

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO
DO SOLO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE USO E MANEJO
AGROPECUÁRIO NO ESTADO DO MARANHÃO**

Telmo José Mendes

Engenheiro Civil

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO
DO SOLO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE USO E MANEJO
AGROPECUÁRIO NO ESTADO DO MARANHÃO**

Telmo José Mendes

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Coorientador: Dr. Diego Silva Siqueira

Coorientador: Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2015

M499a Mendes, Telmo José
Estimativa da variação do estoque de carbono do solo em diferentes cenários de uso e manejo agropecuário no Estado do Maranhão / Telmo José Mendes. – – Jaboticabal, 2015
xiv, 52 p. ; il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: Newton La Scala Júnior
Coorientador: Diego Silva Siqueira
Coorientador: Eduardo Barretto de Figueiredo
Banca examinadora: Alan Rodrigo Panosso, Carlos Cesar Ronquim, José Marques Júnior, Gener Tadeu Pereira
Bibliografia

1. Estoque de carbono. 2. Emissões. 3. Mudanças climáticas. 4. Zoneamento econômico-ecológico. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.433.3

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE USO E MANEJO AGROPECUÁRIO NO ES TADO DO MARANHÃO

AUTOR: TELMO JOSÉ MENDES

ORIENTADOR: Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. DIEGO SILVA SIQUEIRA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO

Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. CARLOS CESAR RONQUIM

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Campinas/SP

Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 12 de junho de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

TELMO JOSÉ MENDES – Filho de Antônio Dias Mendes e Odete José Mendes, nasceu em São Paulo, capital do Estado de São Paulo, no dia 05 de junho de 1975. Em fevereiro de 1994 ingressou no Curso de Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) – Faculdade de Ciências Tecnológicas – SP. Obteve o título de Engenheiro Civil em janeiro de 1999, recebendo o Prêmio Crea-SP de Formação Profissional – 1998, por ter sido classificado em primeiro lugar. Em março de 1999, adentrou no Mestrado em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), sendo bolsista pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, obtendo o título em janeiro de 2002. Em janeiro de 2005, estabelece residência no Estado do Maranhão, onde, em outubro de 2006, foi nomeado, em caráter efetivo, como professor na Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Câmpus de Chapadinha, em regime de dedicação exclusiva. De fevereiro a novembro de 2009, assumiu a Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Chapadinha, como Secretário Municipal. Em fevereiro de 2012, assumiu o cargo de Supervisor de Pagamentos por Serviços Ambientais pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (SEMA), até maio do ano de 2014. Em outubro de 2013, foi designado pela Governadora do Estado do Maranhão, ponto focal técnico junto à Comissão Nacional de Combate à Desertificação – CNCD, com participação ativa até os dias atuais. Em novembro de 2013, recebe da Câmara Municipal de Chapadinha, de acordo com o Decreto Legislativo nº 107, o Título de Cidadão Chapadinhense. Em junho de 2014, foi nomeado Membro Integrante do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Munim, primeiro comitê de bacia hidrográfica do Estado do Maranhão, sendo eleito Vice-Presidente para o exercício de 2015-2016. Iniciou, no ano de 2011, o Curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) pelo Programa de Pós-Graduação pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP, Programa DINTER-UFMA/IFMA/UNESP-FCAV. No mês de junho de 2015, submeteu-se à banca para a defesa de Tese, sendo aprovado como Doutor em Agronomia.

“Tudo posso naquele que me fortalece...”

(Filipenses 4:13)

A Deus, pela vida e por me dar forças para vencer.

Ao meu pai Antônio Dias Mendes, por ser um exemplo de homem e honestidade, e pelos esforços realizados para garantir meus estudos de base até à graduação, que me proporcionaram mais esta vitória.

À minha mãe Odete José Mendes, pela lição de vida, carinho, amor e por suportar minha ausência devida a minhas escolhas, mesmo assim dando-me incentivos na jornada edificante da vida.

Aos meus irmãos: Ronald e Marco Aurélio José Mendes, pelo apoio e incentivo durante estas e outras tarefas da vida.

Às minhas duas imensuráveis paixões desta vida, Victória e Clarice Sousa Mendes, filhas que, na pureza de suas infâncias, nunca deixaram de me esperar pacientemente para me abraçar e beijar no final de cada jornada, fortalecendo-me para as próximas.

COM AMOR, DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por esta bênção que é a vida e que me deu a coragem para sonhar e força para vencer mais esta etapa de minha jornada.

Aos meus pais, que sempre apoiaram minhas decisões e incentivaram-me ao crescimento constante, e que são fonte de amor e união, com todo carinho, agradeço tudo o que sou.

Aos Professores Marcílio Vieira Martins Filho e José Marques Júnior, pela oportunidade e por acreditarem no Programa DINTER-UFMA/IFMA/UNESP-FCAV.

Ao Professor, Orientador e agora amigo Dr. Newton La Scala Junior, pela oportunidade, orientação, ensinamentos e paciência durante a realização deste trabalho. Muito obrigado!

Ao Coorientador Dr. Diego Silva Siqueira, que atuou como tal no trabalho e na vida, sempre me aconselhando, criticando nos momentos certos e passando-me calma nos momentos mais difíceis.

Ao Coorientador Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo que mesmo em sua vida atribulada, sempre se preocupou e procurou ajudar-me mesmo a distância.

Aos Professores Carolina Fernandes, Glauco de Souza Rolim, Gener Tadeu Pereira e Marcílio Vieira Martins Filho, pela participação na banca do exame geral de qualificação, cujas críticas e sugestões contribuíram, de forma significativa, para a melhoria do presente estudo.

Aos Professores Alan Rodrigo Panosso, Carlos Cesar Ronquim, Gener Tadeu Pereira e José Marques Júnior, pela participação na banca de defesa, cujas sugestões contribuíram para a melhoria deste trabalho.

À Mara Regina Moitinho, uma grande e querida amiga, que esteve presente em todos os momentos desta etapa, apoiando-me e dando forças. Obrigado pelas risadas, café, conversas e conselhos. Ainda lhe devo “Caminhões de Melancia! ”

Ao meu novo amigo Ricardo de Oliveira Bordonal, pela troca de conhecimentos, experiências e pelos ensinamentos transmitidos.

À “Família Scala”, que me acolheu e deu-me o apoio essencial para a condução deste trabalho, tornando-se minha família em Jaboticabal. Muito obrigado, pela amizade, respeito, apoio, consideração e pela constante colaboração prestada durante a realização deste trabalho.

Aos colegas do Dinter, em especial Jussara Silva Dantas, pelas palavras de incentivo que me encorajavam nas horas mais difíceis e pelos momentos de alegria compartilhados.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação, Márcia, Nina, Edna, Isabel, Gabriela, Fernanda, Antônio, Diego e Rodrigo, por toda ajuda prestada.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Zezé, Shirley, Norival e Adriana. Obrigado pelo acolhimento.

À Universidade Federal do Maranhão, pela liberação para a realização do Curso de Doutorado.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, FCAV – Câmpus de Jaboticabal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo financiamento deste trabalho.

À Professora Tatiana Coqueiro, pela amizade e dedicação na revisão gramatical da língua portuguesa.

E a todos aqueles que, direta e indiretamente, ajudaram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Gases de efeito estufa	3
2.2 Sequestro de carbono no solo	4
2.3 Práticas agrícolas e seus efeitos sobre o estoque e a estabilidade do carbono no solo	6
2.3.1 Atividade de preparo do solo	6
2.3.2 Manejo conservacionista.....	7
2.3.2.1 Sistemas agrícolas e de integração lavoura-pecuária-floresta.....	9
2.4 Atributos do solo que influenciam na estabilidade do carbono	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 Caracterização da área de estudo	12
3.2 Obtenção de dados.....	18
3.3 Estimativa dos estoques de carbono do solo (t0).	20
3.4 Estimativa dos estoques de carbono do solo (2010).	21
3.5 Estimativa dos estoques de carbono do solo (2030).	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5 CONCLUSÕES	36
6 REFERÊNCIAS.....	37

ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE USO E MANEJO AGROPECUÁRIO NO ESTADO DO MARANHÃO

Resumo – Os solos apresentam variações no estoque de carbono em virtude das mudanças no uso da terra, seu manejo e características intrínsecas, herdadas dos fatores e processos de formação. Os objetivos do trabalho foram estimar a variação do estoque de carbono do solo em diferentes cenários, de uso e manejo agropecuário no Estado, e na conversão dos sistemas agropecuários tradicionais em conservacionistas. A estimativa para o estoque de carbono no solo para o Estado (0-30cm) resultou em valor próximo a 24,74Mt de C. As mudanças nos estoques de carbono do solo foram estimadas a partir do cenário (S0) para o cenário atual (2010), seguidas de sugestão de cenário conservacionista futuro, no ano de 2030. As áreas de pastagem estão em solos com os maiores valores de estoques de carbono médios de 62,19 (M g ha⁻¹); as áreas de silvicultura de 61,60 (M g ha⁻¹) e as áreas agricultáveis de 38,28 (M g ha⁻¹). A conversão de áreas de vegetação natural para áreas de uso agropecuário intensivo contribuiu para perdas de carbono do solo em 1,57 Mt de C, as áreas de pastagem com 1,36 Mt de C, as áreas agricultáveis em 0,21 Mt até o ano de 2010. A substituição dos sistemas agropecuários intensivos para os sistemas conservacionista nas áreas atuais, para o ano de 2030, acarretará estimativas de sequestro de C para o solo de 0,6 Mt, sendo a pecuária responsável por 0,54 Mt de C, e a agricultura por 0,03Mt de C.

Palavras-chave: estoque de carbono, emissões, mudanças climáticas, zoneamento econômico-ecológico

ESTIMATE OF CHANGES IN SOIL CARBON STOCK UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF LAND USE AND AGRICULTURAL MANAGEMENT IN MARANHÃO STATE

Abstract – Soils feature significant variations in soil carbon stocks through in land-use changes, management practices and intrinsic characteristics. The objective of this study was to estimate the changes in soil carbon stock under different scenarios of land use and agricultural management in the Maranhão State, considering the conversion of conventional agriculture to conservationist management systems. The estimate for soil carbon storage (0-30cm) was approximately 24.74 Mt C. Changes in soil carbon stocks were estimated from a scenario (S0) to the current scenario (2010), followed by the adoption of conservationist scenario by the year 2030. The pasturelands are under soils with the highest carbon stocks (62.19 Mg ha⁻¹), the forestry lands with 61.60 Mg ha⁻¹ and agricultural lands with 38.28 Mg ha⁻¹. The conversion of native vegetation for intensive agricultural use contributed to soil carbon losses of 1.57 Mt C, with grazing areas accounting for 1.36 Mt C and agricultural lands for 0.21 Mt C by 2010. The replacement of intensive farming systems by conservationist agricultural practices in the current areas has a technical potential for soil carbon sequestration of 0.6 Mt by 2030, with livestock and agricultural lands accounting for 0.54 Mt C and 0.03 Mt C, respectively.

Keywords: carbon storage, emissions, climate change, ecological economic zoning

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 – Estado do Maranhão, Biomas e Amazônia Legal (adaptado de EMBRAPA, 2013).....	14
Figura 2 – Índice de aridez do Estado do Maranhão (adaptado de MENDES et al., 2014).....	15
Figura 3 – Classes de solo do Estado do Maranhão (adaptado de EMBRAPA, 2013).....	16
Figura 4 – Uso e ocupação do solo em 2010, do Estado do Maranhão (adaptado de EMBRAPA, 2013).....	17
Figura 5 – Pontos de dados do sistema global de informação do solo 3D, <i>SoilGrids-1km</i> (adaptado de HENGL et al., 2014).	18
Figura 6 – Pontos avaliados em campo do Estado do Maranhão e que compõem a modelagem do <i>SoilGrids-1km</i> (adaptado de COOPER et al., 2005).....	19
Figura 7 – Estoque de Carbono no Solo para camada de 0-0,30 m (adaptado de BERNOUX et al., 2002), Estado do Maranhão.....	22
Figura 8 – Cenário considerado da variação do estoque de carbono do solo: ES(t0) - Condição Inicial, ES(2010) - Agricultura/Pecuária Intensiva, conforme fatores de conversão.....	23
Figura 9 – Cenário considerado da variação do estoque de carbono do solo: ES(2010) - Condição Alterada, ES(2030) - Agricultura/Pecuária Conservacionista, conforme fatores de conversão.	24
Figura 10 – Teor de argila (%) para camada de 0-0,30 m, Estado do Maranhão.....	27
Figura 11 – Densidade do Solo ($M\ g\ m^{-3}$) para camada de 0-0,30 m, Estado do Maranhão.	28
Figura 12 – Carbono Orgânico ($g\ kg^{-1}$) para camada de 0-0,30 m.	29
Figura 13 – Resultados para o Estoque de Carbono no Solo ES(t0) para camada de 0-0,30 m.	32
Figura 14 – Estoque de Carbono no Solo ES(2010) para camada de 0-0,30 m.....	33
Figura 15 – Estoque de Carbono no Solo ES(2030) para camada de 0-0,30 m.....	34

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 – Estatística descritiva dos atributos: argila (%), densidade (Mg m^{-3}), CO (g kg^{-1}) e estoques de carbono (Mg ha^{-1}) em função do uso do solo.	25
--	----

1 INTRODUÇÃO

O aumento da produção agrícola, impulsionado pelo crescimento da população mundial e pela necessidade de alimentos, tem forçado a expansão de 27% das áreas de terra cultivada no Mundo (FAO, 2009; BURNEY et al., 2010;). Alguns trabalhos alertam sobre a necessidade de se desenvolver indicadores de impactos globais do uso e da ocupação do solo para balizar esta expansão (ROCKSTROM et al., 2009).

A expansão de áreas de terras cultivadas obriga que os países em desenvolvimento, entre eles o Brasil, criem planos de desenvolvimento agropecuário. Em 2005 a expansão agrícola mundial foi responsável por emissões de 1,40 a 1,70 GtC (gigas toneladas de carbono), correspondendo de 10 a 12% do total das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE); incluindo 0,76 GtC equivalente de N_2O e 0,90 GtC equivalente para CH_4 , 58% e 47% do total antropogênico, respectivamente (SMITH et al., 2007). No mesmo ano, a mudança do uso da terra, relacionada, por exemplo, ao desmatamento de áreas naturais para a agricultura foi responsável por emissões adicionais de 1,5 GtC (CANADELL et al., 2007).

Relatórios referentes aos inventários nacionais de gases de efeito estufa de diversos países mostram que os GEE emitidos nos trópicos estariam principalmente relacionados ao desmatamento e à intensificação da agricultura, enquanto em regiões temperadas os GEE provêm principalmente da combustão de combustíveis fósseis no transporte e em setores da indústria (UNFCCC, 2006).

Segundo Cerri et al. (2009), no caso específico do Brasil, as emissões nacionais de GEE para o ano base de 2005, os subsetores que mais contribuíram foram: Florestas e conversão de áreas naturais em pastagens, com 51,9% das emissões totais; queima de combustíveis fósseis, com 16,8%; fermentação entérica da criação de gado bovino, com 12%; emissões provenientes de solos agrícolas responsáveis por 9,3% das emissões totais, e outros setores com 10%.

Em relação as emissões provenientes da degradação do estoque de carbono do solo (respiração do solo) (LA SCALA et al., 2006, 2012), o solo possui naturalmente regiões com maior potencial de emissão do que outras. Estes

potencias naturais, são intrínsecos ao solo, e estão relacionados a fatores e processos de formação, expressos por sua mineralogia, por exemplo, covariativa destes fatores e processos de formação (LA SCALA et al., 2000a, 2000b; BAHIA et al., 2015; LEAL et al., 2015). Portanto, ao se conhecer previamente a variação destes fatores e processos de formação, o planejamento do uso e ocupação do solo pode ser mais eficiente, possibilitando maior efeito de mitigação da emissão de CO₂, conservação do estoque de carbono no solo (WARD et al., 2014), incrementar a fertilidade e melhorar o rendimento em solos degradados (ROBERTSON et al., 2000; WEST; POST, 2002; LAL, 2004; ALVAREZ, 2005; GOMIERO et al., 2008; SMITH et al., 2008).

