio em cambissolo háplico sob plantio de acácia negra. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 10., 2016, Porto Alegre. *Proceedings*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental Seção Rio Grande do Sul, 2016.

LACLAU, P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, v. 180, n. 1-3, p. 317-333, 2003. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00580-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00580-7)>.

LAL, R.; NEGASSA, W.; LORENZ, K. Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v.15, p. 79-86, 2015.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, v. 220, n. 1-3, p. 242-258, 2005. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>>.

LIMA, A. M. N. *Estoque de carbono e frações da matéria orgânica do solo sob povoamento de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG*. 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LIMA, A. M. N. *Frações da matéria orgânica do solo sob povoamentos de eucalipto no Brasil e simulação de sua dinâmica com modelos processuais*. 2008. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LOPES, R. S.; RODRIGUES, S. J. S. C.; ALBUQUERQUE, M. P. F.; VASCONCELLOS, S. S. Estoque de carbono e densidade do solo em plantio de Eucalyptus grandis na Amazônia Oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOILO, 35., 2015, Natal. *Proceedings*. Viçosa, MG: SBCS, 2015.

LUGO, A. E.; BROWN, S. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil*, v. 149, n. 1, p. 27-41, 1993. DOI: <<https://doi.org/10.1007/BF00010760>>.

KRISHNA, M. P.; MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. *Energy, Ecology and Environment*, v. 2, p. 236-249, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s40974-017-0064-9>>.

MAFRA, A. L.; GUEDES, S. F. F.; KLAUBERG FILHO, O.; SANTOS, J. C. P.; ALMEIDA, J. A.; ROSA, J. D. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. *Revista Árvore*, v. 32, n. 2, p. 217-224, 2008. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000200004>>.

MAQUERE, V.; LACLAU, J. P.; BERNOUX, M.; AINT-ANDRE, L.; GONCALVES, J. L. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; RANGER, J. Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science*, v. 59, n. 5, p. 863-877, 2008. DOI: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01059.x>>.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; MACEDO, R. L. G. Estoque de carbono em sistemas agrossilvipastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional e cerrado nativo na região noroeste de Minas Gerais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. *Proceedings*. Viçosa, MG, 2002. 4 p.

ONTL, T. A.; SCHULTE, L. A. Soil carbon storage. *Nature Education Knowledge*, v. 3, p. 10-35, 2012.

OSTLE, N. J.; LEVY, P. E.; EVANS, C. D.; SMITH, P. UK land use and soil carbon sequestration. *Land Use Policy*, v. 26, p. S274-S283, 2009. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.006>>.

PAUL, K. I.; POLGLASE, P. J.; NYAKUENGAMA, J. G.; KHANNA, P. K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, v.168, n. 1-3, p. 241-257, 2002. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00740-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00740-X)>.

PENMAN, J.; KIKAN, C. K. S. K. *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Hayama, Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2003.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. da; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; FONSECA, S. Carbon and nitrogen stocks in the alfisol submitted to the Eucalyptus urograndis monoculture and Acacia mangium rotation. *Ciência Florestal*, v. 24, n. 4, p. 935-946, 2014. DOI: <<https://doi.org/10.1590/1980-509820142404013>>.

POST, W. M.; KWON, K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. **Global Change Biology**, v. 6, n. 3, p. 317-327, 2000. DOI: <<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>>.

PRIMIERI, S.; MUNIZ, A. W.; LISBOA, H. D. Soil Carbon dynamics in native ecosystems and reforestation in Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00110314, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.1590/2179-8087.110314>>.

PULROLNIK, K.; BARROS, N. F. de; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Carbon and nitrogen pools in soil organic matter under eucalypt, pasture and savanna vegetation in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500006>>.

QU, Z.; JIANG, R.; WANG, K.; LI, M. Soil Organic Carbon, aggregates, and fractions under different land uses in the Loess Plateau, China. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 28, n. 3, p. 1877-1885, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.15244/pjoes/90094>>.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 14, 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600037>>.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARAES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA, A. C. de. Soil organic Carbon and total Nitrogen as related with coffee spacing. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2051-2059, 2008. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500026>>.

REZENDE, M. C.; SILVA, I. R.; VERGUTZ, L.; DEMOLINARI, M. S. M.; NOVAIS, R. F.; LEITE, F. P. Estoques de Carbono e Nitrogênio no solo e na matéria orgânica leve de solos sob eucalipto, pastagem e Mata Atlântica, na Região Centro-Leste de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Proceedings**. Viçosa, MG: SBCS, 2007.

