

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE  
SISTEMAS AMBIENTAIS**

**BALANÇO DE CO<sub>2</sub> NA BIOMASSA E NOS SOLOS DE ÁREAS  
AGRÍCOLAS NO BRASIL EM UM CENÁRIO BAIXO CARBONO**

Juliana Leroy Davis

Belo Horizonte  
2014  
Juliana Leroy Davis

# **BALANÇO DE CO<sub>2</sub> NA BIOMASSA E NOS SOLOS DE ÁREAS AGRÍCOLAS NO BRASIL EM UM CENÁRIO BAIXO CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Britaldo Silveira Soares Filho

2014

D262b  
2014

Davis, Juliana Leroy.

Balanço de CO<sub>2</sub> na biomassa e nos solos de áreas agrícolas no Brasil em um cenário baixo carbono [manuscrito] / Juliana Leroy Davis. – 2014.

vi, 66 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2014.

Inclui bibliografias.

Inclui anexos.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Efeito estufa (Atmosfera) – Brasil – Teses. 3. Sequestro de carbono – Brasil – Teses. 4. Solos – Teor de carbono – Brasil – Teses. I. Soares Filho, Britaldo Silveira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(81)




## FOLHA DE APROVAÇÃO


**BALANÇO DE CO<sub>2</sub> NA BIOMASSA E NOS SOLOS DE ÁREAS AGRÍCOLAS NO  
BRASIL EM UM CENÁRIO BAIXO CARBONO**

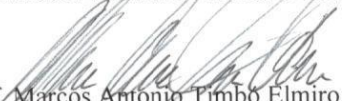
**JULIANA LEROY DAVIS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS

Aprovada em 05 de junho de 2014, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Britaldo Silveira Soares Filho - Orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof. Gilberto Caldeira Bandeira de Melo  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof. Marcos Antonio Timbo Elmiro  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 05 de junho de 2014.

“Digo: O real não está na saída e nem na chegada ele se dispõe pra gente é no meio da travessia”

João Guimarães Rosa

## **AGRADECIMENTOS**

Aos primeiros sempre, mãe, pai e irmão. Pelo amor e pelo incentivo da vida toda, sempre e pra sempre.

A Marcela Barbosa por tudo. Pelo suposto retiro intelectual que proporcionou crescimento pessoal revertido em crescimento profissional. Pelo carinho de irmã e pela convivência tão prazerosa.

Ao meu orientador, Britaldo Silveira Soares Filho, por me confiar o trabalho e compartilhar sua experiência.

Ao Felipe Nunes por todo o incentivo e apoio para a ingressão no mestrado.

Ao Professor Stoécio Maia pela ajuda à distancia que clareou parte do trabalho.

Aos amigos do Centro de Sensoriamento Remoto que fizeram desse período um tempo de aprendizado muito além da academia.

Aos colegas do Programa de mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, em especial, William Leles, Alessandro Campos e André Silveira, por compartilharem parte do caminho com tanta gentileza.

Ao Thiago Lima por me mostrar sempre o lado positivo.

A Daniela Alvarenga por todo o carinho na reta final.

A Ludmila Fonseca por sempre estar presente.

## RESUMO

Estima-se que a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera já tenha aumentado 40% desde 1750. As alterações nos estoques de carbono da biomassa e dos solos constituem-se, dentro deste quadro, como a segunda maior fonte de carbono para a atmosfera, e o setor agrícola é considerado chave para o alcance de um desenvolvimento baixo carbono. Esse segmento se mostra importante tanto pela representatividade de suas emissões e pela sua importância na economia como pelas oportunidades de mitigação que oferece. Dessa forma, o presente estudo teve por objetivo estimar as emissões e o sequestro de carbono da biomassa e dos solos em áreas com uso do solo agrícola no período 2011-2022, por meio de modelagem espacialmente explícita, a partir das projeções de uso do solo estimadas por um cenário Baixo Carbono. Os resultados indicaram o sequestro de 1424 Mt de CO<sub>2</sub>e para todo o período estudado (1134 Mt de CO<sub>2</sub>e pela biomassa e 290 Mt de CO<sub>2</sub>e pelos solos), e uma média de 118 Mt de CO<sub>2</sub>e por ano. Esse valor anual corresponde a quase 80% da meta de redução de gases de efeito estufa relativas ao setor agrícola proposta pelo governo no Plano Nacional de Mudanças Climáticas para o ano de 2020. Para o alcance desses resultados, as pastagens destacaram-se como categoria chave em busca de uma agricultura de baixo carbono, já que a expansão de cultivos agrícolas e, principalmente, de florestas plantadas em áreas de pastagens mostraram grande potencial de sequestro de carbono, 716 Mt de CO<sub>2</sub>e, assim como a recuperação de pastagens degradadas, 234 Mt de CO<sub>2</sub>e. Tal magnitude de sequestro de carbono somente foi possível porque as análises foram baseadas em um cenário que envolveu a conjunção de diferentes práticas de mitigação aliadas à ausência de desmatamento. O modelo produzido, assim como os resultados deste estudo, podem ser utilizados como ferramentas e considerados tendências para orientar ações na direção a uma agricultura de baixo carbono.

Palavras-chave: Balanço de carbono; estoque de carbono; modelagem ambiental; DINAMICA EGO

## ABSTRACT

It is estimated that the concentration of greenhouse gases in the atmosphere has already increased 40% since 1750. Changes in carbon stocks in the biomass and soils constitute the second largest source of carbon to the atmosphere within this scenario, and the agricultural sector is considered key to achieving a low carbon development. This segment proves to be important both for the representativity of its emissions and its importance in the economy as for the mitigation opportunities it offers. Thus, this study aimed to estimate carbon emissions and sequestration in the biomass and soils in areas with agricultural land use over the period 2011-2022, through spatially explicit modeling, based on the land-use projections estimated for a Low Carbon scenario. The results indicated sequestration of 1424 Mt of CO<sub>2</sub>e for the period (1134 Mt of CO<sub>2</sub>e by biomass and 290 Mt of CO<sub>2</sub>e by soils), and an annual average of 118 Mt de CO<sub>2</sub>e. This annual value corresponds to 80% of the goals of reducing greenhouse gases emissions proposed for the agricultural sector by the government in the National Climate Change Plan to 2020. To achieve such results, pastures stood out as a key category in pursuit of a low-carbon agriculture, since the expansion of cropland areas and particularly of planted forests over grasslands showed great potential for carbon sequestration, 716 Mt of CO<sub>2</sub>e, as well as the recovery of degraded grasslands, 234 Mt of CO<sub>2</sub>e. Such carbon sequestration magnitude was only possible because the analyzes were based on a scenario which involved the combination of various mitigation practices combined with absence of deforestation. The produced model, as well as the results of this study, may be used as tools and considered trends for guiding actions towards a low-carbon agriculture.

Keywords: Carbon balance; carbon stock; environmental modeling; DINAMICA EGO.



## Lista de ilustrações

Figura 1 - Emissões de CO <sub>2</sub> e no Brasil por setor no ano de 2010 segundo às Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (MCT, 2013). A- Emissões relativas ao uso de fertilizantes, fermentação entérica do gado, manejo de dejetos animais, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas. B- Emissões relativas às alterações de carbono na biomassa e solos, aplicação de calcário em solos agrícolas e queima de biomassa. C- Setor contabiliza emissões de carbono pela queima de combustíveis fósseis das máquinas agrícolas .....	3
Figura 2- Esquema geral de funcionamento do modelo que calcula as emissões e o sequestro de carbono da biomassa em áreas de uso do solo agrícola de 2011 a 2022.....	9
Figura 3 - Esquema geral de funcionamento do modelo que calcula as emissões e sequestro de carbono nos solos em áreas de uso do solo agrícola de 2011 a 2022.....	22
Figura 4 - Participação das florestas plantadas nos estoques de carbono dos cultivos permanentes do Brasil e do estado de Minas Gerais nos estoques de florestas plantadas nos anos de 2011,2016 e 2022. ....	24
Figura 5 – Estoques de carbono dos cultivos de laranja, café arábica, café robusta e cacau no Brasil no anos de 2011, 2016 e 2022, com destaque para os estados com maior participação nesses estoques. ....	24
Figura 6 - Biomassa dos cultivos anuais no Brasil e a participação dos cultivos mais representativos: cana, soja e milho em 2011, 2016 e 2022. B, C e D –Biomassa dos cultivos de cana, soja e milho no Brasil e a participação dos estados mais representativos em 2011,2016 e 2022 .....	27
Figura 7 - Estados com maiores valores de balanço de carbono da biomassa dos cultivos agrícolas no período de 2011 a 2022.....	29
Figura 8- Distribuição espacial do balanço de carbono da biomassa dos cultivos agrícolas no Brasil no período 2022-2011, em toneladas de CO <sub>2</sub> e por hectare (Mg de CO <sub>2</sub> e /ha).....	30
Figura 9 - Distribuição espacial do fluxo de carbono no solo em áreas de cultivos agrícolas no Brasil no período 2022-2011, em toneladas de CO <sub>2</sub> e por hectare (Mg de CO <sub>2</sub> e /ha).....	33
Figura 10 - Fluxos de carbono nos solos em áreas agrícolas em alguns estados do Brasil no período de 2011 a 2022 (Mt de CO <sub>2</sub> e) .....	34
Figura A1- Mapa de uso do solo gerado pelo modelo OTIMIZAGRO como resultado do cenário Baixo Carbono para o ano de 2011.....	53
Figura A2- Mapa de uso do solo gerado pelo modelo OTIMIZAGRO como resultado do cenário Baixo Carbono para o ano de 2022.....	54
Figura A3- Regiões traçadas de acordo com os biomas e histórico de uso do solo para a aplicação das taxas de mudança nos estoques de carbono no solo.....	55
Figura A4- Distribuição espacial da biomassa dos cultivos agrícolas no Brasil em 2011 em toneladas de carbono por hectare (Gg de C/ha) .....	56
Figura A5- Distribuição espacial da biomassa dos cultivos agrícolas no Brasil em 2022 em toneladas de carbono por hectare (Gg de C/ha) .....	57
Figura A6- Distribuição espacial das subcategorias de pastagens no ano de 2011.....	60
Figura A7- Distribuição espacial das subcategorias de pastagens no ano de 2022.....	61
Figura A8- Série histórica da área de plantio direto no Brasil segundo a FEBRAPDP.....	62
Figura A9- Dados de entrada, IBGE/FEBRAPDP e Meta do Plano ABC, e modelo logístico projetado que representa a evolução das áreas de PD até 2022.....	63
Figura A10- Distribuição espacial das subcategorias de lavouras anuais no ano de 2011.....	64
Figura A11- Distribuição espacial das subcategorias de lavouras anuais no ano de 2011.....	65

## Lista de tabelas

Tabela 1- Níveis metodológicos relativos à complexidade dos cálculos de emissões de GEEs estruturados pelo IPCC.....	7
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no modelo para se estimar a biomassa dos cultivos permanentes de café arábica, café robusta, laranja e cacau: duração do ciclo de produção, densidade e acumulação de biomassa; e valores de estoques de carbono encontrados .....	12
Tabela 3- Densidade do cultivo de café por estados de acordo com dados da CONAB em 2012 .....	12
Tabela 4 - Parâmetros utilizados no modelo para se estimar a biomassa de floresta plantada: duração do ciclo de produção, acumulação de biomassa, densidade da madeira e fator de expansão; e valores de estoques de carbono encontrados .....	13
Tabela 5 – Parâmetros utilizados no modelo para estimar a biomassa dos cultivos anuais e valores de estoques de carbono encontrados .....	14
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no modelo para estimar a biomassa das pastagens e valores de estoques de carbono encontrados .....	16
Tabela 7 - Taxa de alteração do estoque de carbono no solo de acordo com cada tipo de transição e regiões selecionadas para entrada no modelo.....	21
Tabela 8 - Área e estoques de carbono nos cultivos permanentes por estado e no Brasil nos anos de 2011 e 2022 .....	23
Tabela 9 – Área e estoques de carbono nos cultivos anuais por estado e no Brasil nos anos de 2011 e 2022.....	26
Tabela 10- Biomassa em áreas de uso do solo agrícola e balanço de carbono por estados e no Brasil.....	28
Tabela 11- Participação da manutenção do uso do solo e de dois tipos de conversões entre categorias agrícolas no balanço de carbono ao longo do período analisado nos estados com balanço mais representativo no Brasil...31	
Tabela 12- Fluxos de carbono nos solos de áreas agrícolas nos estados e no Brasil no período de 2011 a 2022 e por ano (Mt de CO <sub>2</sub> e) .....	32
Tabela 13- Participação de conversões entre categorias agrícolas no balanço de carbono ao longo do período analisado nos estados com balanço mais representativo no Brasil .....	35
Tabela 14 - Balanço geral de carbono, fluxos de carbono no solo e balanço de carbono na biomassa, em áreas de cultivos agrícolas por estados e no Brasil, de 2011 a 2022, em Mt de CO <sub>2</sub> e.....	36
Tabela 15 - Fluxo de carbono no solo encontrado no presente estudo e em diferentes pesquisas .....	38

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	IV
LISTA DE TABELAS .....	V
SUMÁRIO.....	VI
CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1 INTRODUÇÃO.....	2
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
2.1 ASPECTOS GERAIS .....	6
2.1.1 Utilização da Metodologia do IPCC.....	7
2.2 BIOMASSA .....	8
2.2.1 Cultivos Permanentes .....	10
2.2.2 Cultivos anuais .....	13
2.2.3 Pastagens.....	14
2.3 SOLOS.....	16
3 RESULTADOS .....	23
3.1 BIOMASSA .....	23
3.1.1 Estoques de carbono nos cultivos permanentes e anuais .....	23
3.1.2 Balanço de carbono na Biomassa .....	26
3.2 SOLOS.....	31
3.3 BALANÇO DE CARBONO GERAL.....	35
4 DISCUSSÃO .....	36
5 CONCLUSÕES .....	40
REFERÊNCIAS .....	41
ANEXO FIGURAS .....	53
ANEXO METODOLÓGICO .....	58
REFERÊNCIAS – ANEXO METODOLÓGICO .....	66

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

São crescentes as preocupações mundiais relacionadas ao aumento de emissões de gases de efeito estufa (GEEs). As mudanças climáticas, que podem decorrer desse processo, afligem por ameaçarem tanto a conservação de espécies e a preservação de ambientes quanto o desenvolvimento econômico.

Nesse contexto, destaca-se o setor agrícola, segmento chave dentro desse quadro, pela representatividade de suas emissões de GEEs e pelas diversas oportunidades de mitigação que oferece (IPCC, 2013). Atualmente vê-se a necessidade de expansão do segmento para suprir a demanda de alimentos, mas entende-se que este desenvolvimento não pode acontecer a qualquer custo. Assim, busca-se atingir uma agricultura pouco poluidora, que ofereça opções de mitigação de GEEs a um baixo custo e que ainda seja fonte de energia renovável (RICE& REED, 2007).

Esse panorama é especialmente importante no Brasil, em que um quarto do PIB é representado pelo setor e que se mostra como um dos fortes candidatos a suprir a demanda mundial de alimentos, ao mesmo tempo em que abriga uma das maiores florestas tropicais ainda existentes no planeta. Assim, justifica-se o desenvolvimento do projeto SIMBRASIL/OTIMIZAGRO, que visa à conciliação dos divergentes interesses entre a demanda por terras do setor agropecuário e a necessidade de conservação das florestas (Soares-Filho et al, 2013b). Tendo em vista a busca pelo desenvolvimento econômico aliado à preservação de matas nativas, o OTIMIZAGRO tem como um de seus objetivos o planejamento e a avaliação das transições de uso do solo entre categorias antropizadas (pastagens, cultivos e reflorestamento) e suas respectivas emissões de GEEs.

Dessa forma, como parte deste projeto, o presente estudo desenvolveu um modelo espacialmente explícito para calcular as emissões e o sequestro de carbono pela biomassa e pelos solos de áreas agrícolas de um cenário Baixo Carbono. Assim, a plataforma de modelagem e os resultados encontrados podem colaborar para a orientação da estruturação de políticas públicas sustentáveis.

Este trabalho é requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. **Optou-se, conforme disposto no regulamento do curso, pela dissertação em forma de artigo a ser submetido a periódicos científicos.**

## 1 INTRODUÇÃO

A concentração de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera vem se intensificando desde a revolução industrial e estima-se que tenha chegado a 391 ppm (partes por milhão) em 2011, um aumento de quase 40% comparado aos níveis de 1750 (IPCC, 2013). Segundo estudos do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas - IPCC- parte da explicação para esse aumento pode ser dada a partir da análise das atividades antrópicas fontes de GEEs. Estima-se que a ação antrópica já tenha levado ao acréscimo de 0,85°C na temperatura média da superfície da Terra de 1880 a 2012 (IPCC, 2013). Tais mudanças têm efeitos sobre a distribuição de espécies de flora e fauna (THOMAS *et al.*, 2004), sobre o regime de chuvas e vento e implicações em diversos outros processos naturais (IPCC, 2013). Dessa forma, muitos serviços ambientais ficam prejudicados, como, por exemplo, a produção agrícola, o que ameaça a oferta de alimentos (OLIVEIRA *et al.*, 2013; PELLEGRINO *et al.*, 2007) e o desenvolvimento socioeconômico, principalmente em países em desenvolvimento (WRI, 2005).

As emissões mundiais de GEEs em 2010 somaram 49 Gt de CO<sub>2</sub>e<sup>1</sup>(bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente), e a sua principal fonte continua sendo a queima de combustíveis fósseis, com 65% das emissões totais, tendo as emissões relativas a agricultura, florestas e outros usos do solo contribuído com um quarto das emissões neste ano (IPCC, 2013).