Este trabalho teve como objetivo estimar a variação do estoque de carbono do solo em diferentes cenários de uso e manejo agropecuário no Estado do Maranhão considerando potenciais naturais para conservação do carbono no solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gases de efeito estufa

O efeito estufa é um mecanismo natural responsável por manter a temperatura média do planeta em níveis adequados para a vida entre 15 °C e 18 °C. Esse fenômeno ocorre quando a energia emanada de nosso planeta, na forma de radiação, e na faixa espectral do infravermelho, é absorvida pelos assim chamados gases de efeito estufa (GEE) presentes na atmosfera. Como consequência, ondas eletromagnéticas ou radiação na faixa espectral do infravermelho enviadas ao espaço ficam retidas na baixa atmosfera, resultando assim num aumento da temperatura média de nosso planeta. Esse fenômeno foi enunciado inicialmente em 1824 por Josef Fourier, a partir de teorias e comprovações do eletromagnetismo (BONAN et al., 1992; BETTS, 2000; CHASE et al., 2000; GOVINDASAMY et al., 2001), sendo promovido pela presença de gases, como o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4) e os clorofluorcarbonos (CFCs) que, juntamente com o vapor d'água, possuem a propriedade de absorver radiação na faixa espectral do infravermelho. Por possuírem esta propriedade, estes gases também são conhecidos como gases de efeito estufa. O aumento nas emissões desses gases, em decorrência da ação antrópica, tem intensificado o efeito estufa, acarretando sérias consequências no clima global. Por este motivo, as discussões em torno de temas como mudanças climáticas e aquecimento global ganham cada vez mais destaque, passando a ser amplamente abordadas.

Relatórios publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2001) têm evidenciado que as ações antropogênicas são responsáveis por um aumento da temperatura média do planeta próximo a 0,6 °C. O aumento das emissões provenientes, principalmente, da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, teve início na Revolução Industrial no século XVIII (BUCKERIDGE; AIDAR, 2002).

Dentre os GEE, o CO_2 é o que mais contribui para o efeito estufa, devido à grande quantidade emitida na atmosfera, e algumas práticas agrícolas, em especial

mudanças do uso e do manejo dos solos, estão intimamente relacionadas com essa emissão (CERRI et al., 2007).

As concentrações de CO₂ na atmosfera aumentaram em cerca de 100 ppm (partes por milhão) ao longo dos últimos 250 anos, passando de 275 a 285 ppm, na era pré-industrial, para a concentração de 379 ppm em 2005 (FORSTER et al., 2007) e 389 ppm em 2010 (CHEN et al., 2011), e em maio de 2012 a concentração de CO₂ na atmosfera atingiu o nível de 400 ppm.

Num estudo inédito, o Primeiro Relatório de Avaliação Nacional (RAN1) do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) indicou que todo o Brasil deverá ficar ao menos 3 °C mais quente até o final de 2100. Em suma, a temperatura poderá subir em todos os biomas, sendo previstas mais chuvas nos Pampas e menos na Amazônia.

Sendo a emissão de CO₂ do solo uma importante componente do ciclo global de C, pequenas variações nessa componente podem afetar a concentração de CO₂ na atmosfera (RETH et al., 2005).

2.2 Sequestro de carbono no solo

O conceito de sequestro de carbono foi consagrado pela Conferência de Quioto, em 1997, com a finalidade de conter e reverter o acúmulo de CO₂ na atmosfera, visando à diminuição do efeito estufa. Para mitigar o aquecimento global, uma variedade de meios artificiais de captura e de sequestro do carbono, assim como processos naturais estão sendo estudados e explorados (SILVA et al., 2001).

Os principais compartimentos de carbono no planeta são: oceanos (38.000 Pg C), atmosfera (750 Pg C), formações geológicas contendo o carbono fóssil e mineral (5.000 Pg C) e ecossistemas terrestres (MACHADO, 2005).

Os solos são um grande reservatório de carbono, aproximadamente 1500 Pg, equivalente a 4,5 vezes a quantidade de carbono presente na biomassa terrestre e 3,3 vezes a quantidade estocada na atmosfera (BRUCE et al., 1999).

Considerando estes valores e diante da necessidade de preservação deste importante reservatório, os estudos referentes aos mecanismos de sequestro de

carbono estão sendo direcionados em duas áreas básicas: uma relacionada à compreensão dos processos de emissão e absorção por diferentes ecossistemas naturais (AMADO et al., 2001; FERNANDES et al., 2002; SIX et al., 2006) e outra ao desenvolvimento de alternativas de uso da terra que promovam o sequestro de CO₂ por esses sistemas (LA SCALA et al., 2001; LAL, 2004; DE RESENDE et al., 2006; PANOSSO et al., 2009), o que torna imprescindível compreender os mecanismos que aumentam as entradas de C no solo ou diminuem a emissão de CO₂ do solo, favorecendo o acúmulo de C no solo.

O Brasil possui um enorme potencial para ser um importante dreno mundial de CO₂, pois, além das extensas áreas com florestas, reflorestamento e pastagem, possui na agricultura uma grande área com o plantio direto (14 milhões de ha), e este sistema, por possibilitar uma baixa mobilização do solo, representa mais uma oportunidade de sequestro de quantidades significativas de carbono no solo (BAYER et al., 2000; CAMPOS, 2006).

A localização geográfica do Estado do Maranhão, entre o Nordeste e a Amazônia, caracteriza os aspectos transicionais (semiárido e úmido) das condições de clima e de solo da região, o que favorece a existência tanto de ambientes salinos quanto de campos inundáveis, babaquais, cerrados e vegetação florestal de grande porte (MUNIZ, 2006). Ainda, o Estado apresenta temperaturas médias anuais acima de 22 °C, sendo as temperaturas médias anuais mais elevadas registradas no centro-sul do Estado, com aproximadamente 28,8 °C (CIVIL, 2011). Tais condições climáticas não são favoráveis à adoção do sistema de plantio direto (SPD), porém empregam-se no Estado outras alternativas mais adequadas e que também consistem em práticas agrícolas conservacionistas, a exemplo de sistemas agroflorestais e cultivos em Aleias, que consistem em plantar uma cultura de interesse econômico nas entrelinhas de um plantio de árvores, preferencialmente leguminosas (AGUIAR, 2006), visando a melhorias nas condições químicas, físicas e biológicas do solo, por meio da adição de matéria orgânica ao mesmo (ALTIERI, 2002; VASCONCELOS et al., 2012).

2.3 Práticas agrícolas e seus efeitos sobre o estoque e a estabilidade do carbono no solo

2.3.1 Atividade de preparo do solo

A degradação do solo é um dos maiores desafios da humanidade, pois afeta a capacidade produtiva de um ecossistema, afetando também o clima do planeta através de alterações no equilíbrio da água e da energia, e modificações nos ciclos de carbono, nitrogênio, enxofre e outros elementos, ocasionando impactos negativos na produtividade agrícola e no meio ambiente como um todo (BERTOL et al., 2003). Os processos causadores da degradação do solo são o desmatamento ou a remoção da vegetação nativa, o superpastejo, atividades agrícolas inadequadas de uso e manejo do solo e a exploração intensiva (AGUIAR et al., 2006).

Atividades agrícolas, tais como o desflorestamento, o preparo do solo, a calagem e a irrigação, são as principais atividades humanas que têm causado decréscimo no teor de carbono do solo associado ao aumento na taxa de decomposição da matéria orgânica (CERRI et al., 2007)

A perda de carbono induzida pelo preparo do solo tem sido objeto de estudo de muitos autores que têm demonstrado perdas significativas, especialmente em períodos curtos após o preparo do solo, independentemente das condições edáficas, conforme indicam vários estudos (REICOSKY; LINDSTROM, 1993; FORTIN et al., 1996; REICOSKY et al., 1997; LA SCALA et al., 2001; TEIXEIRA et al., 2010).

Similarmente ao processo de desflorestamento e à queima da biomassa, o preparo do solo acelera as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), reduzindo assim o carbono orgânico e liberando grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera (ELLERT; JANZEN, 1999; ROCHETTE; ANGERS, 1999; LA SCALA et al., 2006).

A atividade decompositora dos microrganismos é intensificada imediatamente após o preparo do solo, devido à exposição do carbono, antes protegido no interior dos agregados, à maior oxigenação do solo e a temperaturas

mais elevadas (REICOSKY; LINDSTROM, 1993; BEARE et al., 1994). Entretanto, após certo período, ocorre a redução das frações lábeis da MOS, e a atividade basal microbiana decresce (SIX et al., 2006). La Scala et al. (2001), avaliando as emissões de CO₂ em solos submetidos a preparo convencional, evidenciaram que a intensidade de preparo foi um fator determinante das perdas de CO₂ do solo para a atmosfera.

Em adição, o preparo também deixa o solo suscetível ao processo de erosão, o que resulta em maior perda de carbono (BERTOL et al., 2003). A incorporação dos resíduos vegetais ao solo, no momento do preparo, também resulta em acréscimos nas taxas de emissões de CO₂, acelerando o processo de mineralização, pois aumenta a área de contato entre o solo e o resíduo, que, associados à maior aeração e temperatura, facilitam a ação da atividade microbiana (SILVA-OLAYA et al., 2013).

2.3.2 Manejo conservacionista

Sistema de manejo que forneça um adicional de resíduos vegetais juntamente com a retenção de C no solo torna-se uma importante prática para aumentar a capacidade de mitigação do CO₂ atmosférico e a redução do aquecimento global (AMADO et al., 2001). Tal fato é amplamente reportado na literatura e está diretamente relacionado ao tempo de adoção do sistema de manejo, e geralmente este aumento é verificado nas camadas mais superficiais do solo (RAZAFIMBELO et al., 2006; LUCA et al., 2008; GALDOS et al., 2009; CANELLAS et al., 2010; PANOSSO et al., 2011; DENDOOVEN et al., 2012; THORBURN et al., 2012).

Entretanto, além da manutenção permanente da cobertura do solo, outros fatores precisam ser atendidos para que ocorra o incremento da matéria orgânica, que acarretará no sequestro de carbono, a exemplo da incorporação na rotação de culturas de uma espécie para fins de adubação verde, eficiente no processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN). Estima-se que, para cada 10 unidades de carbono sequestrado no solo, exista a necessidade de se imobilizar 1 unidade de nitrogênio, portanto faz-se necessária a utilização de espécies de leguminosas com

alta FBN para a efetiva disponibilidade de nitrogênio dentro do sistema (SISTI et al., 2004; SIX et al., 2006), sendo que, para acumular C, torna-se imprescindível acumular N. O terraceamento também é uma prática agrícola conservacionista que, associada ao sistema com rotação de culturas e com cobertura permanente do solo, é eficiente no controle da erosão hídrica, minimizando as perdas de solo, pois favorece a retenção e a infiltração de água no solo, reduzindo o escoamento superficial (LEITE et al., 2002; PES, 2009).

O ciclo do carbono está estreitamente relacionado ao ciclo do nitrogênio, por ser considerado o elemento mais limitante à produção de biomassa, pesquisas estão sendo realizadas e tem-se comprovado que o efeito de adubações nitrogenadas (mineral, orgânica ou leguminosas) promove um incremento no sequestro de carbono em solos agrícolas (SANTI et al., 2003).

Segundo Roscoe et al. (2006), para que haja um efetivo acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) no sistema, deve-se ter uma taxa de entrada de carbono superior à taxa de decomposição. De acordo com Bayer (1996), o potencial de incremento de matéria orgânica do solo pela adoção do sistema de plantio direto numa estimativa poderá aumentar, em média, 1% em 10 anos nas camadas de 0-15 cm.

A utilização dos sistemas conservacionistas do solo, a exemplo do plantio direto, apresenta dados significativos relacionados ao sequestro de carbono sob diferenciadas condições edafoclimáticas. Costa et al. (2008), em estudos para determinar os estoques de carbono orgânico no solo e as emissões de CO₂ influenciadas por sistemas de manejo, em experimentos conduzidos no Sul do Brasil, num Argissolo Vermelho distrófico típico, concluem que o plantio direto, associado a sistemas de cultura com alta adição de resíduos vegetais, ricos em C e N, resulta em balanço positivo de C no solo, sendo possível verificar a importância do plantio direto e da inclusão de plantas de cobertura leguminosas na conservação do C no solo.

Bayer et al. (2000), em um experimento conduzido na depressão central do Rio Grande do Sul (RS), determinaram no sistema plantio direto uma taxa de acúmulo de 1,0 t C ha⁻¹ ano⁻¹ em relação ao preparo convencional. A maioria dos estudos realizados no RS apresentou maiores estoques de MOS no sistema de

plantio direto quando adotada uma leguminosa fixadora de N₂ em sistema de rotação de culturas (AMADO et al., 1999; BAYER; MIELNICZUK, 1999; DIEKOW et al., 2005). Na região do Cerrado, Corazza et al. (1999) encontraram a taxa de acúmulo de 1,43 t C ha⁻¹ ano⁻¹ no sistema plantio direto adotado por 15 anos. Séguy et al. (2001) estimaram taxas de sequestro de C, sob condições de clima subtropical fresco e úmido, em torno de 1,3 a 2,4 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

2.3.2.1 Sistemas agrícolas e de integração lavoura-pecuária-floresta

Além de o aporte de resíduos vegetais ser diferenciado quando em sistemas que integrem lavoura-pecuária-floresta (LPF) e em sistemas puros de produção (SALTON et al., 2002), o pastejo também influencia no aporte de matéria orgânica ao longo da profundidade do solo, pois promove maior crescimento radicular tanto da pastagem quanto das culturas integrantes do sistema (TRECENTI et al., 2008).

Os sistemas de integração LPF, principalmente por meio do componente arbóreo, favorecem a dinâmica hídrica do solo, além de serem considerados estabilizadores térmicos (PRIMAVESI, 2007). Outra importante função das árvores neste sistema diz respeito à maior produção de biomassa total quando comparada a outros sistemas sem a adição de florestas (MACEDO et al., 2009). Quando associado ao SPD, este sistema apresenta resultados significativos quanto ao incremento nos estoques de carbono do solo (CARVALHO et al., 2010; BALBINO et al., 2012). Carvalho et al. (2009), avaliando o potencial de sequestro de carbono do solo de Cerrado na região da Amazônia, observaram que a taxa de acúmulo de carbono no solo foi significativamente maior após a conversão do SPD para o sistema ILP sob SPD.

Sistemas que envolvem somente pastagens perenes também propiciam quantidades significativas de palha na superfície e de raízes no perfil do solo, por isso são apontados como recuperadores do teor de carbono do solo, conforme indicam estudos conduzidos (FEIGL et al., 1995; CORAZZA et al., 1999; SALTON et al., 2002; VILELA et al., 2008). Em adição, a partir da decomposição das raízes, cria-se um ambiente no interior do solo formado por uma rede de canalículos que facilita a troca de gases e a infiltração de água no solo (MACEDO; ZIMMER, 1993),

o que contribui para a redução do processo erosivo e a perda de carbono orgânico do solo (TRECENTI et al., 2008).

Em relação a áreas sob vegetação natural, de acordo com Bayer e Mielniczuk (1999), existe um equilíbrio dinâmico no balanço entre as adições e as perdas de carbono orgânico do solo dentro do sistema. Entretanto, com a conversão desta em áreas agrícolas e florestais, observa-se uma rápida perda de carbono do solo devido a combinação dos fatores: temperaturas elevadas, umidade e aeração que facilitam a degradação microbiana, que também se intensifica com o constante preparo do solo decorrente das atividades agrícolas (CASTRO FILHO et al., 1991).

Ao analisarem o efeito da conversão de áreas florestais para agrícolas após os primeiros 5 anos, Lal et al. (1995) observaram a redução de 20% da quantidade inicial de carbono orgânico do solo, na camada de até 30 cm, como resultado desta conversão.