ROTERS, D. F. **Carbono e nitrogênio em cultivo de pinus em cambissolo húmico no planalto catarinense**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

RUFINO, A. M. M. **Estoque de carbono em solos sob plantios de eucalipto e fragmento de cerrado**. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

SANDI, J. T. T. **Estoque de carbono no solo sob diferentes coberturas vegetais, Chapecó-SC**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Comunitária Regional de Chapecó, Chapecó.

SANTOS, D. C.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A.; LIMA, C. L. R.; SANDRINI, W. C. Frações da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho do Sudoeste do Estado do RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Proceedings**. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

SANTOS, D. C.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A.; LIMA, C. L. R.; SANDRINI, W. C. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 838-844, 2013. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000037>>.

SCHULTHAIS, F.; NOVAIS, R. F.; LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; DAMBROZ, C. S.; BARROS, N. F.; TAKAHASHI, E. N. Influência do uso do solo no carbono orgânico total e biomassa microbiana na região de Luís Antônio-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Proceedings**. Viçosa, MG: SBCS, 2007.

SCHULTHAIS, F. **Dinâmica da matéria orgânica em solos sob plantios de eucalipto**. 2009. 37 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SHI, J.; CUI, L. L. Soil carbon change and its affecting factors following afforestation in China. **Landscape and Urban Planning**, v. 98, n. 2, p. 75-85, 2010. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.07.011>>.

SCOTT, N. A.; TATE, K. R.; FORD-ROBERTSON, J.; GILTRAP, D. J.; SMITH, C. T. Soil carbon storage in plantation forests and pastures: land-use change implications. **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, v. 51, n. 2, p. 326-335, 1999. DOI: <<https://doi.org/10.3402/tellusb.v51i2.16301>>.

SCOTT, N. A.; TATE, K. R.; ROSS, D. J.; PARSHOTAM, A. Processes influencing soil carbon storage following afforestation of pasture with *Pinus radiata* at different stocking densities in New Zealand. **Soil Research**, v. 44, n. 2, p. 85-96, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR05013>

SILVA, E. F. D. **Frações da matéria orgânica e decomposição de resíduos da colheita de eucalipto em solos dos tabuleiros costeiros da Bahia**. 2008. 124 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOARES, E. M. B. **Frações da matéria orgânica e composição molecular das substâncias húmicas de solos sob cultivo de eucalipto em biomas distintos**. 2009. 136 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOTOMAYOR J. F. M. **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes.** 2009 101 f. Dissertação (Mestrado Nutrição Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, SP.

TEIXEIRA, R. S.; SILVA, I. R.; SOARES, B. E. M.; FIALHO, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Impacto do cultivo do eucalipto na fração de carbono lável em solos de texturas distintas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Proceedings.** Viçosa, MG: SBCS, 2009.

TEIXEIRA, R. D.; FIALHO, R. C.; COSTA, D. C.; SOUSA, R. N. de; SANTOS, R. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; REIS, T. G.; SILVA, I. R. da. Land-use change with pasture and short rotation eucalypts impacts the soil C emissions and organic C stocks in the Cerrado biome. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 7, p. 909-923, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1002/ldr.3480>>.

VELOSO-GOMES, M.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V.; BREVILIERI, R. C.; COMERFORD, N. B.; STOPPE, A. M. Reforestation with loblolly pine can restore the initial soil carbon stock relative to a subtropical natural forest after 30 years. **European Journal of Forest Research**, v.137, p. 593-604, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s10342-018-1127-y>>.

VICENTE, L. D. C. **Origem do carbono orgânico em solos e estoques em agregados sob plantações de seringueira e eucalipto no bioma Mata Atlântica.** 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, RJ.

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; SILVA, I. R. Carbon and nitrogen dynamics under eucalyptus plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1623-1632, 2015. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20140182>>.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *eucalyptus* sp. implantados em campo nativo.** 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal da Santa Maria, Santa Maria, RS.

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V. S.; DA SILVA, J. E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, n. 1-3, p. 285-294, 2002. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00682-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00682-X)>.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Eucalypt plantation effects on organic carbon and aggregation of three different-textured soils in Brazil. **Soil Research**, v. 49, n. 7, p. 614-624, 2011.

ZINN, Y. L.; GUERRA, A. R.; SILVA, C. A.; FARIA, J. A.; SILVA, T. A. C. Soil organic carbon and morphology as affected by pine plantation establishment in Minas Gerais, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 318, p. 261-269, 2014. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.034>>.