As emissões agrícolas dizem respeito às atividades praticadas em áreas agrícolas, como uso de fertilizantes, fermentação entérica do gado, manejo de dejetos animais, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas, e geram principalmente emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (Setor A - Figura 1). Já as emissões do setor de florestas e outros usos do solo, referem-se principalmente às alterações de carbono na biomassa e solos, que se constituem como a segunda maior fonte de carbono para atmosfera (PAUSTIAN *et al.*,1998), mas também às emissões de CO<sub>2</sub> por aplicação de calcário em solos agrícolas e às emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O pela queima de biomassa (Setor B -Figura 1). Ainda relativas às atividades agrícolas, além das emissões já citadas, existem também as emissões de carbono pela queima de combustíveis fósseis das máquinas agrícolas, mas estas são computadas pelo setor de energia (Setor C -Figura 1).

---

<sup>1</sup> O dióxido de carbono equivalente - CO<sub>2</sub>e.- é uma medida métrica utilizada para comparar as emissões de vários GEEs e baseia-se no potencial de aquecimento global de cada um deles. Ele é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas GEEs pelo seu potencial de aquecimento global.

A biomassa e os solos são reservatórios de carbono que concentram de 350 a 650 Gt e uma média de 1460 Gt de carbono, respectivamente, e que podem funcionar como fonte ou sumidouro de carbono (HOUGHTON *et al.*,2009, SCHARLEMANN *et al.*,2014).

### Emissões de CO<sub>2</sub>e no Brasil em 2010

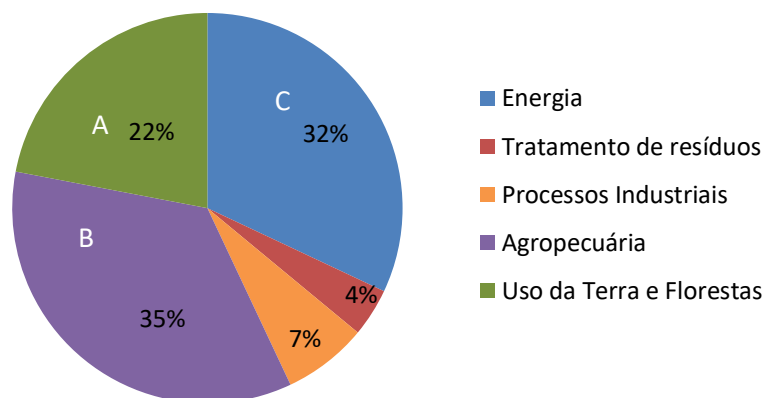


Figura 1 - Emissões de CO<sub>2</sub>e no Brasil por setor no ano de 2010 segundo às Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (MCT, 2013). A- Emissões relativas ao uso de fertilizantes, fermentação entérica do gado, manejo de dejetos animais, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas. B- Emissões relativas às alterações de carbono na biomassa e solos, aplicação de calcário em solos agrícolas e queima de biomassa. C- Setor contabiliza emissões de carbono pela queima de combustíveis fósseis das máquinas agrícolas

Alterações recentes nesses estoques, que aconteceram principalmente por meio da modificação da paisagem, já proporcionaram perdas mundiais na biomassa de aproximadamente 1.5 Gt de carbono por ano de 1959 a 2006, sendo estas emissões advindas majoritariamente de ecossistemas tropicais a partir de 1980 (CANADELL *et al.*, 2007). Em relação à alteração de carbono nos solos, a conversão de sistemas naturais em sistemas agrícolas já levou à perda de 60% dos estoques de carbono em áreas cultivadas de regiões temperadas e de 75% em regiões tropicais (LAL, 2004).

Segundo as Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil de 2013, as emissões gerais de carbono por mudanças no uso do solo<sup>2</sup>, que em 2005 eram equivalentes à 57% das emissões brasileiras, passaram a representar 22% do total das emissões em 2010(Figura 1). Nesse intervalo ocorreu uma diminuição de 76% das emissões de CO<sub>2</sub>e, que passaram de 1103 para 256 Mt CO<sub>2</sub>e (milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente).

<sup>2</sup> Englobando emissões e remoções resultantes das variações da quantidade de carbono, seja da biomassa aérea, seja do solo, considerando-se todas as transições possíveis entre diversos usos, além das emissões de CO<sub>2</sub> por aplicação de calcário em solos agrícolas e das emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O pela queima de biomassa nos solos.

A diminuição das emissões pode estar relacionada a um maior uso de práticas conservacionistas de plantio e nas pastagens (MAIA *et al.*, 2010) além da diminuição sistemática do desmatamento desde 2004 (MCT, 2013).

Uma das causas da queda do desmatamento foi o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com vistas a reduzir as emissões GEEs entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020 (NEPSTAD *et al.*, 2009), formalizado pela instituição da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) em 2009. Para tanto, foram propostas diferentes ações que contemplam a redução das taxas de desmatamento, a ampliação da eficiência energética e um plano específico para ações no setor agrícola, o Plano Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC). Este plano inclui metas para recuperação de pastagens degradadas, aumento de áreas de integração lavoura pecuária, ampliação do uso do Sistema de Plantio Direto e da Fixação Biológica de Nitrogênio, assim como aumento de áreas de florestas plantadas (MAPA, 2012).

As ações do Plano ABC vão no sentido de atingir uma agricultura contemporânea que deve ser pouco poluidora, oferecer opções de mitigação de GEEs a um baixo custo e ainda ser fonte de energia renovável (RICE & REED, 2007). O que tem se visto até o momento são mais emissões do que sequestros de GEEs neste setor, mas percebe-se um aumento de iniciativas conservacionistas e são grandes as oportunidades de mitigação de GEEs em áreas de uso do solo agrícola (CERRI *et al.*, 2010).

Nesse sentido, é importante destacar que qualquer alteração de cobertura do solo ou de práticas agrícolas pode promover emissões ou sequestro de GEEs (JIMENEZ & LAL, 2006). Dessa forma, a quantificação da influência dessas alterações no fluxo de GEEs em áreas agrícolas é extremamente importante (CERRI *et al.*, 2010; LAL, *et al.* 2006; CARVALHO *et al.*, 2010b; BERNOUX *et al.*, 2006), bem como as análises financeiras de custos de implementação e incentivos governamentais para suas práticas (GURGEL & PALTSEV, 2013), tendo em vista a expansão do setor prevista para os próximos anos (MAPA, 2013). A pressão internacional por demanda de alimentos, a intenção de crescimento da economia pelo governo brasileiro e as mudanças recentes no código florestal podem, entretanto, prejudicar a aliança do crescimento da produção agrícola e a queda do desmatamento e das emissões de GEEs por mudanças de uso do solo visto nos últimos anos (KARSTENSEN *et al.*, 2013).

Nesse contexto, justifica-se o desenvolvimento do projeto SIMBRASIL/OTIMIZAGRO (daqui em diante referido como OTIMIZAGRO), promovido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (<http://www.csr.ufmg.br/simbrasil/>), que visa auxiliar o

planejamento territorial para a conciliação dos divergentes interesses entre a demanda por terras do setor agropecuário e a necessidade de conservação das florestas (SOARES-FILHO *et al.*, 2012). Para isso, o projeto simula trajetórias de mudança do uso do solo, até o ano de 2022, segundo dois diferentes cenários, Referência e Baixo Carbono, por meio de modelagem espacialmente explícita.

A partir das demandas econômicas projetadas pelo modelo BLUM - (Brazil Land Use Model), desenvolvido pelo Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais - ICONE - (ICONE, 2012) para os cultivos agrícolas, o estudo de Campos (2013) relativo à expansão de florestas plantadas e de acordo com o cálculo das áreas disponíveis para a expansão agropecuária e de florestas de produção (GOUVELLO *et al.*, 2010), em atendimento ao Código Florestal, o modelo calcula as taxas de transição para os cultivos e para o reflorestamento. Nesse processo, o OTIMIZAGRO aloca espacialmente as florestas plantadas e as principais categorias de cultivos agrícolas de acordo com o cálculo de probabilidade de transição entre usos do solo, considerando: aptidão agrícola do solo; favorabilidade climática e aptidão física; atratividade urbana e rentabilidade de cada cultura agrícola e reflorestamento (SOARES FILHO *et al.*, 2013a). Além disso, as alterações para redução de emissões de GEEs, no caso do cenário Baixo Carbono<sup>3</sup>, também são levadas em consideração na modelagem das transições de uso do solo.

Para atender às metas de redução de desmatamento e de redução de emissões de gases de efeito estufa, no cenário Baixo Carbono não acontece desmatamento direto, sendo as áreas de pastagens utilizadas para expansão de áreas agrícolas e reflorestamento (SOARES-FILHO *et al.* 2012). As saídas deste modelo são séries temporais de dados e mapas de uso do solo que mudam anualmente (Figuras A1 e A2, nos anexos). Além de subsidiar análises, os resultados desse projeto, podem servir como entrada para outros modelos, como é o caso deste estudo.

Nesse contexto é importante destacar que os trabalhos realizados até o momento que se dispuseram a calcular as emissões de GEEs, considerando projeções de mudança de uso do solo, envolvem transições entre vegetação nativa e categorias de uso do solo antropizadas (CERRI *et al.*, 2007; HOLMES *et al.*, 2006). Todavia, tendo em vista a busca pelo desenvolvimento econômico aliado à preservação de matas nativas, a avaliação das transições

---

<sup>3</sup> Disponibilidade de terras para a simulação leva em conta as alterações feitas no Código Florestal Brasileiro, as metas de redução dos índices anuais de desmatamento e a ampliação das áreas de reflorestamento, regeneração florestal ou silvicultura e o compromisso nacional voluntário estabelecido no PNMC de redução das emissões de GEEs (SOARES-FILHO *et al.* 2012, 2013).



de uso do solo especificamente entre categorias antropizadas (pastagens, cultivos e reflorestamento) e suas respectivas emissões de GEEs mostra-se ainda mais importante.

Dessa forma, para uma melhor avaliação das emissões e do sequestro de carbono provenientes da biomassa e dos solos do setor agrícola, é preciso haver uma desagregação das categorias agrícolas por tipo de cultivo e/ou formas de manejo (IPCC, 2006). Além disso, o uso de parâmetros ajustados para realidade local e o uso de modelagem espacialmente explícita são considerados boas práticas que conferem às análises menores graus de incerteza e possibilidade de se levarem em conta variações espaciais dos tipos agrícolas e práticas de cultivos (WANG *et al.*, 2011).

Considerando todo o quadro exposto, o presente trabalho tem como objetivo estimar as emissões e o sequestro de carbono da biomassa e dos solos em áreas com uso do solo agrícola no período 2011-2022 (considerando somente as emissões de CO<sub>2</sub> por mudanças de uso do solo), por meio de modelagem espacialmente explícita, a partir das projeções de uso do solo estimadas pelo cenário Baixo Carbono da plataforma de modelagem OTIMIZAGRO.

Por meio desta análise, pretende-se aumentar o conhecimento para estimativas de emissões de GEEs do setor e contribuir para a gestão territorial e a formulação de políticas públicas.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Aspectos Gerais**

Foram calculadas as emissões e o sequestro de carbono da biomassa e dos solos em áreas de uso do solo agrícola, consideradas neste estudo áreas modificadas por atividade antrópica com o cultivo de espécies vegetais ou com a criação de espécies animais. Desse modo, no presente trabalho são consideradas como áreas agrícolas as categorias de cultivos agrícolas (anuais e permanentes), as pastagens e as florestas plantadas, mostradas nas figuras A1 e A2, nos anexos.

O cálculo das emissões e do sequestro de carbono foi feito a partir dos mapas de uso do solo do modelo OTIMIZAGRO, do período de 2011 a 2022. A base metodológica para o cálculo das emissões e do sequestro de carbono foram as recomendações do IPCC para o setor de “Uso da terra, mudança do uso da terra e florestas” (IPCC, 2003) e “Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo” (IPCC, 2006) com adaptações para a realidade dos dados disponíveis para a presente análise, como será explicitado nas seções abaixo.

### 2.1.1 Utilização da Metodologia do IPCC

A metodologia do IPCC possui três formas de abordagem chamadas “tiers”, que dizem respeito à complexidade dos cálculos: o “tier 1” é o nível mais básico e o “tier 3”, o nível mais detalhado (IPCC, 2003). Neste estudo os cálculos foram realizados mesclando os níveis “tier 2” e “tier 3”, já que foram feitos de forma espacialmente explícita, usando parâmetros específicos para a realidade do país e com alto nível de desagregação das categorias de uso do solo (Figura 2).

Tabela 1- Níveis metodológicos relativos à complexidade dos cálculos de emissões de GEEs estruturados pelo IPCC

<b>Níveis Metodológicos IPCC - TIERS<sup>2</sup></b>		
<b>Tier 1</b>	<b>Tier 2</b>	<b>Tier 3</b>
Parâmetros gerais IPCC	Parâmetros nacionais	Parâmetros nacionais/ locais
Estimativas globais ou nacionais de atividades agrícola e de mudança de uso do solo	Estimativas nacionais de atividades agrícola e de mudança de uso do solo	Dados de atividades agrícolas e mudança de uso do solo desagregados espacialmente e por cultivos. Uso de modelagem e SIG

Além disso, o IPCC define quatro reservatórios de carbono terrestres a serem considerados nas análises: biomassa viva acima do solo, biomassa viva abaixo do solo, matéria orgânica morta e os solos. É importante salientar que, apesar de estar sendo usada uma abordagem de cálculo em níveis mais detalhados, não foi abordado o reservatório de matéria orgânica morta devido à sua pequena importância na categoria de cultivos agrícolas (IPCC, 2006) e à dificuldade de inclui-lo nas análises por conta da baixa disponibilidade de dados. Assim, foram considerados nos cálculos os reservatórios de biomassa viva acima e abaixo do solo e a matéria orgânica nos solos.

De acordo com a metodologia do IPCC, de forma geral, as emissões de sequestro de carbono de qualquer reservatório podem ser calculadas de acordo com os dois métodos abaixo:

(1) Ganho e perda de carbono:

$$\Delta C = \sum_{i,j,k} [ A_{i,j,k} * (C_I - C_L)_{i,j,k} ]$$

$\Delta C$  = Mudança de carbono no reservatório, em toneladas por ano (Mg/ano)

A = Área de uso do solo, hectares (ha)

ijk= Condições de clima i, tipo de uso do solo j, prática de manejo k, etc...

$C_I$  = Taxa de ganho de carbono (Mg /ha/ano)

$C_L$  = Taxa de perda de carbono (Mg /ha/ano)

(2) Comparação de estoques em dois momentos:

$$\Delta C = \sum_{i,j,k} (C_{t2} - C_{t1}) / (t_2 - t_1)_{i,j,k}$$

$\Delta C$  = Mudança de carbono no reservatório (Mg/ano)

$C_{t1}$  = Estoque de carbono no reservatório no momento 1 (Mg de C)

$C_{t2}$  = Estoque de carbono no reservatório no momento 2 (Mg de C)

Dependendo da natureza e disponibilidade de dados, as duas abordagens foram utilizadas nos cálculos realizados para cada unidade de área dos mapas de entrada (em formato raster), células de 500 metros, por meio de modelagem espacialmente explícita. A modelagem foi feita utilizando o software DINAMICA-EGO (SOARES-FILHO *et al.*, 2009), uma plataforma de modelagem ambiental para o desenvolvimento de modelos analíticos e espaço-temporais, que disponibiliza uma biblioteca de algoritmos para análise e simulação de fenômenos (SOARES-FILHO *et al.*, 2013).

Informações sobre como acontece a variação dos estoques de carbono na biomassa e nos solos, alguns dados sobre emissões desses reservatórios no Brasil assim como a metodologia de modelagem utilizada neste estudo estão descritas com mais detalhes nas próximas duas seções, Biomassa e Solos.

## 2.2 Biomassa

A biomassa acumula carbono pelo crescimento das plantas, por meio do processo de fotossíntese, e o carbono retorna para a atmosfera pela respiração e por meio dos processos de decomposição, quando a planta é cortada ou morre. Diferentes sistemas concentram diferentes quantidades de carbono na biomassa e, assim, transições entre diferentes usos do solo podem acarretar ganho ou perda nos estoques de carbono (HOUGHTON *et al.*, 2009).

No Brasil, no período de 1990 a 2010, as mudanças de uso do solo geraram uma perda líquida de carbono na biomassa entre 800 a 1250 Mt de CO<sub>2</sub>e por ano, com pico no ano de 2004, e as emissões vem caindo desde então com valores na ordem 560 Mt de CO<sub>2</sub>e em 2010 em decorrência da diminuição do desmatamento (KARSTENSEN *et al.*, 2013).

No presente estudo, para o cálculo das emissões e do sequestro de carbono da biomassa em áreas agrícolas foi utilizada a equação 2 acima descrita. Para isso realizou-se o balanço de carbono dos estoques de biomassa por meio da comparação desses estoques entre os anos

estudados (sempre comparando o estoque de carbono de um ano com o estoque de carbono do ano anterior), processo F da figura 3.

Para atribuir estoques de carbono às áreas agrícolas foram buscados parâmetros na literatura nacional e as seções abaixo, divididas em cultivos anuais, cultivos permanentes e pastagens, descrevem a metodologia utilizada e apresentam os parâmetros selecionados. Esses dados foram levantados e agregados considerando como padrão informações sobre cultivos comerciais e generalizando-as para toda a área de cada categoria de uso de solo antrópica.