Na busca por indicadores da qualidade do solo, o carbono orgânico destaca-se dentre os parâmetros e características mais utilizados para o monitoramento do solo tanto a médio quanto a longo prazos, sendo o indicador químico mais sensível para a análise dos processos ou comportamento do solo, uma vez que afeta a produtividade das culturas decorrente de seu efeito sobre a estrutura do solo, a disponibilidade de água para as plantas e a resistência do solo a mudanças de pH (ROBERTSON; THORBURN, 2001; BRIENEN et al., 2015), o que torna crescente o interesse científico na identificação de sistemas de manejo do solo e da cultura que promovam a estabilidade deste elemento no solo (BAYER et al., 2000; FREITAS, 2001; CAMPOS, 2006; SIX et al., 2006; GALDOS et al., 2009).

2.4 Atributos do solo que influenciam na estabilidade do carbono

Solos de textura argilosa, com elevados teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, contribuem para aumentar a estabilidade do carbono orgânico em razão da alta capacidade de proteção na forma de complexos organominerais (ROSCOE; BUURMAN, 2003), atuando como mecanismo de proteção do carbono contra o ataque microbiano, uma vez que as moléculas orgânicas são absorvidas pela

superfície desses minerais (DOMINY et al., 2002; BRONICK; LAL, 2005). Por isso, solos com textura mais argilosa geralmente apresentam maior teor de carbono (ZINN et al., 2007).

Ainda, a respiração das raízes e de macro e microrganismos é otimizada em solos com texturas mais grosseiras (arenosa e média). Solos com esta característica textural possuem maior quantidade de poros médios e grandes, possibilitando que o ar entre no solo em maior quantidade, proporcionando melhor aeração (CAPECHE et al., 2004), criando um ambiente mais oxidativo e favorecendo a atividade microbiana na mineralização da MOS (REICOSKY, 2002).

A disponibilidade de água e a temperatura são fatores que influenciam na capacidade do sistema em armazenar carbono no solo (GALDOS et al., 2009; USSIRI; LAL, 2009) por também afetarem diretamente as taxas metabólicas dos microrganismos decompositores do solo (SIX et al., 2006). Em relação à umidade do solo, a atividade decompositora microbiana é influenciada tanto pelas condições de encharcamento quanto pela dessecação do solo (LINN; DORAN, 1984; TSAI et al., 1992; EPRON et al., 2006; LAL, 2009). Já em relação à temperatura, verifica-se que a atividade é otimizada quando esta se encontra na faixa entre 28 e 40 °C (DAVIDSON et al., 2000; FANG; MONCRIEFF, 2001; LICHT; AL-KAISI, 2005).

Brienen et al. (2015), em estudo desenvolvido na floresta Amazônica, estimam que altas temperaturas podem contribuir ainda mais para a redução da absorção e da estocagem de carbono neste ecossistema. Já em regiões temperadas submetidas a baixas temperaturas, a taxa de decomposição da MOS é mais lenta, resultando em maior acúmulo de carbono no solo (THORBURN et al., 2012).

Vários estudos reportam que valores elevados de densidade do solo apresentam uma relação negativa com o teor de carbono do mesmo (BRAIDA et al., 2006; LUCA et al., 2008), uma vez que solos que apresentam menor densidade são em geral melhor estruturados, apresentando maior porosidade, o que favorece a infiltração de água da chuva, diminuindo o escoamento superficial (TOMINAGA et al., 2002; SOUZA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2010; SILVA et al., 2012), tornando-o menos propenso à erosão e consequentemente à perda de carbono (BERTOL et al., 2003; BRADY; WEIL, 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O estado do Maranhão está compreendido em uma área total de 33.193.694,80 ha, entre as latitudes de 01°02'42" e 10°14'59" S e as longitudes de 48°45'33" e 41°48'33" W. Localizado na região Nordeste do Brasil, é oitavo Estado brasileiro e o segundo do Nordeste, em extensão territorial e limita-se com o Oceano Atlântico e os Estados do Tocantins, Pará e Piauí (IMESC, 2010).

Com vasta biodiversidade decorrente da presença de um grande conjunto de biomas, onde se destacam: Amazônia (34,80%), Caatinga (1,10%) e Cerrado, com este último prevalecendo em 64,10% do território (STELLA, 2011), (Figura 1). O Cerrado Maranhense é considerado um "*hotspot*" mundial de biodiversidade, reconhecido como a savana mais rica do mundo (BRASIL, 2012).

As condições climáticas no Maranhão são características de uma área de transição no sentido sudeste (SE) para noroeste (NW), sendo que a penetração das massas do regime marítimo é facilitada pela configuração do relevo. Os movimentos de avanço e recuo das massas de ar predominantes no Estado têm maior penetração pelas partes mais baixas e pelas bacias hidrográficas perpendiculares ao litoral, a mesma direção de penetração das chuvas duradouras do regime marítimo definido pela Massa Equatorial Atlântica Norte (mEn), proveniente do hemisfério Norte em janeiro e com retorno a partir de meados de março (EMBRAPA, 2013).

O clima é quente úmido na região oeste; quente semi-úmido nas regiões norte e sul e nas regiões central, leste e oeste o clima apresenta-se quente, semiárido e sub-úmido seco, respectivamente (Figura 2). Com temperatura média anual de 30 °C, com a mínima de 20,3 °C e a máxima até 40 °C (MENDES et al., 2014).

De acordo com CIVIL (2011), as principais classes de solos encontradas no Estado do Maranhão que expressam maior importância, do ponto de vista socioeconômico são: Latossolo Amarelo (33,87%); Plintossolo Argilúvico (13,67%); Argissolo Vermelho-Amarelo (9,54%); Argissolo Vermelho-Amarelo petroplíntico

(9,22%); Neossolos Quartzarênicos (8,84%); Neossolos Litólicos (6,98%) e Luvissoles Crômicos (6,70%). Total de classes significativas é de 88,82% no Estado. As classes de solos com menor expressão são: Gleissolos (1,89%); Solos Indiscriminados de Mangue (1,85%); Nitossolo Vermelho (1,38%); Latossolo Vermelho (1,20%); Neossolos Flúvicos (1,07%); Plintossolo Pétrico (0,94%); Neossolos Eólicos; Dunas (0,38%); Vertissolo (0,34%); Planossolo Nátrico (0,27%); Argissolo Acinzentado (0,20%) e Cambissolo (0,07%). Estas classes correspondem a cerca de 10% do Estado (Figura 3).

Segundo senso do IBGE, 2006, da superfície total do Estado do Maranhão, 12.991.448 ha (aproximadamente 40% do Estado) são ocupados por estabelecimentos rurais. A área total ocupada com lavouras no Estado foi de 1.637.776 ha e, em 2010, essa área total aumentou para 1.751.480 ha. Em termos relativos, não houve alteração na participação das áreas ocupadas com lavouras temporárias (97,9%) e áreas ocupadas com lavouras permanentes (2,1%). As lavouras temporárias são as culturas de arroz, feijão, mandioca, milho, soja e outros produtos, ao passo que, as lavouras permanentes, são as culturas de banana, de caju e outros produtos (EMBRAPA, 2013).

As áreas de pastagens localizam-se, fundamentalmente, no centro e no oeste do Estado do Maranhão, próximo ao Estado do Pará. Por outro lado, as áreas voltadas a agricultura localizam-se na região sul do Estado, sendo as regiões de Balsas e Tasso Fragoso aquelas mais voltadas a tal atividade (SILVA et al., 2013). Na região de da cidade de Imperatriz, predomina-se a pecuária semi-intensiva, com alto padrão zootécnico. Assim, nessa região, a pecuária vem sendo substituída por atividades agrícolas, e também a silvicultura começa a se difundir naquela região. O incremento de áreas destinadas à silvicultura no Estado possui média anual aproximada de 18.300 ha, passando de 50.802,50 ha em 2006 para 197.167,90 ha em 2010 (EMBRAPA, 2013) (Figura 4).

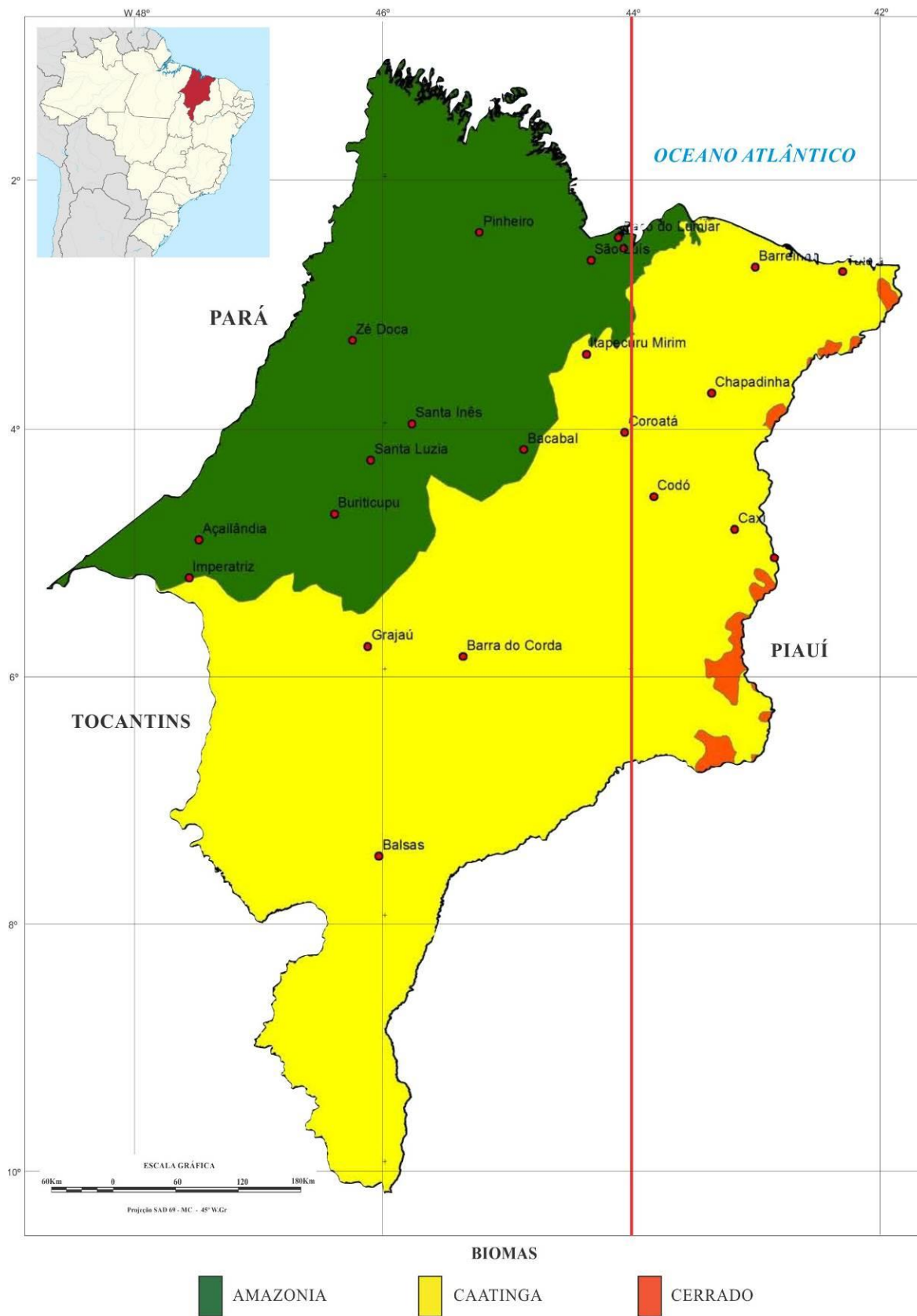


Figura 1. Estado do Maranhão, Biomas e Amazônia Legal (adaptado de EMBRAPA, 2013).

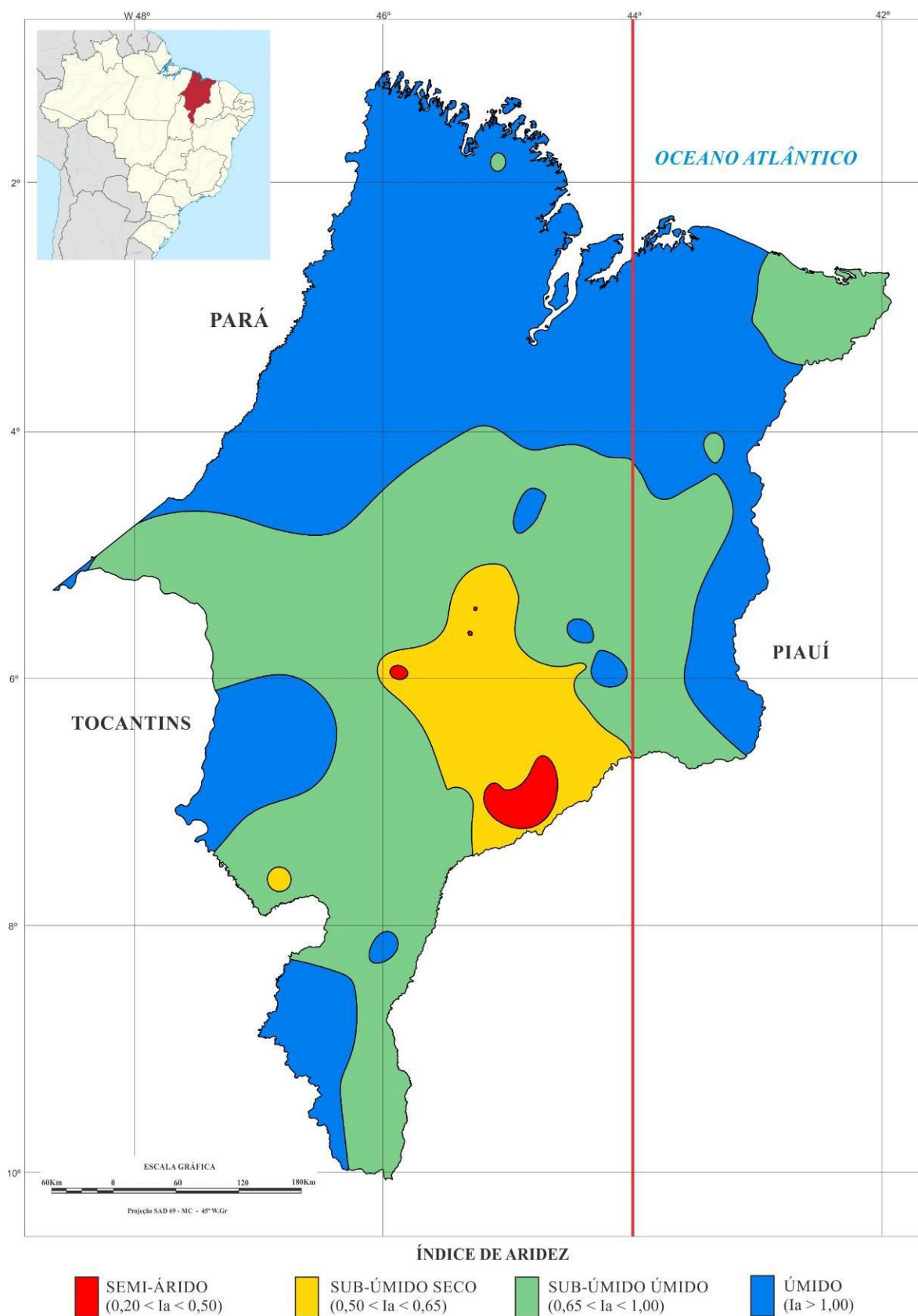


Figura 2. Índice de aridez do Estado do Maranhão (adaptado de MENDES et al., 2014).