Os dados de biomassa levantados são parâmetros de entrada do modelo (A- Figura 3) atribuídos a cada classe de uso do solo agrícola dos mapas de entrada gerados pelo modelo OTIMIZAGRO (D- Figura3). Em seguida, os valores de biomassa são transformados em quantidade de carbono por meio da multiplicação por 0,5 (fração padrão de carbono contido na biomassa recomendada pelo IPCC (2006), e aqui adotada para todas as categorias) para gerar os estoques de carbono na biomassa em áreas agrícolas (E-Figura3). A partir destes estoques, é realizado o balanço de carbono, já descrito acima, que é multiplicado por 3,6 para se ter as emissões e o sequestro em CO<sub>2</sub>e. O processo de atribuição de biomassa e conversão em carbono é repetido para cada mapa de uso do solo (de 2011 a 2022) e o balanço de carbono é feito para cada par de mapas do período (2012- 2011,2013-2012, 2014-2013, 2015-2014, 2016-2015, 2017-2016, 2018-2017, 2019-2018, 2020-2019, 2021-2020, 2022-2021).

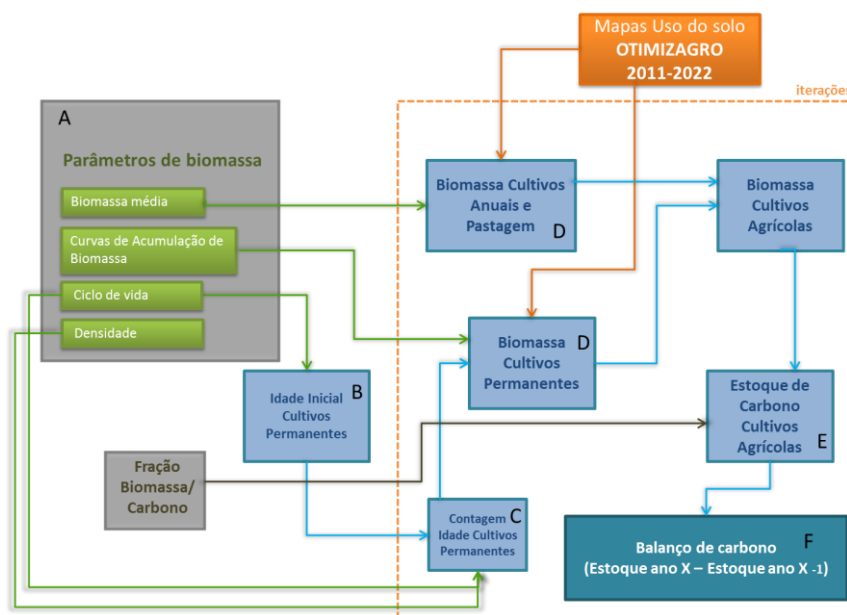


Figura 2- Esquema geral de funcionamento do modelo que calcula as emissões e o sequestro de carbono da biomassa em áreas de uso do solo agrícola de 2011 a 2022

### 2.2.1 Cultivos Permanentes

Os cultivos permanentes constituem-se como uma categoria agrícola que acumula carbono em sua biomassa pois podem permanecer por muitos anos na paisagem sem serem alterados. Dentro das categorias antrópicas de uso do solo, o reflorestamento representa uma das formas que mais acumula carbono. A plantação de florestas é em si uma forma de mitigação de emissões de carbono, além de ser uma maneira sustentável de produção de madeira e, assim, de suporte à manutenção das florestas nativas (BROWN, 1999). Segundo Paixão *et al.* (2006), o eucalipto tem um incremento médio anual de 12 toneladas de carbono por hectare (t de C /ha), estocando aproximadamente 70% da biomassa na parte aérea, 20% nas raízes e 10% na manta orgânica. Entre os anos de 2005 e 2012, houve uma expansão da área ocupada por plantios florestais no Brasil de 26%, o que totalizou 6,6 milhões de hectares em 2012 e com indicações de aumento do crescimento nos próximos anos (ABRAF, 2013). Além das florestas para produção de madeira, a fruticultura também é uma forma interessante de mitigação de carbono, já que gera emprego, renda e produção de alimento. Plantações de cacau e laranja, por exemplo, podem acumular 65 e 76 t de C/ha, respectivamente (KONGSAGER *et al.*, 2012).

Os cultivos permanentes aqui estudados incluem as plantações de café arábica, café robusta, laranja e cacau. Além disso, as florestas plantadas também foram tratadas como cultivos permanentes por utilizarem a mesma metodologia para cálculo dos estoques e do balanço de carbono. Toda a categoria de florestas plantadas refere-se ao cultivo de *Eucalyptus* já que a espacialização da categoria no modelo OTIMIZAGRO foi feita apenas com base na expansão desse gênero justificada pela superioridade da sua representatividade, 76% da área de florestas plantadas no Brasil, e na crescente tendência de diminuição do *Pinus* para os próximos anos (ABRAF, 2013). A banana não foi considerada como cultivo permanente já que foram encontradas informações que recomendam o corte dos cultivares logo após a colheita que acontece em média de um ano e meio a dois anos (BORGES & SOUZA, 2004).

No presente estudo, para estimar a biomassa dos cultivos permanentes utilizou-se a equação 1, em que os reservatórios são estimados a partir de perdas e ganhos de carbono. Para cada um dos cultivos permanentes, em lugar de taxas fixas de ganho de carbono, foram usadas equações que descrevem a acumulação de biomassa em função da idade dos cultivos e, em lugar de taxas fixas de perda de carbono, foram pesquisados dados sobre o ciclo de vida dos cultivos para saber com que idade eles normalmente são cortados e retirados da paisagem.

Essas equações de acumulação de biomassa foram pesquisadas na literatura e replicadas de outros estudos quando disponíveis. Quando não havia estudos disponíveis, elas foram estimadas a partir de dados secundários relativos à biomassa e à idade dos cultivos, também

buscados em publicações científicas, ajustados a uma curva de crescimento logístico (Equação 3) assim como realizado por Bragança *et al.* (2010). Os dados de acumulação de biomassa são referentes ao peso de um indivíduo (parte aérea e raiz) e foram multiplicados no modelo pela densidade dos cultivos (número de indivíduos por hectare), também levantada na literatura científica e em informações de associações. Para as florestas plantadas, por sua vez, os dados disponibilizados para as curvas de acumulação são em volume de madeira do tronco por hectare. Este volume é, então, multiplicado por um fator que determina o peso da biomassa contida do volume e por um fator de expansão para se estimarem valores de biomassa para toda a planta. Já os dados sobre o ciclo de vida dos cultivos, que determinam as perdas de carbono da biomassa, foram buscados em artigos científicos e informações de associações assim como os dados de densidade.

$$(3) \quad y = a/(1 + be^{-cx})$$

$y$  = Variável dependente, em quilogramas de biomassa seca por planta (Kg/planta) -no caso das florestas plantadas, metros cúbicos de tronco por hectare ( $m^3/ha$ )

$x$  = Idade, em anos

$a, b, c$  = Parâmetros do modelo

Os dados para o cálculo dos estoques dos cultivos permanentes são escassos na literatura nacional e, por isso, algumas vezes recorreu-se a diferentes trabalhos para compor as informações necessárias na estimação das equações de acúmulo de biomassa. Além disso, também é importante dizer que foram buscados artigos de estudos feitos nos locais em que os cultivos ocorrem com maior frequência no país.

Para estimar os estoques de carbono dos cultivos permanentes, o modelo realiza a contagem de idade desses cultivos de acordo com a permanência do uso do solo das categorias verificada pela série de mapas de uso do solo (C-Figura 3) e atribui biomassa a eles por meio das equações de acúmulo de biomassa e de densidade dos cultivos. As perdas de carbono acontecem quando os cultivos atingem a idade máxima (de acordo com as informações do ciclo de vida) e são cortados tendo seus estoques de carbono reduzidos a zero (D-Figura 3). Para os cultivos que já existiam no primeiro ano de estudo foram atribuídas idades aleatórias uniformemente distribuídas de maneira que, em 2011, existem cultivos com todas as idades possíveis na mesma proporção em cada categoria de cultivos permanentes (B-Figura 3).

Nas tabelas 1, 2 e 3, estão resumidos os dados de ciclo de produção, densidade e acumulação de biomassa usados para os cálculos dos estoques de biomassa permanente e suas

respectivas fontes. Além deles, estão incluídas também as informações resultantes do uso desses parâmetros para o cálculo dos estoques de carbono, como a quantidade máxima de carbono acumulado, o incremento médio de carbono por ano e o estoque médio de carbono, em toneladas de carbono por hectare (Mg de C/ha).

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no modelo para se estimar a biomassa dos cultivos permanentes de café arábica, café robusta, laranja e cacau: duração do ciclo de produção, densidade e acumulação de biomassa; e valores de estoques de carbono encontrados

Cultivo	Duração do Ciclo de Produção	Densidade (Plantas /ha)	Equação de acumulação de biomassa	Max. de Carbono Acumulado (Mg de C/ha)	Incremento Médio Anual (Mg de C/ha/ano)	Estoque médio de carbono (Mg de C/ha)	Fontes
Café Arábica	20 anos	Variável por estado Média: 2733	$y = 11.42 / (1 + 16.62 \exp(-0.6t))$	15	0.8	7.5	Biomassa: PREZOTTI, 2001 Ciclo de Produção: FUNDAÇÃO PROCAFÉ OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2005 Densidade: CONAB,2012
Café Robusta	20 anos	Variável por estado Média: 2733	$y = 17.86 / (1 + 40.29 \exp(-0.96t))$	24	1.2	21	Biomassa: BRAGANÇA, 2005 Ciclo de Produção: FUNDAÇÃO PROCAFÉ OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2005 Densidade: CONAB,2012
Laranja	21 anos	394	$y = 275.72 / (1 + 231.18 \exp(-0.514t))$	54	2.6	27	Biomassa: RONQUIM, 2007 QUINONES <i>et al.</i> , 2013 Ciclo de Produção: NEVES <i>et al.</i> , 2010 Densidade: CONAB,2013
Cacau	30 anos	Pará= 960 Bahia=700	$y = 38.22 / (1 + 7.47 \exp(-0.33t))$	16	0.5	8	Biomassa: TEIXEIRA <i>et al.</i> , 1994 TEIXEIRA & OLIVEIRA, 1999 SOMARRIBA <i>et al.</i> , 2013 Ciclo de Produção: CEPLAC, 2009 Densidade: TEIXEIRA & OLIVEIRA, 1999 CEPLAC & CPC, 2011

Tabela 3- Densidade do cultivo de café por estados de acordo com dados da CONAB em 2012

Estado	Pés café/ha 2012
Minas Gerais	3156.4
Espírito Santo	2732.5
São Paulo	2781.9
Paraná	3331.4
Bahia	2366.2
Rondônia	1546.0
Mato Grosso	2296.9
Góias	5324.5
Pará	2230.0
Rio de Janeiro	2100.1
Outros	2200.0
<b>Média</b>	<b>2733.0</b>

Tabela 4 - Parâmetros utilizados no modelo para se estimar a biomassa de floresta plantada: duração do ciclo de produção, acumulação de biomassa, densidade da madeira e fator de expansão; e valores de estoques de carbono encontrados

Cultivo	Duração do Ciclo de Produção	Equação de acumulação de biomassa	Fator de Expansão	Densidade da madeira	Max. de Carbono Acumulado (Mg/ha)	Estoque médio de carbono (Mg/ha)
<i>Eucalyptus</i>	7 anos	$y = 299.27 / (1 + 26.77 \exp(-0.82 t))$	1.47	0.52	105	52.5
Fonte	ABRAF, 2013	Volume: ABRAF, 2013 Curva de crescimento: MCT, 2006	MCT, 2006 GATTO <i>et al.</i> , 2010	MCT, 2006 SCOLFORO <i>et al.</i> , 2008 SCANAVACA-JUNIOR & GARCIA, 2004 GUEDES <i>et al.</i> , 2011		

### 2.2.2 Cultivos anuais

Os cultivos anuais não acumulam carbono ao longo do tempo, já que são plantados e colhidos em um mesmo ano. Assim, para essa categoria não se calculam estoques de carbono dinâmicos. Por isso, foram atribuídos valores de biomassa fixos para cada um desses cultivos de acordo com uma média de valores encontrados em diversos trabalhos selecionados em revisão de literatura realizada.

Nesta revisão foram selecionados artigos que fornecessem o peso seco da biomassa dos cultivos em sua fase de maturação. Muitos trabalhos utilizados tratavam-se de avaliações de aumento de produtividade agrícola a partir de testes com diferentes fertilizantes ou diferentes formas de adensamento, por exemplo. É importante ressaltar que, nestes casos, foram utilizados os dados de experimentos controle ou que mais se adequassem à forma de manejo padrão utilizada nos cultivos comerciais, apesar de este aspecto poder ser bastante variável. A maioria dos estudos continha somente os valores de biomassa aérea dos cultivos, por isso os valores de biomassa das raízes foram estimados separadamente e somados à biomassa aérea para se obter a biomassa total. Além disso, foram buscados artigos com estudos feitos em locais que abrangessem a área de distribuição dos cultivos no país. A tabela 4 abaixo resume os valores de biomassa (aérea e da raiz) encontrados.



Tabela 5 – Parâmetros utilizados no modelo para estimar a biomassa dos cultivos anuais e valores de estoques de carbono encontrados

Cultivo	Média Biomassa aérea (Mg/ha)	Biomassa das raízes (Mg/ha)	<b>Biomassa total</b> (Mg/ha)	Carbono Total (Mg/ha)	Número de estudos consultados
<b>Algodão</b>	11.6	2.9	<b>14.5</b>	7.3	4
<b>Arroz</b>	10.0	3.0	<b>13.0</b>	6.5	1
<b>Banana</b>	8.6	1.7	<b>10.3</b>	5.2	2
<b>Cana de açúcar</b>	56.2	7.3	<b>63.5</b>	31.7	4
<b>Feijão</b>	5.4	2.9	<b>8.4</b>	4.2	6
<b>Mandioca</b>	10.2	1.1	<b>11.3</b>	5.7	3
<b>Milho</b>	16.2	2.9	<b>19.1</b>	9.6	7
<b>Soja</b>	8.9	2.2	<b>11.1</b>	5.6	8
<b>Trigo</b>	6.6	2.0	<b>8.6</b>	4.3	5
<b>Fumo</b>	10.0	2.5	<b>12.5</b>	6.3	1

**Fonte biomassa aérea:**

**Algodão:** ROSOLEM *et al.*, 2012, ALMEIDA *et al.*, 2009, ATHAYDE & LAMAS, 1999, MARUR & RUANO, 2004, SILVA *et al.*, 2005

**Arroz:** IPCC, 2006

**Banana:** COSTA, F.S. *et al.*, 2012, RODRIGUES *et al.*, 2010, BORGES & SOUZA, 2004

**Cana de açúcar:** OLIVEIRA *et al.*, 2006, SOUZA, 2007, TOLEDO FILHO, 2001, RODRIGUES, 1995, LEITE *et al.*, 2010, RIDESA, 2013

**Feijão:** GOMES *et al.*, 2000, URCHE *et al.*, 2000, MEDEIROS *et al.*, 2000, BORGES *et al.*, 2012, ANDRADE *et al.*, 2009, SILVA *et al.*, 2006

**Mandioca:** SANGOI & KRUSE, 1993, AGUIAR, 2011, PERESSIN *et al.*, 1998

**Milho:** SILVA *et al.*, 2010, DUARTE *et al.*, 2003, SANTOS *et al.*, 2010, BERGONCI *et al.*, 2001, VON PINHO *et al.*, 2009, COSTA, H.J.U. *et al.*, 2012, GAVA *et al.*, 2010

**Soja:** PADOVAN *et al.*, 2008, LAZARINI *et al.*, 2000, GONÇALVES, 2012, CRUZ *et al.*, 2010, WALTER *et al.*, 2009, BIANCO *et al.*, 2007, MARTORANO, 2007, WATANABE *et al.*, 2005, ALLIPRANDINI *et al.*, 2009

**Trigo:** HAMADA & PINTO, 2001, SCHEEREN, *et al.*, 2012, FONTOURA & HAAG, 1987, DALBERTI *et al.*, 2010, COELHO *et al.*, 1998

**Fumo:** IPCC, 2006

**Fonte biomassa das raízes:**

WALTER, 2012, RONQUIM, 2007

**2.2.3 Pastagens**

A biomassa das pastagens varia de acordo com as atividades humanas e os desequilíbrios naturais. Dessa forma, esse tipo de uso do solo pode perder carbono por meio de retirada de biomassa lenhosa, pastoreio de animais, queimadas, dentre outras razões, e pode ter sua biomassa aumentada de acordo com seu crescimento, manejo adotado e as técnicas de recuperação do pasto (IPCC, 2006). De acordo com o nível mais básico da metodologia do IPCC (2006), a biomassa das pastagens é considerada constante, se se parte do pressuposto de que as entradas e saídas de carbono anulam-se. No presente estudo também foi considerada a não mudança nos estoques de biomassa em pastagens e adotado um valor médio fixo, como foi

realizado para os cultivos anuais. A categoria de pastagens foi dividida, porém em subcategorias que dizem respeito à sua natureza e ao seu manejo.

Nos mapas de uso do solo gerados pelo modelo OTIMIZAGRO, a classe de pastagens ocupa grande parte do território nacional e é considerada uma classe única. No presente estudo, esta classe foi dividida em subclasses: pastagem nativa, pastagem plantada degradada e pastagem plantada em boas condições. Tal procedimento foi realizado para que as diferenças entre as subclasses fossem consideradas tanto na contabilização de emissões e de sequestro de carbono pela biomassa como pelos solos de áreas agrícolas. Essa divisão foi feita espacializando-se a quantidade das subcategorias nas áreas de pastagens dos mapas de uso do solo do modelo OTIMIZAGRO em cada município, de acordo com os dados do Censo Agropecuário do IBGE de 2006 ajustados com informações de artigos científicos. Além disso, foi considerada a recuperação de pastagens degradadas projetadas pelo Plano ABC de 15 milhões de hectares (MAPA, 2012) durante o período de estudo. Tal procedimento tem sua metodologia explicada em maiores detalhes no anexo metodológico.

Na revisão bibliográfica feita com o intuito levantar dados sobre a biomassa dessa categoria, as pastagens nativas foram divididas por biomas. Para o bioma Mata Atlântica não foram encontrados trabalhos e, por isso, foram replicados os valores adotados para o Cerrado. Para pastagens nativas do Cerrado e Amazônia, não foram encontradas publicações específicas sobre a biomassa de pastagens usadas com fins antrópicos e, devido a isso, foram utilizadas publicações com valores de biomassa das fitofisionomias de campos limpos para o Cerrado e de savana e savana estépica para a Amazônia.

Todos os valores de biomassa retirados dos artigos referem-se à biomassa acima do solo. Para se atribuir biomassa para o componente abaixo do solo, foi adotada a proporção entre biomassa abaixo do solo e acima do solo (root to shoot ratio) do IPCC, 2006, para ecossistemas tropicais, equivalente a 1,6, para todos os tipos de pastagens. Na tabela 5 encontram-se os parâmetros referentes à biomassa de pastagens que foram usados como dados de entrada no modelo de contabilização de carbono.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no modelo para estimar a biomassa das pastagens e valores de estoques de carbono encontrados

Tipo de Pastagem	Manejo/Bioma	Biomassa acima do solo (Mg/ha)	Biomassa Total (Mg/ha)	Carbono (Mg/ha)	Fonte
Pastagem Plantada	Boas Condições	5	<b>13.1</b>	6.6	POMPEU <i>et al.</i> , 2008, dos SANTOS <i>et al.</i> , 2007, ZANCHI <i>et al.</i> , 2009, RODRIGUES, 2004
	Degradada	2,6	<b>6.9</b>	3.4	MÜLLER <i>et al.</i> , 2004, SILVA NETO <i>et al.</i> , 2012, POMPEU <i>et al.</i> , 2008
Pastagem Nativa	Amazônia	6.2	<b>16.1</b>	8.1	BARBOSA & FEARNESIDE, 2005 FEARNESIDE <i>et al.</i> , 2009
	Cerrado	7.8	<b>20.4</b>	10.2	OTTMAR <i>et al.</i> , 2002 CASTRO & KAUFFMAN, 1998
	Mata Atlântica	7.8	<b>20.4</b>	10.2	-
	Caatinga	4.2	<b>10.9</b>	5.5	ARAÚJO FILHO <i>et al.</i> , 2002 EMBRAPA, 1990
	Pampas	4.9	<b>12.7</b>	6.4	HERINGER & JAQUES, 2002 NEVES <i>et al.</i> , 2009 FIDELIS <i>et al.</i> , 2007
	Pantanal	3.4	<b>8.8</b>	4.4	POZER & NOGUEIRA, 2004

### 2.3 Solos

Os estoques de carbono no solo variam dependendo da composição vegetal, dos tipos de solo, do clima e de outras características físicas que influenciam na dinâmica do carbono. Em condições naturais, as entradas de carbono acontecem principalmente por meio da serapilheira e da biomassa das raízes, e as saídas são causadas pelos processos de erosão, decomposição da matéria orgânica e lixiviação (SIX *et al.*, 2002). Dessa forma, processos que alteram essa dinâmica ocasionam mudanças no estoque de carbono no solo e acontecem principalmente devido a mudanças na entrada de matéria orgânica, seja pela alteração da cobertura do solo (ZINN *et al.*, 2005 e ASSAD *et al.*, 2013) e/ou pelo manejo via adições orgânicas (KUNDU *et al.*, 2006), seja por outros processos que compõem o conjunto de práticas agrícolas adotado (BATLLE-BAYER *et al.*, 2010).

No Brasil, segundo a avaliação de Bernoux e colaboradores (2001), as alterações de carbono no solo geraram a emissão de pouco mais de 93 Mt de CO<sub>2</sub>e por ano no período 1970-1990, caindo pela metade no período 1975-1995. Algumas regiões, como o norte e centro-oeste, não tiveram uma diminuição tão acentuada (com aumento nos estados Amapá, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), mas o sul e o sudeste do país passaram a sequestrar carbono no último período analisado. Outra pesquisa relativa às alterações de carbono no solo foi feita para os

estados do Mato Grosso e Rondônia nos períodos de 1970-1985 e 1985-2002 (MAIA *et al.*, 2010). Este trabalho também mostrou uma queda nas emissões de 15,2 para 10,1 Mt de CO<sub>2</sub>e em relação ao primeiro e segundo períodos estudados, respectivamente, no estado do Mato Grosso e 4,1 para 3,2 Mt de CO<sub>2</sub>e para o estado de Rondônia.

No setor agrícola, destaca-se a adoção de plantio direto como forma de sequestro de carbono pelos solos, que é um tipo de manejo em que não há distúrbios no solo da semeadura à colheita, que já é praticada em 25 milhões de hectares no país (FEBRAPDP, 2012). Neste sistema, o solo não é revolvido e recebe maiores aportes de carbono por meio dos resíduos da colheita anterior, que não são removidos, e pode assim acumular mais carbono (SIX *et al.*, 2002). Apesar de, quando se analisa o perfil dos solos em maior profundidade, ainda serem discutidos os reais benefícios do sequestro de carbono na adoção do sistema de plantio direto (POWSON *et al.*, 2011), a maioria das publicações relata, a partir da adoção desse sistema, ganhos de carbono na camada superficial do solo (30cm) (BODDEY *et al.*, 2012). As taxas de acumulação de carbono no solo a partir da adoção do plantio direto variam muito de acordo com as diferentes regiões, os tipos de solo e os sistemas de rotação de cultivos (ZINN *et al.*, 2005; CONCEIÇÃO *et al.*, 2013). Esses valores podem chegar a médias entre 0,48 toneladas de carbono por hectare por ano (Mg de C/ha/ano) e 0,88, de acordo com pesquisas feitas na região sul do Brasil, e entre 0,29 a 1 Mg de C/ha/ano, em estudos feitos na região centro-oeste (BERNOUX *et al.*, 2001; BAYER *et al.* 2006; BATLLE-BAYER *et al.*, 2010; LAL *et al.*, 2006; MAIA *et al.*, 2013).

Outra estratégia potencial de acumulação de carbono em áreas agrícolas é a recuperação de pastagens degradadas. De acordo com dados compilados por Lal *et al.* (2006), esse processo pode acarretar o sequestro em diferentes biomas de 0,27 a 2,71 Mg de C/ha/ano. Dependendo do tipo de manejo adotado nas pastagens elas podem até acumular mais carbono que os sistemas naturais. Segundo Carvalho *et al.* (2010b), a conversão de vegetação nativa para pastagens bem manejadas promove um sequestro médio de 0,44 Mg de C/ha/ano e emissões médias de 0,15 Mg de C/ha/ano, na conversão de vegetação natural para pastos degradados. O mesmo padrão foi verificado por Maia *et al.* (2010), que encontrou em média perdas de 0,27 e ganhos de 0,61 Mg de C/ha/ano, em conversões de vegetação natural para pastos degradados e bem manejados, respectivamente.

Para o cálculo das emissões e do sequestro de carbono nos solos, o IPCC sugere o uso da equação 2 descrita na seção 2.1.1 (IPCC, 2006), em que são comparados os estoques de carbono em dois momentos. Para isso, os estoques de carbono de um determinado ponto do

período estudado são estimados por meio da multiplicação do estoque de carbono referência da área (estoque de carbono no solo em condições naturais) por fatores de mudança de estoque (fatores de emissão), relacionados ao tipo uso do solo, ao manejo e às adições orgânicas relativas às atividades desenvolvidas em uma área. Esses fatores de emissão são taxas relativas que indicam a perda ou o ganho de carbono no solo por vinte anos de desenvolvimento de determinada atividade antrópica (tempo padrão considerado pelo IPCC para estabilização dos estoques de carbono depois da mudança do uso do solo, sendo linear a forma como acontece essa alteração).

Foram encontradas duas principais dificuldades para replicação dessa metodologia. Primeiramente, em revisão bibliográfica para a busca desses parâmetros para a realidade nacional, nos deparamos com uma grande escassez de trabalhos que tivessem calculado fatores de emissão como recomenda o IPCC, 2006, e como, por exemplo, feito por Ogle *et al.*, (2003), (2004) e VandenBygaart *et al.* (2004) para os Estados Unidos e Canadá, respectivamente. Apenas Maia *et al.*, (2013) desenvolveu esse tipo de pesquisa para o Brasil, mas apenas para região do Cerrado e Amazônia. Além disso, o uso do estoque de carbono referência para aplicação dessa metodologia não é ideal para o nosso período de cálculo que começa em 2011, quando esses estoques já se encontram bastante alterados pelo uso do solo promovido desde o início das atividades antrópicas no país (BERNOUX *et al.*, 2001; MAIA *et al.*, 2010), e o cálculo de uma base espacial de estoque de carbono atualizada seria extremamente trabalhoso.

A maioria dos trabalhos realizados no Brasil que reportam a mudança do estoque de carbono no solo por mudança de uso do solo ou manejo fornece taxas brutas de alteração de carbono no solo (BAYER *et al.*, 2006; BATLLE-BAYER *et al.*, 2010; ZINN *et al.*, 2005; BERNOUX *et al.*, 2006; CARVALHO *et al.*, 2010a,b; AMADO *et al.*, 2001; FIALHO E ZINN, 2012; LIMA *et al.*, 2008). Assim, para os cálculos neste trabalho foram utilizadas as taxas brutas de mudança no estoque de carbono, seguindo então a metodologia 1 descrita na seção 2.1.1. Tais taxas, em toneladas de carbono por hectare por ano (em Mg de C/ha/ano), já significam diretamente as emissões ou o sequestro de determinado local em consequência das mudanças de uso do solo ou manejo. Podem-se encontrar orientações a respeito deste tipo de abordagem no capítulo 4 do guia de boas práticas do IPCC, 2003 (específico para metodologia referente ao Protocolo de Kyoto) e exemplos de sua utilização na ferramenta de avaliação ex-ante do impacto de projetos nas emissões e no sequestro de carbono pelos solos desenvolvida pela FAO, EX-ACT (BERNOUX *et al.*, 2006) e nos cálculos do trabalho de Carvalho *et al.*, (2010a).

Dessa forma, essas taxas foram selecionadas da literatura, em sua maioria em trabalhos de meta- análises que atribuem valores de alteração do estoque de carbono no solo em decorrência da mudança de seu uso ou manejo por meio de uma média dos resultados de diversas pesquisas (Tabela 6). A seleção levou em conta as principais conversões de uso do solo ocorridas no cenário analisado, e as taxas foram divididas por regiões (Figura A3) que foram traçadas de acordo com os biomas e o histórico de uso do solo, como feito por Zinn *et al.*, (2005), já que ambos os fatores podem influenciar nas alterações de carbono no solo.

Alguns aspectos foram levados em consideração para a seleção e atribuição das taxas:

- Não existem muitos trabalhos relatando as alterações nos estoques de carbono para o nordeste, Pantanal e Mata Atlântica, por isso, para algumas conversões, para as duas primeiras regiões, foram repetidas as taxas selecionadas para o Cerrado, e para a Mata Atlântica taxas selecionadas para a Amazônia;
- Também não existem muitos trabalhos relatando as alterações nos estoques de carbono em conversões que envolvem os cultivos permanentes. Por isso, para essa categoria, foram utilizados os mesmos valores encontrados para as conversões envolvendo as florestas plantadas;
- Para a conversão “Pastos para florestas plantadas ou cultivos permanentes”, foi usada a taxa encontrada para o bioma Mata Atlântica para todos os biomas por falta de outras informações;
- Quando os valores de determinada conversão estavam divididos por diferentes tipos de solo, foi feita uma média para se chegar em um valor geral, já que esta variável não foi utilizada nas análises;
- A maioria dos trabalhos não relatam valores de alteração do estoque de carbono no solo entre categorias antropizadas. Assim, para algumas conversões esses valores foram estimados a partir da diferença das alterações de carbono das categorias envolvidas com a vegetação natural, como feito por Maia *et al.* 2010, ou foi usado o valor da transição inversa, apenas trocando-se o sinal da conversão;
- Todos os valores de transição da tabela 6 dizem respeito às alterações no estoque de carbono ocorridas nos primeiros 30cm do solo. Quando os artigos não forneceram valores de alteração nessa profundidade, esses foram estimados por meio de proporção simples;
- Taxas negativas significam perda de carbono no solo e taxas positivas, ganho de carbono no solo.

A categoria de plantios anuais foi dividida de acordo com seu manejo, plantio convencional ou plantio direto, já que o tipo de prática agrícola pode fazer do solo um emissor ou um sequestrador de carbono (SIX *et al.*, 2002). O plantio direto já é adotado em mais de 25

milhões de hectares no Brasil (FEBRAPDP, 2012) e a sua expansão é uma das estratégias para redução de GEEs adotadas pelo PLANO ABC, que pretende aumentar essas áreas em mais 8 milhões de hectares até 2020(MAPA, 2012). O tipo de plantio foi, então, especializado segundo os dados de área da FEBRAPDP e do Censo Agropecuário de 2006, levando em conta esse aumento de abrangência planejado pelo governo. Para a alocação espacial foram utilizadas informações sobre a ocorrência de plantio direto por categorias de cultivo. O processo encontra-se descrito em maiores detalhes no anexo metodológico e o resultado das espacializações foram usados como mapas de entrada do modelo.

As adições orgânicas são características que influenciam nas emissões de GEEs, porém são muito variáveis quando se tem como área de estudo todo o país. Assim, não foi possível considerar essa variável separadamente nas taxas de mudança de estoque, como foi feito para o tipo de plantio. Dessa forma, adotou-se como pressuposto que o resultado das pesquisas utilizadas refletem os tipos de manejo mais frequentes no país e que assim as alterações nos estoques de carbono referentes à essa variável já estariam embutidas nessas taxas.

Dessa maneira, a partir das informações de mudança de uso do solo (da categoria de uso do solo do ano avaliado e da categoria de uso do solo do ano anterior) dos mapas do modelo OTIMIZAGRO (A- Figura 4) e da região/bioma em que elas acontecem (B- Figura 4), o modelo seleciona as taxas de mudança de estoque de carbono no solo (ECS) (E- Figura 4) e assim calcula as emissões e o sequestro de carbono. A informação sobre a categoria de uso do solo do ano anterior é guardada (e atualizada se houver outras mudanças) para que a mudança continue a ter impacto nos anos subsequentes avaliados pelo modelo, já que foi adotado o pressuposto do IPCC de que as alterações nos estoques se estabilizam somente 20 anos após a mudança e que elas acontecem de forma linear ao longo do tempo (C- Figura 4).

Além disso, ainda por causa do pressuposto dos 20 anos de propagação das mudanças, o modelo realiza a contagem de idade do uso do solo, de acordo com a permanência de uso do solo das categorias, para que possa ser aplicado também em estudos com períodos de duração mais longos (D- Figura 4).