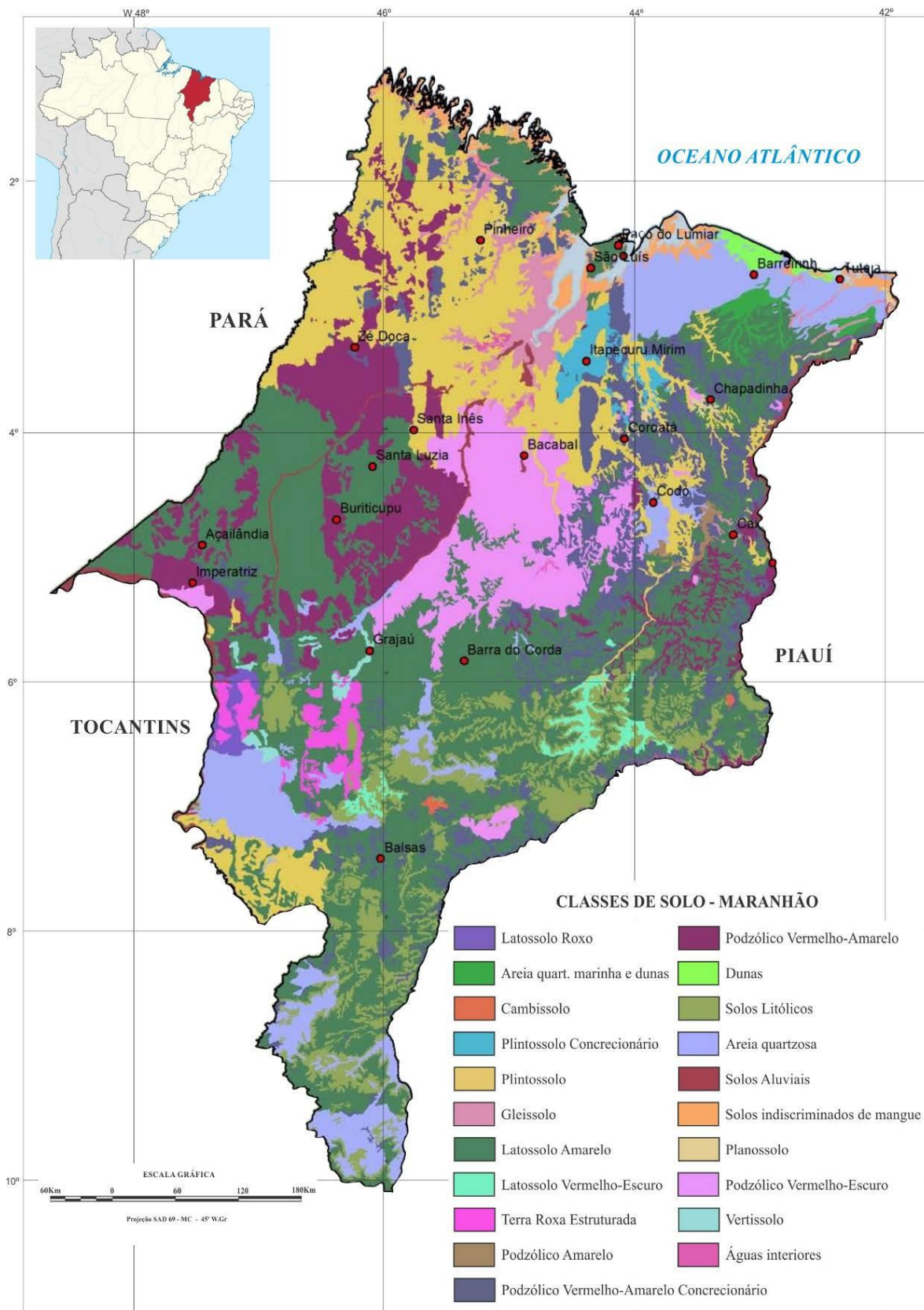


Figura 3. Classes de solo do Estado do Maranhão (adaptado de EMBRAPA, 2013).

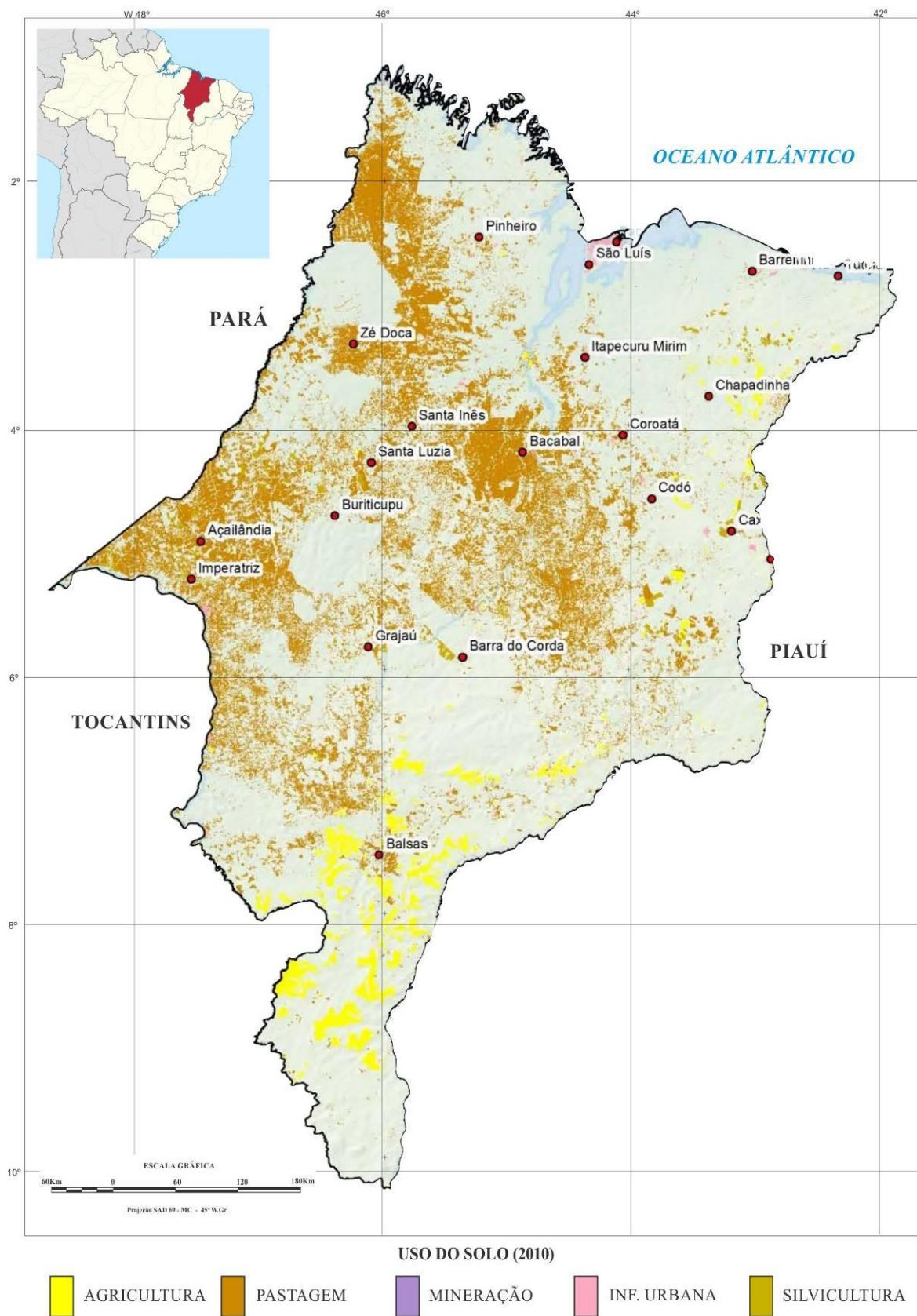


Figura 4. Uso e ocupação do solo em 2010, do Estado do Maranhão (adaptado de EMBRAPA, 2013).

3.2 Obtenção de dados

Foram utilizadas informações do teor de argila (TA) (%), densidade do solo (DS) (Mg m^{-3}) e carbono orgânico (CO) (g kg^{-1}) obtidas na plataforma de acesso aberto *SoilGrids-1km*. Cada ponto avaliado possui representatividade de 100 ha ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) (Figura 5).

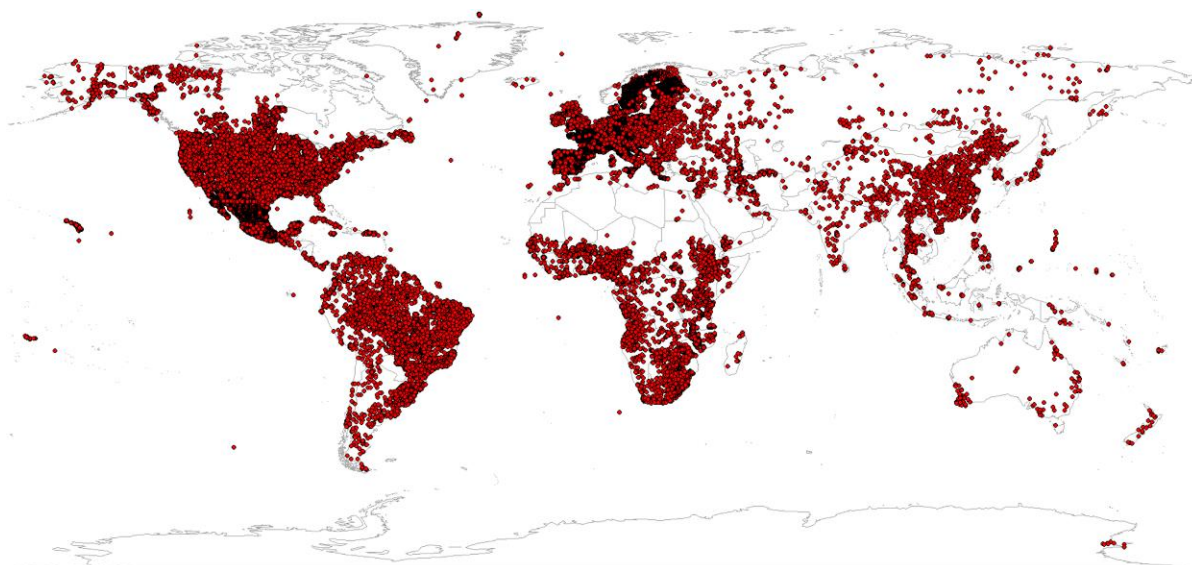


Figura 5. Pontos de dados do sistema global de informação do solo 3D, *SoilGrids-1km* (adaptado de HENGL et al., 2014).

Os atributos do solo obtidos no *SoilGrids-1km* foram estimados por um modelo de regressão que associa banco de dados internacional contendo 110 mil informações de solo avaliadas em campo, com 75 covariáveis representativas dos fatores de formação do solo. A precisão das estimativas do *SoilGrids-1km* varia de 23 a 51%, dependendo da densidade de informações utilizadas na modelagem regional (HENGL et al., 2014).

As 10.034 informações avaliadas em campo que compõem o *SoilGrids-1km* provenientes do Brasil (9,1% do total) foram obtidas do trabalho de Cooper et al. (2005). No Estado do Maranhão foram consideradas na modelagem do *SoilGrids-1km* aproximadamente 200 observações de campo dos horizontes com representatividade pedológica (Figura 6), sendo que a uniformidade de distribuição dos dados foi baixa nas regiões noroeste, centro-oeste e sul do Estado do Maranhão.

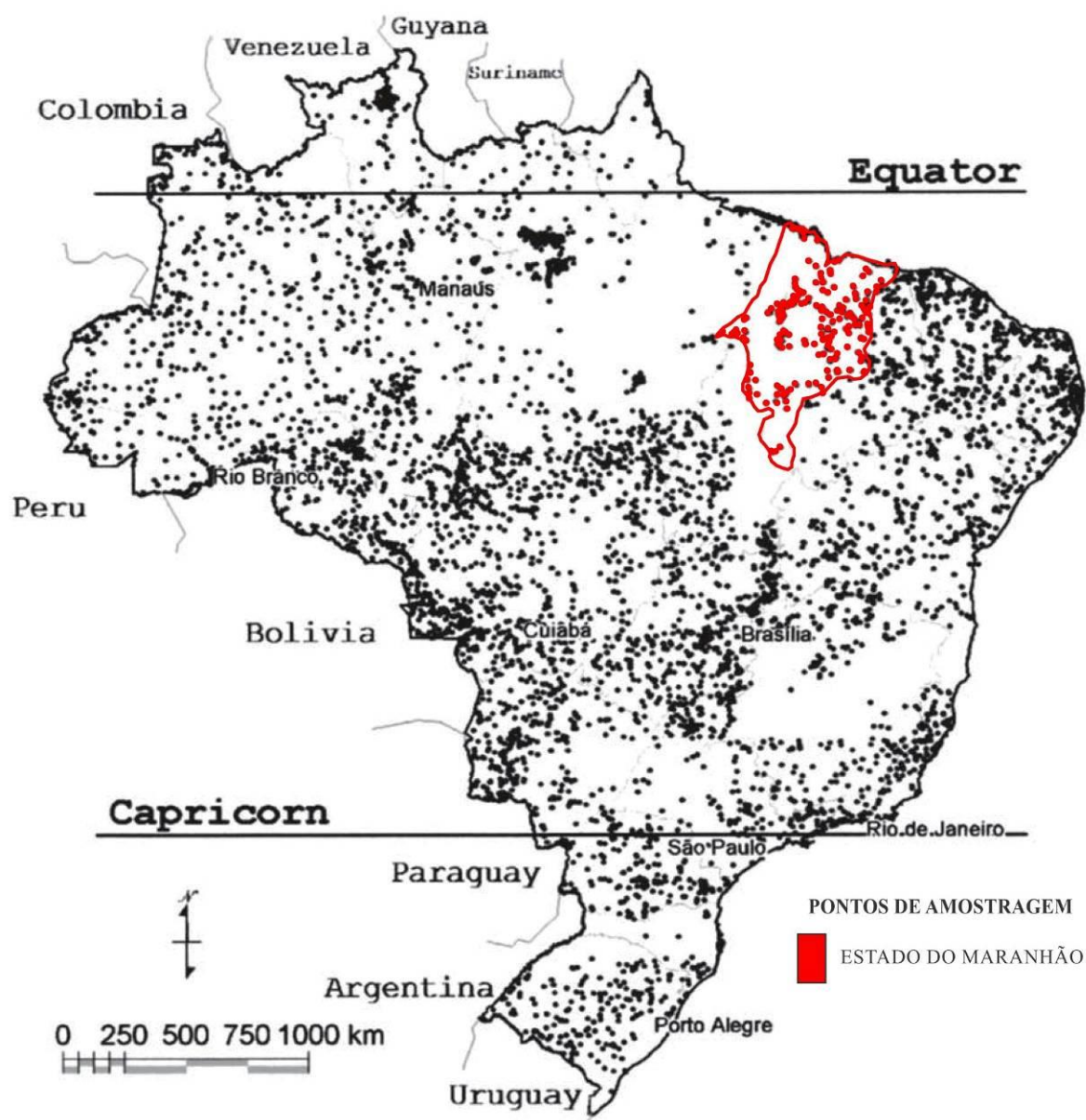


Figura 6. Pontos avaliados em campo do Estado do Maranhão e que compõem a modelagem do SoilGrids-1km (adaptado de COOPER et al., 2005).

Foram utilizadas as informações das profundidades de 0,0-0,05 m, 0,05-0,15 m e 0,15-0,30 m. A partir da prospecção das informações (*'data mining'*) das 110 mil informações do *SoilGrids-1km* foi construído novo banco de dados utilizando somente informações do Estado do Maranhão. O banco de dados foi composto por 384.542 observações. Cada observação possui representatividade de 100 ha.

O banco de dados montado segue a nova proposta de escala moderna da produção de dados denominado *'eScience'*, baseada prospecção de informações e

na interação de grandes bancos de dados (*'bigdata'*) (MINASNY; McBRATNEY, 2015; STOKMANN et al., 2015).

A média aritmética dos atributos do solo na profundidade de 0,0-0,30 m, padrão para cálculo do estoque de carbono, foi calculada a partir das profundidades de 0,0-0,05 m, 0,05-0,15 m e 0,15-0,30 m do *SoilGrids-1km*.

A variabilidade espacial para o Estado foi modelada com base na teoria das variáveis regionalizadas e nos princípios da hipótese intrínseca (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Neste estudo foram testados modelos esféricos, exponenciais e gaussianos.