Tabela 7 - Taxa de alteração do estoque de carbono no solo de acordo com cada tipo de transição e regiões selecionadas para entrada no modelo

<b>Mudanças no Estoque de carbono no solo (Mg de C/ha/ano)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>Cerrado</b>	<b>Amazônia</b>	<b>Sul</b>	<b>Mata Atlântica</b>	<b>Nordeste</b>
<b>Plantio Convencional para Plantio Direto</b>					
MAIA <i>et al.</i> , 2013 BAYER <i>et al.</i> , 2006	0.48	0.72	0.48	0.48	0.48
<b>Pastos para Plantio Direto</b>					
MAIA <i>et al.</i> , 2013 ZINN, <i>et al.</i> 2005	0,19	-0,41	-0.11	-0,23	
<b>Pastos para Plantio Convencional</b>					
MAIA <i>et al.</i> , 2013 ZINN <i>et al.</i> , 2005	-0.29	-0,8	-0.39	-0.49	
<b>Pastos para Florestas Plantadas/ Plantio Permanente</b>					
LIMA <i>et al.</i> , 2008	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
<b>Pastos degradados para pastos bem manejados</b>					
LAL <i>et al.</i> , 2006	1.12	0.27	1.12	0.27	1.12
<b>Plantio Direto para Pastos</b>					
MAIA <i>et al.</i> , 2013 LAL <i>et al.</i> , 2006	-0,19	0.41	0.11	0.23	
<b>Plantio Convencional para Pastos</b>					
MAIA <i>et al.</i> , 2013 LAL <i>et al.</i> , 2006	0.29	0.8	0.39	0.49	
<b>Floresta Plantada/Plantio Permanente para pastos</b>					
LIMA <i>et al.</i> , 2008	-0.45	-0.45	-0.45	-0.45	-0.45
<b>Plantio Convencional para Floresta Plantada/Plantio Permanente</b>					
LIMA <i>et al.</i> , 2008 MAIA <i>et al.</i> , 2013 ZINN <i>et al.</i> , 2005	-0.32	0.02	-0.32	-0.32	
<b>Plantio Direto para Floresta Plantada/Plantio Permanente</b>					
LIMA <i>et al.</i> , 2008 MAIA <i>et al.</i> , 2013 ZINN <i>et al.</i> , 2005	-0.58	-0.7	-0.41	-0.7	-0.58



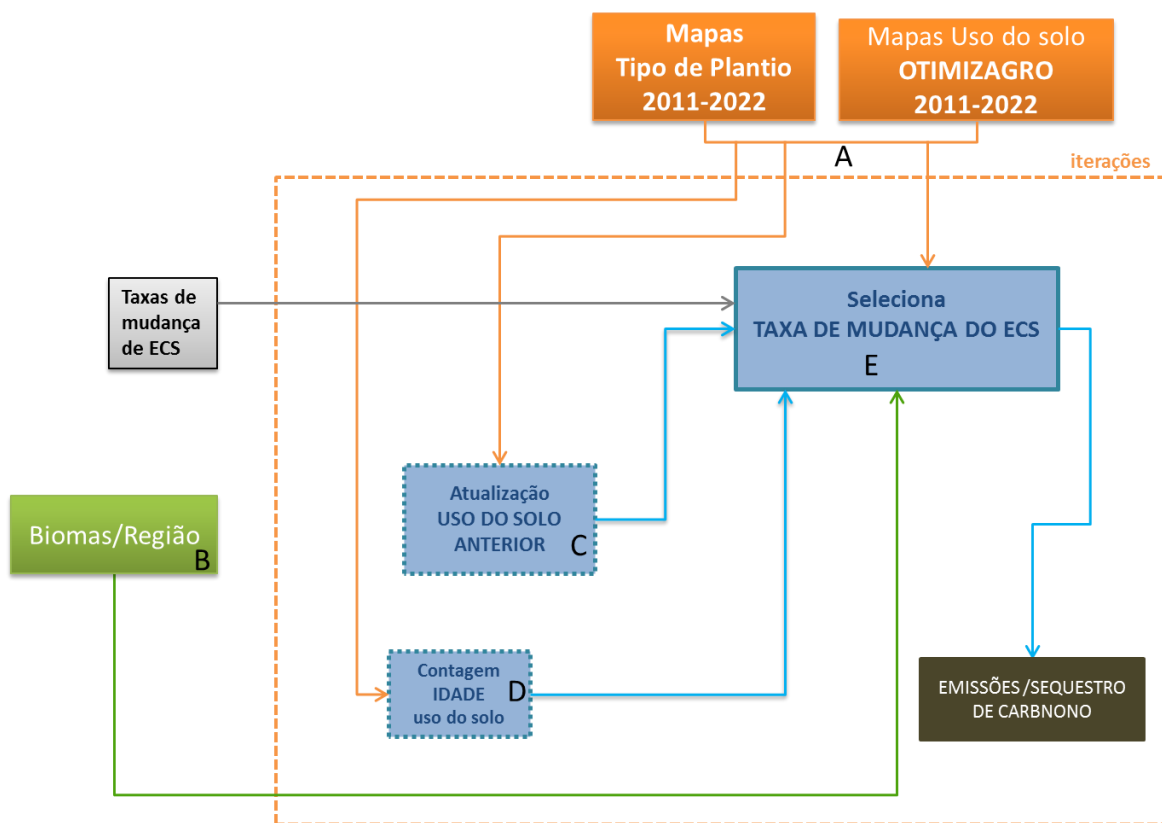


Figura 3 - Esquema geral de funcionamento do modelo que calcula as emissões e sequestro de carbono nos solos em áreas de uso do solo agrícola de 2011 a 2022

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Biomassa

##### 3.1.1 Estoques de carbono nos cultivos permanentes e anuais

A tabela 7 mostra a área e os estoques de carbono dos cultivos permanentes por estados e no Brasil no início e no final do período analisado, em milhões de toneladas de carbono (Mt de C).

Tabela 8 - Área e estoques de carbono nos cultivos permanentes por estado e no Brasil nos anos de 2011 e 2022

Estado	Área de cultivos permanentes (milhares de ha)		Estoque carbono na Biomassa dos Cultivos Permanentes (Mt de C)	
	2011	2022	2011	2022
Acre	9	9	0.4	0.4
Alagoas	6	8	0.2	0.3
Amazonas	33	36	1.2	1.2
Amapá	33	33	1.8	1.8
<b>Bahia</b>	<b>1206</b>	<b>1315</b>	<b>35.3</b>	<b>42.0</b>
Ceará	22	21	0.9	1.0
Distrito Federal	5	11	0.2	0.6
Espirito Santo	672	630	19.6	22.5
Goiás	95	178	5.0	9.2
Maranhão	51	54	2.9	2.8
<b>Minas Gerais</b>	<b>3915</b>	<b>4906</b>	<b>179.8</b>	<b>239.2</b>
<b>Mato Grosso do Sul</b>	<b>144</b>	<b>494</b>	<b>8.1</b>	<b>26.9</b>
Mato Grosso	85	128	4.0	6.6
Pará	169	171	5.3	5.1
Paraíba	5	8	0.3	0.4
Pernambuco	27	32	1.2	1.6
Piauí	27	28	1.5	1.5
<b>Paraná</b>	<b>766</b>	<b>1402</b>	<b>39.7</b>	<b>73.9</b>
Rio de Janeiro	36	97	1.3	4.6
Rio Grande do Norte	5	6	0.3	0.3
Rondônia	196	151	3.2	2.9
Roraima	3	3	0.1	0.2
<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>878</b>	<b>1647</b>	<b>49.0</b>	<b>89.3</b>
<b>Santa Catarina</b>	<b>665</b>	<b>1037</b>	<b>37.8</b>	<b>56.4</b>
Sergipe	58	59	1.7	1.7
<b>São Paulo</b>	<b>1164</b>	<b>1664</b>	<b>41.1</b>	<b>66.4</b>
Tocantins	41	41	2.3	2.3
<b>Brasil</b>	<b>10313.1</b>	<b>14166.5</b>	<b>444.4</b>	<b>661.0</b>

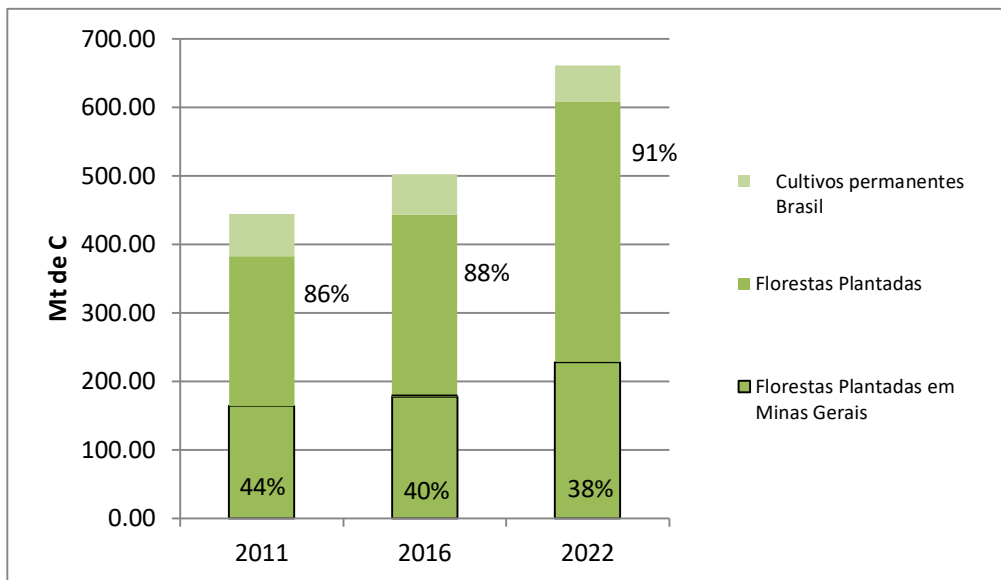


Figura 4 - Participação das florestas plantadas nos estoques de carbono dos cultivos permanentes do Brasil e do estado de Minas Gerais nos estoques de florestas plantadas nos anos de 2011, 2016 e 2022.

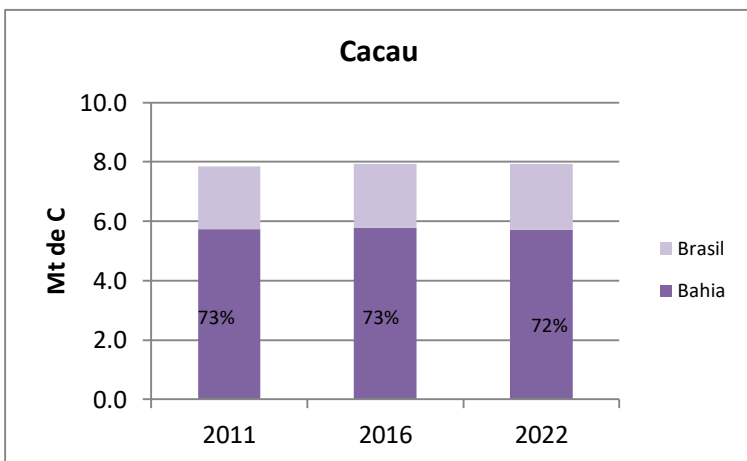
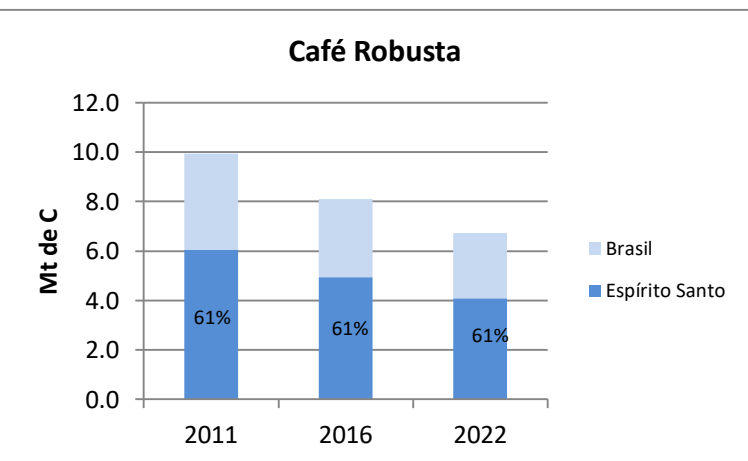
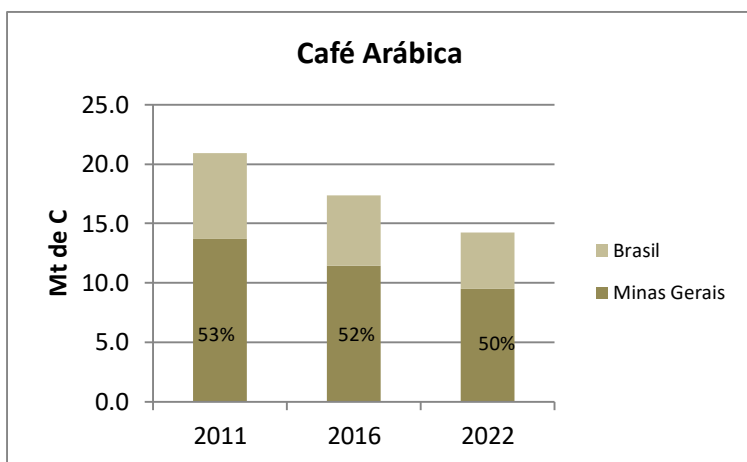
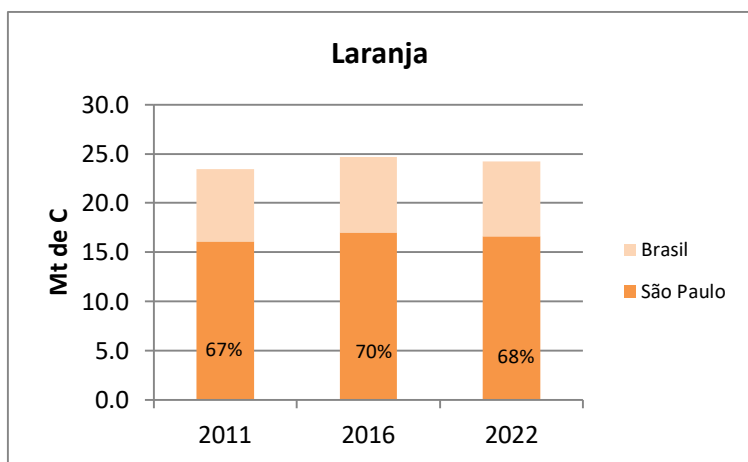


Figura 5 – Estoques de carbono dos cultivos de laranja, café arábica, café robusta e cacau no Brasil no anos de 2011, 2016 e 2022, com destaque para os estados com maior participação nesses estoques.

Pode-se perceber o aumento dos estoques ocorrido entre o ano de 2011 e 2022: de 444 a 661 Mt de carbono, no Brasil como um todo, em decorrência do aumento de área de 3,8 milhões de hectares. Em relação a este montante, destacam-se os estados de Minas Gerais, com 40% dos estoques em 2011, e os estados do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo, Santa Catarina, Bahia e Mato Grosso do Sul, cujos estoques de carbono somados em 2011 representam 46% do total. A maior parte desses estoques, mais de 85%, pertencem às florestas plantadas (Figura 5), e dentre os estoques de floresta plantada, destaca-se o estado de Minas Gerais, com mais de 40% de participação no total dessa categoria de uso do solo no país. Essa categoria teve um grande aumento de área plantada no período analisado, 4,3 milhões de hectares, refletido no aumento dos estoques de carbono.

Em relação aos outros cultivos permanentes, os maiores estoques de carbono são referentes ao cultivo de laranja, que é seguido pelo cultivo de café arábica, café robusta e cacau; São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia são os estados que contêm os maiores estoques de cada um desses cultivos, respectivamente (Figura 6). Analisando-se na figura 6 a evolução dos estoques durante o período deste estudo, percebe-se uma diminuição dos estoques de café (redução de 600 mil hectares de área), e uma manutenção dos estoques de laranja e cacau.

A tabela 8 apresenta a área e os estoques de carbono dos cultivos anuais em 2011 e 2022. Do início do período estudado até o final houve um aumento de 8,8 milhões de hectares de área plantada, que refletiram em um aumento de 127 milhões de toneladas de carbono. De todo esse estoque, destacam-se os cultivos de cana de açúcar, soja e milho, que representam em média 53%, 23% e 11% dos estoques de carbono, sendo os estados de São Paulo, Mato Grosso e Rio Grande do Sul os com os maiores estoques desses cultivos, respectivamente (Figura 7). A cana de açúcar responde por mais da metade dos estoques por ter uma grande densidade de biomassa e considerável área plantada, 10 milhões de hectares em 2011 e 13 milhões em 2022 (Figura 7). Já a soja tem baixa densidade de biomassa, mas é o cultivo de maior área plantada no país com 25 milhões de hectares em 2011 e 30 milhões de hectares em 2022 (Figura 7).

Tabela 9 – Área e estoques de carbono nos cultivos anuais por estado e no Brasil nos anos de 2011 e 2022

Estados	Área de cultivos anuais (milhares de ha)		Estoque carbono na Biomassa dos Cultivos Anuais (Mt de C)	
	2011	2022	2011	2022
Acre	115	134	0.9	1
Alagoas	506	451	14.2	13.4
Amazonas	131	133	0.9	1
Amapá	21	20	0.1	0.1
Bahia	2728	2605	20.6	23.6
Ceará	1333	639	10.7	7
Distrito Federal	96	86	0.6	0.6
Espirito Santo	155	165	3	3.2
Goiás	4008	4900	43	55
Maranhão	1694	1640	12.5	11.5
<b>Minas Gerais</b>	<b>3515</b>	<b>4531</b>	<b>46.3</b>	<b>58.7</b>
<b>Mato Grosso do Sul</b>	<b>2523</b>	<b>3070</b>	<b>29.7</b>	<b>54.8</b>
<b>Mato Grosso</b>	<b>7835</b>	<b>8911</b>	<b>51.4</b>	<b>59.4</b>
Para	851	1654	6	10.6
Paraíba	321	275	5.6	5.7
Pernambuco	888	732	15	16
Piauí	1174	1136	8.1	7.6
<b>Paraná</b>	<b>7633</b>	<b>7431</b>	<b>61.2</b>	<b>65.1</b>
Rio de Janeiro	154	153	3.6	3.7
Rio Grande do Norte	228	164	3.1	3.2
Rondônia	594	936	4.1	6.2
Roraima	43	38	0.3	0.3
<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>8007</b>	<b>10588</b>	<b>50</b>	<b>67.1</b>
Santa Catarina	1572	2071	11.2	14.6
Sergipe	98	149	2	3.6
<b>São Paulo</b>	<b>6664</b>	<b>8107</b>	<b>179</b>	<b>218.2</b>
Tocantins	767	1754	5.3	10.8
<b>Brasil</b>	<b>53651</b>	<b>62477</b>	<b>583.4</b>	<b>711.3</b>

### 3.1.2 Balanço de carbono na Biomassa

Para se calcular o balanço de carbono entre os anos, considerou-se a biomassa das áreas agrícolas como um todo, incluindo os cultivos permanentes, anuais e as pastagens. Os resultados deste estudo indicam um aumento de biomassa: de 2118 milhões de toneladas de carbono no primeiro ano do período para 2433 no último ano (Tabela 9), sendo os estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul, Bahia, Mato Grosso e Paraná como os estados de maior biomassa. A distribuição espacial da quantidade de biomassa por hectare em áreas de uso do solo agrícola no Brasil nos anos de 2011 e 2022 pode ser verificado por meio das figuras A4 e A5 dos anexos. Analisando-se as figuras, é possível perceber a localização das áreas de maior biomassa por hectare (em vermelho), pertencentes às florestas plantadas,



Figura 6 - Biomassa dos cultivos anuais no Brasil e a participação dos cultivos mais representativos: cana, soja e milho em 2011, 2016 e 2022. B, C e D –Biomassa dos cultivos de cana, soja e milho no Brasil e a participação dos estados mais representativos em 2011,2016 e 2022

principalmente nos estados destacados na seção acima. Além disso, pode-se ver as áreas em amarelo, que são ocupadas por outros cultivos permanentes e pelo cultivo anual de maior biomassa por aérea, a cana, principalmente no estado de São Paulo. O restante das áreas correspondem aos cultivos anuais de menor biomassa e à biomassa de pastagens.

Calculando-se a diferença de biomassa entre os anos do período, tem-se o balanço de carbono total, representado também na tabela 9. A quarta coluna da tabela corresponde ao balanço do período 2011-2022 como um todo, e a última coluna representa uma média do balanço por ano. Os valores positivos indicam aumento de carbono na biomassa (sequestro de carbono da atmosfera) e os valores negativos, por sua vez, indicam diminuição de carbono na biomassa (emissão de carbono para a atmosfera), em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e.

Dessa forma, vê-se que, no Brasil como um todo, houve um balanço positivo na biomassa dos cultivos agrícolas, totalizando o acúmulo de 1134 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e no período 2011-2022 e uma média de acúmulo anual de 94,5 Mt de CO<sub>2</sub>e. Analisando o balanço por estados vê-se que a maioria deles também apresentou um aumento de biomassa, e apenas os estados de Alagoas, Amapá e Piauí tiveram perdas de carbono, mas com valores

baixos. Os estados com maiores valores de balanço de carbono foram destacados na tabela 9 e representados na figura 8, juntamente com todos os outros que tiveram balanço maior que 10 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e.

Tabela 10- Biomassa em áreas de uso do solo agrícola e balanço de carbono por estados e no Brasil

Biomassa em áreas de uso do solo agrícola ( Mt de carbono)			Balanço de carbono ( Mt de CO <sub>2</sub> e) <sup>4</sup>	
Estado	2011	2022	Período 2011-2022	Média Anual
Acre	8.4	8.7	1.0	0.09
Alagoas	22.5	22.4	0.0	-0.002
Amazonas	16.2	16.5	1.1	0.09
Amapá	3.3	3.3	-0.2	-0.01
Bahia	178.6	193.4	53.3	4.44
Ceará	33.0	33.6	2.2	0.18
Distrito Federal	1.9	2.3	1.4	0.12
Espirito Santo	34.7	39.0	15.2	1.27
Goiás	119.9	136.8	60.7	5.06
Maranhão	57.7	58.9	4.6	0.39
<b>Minas Gerais</b>	<b>400.8</b>	<b>464.8</b>	<b>230.6</b>	<b>19.22</b>
<b>Mato Grosso do Sul</b>	<b>111.2</b>	<b>157.3</b>	<b>166.1</b>	<b>13.84</b>
Mato Grosso	149.8	164.0	51.1	4.26
Para	90.8	93.8	10.7	0.89
Paraíba	17.8	18.4	2.3	0.20
Pernambuco	39.1	41.8	9.7	0.81
Piauí	35.7	35.5	-0.7	-0.06
<b>Paraná</b>	<b>145.4</b>	<b>182.0</b>	<b>131.8</b>	<b>10.98</b>
Rio de Janeiro	19.6	22.9	11.8	0.99
Rio Grande do Norte	14.6	15.3	2.3	0.19
Rondônia	31.4	32.6	4.4	0.37
Roraima	4.1	4.2	0.5	0.04
<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>159.6</b>	<b>194.4</b>	<b>125.5</b>	<b>10.46</b>
Santa Catarina	76.4	91.0	52.5	4.37
Sergipe	10.8	12.3	5.3	0.44
<b>São Paulo</b>	<b>286.5</b>	<b>338.9</b>	<b>188.8</b>	<b>15.74</b>
Tocantins	49.2	49.7	1.7	0.14
<b>Brasil</b>	<b>2118.9</b>	<b>2433.9</b>	<b>1134.1</b>	<b>94.51</b>

<sup>4</sup> 1 kg de carbono é igual a 3,666 Kg CO<sub>2</sub>e.

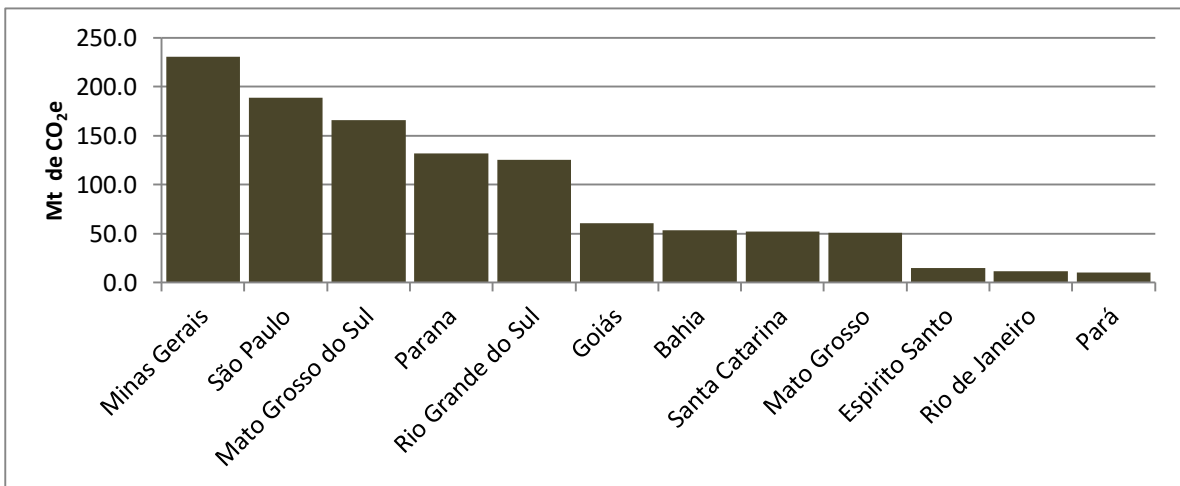


Figura 7 - Estados com maiores valores de balanço de carbono da biomassa dos cultivos agrícolas no período de 2011 a 2022

Observando-se a distribuição espacial do balanço de carbono da biomassa dos cultivos agrícolas (Figura 9) pode-se ver que a maior parte das áreas teve balanço de carbono positivo, comprovando o balanço positivo geral demonstrado pela tabela 9, e a localização das áreas com balanço de carbono negativo. Grande parte das áreas que perderam carbono coincidem com áreas que permaneceram como cultivo permanente por todo o período analisado e que tinham uma idade maior no ano inicial do período comparada à idade do ano final.

A tabela 10 representa a participação de dois tipos de conversões mais representativas no balanço de carbono ao longo do período analisado nos estados com maior balanço no país. Por meio da tabela, é possível notar o importante papel das áreas de pastagem convertidas em floresta plantada para o acúmulo de carbono em todos os estados e no Brasil: as áreas de pastagem que se converteram para o cultivo de florestas acumularam 716,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e de 2011 a 2022. Além disso, a conversão de pastagens em cultivos anuais também deu importante contribuição para o balanço de carbono positivo: 285 Mt de CO<sub>2</sub>e no país durante todo o período estudado. Analisando-se onde aconteceu esse tipo de conversão, vê-se a fonte do grande balanço positivo dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul: a transição de pastagens em cultivos anuais de maior biomassa, cana de açúcar,- 103,2 e 77,2 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e, respectivamente.



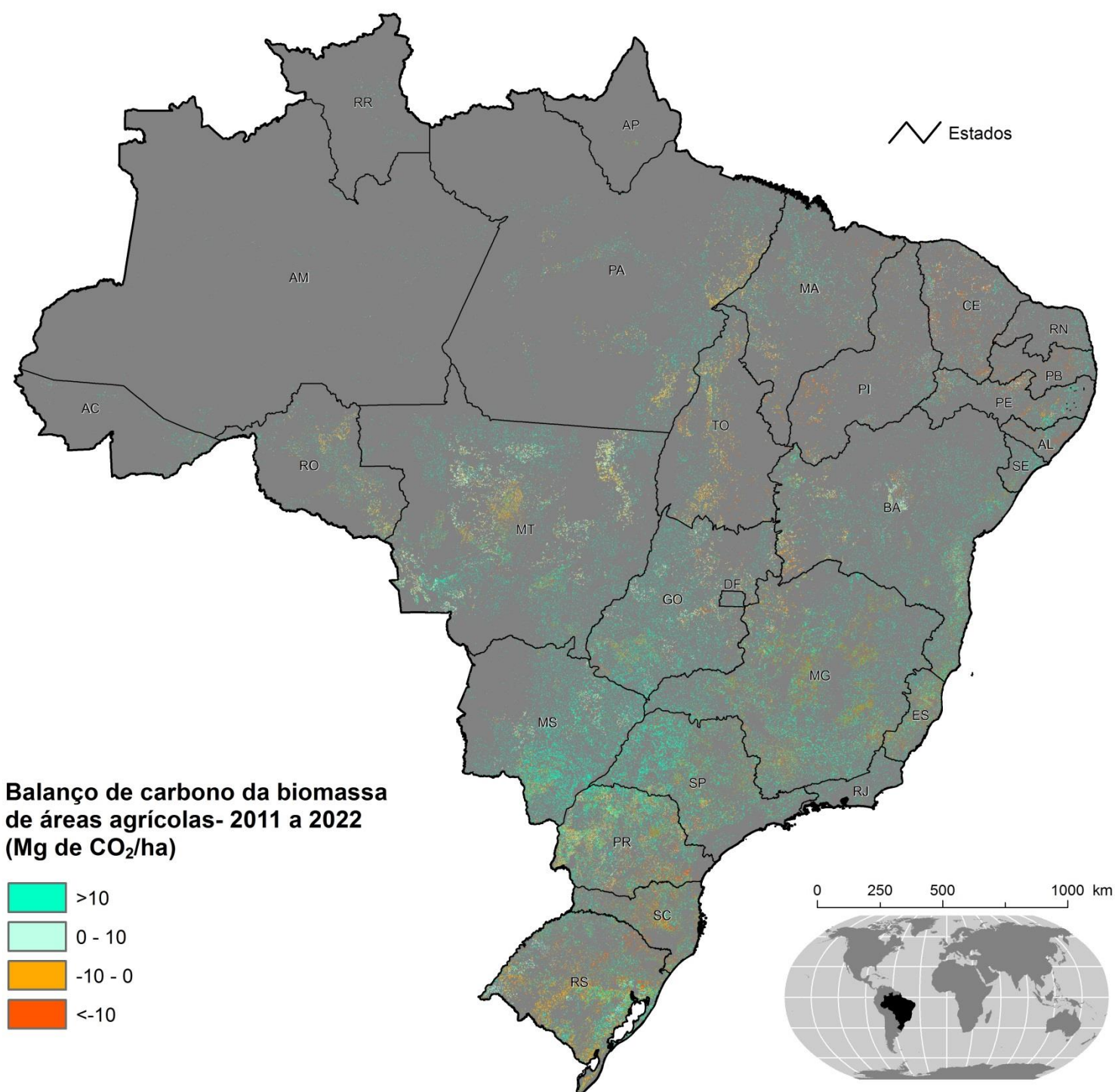


Figura 8- Distribuição espacial do balanço de carbono da biomassa dos cultivos agrícolas no Brasil no período 2022-2011, em toneladas de CO<sub>2</sub>e por hectare (Mg de CO<sub>2</sub>e /ha)

Tabela 11- Participação da manutenção do uso do solo e de dois tipos de conversões entre categorias agrícolas no balanço de carbono ao longo do período analisado nos estados com balanço mais representativo no Brasil

Estado	Balanço Total (Mt de CO <sub>2e</sub> )	Participação de conversões no balanço (Mt de CO <sub>2e</sub> )		
		Pastagem - Floresta Plantada	Pastagem - Cultivos anuais	Outras Conversões
Minas Gerais	230.6	209	21.4	0.2
São Paulo	188.8	79.1	103.2	6.5
Mato Grosso do Sul	166.1	61	77.2	27.9
Paraná	131.8	100.4	13.5	17.9
Rio Grande do Sul	125.5	125.7	-2.1	1.9
<b>Brasil</b>	<b>1134.1</b>	<b>716.5</b>	<b>285</b>	<b>132.6</b>

### 3.2 Solos

A tabela 11 apresenta valores de área convertida e os fluxos de carbono nos solos, em milhões de toneladas de CO<sub>2e</sub>, em todo o período estudado e uma média por ano, para o Brasil e para cada estado - sendo valores negativos correspondentes à perda de carbono no solo e sua respectiva emissão para a atmosfera e valores positivos correspondentes ao ganho de carbono no solo e seu respectivo sequestro da atmosfera. As conversões de uso do solo entre 2011 e 2022 no cenário analisado aconteceram em 48 milhões de hectares e resultaram no sequestro de 290 milhões de toneladas de CO<sub>2e</sub> no país para todo o período e em uma média de 24,1 Mt de CO<sub>2e</sub> por ano.

Na maioria dos estados vê-se sequestro de carbono pelos solos sendo apenas os estados de Rondônia, São Paulo e Rio Grande do Sul emissores de carbono, com destaque para o último com as maiores perdas de carbono nos solos (Tabela 11). Dentre os estados que acumularam carbono tem-se Paraná, Mato Grosso do Sul, Bahia, Mato Grosso e Minas Gerais como os que mais contribuíram para o sequestro de carbono de 2011 a 2022 (Figura 11).

Como forma de representação espacialmente explícita dos dados contidos na tabela 11, a partir da figura 10 é possível analisar a distribuição espacial do fluxo de carbono gerado pelas conversões de uso do solo no período estudado. Pode-se ver nela a maior parte das áreas no país com sequestro de carbono no solo e a localização das áreas que liberaram carbono para a atmosfera.

O fluxo de carbono negativo deve-se principalmente às áreas que foram convertidas de pastagens para cultivos anuais, conversões de taxa negativa (Tabela 6), e foram fonte das maiores perdas de carbono no solo no Brasil, somando 132,8 toneladas de CO<sub>2e</sub> de 2011 a 2022, que aconteceram em maior parte nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul (Tabela 12).

Tabela 12- Fluxos de carbono nos solos de áreas agrícolas nos estados e no Brasil no período de 2011 a 2022 e por ano (Mt de CO<sub>2</sub>e)

<b>Estados</b>	<b>Área convertida<sup>5</sup> (Milhares de ha)</b>	<b>Emissões totais (Mt de CO<sub>2</sub>e)</b>	<b>Emissões anuais (Mt de CO<sub>2</sub>e)</b>
Acre	135	0.4	0.03
Alagoas	195	2.5	0.21
Amazonas	133	0.7	0.06
Amapá	9	0.05	0.004
<b>Bahia</b>	<b>3291</b>	<b>43.8</b>	<b>3.65</b>
Ceará	1000	11.5	0.96
Distrito Federal	39	0.5	0.04
Espirito Santo	522	1.2	0.10
<b>Goiás</b>	<b>4046</b>	<b>42.6</b>	<b>3.55</b>
Maranhão	1592	8.1	0.68
<b>Minas Gerais</b>	<b>4909</b>	<b>32.7</b>	<b>2.73</b>
<b>Mato Grosso do Sul</b>	<b>4285</b>	<b>45.6</b>	<b>3.80</b>
<b>Mato Grosso</b>	<b>7020</b>	<b>38.5</b>	<b>3.21</b>
Pará	2029	0.1	0.01
Paraíba	268	2.5	0.21
Pernambuco	696	7.1	0.59
Piauí	856	6.8	0.56
<b>Paraná</b>	<b>5638</b>	<b>53.5</b>	<b>4.46</b>
Rio de Janeiro	213	1.4	0.12
Rio Grande do Norte	179	2.4	0.20
Rondônia	825	-0.9	-0.08
Roraima	62	0.3	0.02
<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>4739</b>	<b>-12.0</b>	<b>-1.00</b>
Santa Catarina	1138	0.4	0.03
Sergipe	124	1.0	0.09
São Paulo	3075	-1.3	-0.11
Tocantins	1586	0.5	0.04
<b>Brasil</b>	<b>48602</b>	<b>290.1</b>	<b>24.17</b>

Tais conversões correspondem à expansão do cultivo de cana de açúcar no estado de São Paulo e ao aumento de áreas de cultivo de soja e trigo no Rio Grande do Sul, ambas em

<sup>5</sup> Inclui conversões de uso do solo e as conversões de manejo (adoção de plantio direto e recuperação de pastagens degradadas)