A escolha do melhor modelo ajustado aos variogramas utilizados baseou-se nos resíduos das estimativas. Foi identificada tendência linear na Latitude nos atributos argila e densidade. Neste caso a modelagem do variograma foi conduzida nos valores do resíduo da análise de regressão.

O resíduo foi calculado pela diferença entre o valor medido e o valor estimado pelo polinômio (DAVIS, 1986). Após a modelagem do variograma foram gerados os mapas de variabilidade utilizando a krigagem ordinária na interpolação.

Foi calculado o erro relativo expresso em porcentagem dividindo o resíduo (valor estimado após a interpolação menos o valor observado) pelo valor observado no *SoilGrids-1km*.

3.3 Estimativa dos estoques de carbono do solo (t0)

Para a estimativa do estoque de carbono (ES) do solo foi utilizada a fórmula proposta por Veldkamp (1994), para uma espessura (e) constante de 0,30m (camada de solo agricultável), conforme referência em Bernoux et al. (2002).

$$ES = (CO \times DS \times e) / 10$$

em que:

ES = estoque de carbono em Mg ha⁻¹;

CO = conteúdo de Carbono Orgânico em g kg⁻¹;

DS = densidade do solo média na camada em Mg m⁻³;

e = espessura (e) da camada em metros (m).

Por meio deste processo, obteve-se o $ES(t_0)$, valores de estoque de carbono iniciais para o ano de 2005. Destaca-se a semelhança no padrão das isolinhas do mapa de estoque de carbono gerado por Bernoux et al. (2002), apesar de terem sido gerados em diferentes bases de dados, utilizaram a metodologia que relaciona informações a respeito da vegetação e tipo de solo para todo território brasileiro (Figura 7). Isso reforça a hipótese de que o solo possui naturalmente regiões com diferentes estoques de carbono, e consequentemente diferentes potenciais de emissão.

3.4 Estimativa dos estoques de carbono do solo (2010)

Os cenários de estimativa dos estoques de carbono do solo têm por objetivo direcionar para manejos de uso e ocupação mais conservacionista, preservar os estoques de carbono em áreas prioritárias, e possibilitar a adoção de manejos adequados em áreas de baixos estoques, seja com pastagens, introdução do sistema de plantio direto e rotação de culturas, de forma a contribuir para o aumento destes estoques e mitigar as mudanças climáticas globais.

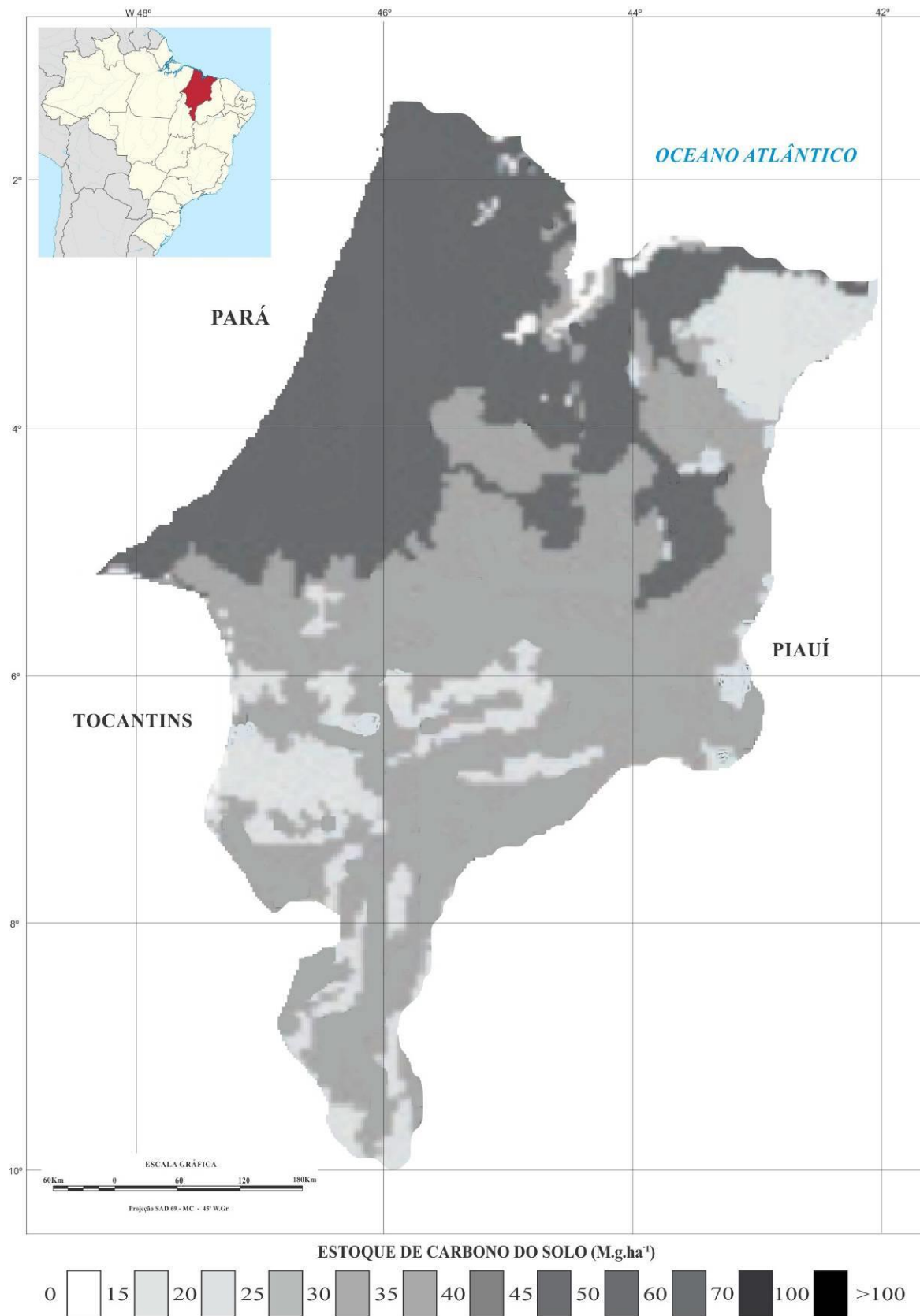
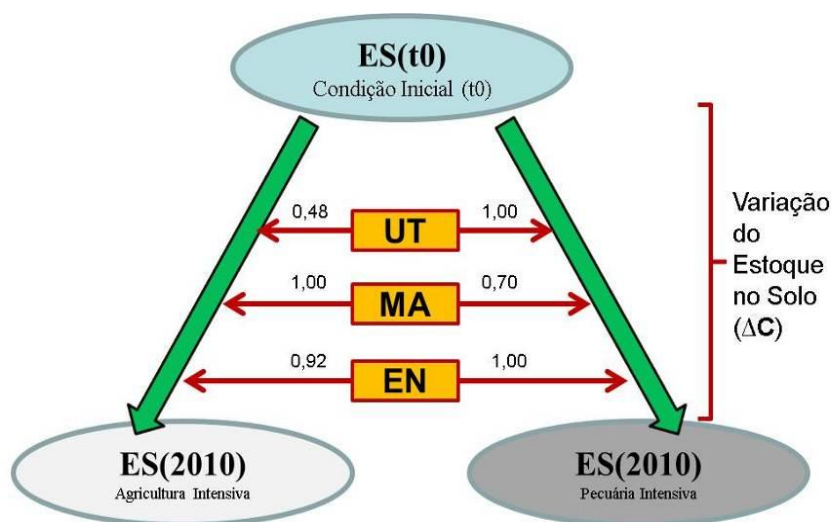


Figura 7. Estoque de Carbono no Solo para camada de 0-0,30m (adaptado de BERNOUX et al., 2002), Estado do Maranhão.

Os cenários da estimativa do estoque de carbono consideram a combinação de três variáveis: (i) clima, (ii) solo e (iii) gestão agrícola. Estas variáveis determinaram duas categorias de fatores de mudança no estoque de carbono do solo: (i) fator de manejo do solo e resíduos, e (ii) fator de entrada (IPCC, 2006). Para fins de processos matemáticos relacionados ao clima, foi adotado para todo Estado o clima descrito como tropical úmido / molhado (Mendes et al., 2014).

Os fatores de mudança nos estoques: (i) uso da terra (UT); (ii) lavoura (LA), e (iii) entradas (EN), sugeridos pelo IPCC (2006), foram aplicados para as atividades agropecuárias anuais, cujas práticas de manejo ocorrem anualmente com previsão de estoques de carbono do solo ao longo de um período de 20 anos (Figura 8).



Fatores de mudança nos estoques segundo IPCC, 2006: Uso da terra (UT); Manejo (MA) e Entradas (EN).

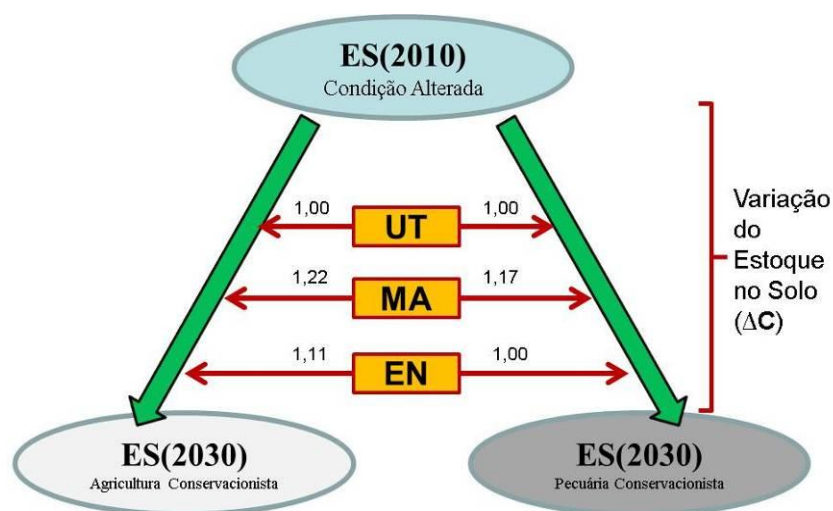
Figura 8. Cenário considerado da variação do estoque de carbono do solo: $ES(t_0)$ - Condição Inicial, $ES(2010)$ – Agricultura/Pecuária Intensiva, conforme fatores de conversão.

3.5 Estimativa dos estoques de carbono do solo (2030)

A partir do cenário de gestão de $ES(2010)$, cujo estoque de carbono foi considerado com perdas devido às atividades já implementadas no Estado até o ano de 2010, foram aplicadas as mudanças nas mesmas áreas, porém alterando-se o sistema produtivo. O cenário intensivo foi substituído pelo cenário conservacionista, que é o sistema agrícola que representa um conjunto de

princípios de manejo através do uso do sistema plantio direto (SPD), com revolvimento mínimo do solo, utilizando-se de práticas que favorecem a cobertura permanente do solo por resíduos de culturas e rotação de culturas (Pittelkow et al., 2014).

Os fatores de mudança nos estoques: (i) uso da terra (UT); (ii) lavoura (LA), e (iii) entradas (EN), sugeridos pelo IPCC (2006), foram aplicados para as atividades agropecuárias anuais, cujas práticas de manejo ocorrem anualmente com previsão de estoques de carbono do solo ao longo de um período de 30 anos (Figura 9).



Fatores de mudança nos estoques segundo IPCC, 2006: Uso da terra (UT); Manejo (MA) e Entradas (EN).

Figura 9. Cenário considerado da variação do estoque de carbono do solo: ES(2010) - Condição Alterada, ES(2030) - Agricultura/Pecuária Conservacionista, conforme fatores de conversão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dos atributos do solo estudados e estimados neste trabalho, para o uso da terra agricultura, pecuária e silvicultura, bem como o estoque de C (carbono) estimado para os anos t(0), 2010 e 2030.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos: argila (%), densidade (Mg m^{-3}), CO (g kg^{-1}) e estoques de carbono (Mg ha^{-1}) em função do uso do solo.

Uso Agricultura (2010)						
Atributo	Média	Erro	Desvio	Mínimo	Máximo	CV (%)
Argila	32,93	0,05	4,84	11,33	43,00	14,71
Densidade	1,35	0,00	0,06	1,19	1,62	4,74
CO	9,43	0,02	2,00	5,00	24,67	21,25
Estoque de C (t0)	38,29	0,09	9,05	20,37	105,29	23,63
Estoque de C (2010)	16,91	0,04	4,00	9,00	46,50	23,63
Estoque de C (2030)	22,90	0,06	5,41	12,18	62,97	23,63
Uso Pecuária (2010)						
Atributo	Média	Erro	Desvio	Mínimo	Máximo	CV (%)
Argila	28,43	0,01	3,91	10,33	44,33	13,75
Densidade	1,41	0,00	0,08	1,03	1,66	5,83
CO	14,75	0,01	3,37	4,00	127,33	22,83
Estoque de C (t0)	62,19	0,05	14,35	15,08	518,76	23,07
Estoque de C (2010)	43,54	0,04	10,04	10,56	363,13	23,07
Estoque de C (2030)	50,94	0,04	11,75	12,35	424,86	23,07
Uso Silvicultura (2010)						
Atributo	Média	Erro	Desvio	Mínimo	Máximo	CV (%)
Argila	27,05	0,11	6,03	11,00	40,33	22,29
Densidade	1,37	0,00	0,07	1,15	1,55	4,98
CO	15,09	0,08	4,50	7,00	43,33	29,84
Estoque de C (t0)	61,60	0,31	17,56	29,31	165,45	28,50
Estoque de C (2010)	61,60	0,31	17,56	29,31	165,45	28,50
Estoque de C (2030)	61,60	0,31	17,56	29,31	165,45	28,50

N = 9.644 (agricultura), 7.2447 (pecuária), 3.152 (silvicultura); Erro = erro-padrão da média; Desvio = desvio-padrão; CV = coeficiente de variação.

Nota-se que, para todos os usos da terra, os maiores estoques de carbono do solo estimados, na vegetação original (t0), são superiores àqueles estimados para 2010, partindo-se do uso de uma agricultura/pecuária intensiva (2010). No caso da silvicultura, considerou-se que não houve variações no estoque de carbono do solo, já que o uso da terra não era agrícola, permanecendo a condição inicial (t0).

Porém, quando se aplicam os critérios e as estimativas de variação do estoque de carbono do solo supondo-se uma agricultura e pecuária conservacionistas, percebeu-se os ganhos nos estoques de carbono do solo para o ano de 2030 (Tabela 1). Assim, a aplicação de práticas conservacionistas levaria a um estoque de carbono médio nas áreas de agricultura de 16,91 para 22,90 Mg ha^{-1} , enquanto nas áreas de pecuária esse aumento seria até mais expressivo, subindo de 43,54 para 50,94 Mg ha^{-1} , no período de 20 anos (2010–2030), em que a prática conservacionista seria adotada.

A Figura 10 apresenta a distribuição espacial dos teores de argila no Estado do Maranhão (0-30 cm).

Observou-se também que os maiores teores ($> 41,50\%$) se encontram nas partes oeste e sul do Estado, provavelmente devido à formação geológica ser predominantemente oriunda de estrutura sedimentar (EMBRAPA, 2013). Por outro lado, os menores teores de argila ($< 12,50\%$) encontram-se na porção nordeste do Estado, onde também se localizam os “Lençóis Maranhenses”, caracterizados por depósitos Eólicos. O mesmo ocorre na região sudoeste do Estado, que é caracterizada pelo Grupo Balsas, Formação Samambaia, numa sequência de arenitos avermelhados e esbranquiçados, depositados em ambiente desértico, com contribuição fluvial (LIMA; LEITE, 1978). Na grande porção do Estado, dos eixos noroeste a sudeste, os teores de argila apresentam-se na faixa de 20% a 30%. Foi ajustado o modelo de variograma esférico, indicando transição abrupta entre as classes de variabilidade do teor de argila. A transição abrupta é resultado dos diferentes agentes de transporte que atuaram na seleção das partículas que compõem as rochas areníticas do Estado. O erro da estimativa teve variação da ordem de 10%, para mais ou menos, prevalecendo tendência de subestimativa da ordem -5% a -10%.