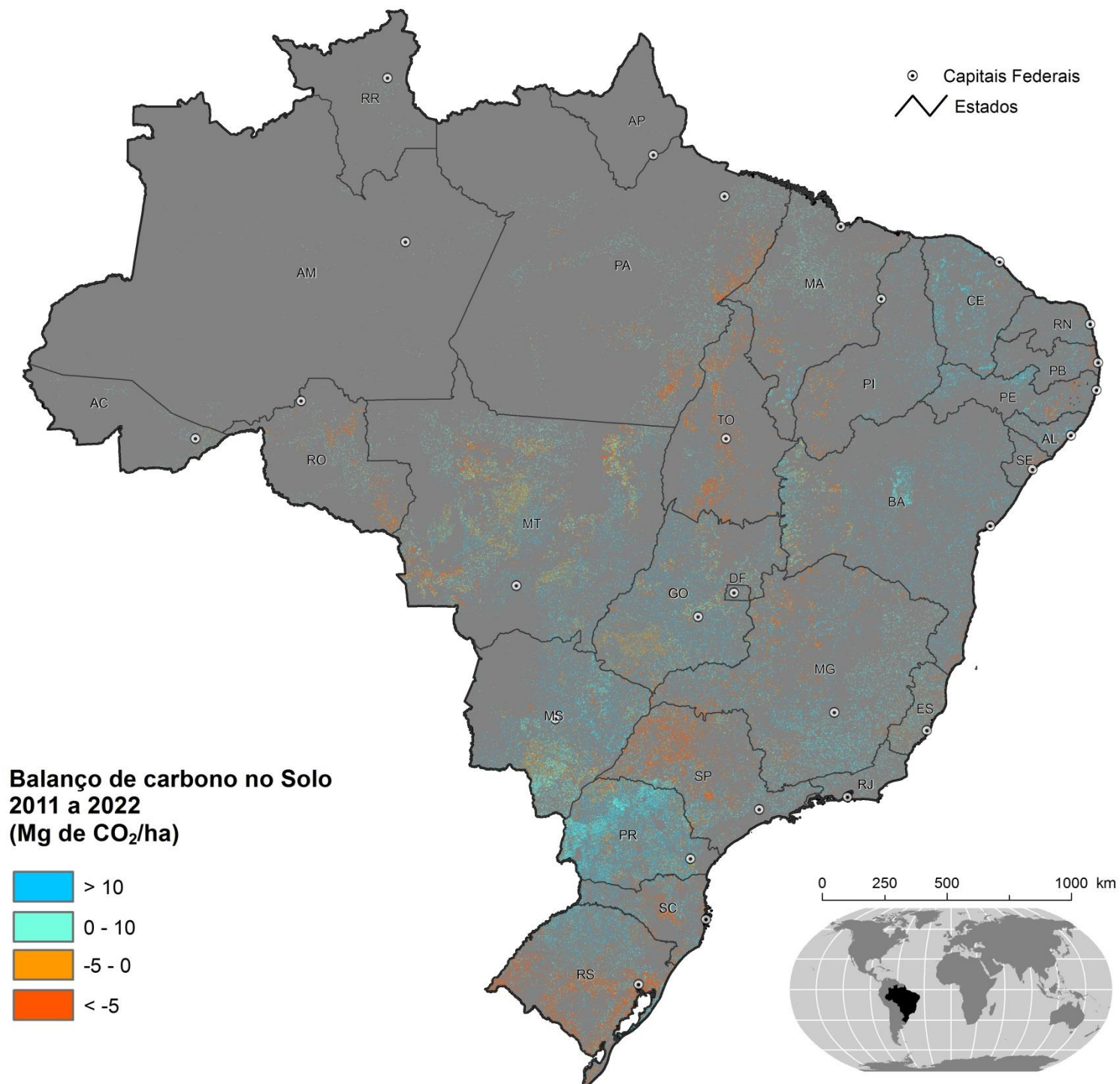


Figura 9 - Distribuição espacial do fluxo de carbono no solo em áreas de cultivos agrícolas no Brasil no período 2022-2011, em toneladas de CO<sub>2</sub>e por hectare (Mg de CO<sub>2</sub>e /ha)

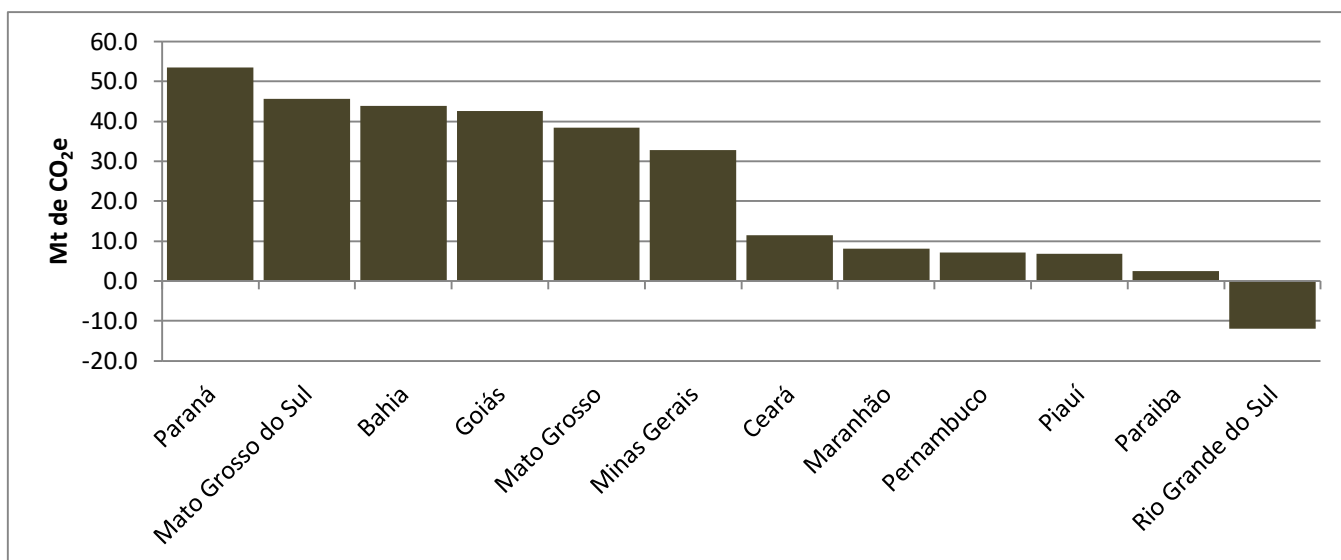


Figura 10 - Fluxos de carbono nos solos em áreas agrícolas em alguns estados do Brasil no período de 2011 a 2022 (Mt de CO<sub>2</sub>e)

áreas que anteriormente eram pastagem. Essas mudanças de uso do solo já haviam sido reportadas nas seções acima, já que resultaram em aumento de biomassa, no caso da expansão da cana em São Paulo. O mesmo não aconteceu no Rio Grande do Sul, já que as pastagens e as plantações de soja e trigo têm valores de biomassa parecidos e não geraram grandes perdas ou ganhos de carbono.

A conversão que resultou nos maiores sequestros de carbono pelos solos foi a transição de pastagens degradadas para pastagens em boas condições - recuperação de pastagens degradadas - somando 234 Mt de CO<sub>2</sub>e. Isso se justifica por esta conversão ter altas taxas de sequestro de carbono (Tabela 6) e por ter acontecido em 15 milhões de hectares no Brasil inteiro, sendo distribuída aleatoriamente nas áreas de pastagens degradadas pelo modelo espacial. Dessa forma, as áreas que continham maior quantidade de pastagens degradadas foram as que mais tiveram a conversão para pastagens recuperadas, no caso os estados do centro oeste, Minas Gerais e Bahia (FiguraA6 e A7).

Também contribuíram muito para o sequestro de carbono a adoção de plantio direto, com 100 Mt de CO<sub>2</sub>e, e a conversão de pastagens em floretas plantadas, com 48 Mt de CO<sub>2</sub>e. A primeira conversão citada aconteceu principalmente nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul, já que a espacialização de áreas com plantio direto seguiu a proporção da adoção desse tipo de manejo já existente entre os estados e também porque ocorreu preferencialmente em áreas de soja, milho, trigo e feijão, cultivos muito presentes nesses estados, exceto pelo feijão. Já o sequestro a partir da conversão de pastagens em florestas plantadas ocorreu nos estados já destacados na seção 3.1, onde aconteceram as maiores expansões dessa categoria.

Tabela 13- Participação de conversões entre categorias agrícolas no balanço de carbono ao longo do período analisado nos estados com balanço mais representativo no Brasil

Estados	Balanço Total (Mt de CO <sub>2</sub> e)	Participação de conversões no Balanço (Mt de CO <sub>2</sub> e)				
		Recuperação de pastagem degradada	Adoção de plantio direto	Pastagem - Plantio convencional	Pastagem-Floresta Plantada	Outras
Paraná	53.5	8.7	29.8	-7.5	6.8	15.8
Mato Grosso do Sul	45.6	37.3	8	-4.2	3.9	0.5
Bahia	43.8	37.6	4.9	-3.3	1.6	3.1
Goiás	42.6	38.5	9.8	-5.7	0.9	-0.9
Mato Grosso	38.5	30.3	19	-10.8	0.6	-0.6
Minas Gerais	32.7	25.1	3.7	-8.4	14.1	-1.7
Rio Grande do Sul	-12	3.4	16	-42.5	8.4	2.7
São Paulo	-1.3	4.7	1.9	-14.7	5.4	1.5
<b>Brasil</b>	<b>290.1</b>	<b>234</b>	<b>100.6</b>	<b>-132.8</b>	<b>48.1</b>	<b>40.2</b>

### 3.3 Balanço de carbono geral

Analisando-se o balanço de carbono como um todo, sequestros e emissões no solo e na biomassa, todos os estados tiveram um balanço geral positivo ou muito próximo de zero (Tabela 13). As conversões de pastagens em cultivos anuais que geraram perda de carbono nos solos em São Paulo também foram responsáveis por um aumento de carbono na biomassa neste estado, sendo ele um dos maiores sequestradores no país. Esse mesmo tipo de transição também ocasionou emissões de carbono pelos solos agrícolas no Rio Grande do Sul, que teve um balanço de carbono geral positivo por conta da expansão de florestas plantadas em áreas de pastagens. O Brasil como um todo apresentou um sequestro de 1424 Mt de CO<sub>2</sub>e de 2011 a 2022, com uma média anual de 118 Mt de CO<sub>2</sub>e.

Tabela 14 - Balanço geral de carbono, fluxos de carbono no solo e balanço de carbono na biomassa, em áreas de cultivos agrícolas por estados e no Brasil, de 2011 a 2022, em Mt de CO<sub>2</sub>e.

<b>Estado</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Solos</b>	<b>Total</b>	<b>Anual</b>
Acre	1.0	0.4	1.5	0.1
Alagoas	0.0	2.5	2.5	0.2
Amazonas	1.1	0.7	1.8	0.1
Amapá	-0.2	0.0	-0.1	0.0
<b>Bahia</b>	<b>53.3</b>	<b>43.8</b>	<b>97.1</b>	<b>8.1</b>
Ceará	2.2	11.5	13.7	1.1
Distrito Federal	1.4	0.5	1.9	0.2
Espirito Santo	15.2	1.2	16.4	1.4
<b>Goiás</b>	<b>60.7</b>	<b>42.6</b>	<b>103.4</b>	<b>8.6</b>
Maranhão	4.6	8.1	12.8	1.1
<b>Minas Gerais</b>	<b>230.6</b>	<b>32.7</b>	<b>263.4</b>	<b>21.9</b>
<b>Mato Grosso do Sul</b>	<b>166.1</b>	<b>45.6</b>	<b>211.7</b>	<b>17.6</b>
<b>Mato Grosso</b>	<b>51.1</b>	<b>38.5</b>	<b>89.6</b>	<b>7.5</b>
Para	10.7	0.1	10.9	0.9
Paraíba	2.3	2.5	4.9	0.4
Pernambuco	9.7	7.1	16.8	1.4
Piauí	-0.7	6.8	6.0	0.5
<b>Paraná</b>	<b>131.8</b>	<b>53.5</b>	<b>185.3</b>	<b>15.4</b>
Rio de Janeiro	11.8	1.4	13.2	1.1
Rio Grande do Norte	2.3	2.4	4.7	0.4
Rondônia	4.4	-0.9	3.5	0.3
Roraima	0.5	0.3	0.8	0.1
<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>125.5</b>	<b>-12.0</b>	<b>113.5</b>	<b>9.5</b>
Santa Catarina	52.5	0.4	52.9	4.4
Sergipe	5.3	1.0	6.4	0.5
<b>São Paulo</b>	<b>188.8</b>	<b>-1.3</b>	<b>187.5</b>	<b>15.6</b>
Tocantins	1.7	0.5	2.1	0.2
<b>Brasil</b>	<b>1134.1</b>	<b>290.1</b>	<b>1424.2</b>	<b>118.7</b>

#### 4 DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho apontam um sequestro de 1424 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e pela biomassa e pelos solos em todo o período estudado e uma média de 118 toneladas de CO<sub>2</sub>e por ano em decorrência das mudanças de uso do solo e manejo ocorridas.

O sequestro anual de carbono atingido corresponde a quase 80% da meta do governo de redução de GEEs para o setor agrícola no ano de 2020 (133- 166 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e). A redução de GEEs do setor agrícola projetadas pelo governo englobam além da recuperação de pastagens degradadas e ampliação da adoção do plantio direto consideradas no presente estudo, a expansão de sistemas de integração lavoura -pecuária-floresta e a fixação biológica



de nitrogênio. Além disso, o cálculo das metas de redução do governo foram feitos levando-se em conta a emissão de todos os GEEs envolvidos nas estratégias de mitigação consideradas. Por outro lado, o sequestro de carbono encontrado na presente análise representa apenas o balanço de carbono da biomassa e dos solos, mas esses valores englobam toda mudança de uso do solo ocorrida entre categorias antrópicas no período estudado.

Assim, pode-se perceber o papel estratégico das pastagens na direção de uma agricultura de baixo carbono, já que, no cenário analisado, a expansão dos cultivos e do reflorestamento aconteceu sobre áreas de pastagens. Dessa forma, as mudanças de uso do solo citadas levariam a uma redução das áreas de pastagens e é importante destacar que essa diminuição deve ser acompanhada de uma intensificação da pecuária para que a produção de carne mantenha-se ou ainda cresça, como esperado pelo mercado. De acordo com Soares Filho et al. (2012) isso seria possível com o aumento da densidade do gado dos atuais 1,1 cabeças por hectare para 1,5 cabeças por hectare.

A maior fonte de sequestro de CO<sub>2</sub> foi a expansão das florestas plantadas, com 716 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e sequestradas pela biomassa e 48 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e sequestradas pelos solos. Esses resultados são consequência do aumento de 4,3 milhões de hectares da área de florestas plantadas nesse período como projetado por Campos (2013) para atendimento às demandas de mercado. Tal potencial de mitigação só foi possível porque esta expansão aconteceu a partir da substituição de áreas de pastagens e não de matas nativas. Esse aspecto pode ser observado no Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, que reportou o fluxo de GEEs de 1994 a 2002. Nele pode-se ver a emissão de 26 Mt de CO<sub>2</sub>e por conta da implantação de 105 mil hectares de floresta plantada em áreas de mata nativa e a remoção de 32 Mt de CO<sub>2</sub>e em resultado à substituição de 208 mil hectares de pastagens e áreas de cultivo.

A recuperação de pastagens degradadas também levou a grandes quantidades de sequestro, 234 Mt de CO<sub>2</sub>e. Esses resultados são mais baixos do que as projeções feitas por Cerri *et al.* (2006) e Bustamante *et al.* (2006), que relataram o potencial de recuperação de pastagem degradada para a Amazônia e Cerrado, respectivamente. De acordo com os autores, estes biomas poderiam sequestrar 12,6 e 129,6 Mt de CO<sub>2</sub>e por ano, respectivamente, contra a média anual de 19,5 Mt de CO<sub>2</sub>e encontrada na presente pesquisa para todo o Brasil. A diferença dos resultados justifica-se pelas diferentes áreas de abrangência de recuperação consideradas – 44 milhões de hectares considerando os dois estudos e 15 milhões de hectares na presente



pesquisa – e pelas diferentes taxas de alteração de carbono no solo adotadas para o Cerrado – 1,5 Mg de C/ha/ano por Bustamante *et al.* (2006) e 1.1 Mg de C/ha/ano nesta pesquisa.

Em relação ao sequestro de CO<sub>2</sub> encontrado pela adoção de plantio direto, os presentes resultados são um pouco mais altos do que os encontrados nas projeções de Cerri *et al.* (2010) para semelhantes áreas de atuação. O referido autor reporta um sequestro de 69 Mt de CO<sub>2</sub>e para 6 milhões de hectares e foram encontrados neste trabalho 100 Mt de CO<sub>2</sub>e com a adoção de plantio direto em 6,7 milhões de hectares. Tal diferença é justificada pelo fato de que os resultados da presentes pesquisa serem relativos a um período de tempo com dois anos a mais de duração e por ter sido usada uma taxa maior de sequestro de carbono para o sul do país.

Comparando-se as presentes análises de emissões e sequestro de carbono pelos solos com as de outros estudos (Tabela 14), pode-se ver que os solos do Brasil passam da condição de emissor, de acordo com as mudanças de uso do solo analisadas em períodos anteriores, para a de sequestrador no cenário analisado. Isso aconteceu devido à maior adoção de práticas para a conservação de carbono no solo e às conversões de uso do solo somente entre áreas agrícolas. Os resultados são comparáveis aos realizados nos Estados Unidos e Canadá

Tabela 15 - Fluxo de carbono no solo encontrado no presente estudo e em diferentes pesquisas

Fluxo de carbono no solo (Mt de CO <sub>2</sub> e / ano) <sup>6</sup>				
Pesquisas	Períodos	Regiões		
		Mato Grosso	Rondônia	Brasil
BERNOUX <i>et al.</i> , 2001	1970-1990	-18.4	-3.5	-93.2
	1975-1995	-20.5	-3.8	-46.4
MAIA <i>et al.</i> , 2010	1970-1985	-15.2	-4.1	
	1985-2002	-10.1	-3.2	
<b>Presente Estudo<sup>7</sup></b>	<b>2011-2022</b>	<b>3.2</b>	<b>-0.08</b>	<b>24.1</b>
				<b>EUA</b>
OGLE <i>et al.</i> , 2006 <sup>8</sup>	1982-1997			38.8
				<b>Canadá</b>
VANDENBYGAART <i>et al.</i> , 2004 <sup>9</sup>	1991-2001			20.5

<sup>6</sup> Valores negativos significam perda de carbono nos solos e valores positivos ganho de carbono.

<sup>7</sup> As presentes análises referem-se apenas às áreas com uso do solo agrícola, mas, levando em conta que no cenário considerado não acontecem conversões envolvendo vegetação nativa, é possível a comparação dos resultados do estudo com outros que envolvem análises de mudanças gerais de uso do solo.