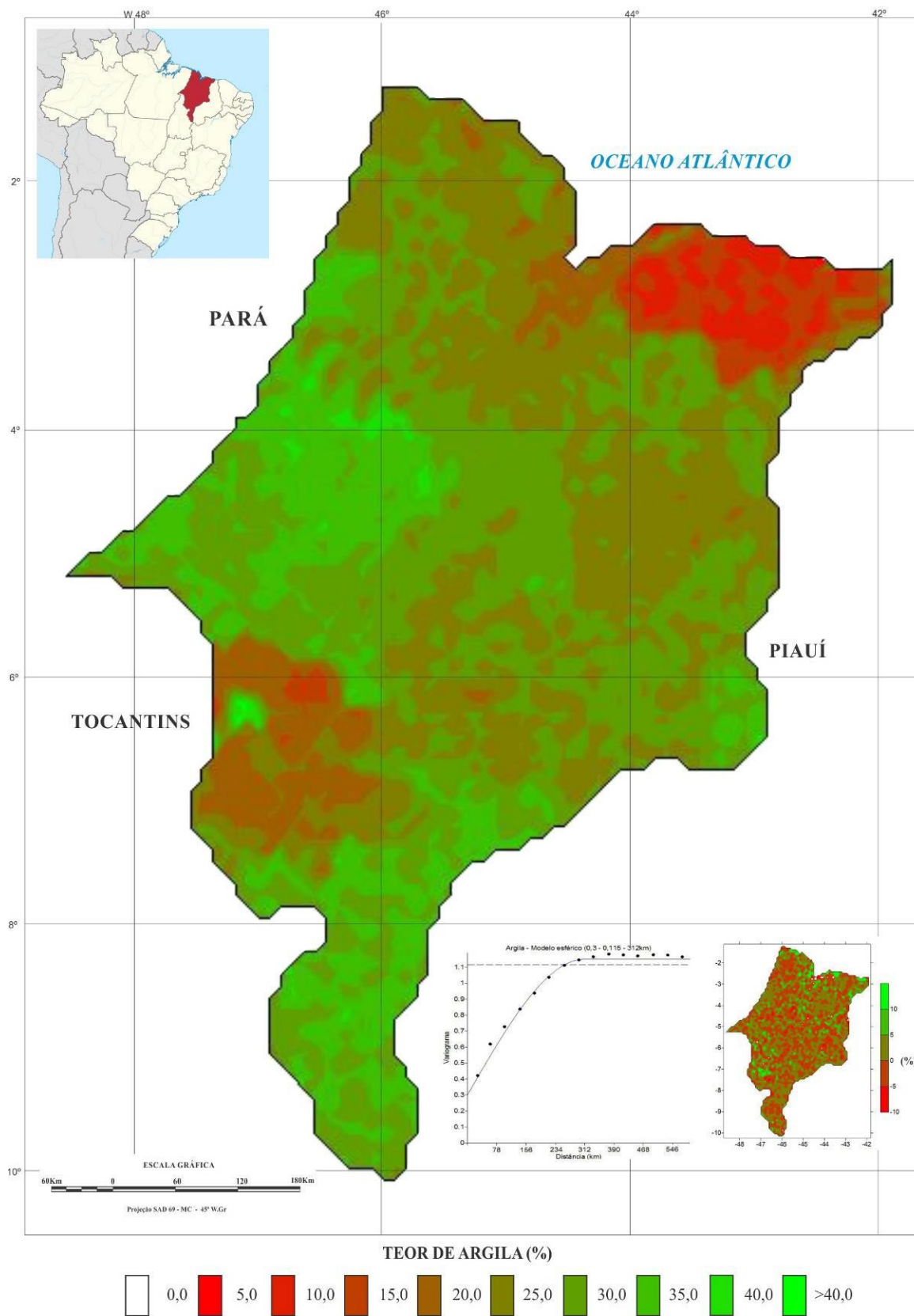


Figura 10. Teor de argila (%) para camada de 0-0,30 m, Estado do Maranhão.

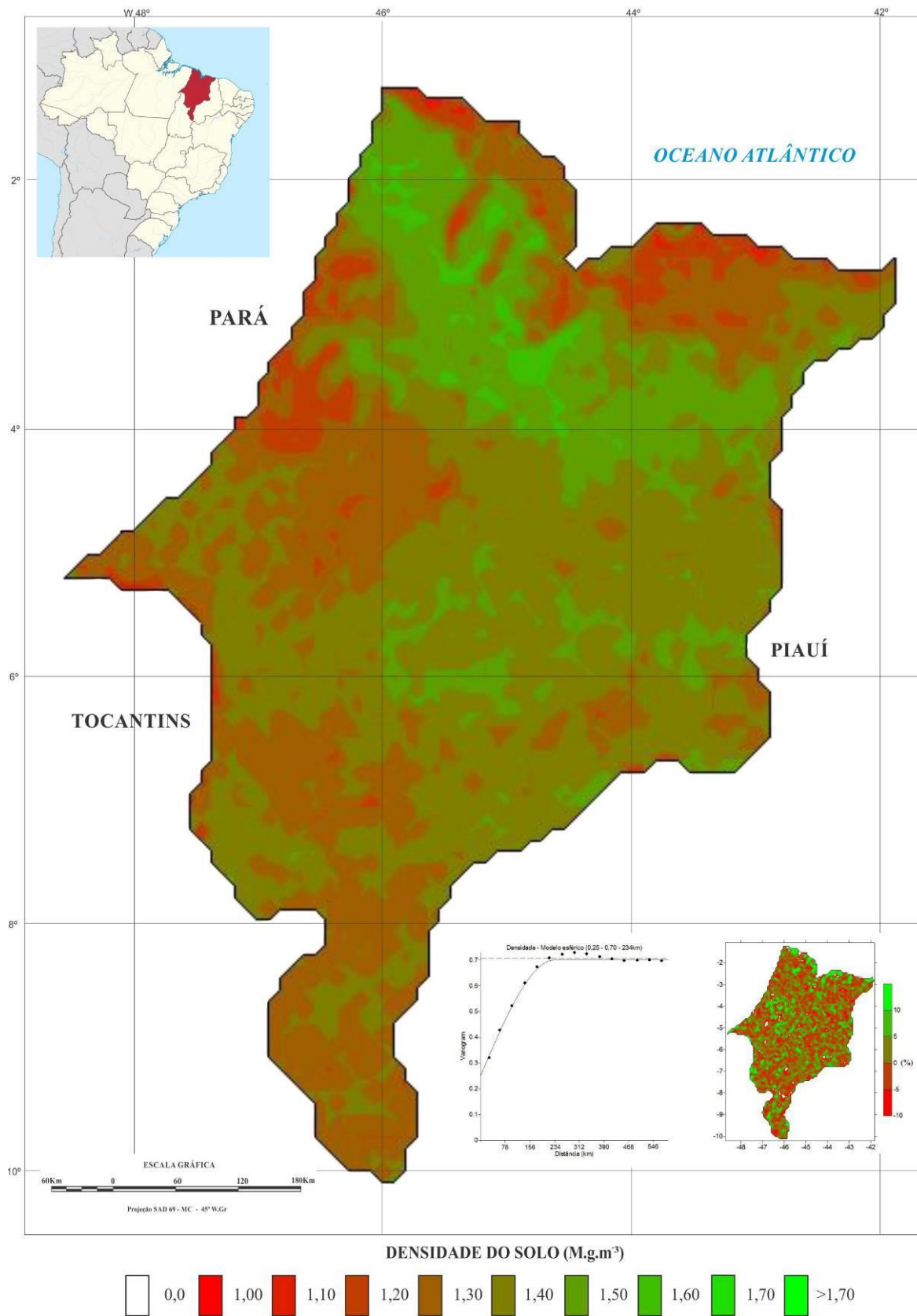


Figura 11. Densidade do solo (M g m⁻³) para camada de 0–0,30 m, Estado do Maranhão.

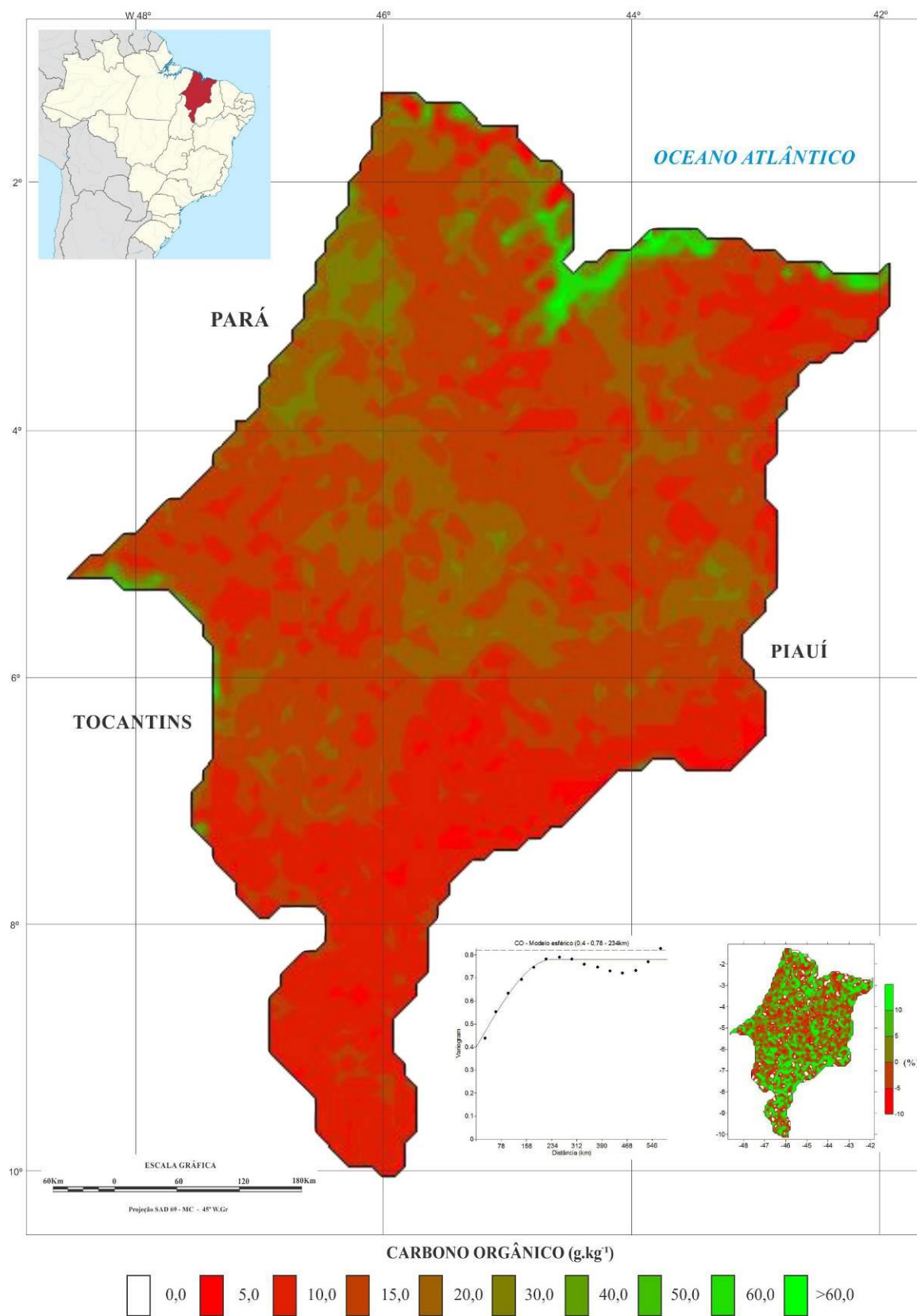


Figura 12. Carbono orgânico (g kg⁻¹) para camada de 0-0,30 m.

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial da densidade do solo (0-30 cm) sendo que, dentro da Figura, observam-se também o semivariograma utilizado para mapeamento, e o respectivo mapa de erros associado. Podem-se observar maiores valores ($>1,60 \text{ Mg m}^{-3}$) presentes na porção noroeste do mapa, onde o relevo apresenta as menores altitudes: relevo predominantemente plano ou suave ondulado e poucas vezes ondulado. Tal região também é conhecida como “Baixada Maranhense”, onde a classe de solo predominante são os Plintossolos (JACOMINE et al., 1986). Coincidentemente, é nesta região do Estado que se encontra a maior concentração das áreas voltadas à pecuária, como se pode observar por meio da Figura 4.

Para densidade, atributo covariativo do teor de argila e relacionado com características intrínsecas do solo como mineralogia, também foi ajustado o modelo de variograma esférico, expressando influência da diversidade geológica. O alcance da densidade foi de 234 m enquanto o que o do teor de argila foi de 312 m, indicando maior variabilidade espacial da densidade, possivelmente devido as práticas de manejo. Prevaleceram valores do erro da estimativa teve da ordem de -5% a -10%, indicando subestimativa, principalmente nas regiões sul e sudeste do estado.

A Figura 12 apresenta os teores de carbono orgânico do solo (0-30 cm), com o respectivo semivariograma e o mapa de erros derivados, no interior da mesma Figura. Os maiores valores de carbono orgânico ($> 20,50 \text{ g kg}^{-1}$) são observados na região dos mangues costeiros, no delta da Ilha de São Luís (Norte, Bacia de São Marcos) e na região do “Delta do Rio Parnaíba”, nos “Lençóis Maranhenses”. Nas áreas noroeste e central do Estado, onde se encontram predominantemente áreas de preservação ambiental, também se observou a existência de solos com teores mais altos de carbono orgânico (CO). Alguns locais ao leste possuem teores que pode também ser considerados altos ($> 20,50 \text{ g kg}^{-1}$), intercalando áreas de pastagens e áreas de vegetação nativa, como se pode comparar pela Figura 4.

Em contraste, os menores valores de carbono orgânico ($<10,50 \text{ g kg}^{-1}$) para o Estado do Maranhão podem ser observados na região sul, provavelmente devido à influência de ações antrópicas com a introdução de agricultura intensiva (EMBRAPA, 2013), principalmente soja (cultura anual, com baixa entrada de

resíduos no solo) e na região sudeste, provavelmente devido a esta região ser predominantemente de clima semiárido e com baixos índices pluviométricos ($800\text{--}1.200\text{ mm ano}^{-1}$) (MENDES et al., 2014), o que pode estar relacionado a uma baixa produção de material orgânico e, conseqüentemente, a menores estoques de carbono do solo.

Segundo Bernoux et al. (2002) os maiores estoques de carbono no Estado do Maranhão estão na parte noroeste, estendendo-se para áreas mais a leste, onde se encontram principalmente Florestas Ombrófila Densa (Figura 12), corroborando alguns dos resultados deste estudo, em relação aos altos valores de estoques de carbono.

Para carbono orgânico, também foi ajustado o modelo de variograma esférico e alcance de 234 m semelhante a densidade do solo. Prevaleceram os valores do erro da estimativa 10%, indicando superestimativa, em grande parte do Estado.

As áreas com maiores teores de carbono orgânico também podem estar associadas aos ambientes redutores, geralmente formas côncavas, com maior umidade ou regiões com maior fração argila. Um dos processos que ocorre nos solos coesos existe no Estado é o entupimento dos poros com argila (LIMA NETO et al., 2004, LIMA et al., 2009). Este modelo de gênese dos solos coesos subdividido em duas partes, iluviação de argila fina, entupindo os poros do solo, e posterior perda de Fe, colapsando a estrutura do solo, também foi observada por Dantas et al. (2014) na região nordeste do Maranhão. Em seu modelo de gênese de solos coesos do leste maranhense baseado na relação solo-paisagem, Dantas et al. (2014), constatou que a posição da paisagem foi determinante para a distinção dos solos coesos, de modo que os desenvolvidos em forma côncava apresentaram a maior expressão do caráter coeso, com maior densidade ($1,56\text{ kg dm}^{-3}$), maior *status* de fertilidade e teor de matéria orgânica (21 g kg^{-1}), refletindo na vegetação mais exuberante, caracterizada pelo Cerradão.

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os mapas de estoque de carbono do solo estimados (0-30 cm) nas condições t0 (Figura 13, original), a partir do mapa de uso real da terra 2010 (Figura 14) e após adotadas as práticas conservacionistas na agricultura e na pecuária (Figura 15).

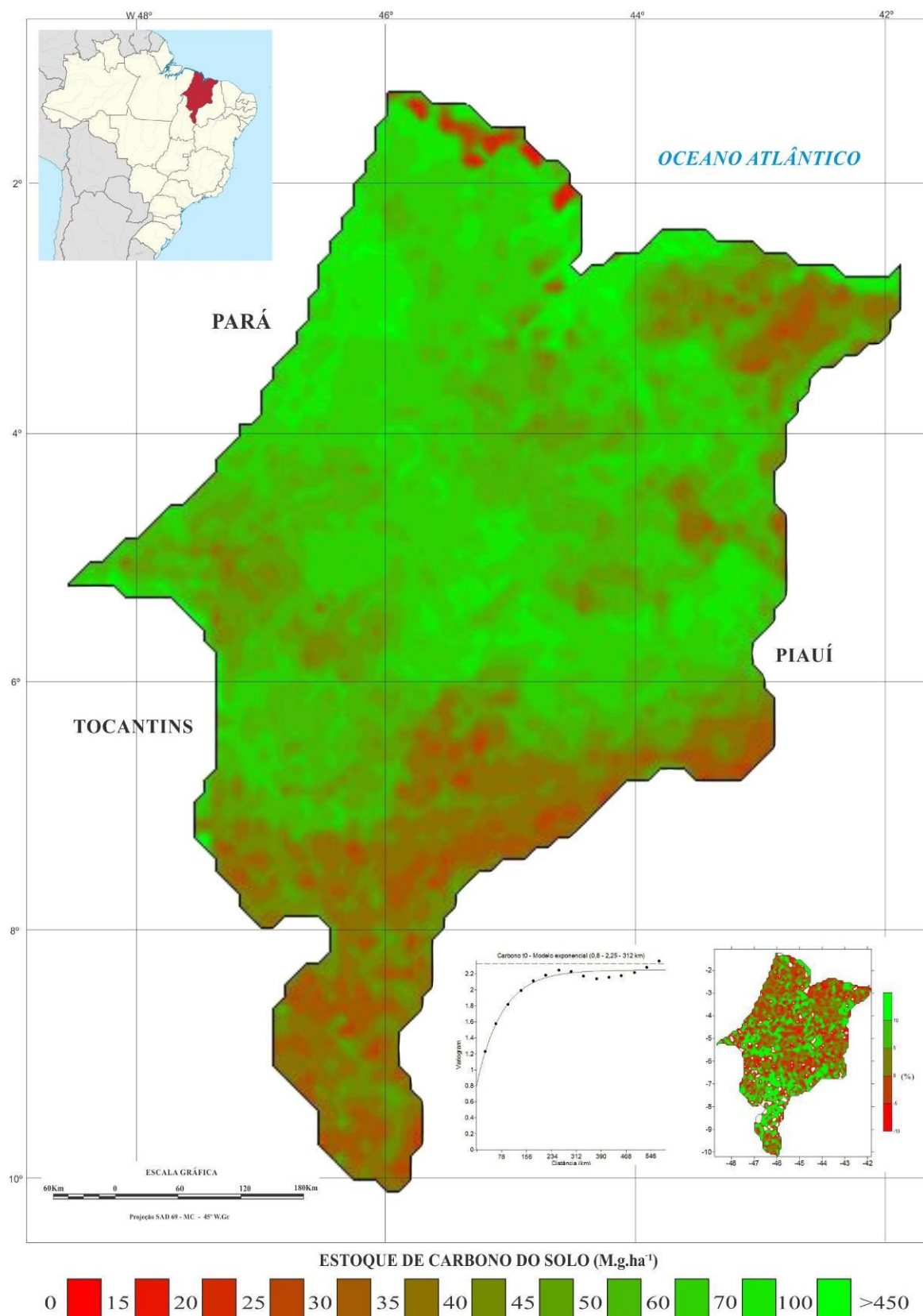


Figura 13. Resultados para o Estoque de Carbono no Solo ES(t0) para camada de 0-0,30 m.

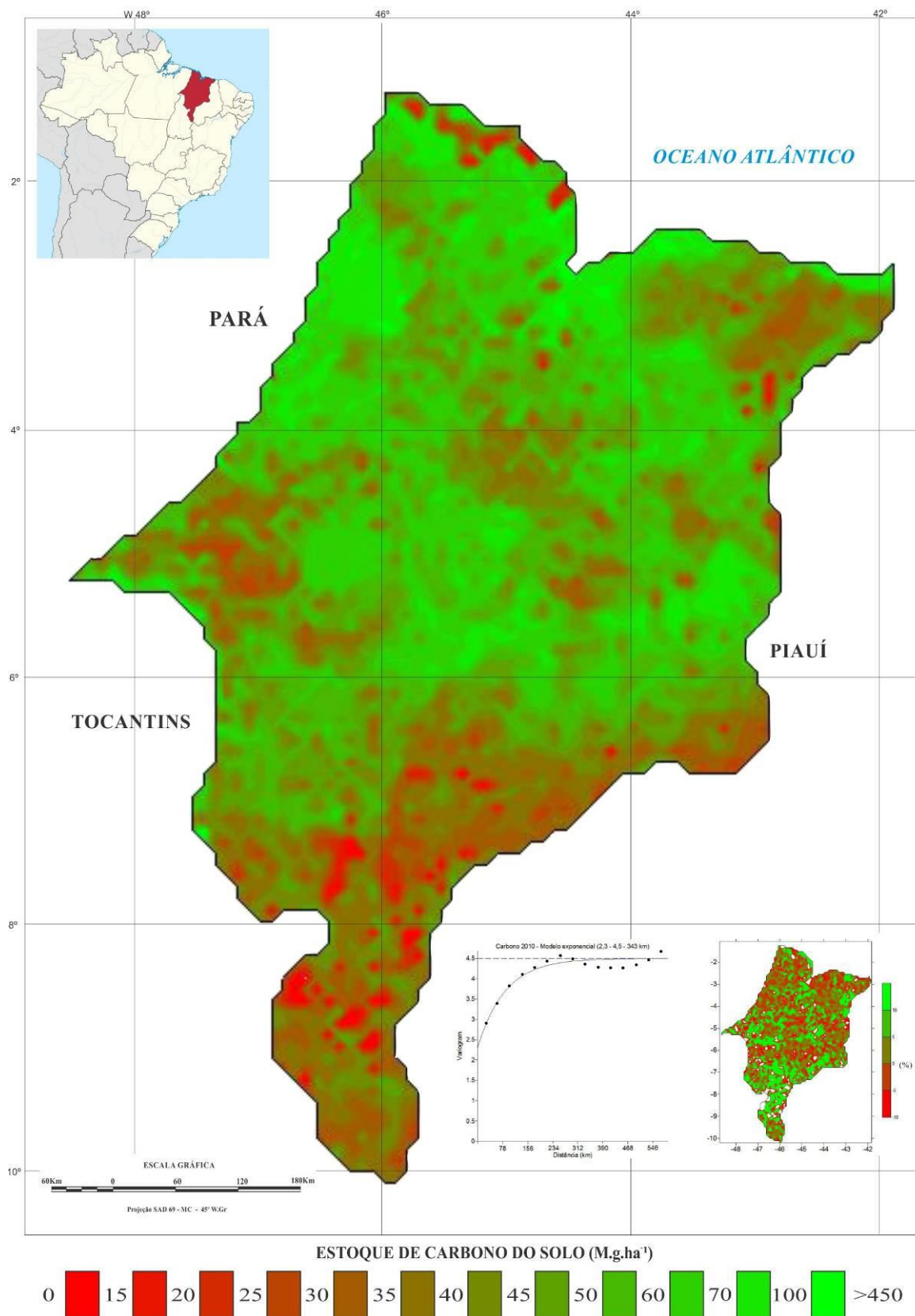


Figura 14. Estoque de Carbono no Solo ES(2010) para camada de 0-0,30 m.

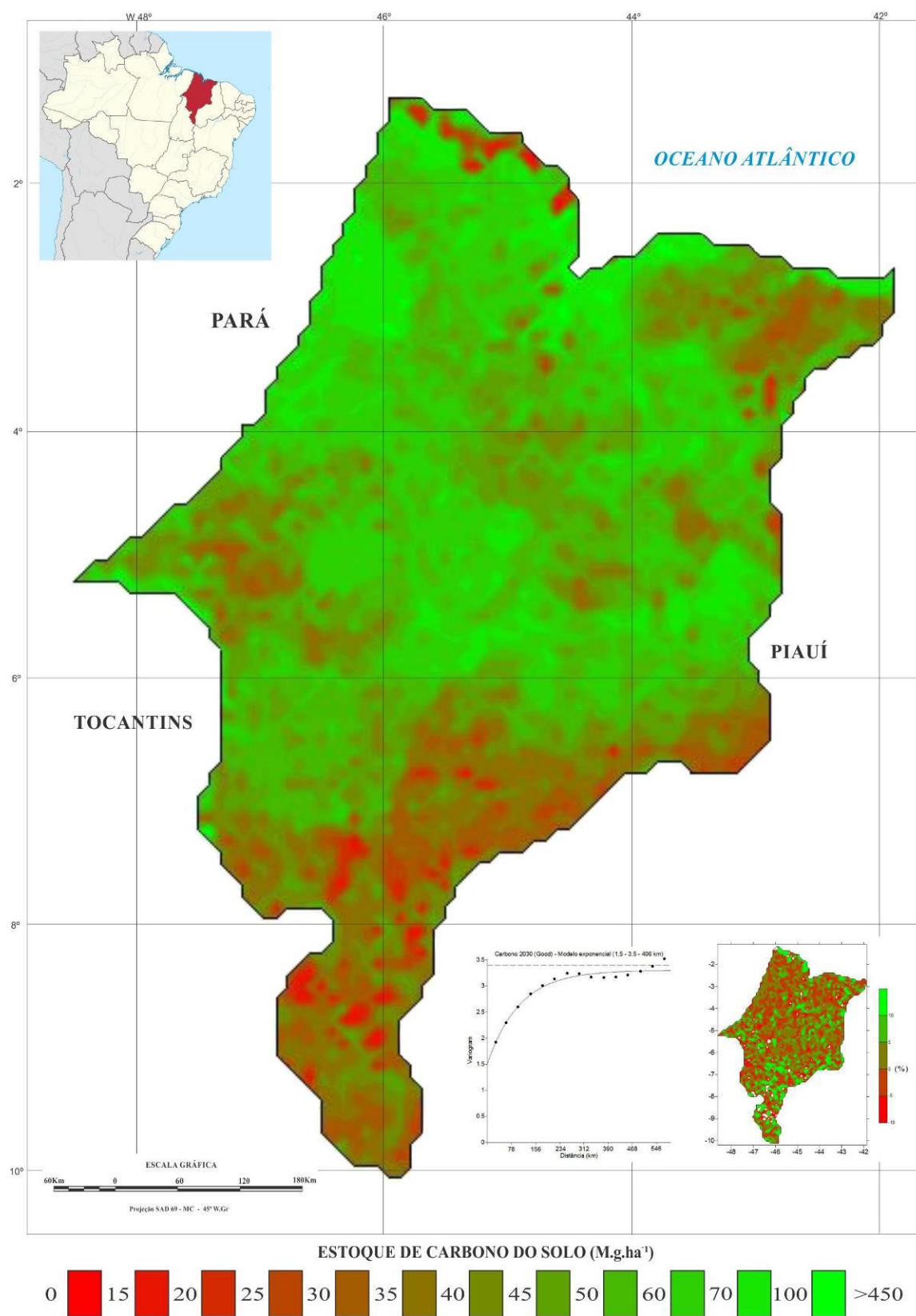


Figura 15. Estoque de carbono no solo ES(2030) para camada de 0-0,30 m.

Nota-se que independente do uso e ocupação do solo, agricultura ou pecuária, houve uma perda dos estoques de carbono do solo para o cenário de 2010, porém, com práticas conservacionistas esses estoques retornam aos valores originais, sem interferência antrópica (t_0), em 2030.

De acordo com o estudo realizado por Silva et al. (1994), na região do bioma Cerrado, ocorre redução de 80% da matéria orgânica do solo após cinco anos de cultivo agrícola convencional em solo com menos de 15% de teor de argila, 76% para solos com teor de argila entre 15-30% e, 46% para solo com mais de 30% de teor de argila. A alta estabilidade da matéria orgânica em solos com maior teor de argila vem sendo atribuída aos maiores teores de minerais presentes nessa fração do solo como óxidos de ferro, hematita e goethita, e hidróxidos de alumínio, como a gibssita, que complexam a matéria orgânica, estabilizando-a (ROSCOE et al., 2000).

A caracterização da variabilidade de atributos do solo que sejam covariativos do estoque de carbono é uma ferramenta alternativa no planejamento estratégico do manejo e uso do solo para o Estado do Maranhão, bem como pode ser utilizado para minimizar as perdas de carbono do solo neste Estado, reforçando-se assim as melhores condições de conservação do solo que devem ser consideradas para as futuras gerações.

Assim, considerando os cenários gerados, a expansão agrícola no Estado do Maranhão deve seguir uma lógica de mínimo impacto nos estoques de carbono do solo e biomassa aérea, havendo assim um impacto também minimizado no aumento da concentração de GEE atmosférico e efeito estufa adicional, resultado de tais atividades. Este tipo de planejamento de uso e ocupação do solo pode ser útil para outras regiões visando a conservação do estoque de carbono no solo.

5 CONCLUSÕES

As áreas agropecuárias do Estado do Maranhão foram alocadas em diversas regiões, com valores diferenciados de estoques de carbono: as áreas de pastagem em solos com os maiores valores de estoques de carbono médios de 62,19 (Mg ha⁻¹); as áreas de silvicultura em solos com valores de estoques de carbono médios de 61,60 (Mg ha⁻¹), e as áreas agricultáveis em solos com valores de estoques de carbono médios de 38,28 (Mg ha⁻¹).

A conversão de áreas de vegetação natural para áreas de uso agropecuário intensivo (tradicional), no Estado do Maranhão, contribui para perdas de carbono do solo em 1,57 Mt de C até o ano de 2010, bem com as áreas de pastagem com a parcela de 1,36 Mt de C, as áreas agricultáveis com 0,21 Mt de C e as áreas de silvicultura neutras nesse processo.

A substituição dos sistemas agropecuários tradicionais (intensivos) para os sistemas conservacionistas, nas áreas atuais do Estado do Maranhão, entre os anos de 2010 a 2030, acarretará estimativas de sequestro de C para o solo de 0,6 Mt, sendo a pecuária responsável por 0,54 Mt de C e a agricultura por 0,03Mt de C.

Assim, considerando-se os cenários supracitados, conclui-se que a expansão agrícola no Estado do Maranhão deve seguir uma lógica de mínimo impacto nos estoques de carbono do solo e de biomassa aérea, havendo assim um impacto também minimizado no aumento da concentração de GEE atmosférico e de efeito estufa adicional, resultado de tais atividades.

6 REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. C. F. **Sustentabilidade do sistema plantio direto em Argissolo no trópico úmido**. 2006. 55 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

AGUIAR, M. I. de; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S. de; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. de. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 37, n. 3, p. 270-278, 2006.

ALTIERI, M. A. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 93, n. 1-3, p. 1-24, 2002.

ALVAREZ, R. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture storage. **Soil Use and Management**, West Sussex, v. 21, p. 38–52, 2005.

AMADO, T. J. C. Sequestro de carbono em plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. In: CONFERÊNCIA ANUAL DA REVISTA PLANTIO DIRETO, 4., 1999, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Aldeia Norte, 1999. p. 44-51.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PANOSSO, A. R.; Camargo, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA, N. Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO₂ emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 2, p. 157-166, 2015.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, R. **Agricultura sustentável por meio da integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)**. Piracicaba: Informações Agrônômicas. 18 p. (Documento 138).

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo do solo**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 599-607, 2000.

BEARE, M. H.; CABRERA, M. L.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D.C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 3, p. 787-795, 1994.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p.888-896, 2002.

BERTOL, I.; MELLO, E. L.; GUADAGNIN, J. C.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Nutrients losses by water erosion. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 581-586, 2003.

BETTS, R. A. Offset of potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. **Nature**, Londres, v. 408, n. 3, p. 187-190, 2000.

BONAN, G. B.; POLLARD, D.; THOMPSON, S. L. Effects of boreal vegetation on global climate. **Nature**, Londres, v. 359, p. 716-718, 1992.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3 ed. São Paulo: Bookman, 2012. 720 p.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRASIL. Casa Civil. **Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012**. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011_2014/2012/Decreto/D7830.htm>. Acesso em: 27 jul. 2013.

BRIENEN, R. J. W.; PHILLIPS, O. L.; FELDPAUSCH, T. R.; GLOOR, E.; BAKER, T. R.; LLOYD, J.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; MONTEAGUDO-MENDOZA, A.; MALHI, Y.; LEWIS, S. L.; VÁSQUEZ, R.; MARTINEZ, R.; ALEXIADES, M.; ÁLVAREZ DÁVILA, E.; ALVAREZ-LOAYZA, P.; ANDRADE, A.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ARAUJO-MURAKAMI, A.; ARETS, E. J. M. ARROYO, M. L.; AYMARD, G. A.; BÁNKI, O. S.; BARALOTO, C.; BARROSO, J.; BONAL, D. Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, Londres, v. 519, p. 344-348, 2015.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BRUCE, J. P.; FROME.; HAITES, E.; JANZEN, H.; LAL, R. Carbon sequestration in soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 54, p. 382-389, 1999.

BUCKERIDGE, M. S.; AIDAR, M. P. M. Carbon sequestration in the rain forest: alternatives using environmentally friendly biotechnology. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 1-4, 2002.

BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. **Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification**. 2010. Disponível em: <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0914216107>. Acesso em: 23 fev. 2012.

CAMPOS, B. C. **Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CANADELL, J.G.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACHA, M.R.; FIELD, C.B.; BUITENHUIS, E.; CIAIS, P.; CONWAYG, T.J.; GILLETTC, N.P.; HOUGHTONH, R.A.; MARLAN, G. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 104, n. 47, p. 18.866–18.870. 2007.

CANELLAS, L. P.; BUSATO, J. G.; DOBBS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; RUMJANEK, V. M.; OLIVARES, F. L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, n. 3, p. 375–383, 2010.

CAPECHE, C. L.; MACEDO, J. R.; MELO, A. S.; ANJOS, L. H. C. **Parâmetros técnicos relacionados ao manejo e conservação do solo, água e vegetação perguntas e respostas**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2004. 16 p (Comunicado Técnico).

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-290, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PICOLLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J. C.; VIEIRA, M. J.; CASÃO JÚNIOR, R. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 2-4, p. 271-283, 1991.

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical Agriculture and global warming impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-89, 2007.

CHASE, T. N.; PIELKE, R.; KITTEL, T. G. F.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Simulation impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. **Climate Dynamics**, Heidelberg, v. 16, p. 93–105, 2000.

CHEN, I. C.; HILL, J. K.; OHLEMÜLLER, R.; ROY, D. B.; THOMAS, C. D. Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. **Science**, Washington, v. 333, n. 6045, p. 1.024-1.026, 2011.

CIVIL - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais Grupo Permanente de Trabalho Interinstitucional. **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no Estado do Maranhão**. São Luis: Governo do Estado do Maranhão, 2011. 110 p.

COOPER, M.; MENDES, L. M. S.; SILVA, W. L. C.; SPAROVEK, G. A national soil profile database for Brazil available to international scientists. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 649-652, 2005.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoques de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 323-332, 2008.

DANTAS, J. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1.039-1.050, 2014.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2. ed. New York: John Wiley, 1986. 656 p.

DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTÂNIO, H.; ACKERMAN, I. L.; CARVALHO, E. M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 48, n. 1, p. 53-69, 2000.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2. ed. New York: John Wiley, 1986. 656 p.

DE RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; DE OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugarcane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 281, n. 1-2, p.339-351, 2006.

DENDOOVEN, L.; GUTIÉRREZ-OLIVA, V. F.; PATIÑO-ZÚÑIGA, L.; RAMÍREZ-VILLANUEVA, D. A.; VERHULST, N.; LUNA-GUIDO, M.; MARSCH, R.; MONTES-MOLINA, J.; GUTIÉRREZ-MICELI, F. A.; VÁSQUEZ-MURRIETA, S.; GOVAERTS, B. Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 431, n. 1, p. 237–244, 2012.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a Southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.

DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; van ANTWERPN, R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 36, n. 5, p. 350-356, 2002.

ELLERT, B. H.; JANZEN, H. H. Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian prairies. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 21-32, 1999.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Relatório do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite; São Luis: Embrapa Cocais, 2013. 450 p.

EPRON, D.; BOSC, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Nova York, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 155-165, 2001.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food and Agriculture Organization of the United Nations statistical database**. 2009. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 30 jun. 2014.

FEIGL, B. J.; MELILLO, J.; CERRI, C. C. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondonia (Brazil). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 175, p. 21-29, 1995.

FERNANDES, S. A. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; PICOLLO, M. C. Seasonal variation of chemical properties and CO₂ and CH₄ fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in Ultisol of the Brazilian Amazon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, n. 3-4, p. 227-241, 2002.

FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., FAHEY, D. W., HAYWOOD, J., LEAN, J., LOWE, D. C., MYHRE, G., NGANGA, J., PRINN, R., RAGA, G., SCHULZ, M., VAN DORLAND, R. Radiative Forcing of Climate Change, in **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: University Press, 2007. p. 129–234.

FORTIN, M. C.; ROCHETTE, P.; PATTEY, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 5, p. 1541-1547, 1996.

FREITAS, H. C. **Efluxo de CO₂ do solo em uma pastagem na Amazônia (Rondônia)**: observações com câmara portátil e simulação do ciclo de carbono com o modelo SiB2. 2001. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2001.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, n. 3-4, p. 347–352, 2009.

GOMIERO, T.; PAOLETTI, M. G.; PIMENTEL, D. Critical reviews. **Plant Science**, Clare, v. 27, p. 239–254, 2008.

GOVINDASAMY, B.; DUFFY, P. B. Land use Changes and Northern Hemisphere Cooling. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 28, n. 2, p. 291-294, 2001.

HENGL, T.; JESUS, J. M.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; HEUVELINK, G. B. M.; RIBEIRO, E.; SAMUEL-ROSA, A.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J. G. B.; WALSH, M. G. SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. **PLoS ONE**. San Francisco, v. 9, n. 8, p. e105992, 2014.

IMESC - INSTITUTO MARANHENSE de ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS e CARTOGRÁFICOS. **Anuário Estatístico do Maranhão 2010**. 2010. São Luís: IMESC, 2010. 792 p.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 2: generic methodologies applicable to multiple land-use categories. Chapter 3: mobile combustion. Chapter 5: Cropland. Chapter 11: N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme**. Japan: IGES; 2006. 986 p.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001: The scientific basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JACOMINE, P. T. K.; ALMEIDA, J. C.; MEDEIROS, L. A. R. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Maranhão**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS/SUDENE-DRN, 1986. 406 p.

LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p.1459-1462, 2000b.

LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p.1469-1473, 2000a.

LA SCALA JUNIOR, N.; LOPES, A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brasil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, n. 3-4, p. 163-166, 2001.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 244-248, 2006.

LA SCALA JR, N.; DE FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. On the mitigation potential associated with atmospheric CO₂ sequestration and soil carbon accumulation in major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, p. 775-785, 2012.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, v. 304, n. 5.677, p. 1.623–1.627, 2004.

LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; WHITMAN, C. World soils and greenhouse effect: An overview. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (Eds.) **Soils and global change**. Boca Raton: CRC Press Inc., 1995. p. 1-7.

LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA JR, N. Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 7, p.xx, 2015 (aceito para publicação).

LEITE, D.; BERTOL, I.; ZAPORALLI, A. S.; CARRAFA, R. Erosão hídrica sob chuva simulada no milho. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 1 CD-ROM.

LICHT, M. A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, p. 233-249, 2005.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1.001-1.011, 2009.

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética**. Belém: DNPM/CPRM, 1978. 190 p.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; JACOMINE, P. T. K.; ROMERO, R. E.; LIBARDI, P. L. Identificação e caracterização de solos coesos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 467-476, 2004.

LINN, D. M.; DORAN, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 6, p. 1267-1272, 1984.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 789-800, 2008.

MACEDO, M. C. M. Integração Lavoura e Pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Minas Gerais, v. 38, n. sp, p. 133-146, 2009.

MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DE PASTAGENS, 2., 1993, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP/UNESP, 1993. p. 216-245.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MENDES, T. J.; NOGUEIRA, J.A.; ARAÚJO, E.P.; LOPES, J.R.; BEZERRA, D.S.; SENA, D.B. Areas susceptible to desertification the state of Maranhão. In: INTERNATIONAL DISASTER AND RISK CONFERENCE INTEGRATIVE RISK MANAGEMENT - THE ROLE OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND PRACTICE, 5., 2014, Davos. **Anais...** Davos: Global Risk Forum GRF, 2014. 1 CD-ROM.

MINASNY, J P B; McBRATNEY, A B. Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 83, p. 80-88, 2015.

MUNIZ, F. H. A vegetação da região de transição entre a Amazônia e o Nordeste: diversidade e estrutura. In: MOURA, E. G. (Org.). **Agroambientes de transição entre o Trópico Úmido e o Semi-árido do Brasil**: atributos, alterações e uso na produção familiar. 2. ed. São Luís: Programa de Pós-graduação em Agroecologia/UEMA, v. 1, p. 53-69. 2006.

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONSELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 914-920, 2010.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 2, p. 275-282, 2009.

PANOSSO, A. R.; MARQUES, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190–196, 2011.

PES, L. Z. **Fluxo de gases de efeito estufa em sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no planalto do Rio Grande do Sul**. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2009.

PITTELKOW, C. M.; LIANG, X.; LINQUIST, B. A.; GROENIGEN, K. J. V.; LEE, J.; LUNDY, M. E.; GESTEL, N. V.; SIX, J.; VENTEREA, R. T.; KESSEL, C. V. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, London, v. 517, p. 365–368, 2014.

PRIMAVESI, O. A pecuária de corte brasileira e o aquecimento global. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 44 p. (Documentos 72).

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRE´-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystems Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285–289, 2006.

REICOSKY, D. C.; LINDSTROM, M. J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 6, p. 1237–1243, 1993.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 41, n. 1-2, p. 105-118, 1997.

REICOSKY, D.C. Long-term effect of moldboard plowing on tillage-induced CO₂ loss. In: KIMBLE, J. M.; LAL, R. Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil. Boca Raton: CRC Press Inc., 2002. p. 87-97.

RETH, S.; MARKUS, R.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH value and the root mass on soil CO₂ efflux - A modified model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, n. 1-2, p. 21-33, 2005.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Crop residue effects on soil C and N cycling under sugarcane. In: REES, R. M.; BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Eds.). **Sustainable management of soil organic matter**. Wallingford: CAB International, 2001. p. 112-119.

ROBERTSON, G. P.; PAUL, E. A.; HARWOOD, R. R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. **Science**, Washington, v. 289, p. 1.922–1.925, 2000.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D. A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 3, p. 621–28, 1999.

ROCKSTROM, J. A. Safe operating space for humanity. **Nature**, Londres, v. 461, p. 472-475, 2009.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VEITHORST, E. J. Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay latosol: carbon, nitrogen, and ¹³C distribution in particle-size fractions. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, n. 3, p. 445-454, 2000.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas. Modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 304 p.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 2, p. 107-119, 2003.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACHADO, L. A. Z.; OLIVEIRA, H. Pastoreio de aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 69, p. 32-34, 2002.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta: influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6; p. 1.075-1.083, 2003.

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S.; MARONEZZI, A. C. **Sistemas de cultivo e dinâmica da matéria orgânica**. Informações Agrônômicas, n. 96, 2001. 32 p. (POTAFOS – Encarte Técnico).

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 3, p.541-547, 1994.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. Oportunidades para o setor florestal brasileiro com o advento do mercado de créditos de carbono. **Revista Ação Ambiental**, Viçosa, v. 21, p. 14-15, 2001.

SILVA, W. R. N.; NUNES, M. C. M.; CALDEIRA, D. S. A.; ARANTES, E. M.; SOUZA, L. H. C Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes manejos. **Revista Agrotecnologia**, Anápolis, v. 3, n. 2, p. 49-61, 2012.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; LA SCALA, N.; DIAS, C. T. S.; CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, Baltimore, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2013.

SISTI, C. P. J.; SANTS, H. P.; KOCHHANN, R.; ALVES, B.J.R., URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SIX, J.; FREY, S. D.; THIES, R. K.; BATTEN, K. M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 555-569, 2006.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; MCCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLE, B.; SIROTKENKO, O. Agriculture. In: METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L. A. (Eds.). **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; MCCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLE, SIROTKENKO, O.; HOWDEN, M.; MCALLISTER, T.; PAN, G.; ROMANENKOV, V.; SCHNEIDER, U.; TOWPRAYOON, S.; WATTENBACH, M.; SMITH, J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society London**, Londres, v. 363, p. 789-813, 2008.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p.271-278, 2005.

STELLA, A. **Plano de prevenção e controle do desmatamento e queimadas do Maranhão**. 2011. Disponível em: <<http://www.sema.ma.gov.br/pdf/Plano%20Estadual%20de%20Combate%20ao%20Desmatamento.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

STOKMANN, U.; McBRATNEY, P. J.; Alexander B.; MINASNY, B. B. D.; MONTANARELLA, L.; HONG, S. Y.; RAWLINS, B.; FIELD, D. Global Soil Organic Carbon Assessment. **Global Food Security**, Amsterdam, v. 6, p. 9-16, 2015.

TEIXEIRA, L. G.; LA SCALA, N.; LOPES, A. Fluxo de CO₂ do solo após aração e escarificação em diferentes configurações. **HOLOS Environment**, Rio Claro v. 10, p. 1-11, 2010.

THORBURN, P. J.; MEIER, E. A.; COLLINS, K.; ROBERTSON, F. A. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 120, p. 99-111, 2012.

TOMINAGA, T. T.; CÁSSARO, F. A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; TIMM, L. C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 40, n. 4, p. 605-614, 2002.

TRECENTI, R.; OLIVEIRA, M. C.; HASS, G. **Integração Lavoura-Pecuária-Silvicultura**. Brasília: MAPA/SDC, 2008. 54 p (Boletim Técnico).

TSAI, S. M.; BARAIBAR, A. V. L.; ROMANI, V. L. M. Efeitos de fatores físicos e químicos sobre os microrganismos do solo umidade e aeração. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992, p. 60-89.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORKS CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **National reports**. 2006. Disponível em: <http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php>. Acesso em: 20 mar. 2012.

USSIRI, A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 39-47. 2009.

VASCONCELOS, M. C. A.; SILVA, A. F. A.; LIMA, R. S. Cultivo em Aléias: uma alternativa para pequenos agricultores. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 8, n. 3, p. 18-21, 2012.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; BARIONI, L. G.; BARCELLOS, A. de O. Integração lavoura-pecuária. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. de (Eds.). **Savanas**: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Planaltina: Embrapa Cerrados; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 931-962.

WARD, D. S.; MAHOWALD, N. M.; KLOSTER, S. Potential climate forcing of land use and land cover change. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Goettingen, v. 14, n. 23, p. 1.2701-1.2724, 2014.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1.930–1.946, 2002.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: texture and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 4, p. 1.215-1.224, 2007.