<sup>8</sup> Resultados para análises em solos minerais

<sup>9</sup> Resultados para análises em solos minerais

onde as áreas agrícolas têm taxas de expansão muito menores e acontecem, em sua maioria, também sem a substituição de vegetação nativa.

O uso de parâmetros nacionais confere às análises menores graus de incerteza (Ogle *et al.*, 2006). O valor padrão de 5 Mg deC/ha para biomassa os cultivos anuais, recomendado pelo IPCC, por exemplo, é muito diferente dos valores médios encontrados nesse trabalho para milho e cana de açúcar. Além disso, o uso de valores nacionais e atualizados (ABRAF, 2013) de produtividade de florestas plantadas, também proporcionaram uma maior aproximação dos resultados à realidade local.

O mesmo raciocínio pode ser usado para as taxas de mudança de estoque de carbono no solo retiradas de estudos nacionais. Entretanto, como não existiam muitas pesquisas específicas para a região nordeste, foram usados os parâmetros encontrados para o Cerrado. Essa generalização com certeza teve impactos nos resultados, tendo em vista a grande quantidade de mudanças de uso do solo ocorridas na Bahia, um dos estados destacados pelo fluxo de carbono nos solos.

Além disso, por questões explicadas na metodologia, foram usadas taxas de alteração de carbono no solo que foram calculadas, em sua maioria, de forma simples, apenas dividindo a quantidade de mudança no solo pelo período de tempo em que foram documentadas. Apenas as taxas retiradas do trabalho de Maia *et al.* (2013) foram calculadas levando em conta o tempo de 20 anos de duração das mudanças previstas pelo IPCC. O autor deste estudo reportou as diferenças entre o uso dessas metodologias e encontrou valores de sequestro de carbono 25% maiores quando foram usadas taxas calculadas considerando o tempo de duração das alterações de estoque do IPCC. Dessa forma, os valores de sequestro encontrados aqui podem estar subestimados em decorrência das taxas utilizadas.

Ademais, as análises de emissão e sequestro de carbono nos solos teriam um resultado ainda mais confiáveis se houvessem disponíveis bases de dados atualizadas e espacializadas sobre as atividades agrícolas do país. O último Censo Agropecuário é do ano de 2006, e as informações sobre produção e manejo agrícolas mais desagregadas espacialmente são agregadas por município. Tais informações são importantes tanto para avaliações como para o planejamento e gestão do território. Elas poderiam ser usadas em estudos de modelagem para a seleção de áreas potenciais para expansão de plantio direto ou recuperação de pastagens degradadas projetadas pelo Plano ABC, por exemplo. Por falta desses dados, a presente pesquisa realizou a espacialização dessas áreas que ainda pode ser aprimorada com informações

mais específicas sobre o uso de plantio direto para cada tipo de cultivo e de topografia para a identificação de áreas de pastagens degradadas.

Por todos os fatores apresentados relativos à procedência e seleção dos dados de entrada do modelo, seria interessante incluir futuramente análises que quantificassem a incerteza nos resultados do presente trabalho.

Os resultados encontrados referem-se somente às emissões e sequestro de carbono consequentes das mudanças de uso do solo e manejo. Dessa forma, é preciso lembrar que essas são apenas uma parte das emissões de GEEs promovidas pelo setor agrícola que é o maior emissor de outros gases de efeito estufa, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (IPCC, 2013). A emissão desses gases podem ser influenciadas pela modificação de práticas agrícolas promovidas pela adoção de estratégias de mitigação de CO<sub>2</sub>, como a adoção de plantio direto e a recuperação de pastagens degradadas, analisadas neste estudo (BATLLE-BAYER *et al*, 2010.). Dessa forma, é preciso levar em consideração a emissão desses outros gases para uma real avaliação do potencial dessas estratégias na redução de GEEs, assim como para as análises das emissões e do sequestro total de GEEs do setor agrícola.

## **5 CONCLUSÕES**

O cenário Baixo Carbono analisado apresenta um grande potencial de sequestro de carbono, com valores próximos às metas de redução de GEEs projetadas pelo governo para o setor de agricultura. Para alcance de tais metas, as pastagens destacam-se como categoria chave em busca de uma agricultura de baixo carbono. A expansão de áreas agrícolas e principalmente de florestas plantadas em áreas de pastagens mostraram grande potencial de sequestro de carbono, assim como a recuperação de pastagens degradadas. Além disso, a adoção de plantio direto também teve papel importante nessa conjuntura.

O uso de parâmetros nacionais referentes aos sistemas de cultivo colaborou para que os resultados fossem mais condizentes com realidade do país. No entanto, as restrições relativas à disponibilidade de bases de dados do setor agrícola mostraram-se limitadoras para os cálculos de emissão e sequestro de GEEs, assim como para sua modelagem espacial.

A metodologia de modelagem espacialmente explícita usada provou-se conveniente para o cálculo de emissões e sequestro de carbono. Além disso, ela facilita a visualização dos resultados e assim proporciona um melhor entendimento da distribuição espacial das emissões e do sequestro de carbono para o direcionamento de apoio a estratégias de mitigação.

Finalmente, assim como em todo trabalho que envolve a modelagem de dados, é importante ressaltar que os resultados aqui apresentados são apenas uma representação da realidade. Dessa forma, a magnitude de sequestro de carbono encontrada somente foi possível porque as análises foram baseadas em um cenário que envolve a conjunção de diferentes práticas de mitigação aliadas à ausência de desmatamento. Assim, os resultados devem ser usados não como previsões, mas como tendências para orientar a implantação de uma agricultura de baixo carbono.

## REFERÊNCIAS

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012, Brasília, 148p, 2013.

AGUIAR, E.B. Estudo da poda da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), 2011, 144f. Tese (Doutorado em Agronomia, Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, Mar. 2011.

ALLIPRANDINI, L.F. et al. Understanding soybean maturity groups in Brazil: Environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, [s.l.], v.49, Maio-Jun. 2009.

ALMEIDA, R.E.M. et al. Minimização da imobilização de N no algodoeiro no sistema plantio direto com palhada de milho e braquiária no oeste baiano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 7., 2009, Foz do Iguaçu. Sustentabilidade da cotonicultura Brasileira e Expansão dos Mercados. *Anais...* Campina Grande: Embrapa Algodão, p.1287-1294, 2009.

AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v.25, p.189-197, 2001.

ANDRADE, C.A.B. et al. Produtividade, crescimento e partição de matéria seca em duas cultivares de feijão. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.4, p.683-688, 2009.

ARAÚJO-FILHO, J.A. Manipulação da vegetação lenhosa da caatinga para fins pastoris. Sobral: Embrapa Caprinos, (Circular Técnica), n.11, 18p, Jul. 1990.

\_\_\_\_\_. Efeitos da Manipulação da Vegetação Lenhosa sobre a Produção e Compartimentalização da Fitomassa Pastável de uma Caatinga Sucessional. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.31, p.11-19, Jan.-Fev. 2002.

ASSAD, E.D. et al. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences Discussions**, v.10, p.5499-5533, 2013.

ATHAYDE, M.L.F.; LAMAS, F.M. Aplicação sequencial de cloreto de mepiquat em algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.3, p.369-375, Mar. 1999.

BARBOSA, R.I.; FEARNSIDE, P.M. Above-ground biomass and the fate of carbon after burning in the savannas of Roraima, Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.216, p.295–316, May 2005.

BATLLE-BAYER, L.; BATJES, N.H.; BINDRABAN, P.S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.137, p.47-58, Apr. 2010.

BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.86, n.2, p.237-245, Apr. 2006.

BERGONCI, J.I. et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.7, p.949-956, Jul. 2001.

BERNOUX, M. et al. CO<sub>2</sub> emission from mineral soils following land-cover change in Brazil. **Global Change Biology**, [s.l.] v.7, n.7, p.779-787, Oct. 2001.

\_\_\_\_\_. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.26, p.1-8, 2006.

BIANCO, S.; PITELLI, R.A.; CARVALHO, L.B. Estudo comparativo do acúmulo de massa seca e macronutrientes por plantas de *Glicine max* (L.) MERR. E *Euphorbia heterophylla* L. **Revista Ensaios e Ciência**, Campo Grande, MS, v.11, n.2, p.61-72, Ago. 2007.

BODDEY, R.M. et al. Estoques de carbono nos solos do Brasil: Quantidade e mecanismos de acúmulo e preservação. In: LIMA, M.A. et al. (Edits). *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. Brasília: EMBRAPA, 347p, 2012.

BORGES, A.L.; SOUZA, L.S. O cultivo da bananeira. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 279p, 2004.

BORGES, P.R.S. et al. Distribuição de massa seca e rendimento de feijão-caupi inoculadas com rizóbio em Gurupi, TO. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.25, p.37-44, Jan.-Mar. 2012.

BRAGANÇA, S.M. Crescimento e acúmulo de nutrientes pelo cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre), 2005, 99f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Mar. 2005.

BRAGANÇA, S.M. et al. Acumulação de matéria seca pelo cafeeiro Conilon. **Revista Ceres**, Viçosa, v.57, p.48-52, Jan.-Fev. 2010.

BROWN, S. Opportunities for mitigation carbon emissions through forestry activities. **Winrock International**. Arlington, p.1-5. 1999.

BUSTAMANTE, M.M.C. et al. Soil carbon storage and sequestration potencial in the Cerrado region of Brazil. In: LAL, R. et al. (Edits.). *Carbon sequestration in soils of Latin America*. Binghamton: Food Products Press, p.285-304, 2006.

CAMPOS, A.R. Modelagem territorial de cenário da expansão das plantações de eucalipto no Brasil. 2013. 65f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, Dez. 2013.

CANADELL, J.G. et al. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Cambridge, v.104, n.47, p.18866-18870, Nov. 2007.

CARVALHO, J.L.N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.2, p.277-289, Mar.-Abr. 2010a.

\_\_\_\_\_. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v.110, p.175-186, Sep. 2010b.

CASTRO, E.A.; KAUFFMAN, J.B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, [s.l.], v.14, n.3, p.263-283, May 1998.

CERRI, C.C. et al. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, p.102-116, Jan.-Feb. 2010.

CERRI, C.E.P. et al. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL, R. et al. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, Haworthp, p.245-266, 2006.

\_\_\_\_\_. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s.l.], v.122, p.58-72, Sep. 2007.

COELHO, M.A.O. et al. Resposta da produtividade de grãos e outras características agrônômicas do trigo EMBRAPA-22 irrigado ao nitrogênio em cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, p.555-561, 1998.

CEPLAC & CPC - COMISSÃO EXECUTIVA DO PLANO DA LAVOURA CACAUEIRA/CENTRO DE PESQUISAS DO CACAU. Características gerais do cacau. [s.l.; s.n.; 2011?]. Disponível em <<http://www.ceplac.gov.br/radar/cacau.htm>>. Acesso em Dez. 2013

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: Café, safra 2012 primeira estimativa, Janeiro/2012. Brasília: Conab, 16p, 2012.

\_\_\_\_\_. Acompanhamento da safra Brasileira: Laranja, safra 2013/14 terceiro levantamento - São Paulo e Triângulo Mineiro, Dezembro/2013. Brasília: Conab, v.1, 11p, Dez. 2013.

CONCEIÇÃO, P.C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**, v.129, p.40-47, May 2013.

COSTA, F.S. et al. Crescimento, produção e acúmulo de potássio em bananeira 'Galil 18' sob irrigação e fertilização potássica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.3, p.409-416, Mar. 2012.

COSTA, H.J.U. et al. Massa de forragem e características morfológicas do milho e da *Brachiaria brizantha* cv. Piatã cultivados em sistema de consórcio. **Revista Ars Veterinaria**, Jaboticabal, v.28, n.2, p.134-143, 2012.

CRUZ, T.V.; PEIXOTO, C.P.; MARTINS, M.C. Crescimento e produtividade de soja em diferentes épocas de semeadura no oeste da Bahia. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, p.33-42, Jan.-Fev. 2010.

DUARTE, A.P. et al. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho originárias de clima tropical e introduzidas de clima temperado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, n.3, p.1-20, 2003.

FEARNSIDE, P.M. et al. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, [s.l.], v.258, p.1968-1978, Jul. 2009.

FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Evolução da área cultivada no sistema de plantio direto na palha – Brasil. [s.l.; s.n.], 2012. Disponível em <[http://www.febrapdp.org.br/download/PD\\_Brasil\\_2013.I.pdf](http://www.febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.I.pdf)>. Acesso em: Jan. 2014.

FIALHO, R.C.; ZINN, Y.L. Changes in soil organic carbon under eucalyptus plantations in Brazil: A comparative analysis. **Land Degradation & Development**, [s.l.], 2012.

FIDELIS A. et al. Influência do fogo na biomassa aérea e subterrânea dos Campos Sulinos. In: REUNIÃO DO GRUPO TÉCNICO EM FORRAGEIRAS DO CONE SUL – GRUPO CAMPOS, 11., 2006, Pelotas. Desafios e oportunidades do Bioma Campos frente à expansão e intensificação agrícola. *Anais...* Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006.

FONTOURA, J.U.G; HAAG, H.P. Nutrição mineral do trigo I. produção de matéria seca sob regime de sequeiro e irrigado em latossolo roxo. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, Piracicaba, v.44, n.2, p.1563-1577, 1987.

FUNDAÇÃO PROCAFÉ. Renovar mais, nossos cafezais. Fundação Procafé, Varginha. Folha Técnica n.009. Disponível em <<http://www.fundacaoprocafe.com.br/sites/default/files/publicacoes/pdf/folhas/Central.pdf>>. Acesso em Nov. 2013

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.4, p.1069-1079, Jul.-Ago. 2010.

GAVA, G.J.C. et al. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de N-uréia. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.31, n.4, p.851-862, Out.-Dez. 2010.

GOMES, A.A. et al. Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.1927-1937, Out. 2000.

GONÇALVES, J.M. Acúmulo de nutrientes em soja transgênica no cerrado goiano. 2012. 62f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de Concentração Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Goiânia, Fev. 2012.

GOUVELLO, C. et al. Estudo de baixo carbono para o Brasil: Uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas. Relatório de Síntese Técnica. Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial, 292p, 2010.

GUEDES, I.C.L. et al. Análise econômica da reforma e da talhadia de povoamentos de eucalipto em condições de risco. **Revista Cerne**, Lavras, v.17, n.3, p.393-401, Jul.-Set. 2011.

GURGEL, A.C & PALTTSEV, S. Costs of reducing GHG emissions in Brazil. **Climate Policy**, v.14, n.2, Nov. 2013.

HAMADA, E.; PINTO, H.S. Avaliação do desenvolvimento do trigo utilizando medidas radiométricas em função de graus-dia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos, p.95-101, 2001.

HERINGER, I.; JACQUES, A.V.A. Acumulação de forragem e material morto em pastagem nativa sob distintas alternativas de manejo em relação às queimadas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.31, n.2, p.599-604, 2002.

HOLMES, K.W. et al. Large-area spatially explicit estimates of tropical soil carbon stocks and response to land-cover change. **Global Biogeochemical Cycles**, v.20, GB3004, Jul. 2006.

HOUGHTON, R.A.; HALL, F.; GOETZ, S.J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.114, G2, Jun. 2009.

ICONE - INSTITUTO DE ESTUDOS DO COMÉRCIO E NEGOCIAÇÕES INTERNACIONAIS) 2012. Outlook Brasil 2022. Disponível em:< [www.fiesp.com.br](http://www.fiesp.com.br)>, Acesso em Out. 2013

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Tóquio, [s.n.], 2003.

\_\_\_\_\_. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: Agriculture, forestry and other land use. Generic methodologies applicable to multiple land-use categories, chapter 2 [s.l.], v.4, 59p, 2006.

\_\_\_\_\_. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1535p, 2013.

JIMÉNEZ, J.J.; LAL, R. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.25, n.4, p.337-365, 2006.



KARSTENSEN, J.; PETERS, G.P.; ANDREW, R.M. Attribution of CO<sub>2</sub> emissions from Brazilian deforestation to consumers between 1990 and 2010. **Environmental Research Letters**, [s.l.], v.8, n.2, 7p, Apr. 2013.

KONGSAGER, R.; NAPIER, J.; MERTZ, O. The carbon sequestration potential of tree crop plantations. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [s.l.], v.18, n.8, p.1197-1213, Sep. 2012.

KUNDU, S. et al. Carbon sequestration and relationship between carbon addition and storage under rainfed soybean-wheat rotation in a sandy loam soil of the Indian Himalayas. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v.92, p.87-95, Jan. 2007.

LAL, R. Soil Carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science AAAS**, New York, v.304, p.1623-1627, Jun. 2004.

LAL, R. et al. (Edits.). Carbon sequestration in soils of Latin America. Binghamton: Food Products Press, 554p, 2006.

LAZARINI, E.; SÁ, M.E.; FERREIRA, R.C. Acúmulo de matéria seca em plantas de soja durante os estádios reprodutivos e qualidade fisiológica de sementes colhidas em diferentes fases do desenvolvimento. **Revista Brasileira de Sementes**, [s.l.], v.22, p.153-162, 2000.

LEITE, R.L.L. et al. Produção e desenvolvimento de cultivares de cana-de-açúcar em argissolo vermelho eutroférrico do Tocantins, Brasil. **Amazônia - Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v.5, n.10, p.181-194, Jan.-Jun. 2010.

LIMA, A.M.N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1053-1063, Maio-Jun. 2008.

MAIA, S.M.F. et al. Soil organic carbon stock change due to land use activity along the agricultural frontier of the southwestern Amazon, Brazil, between 1970 and 2002. **Global Change Biology**, [s.l.], v.16, n.10, p.2775-2788, Oct. 2010.

\_\_\_\_\_. Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v.133, p.75-84, Oct. 2013.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. O aquecimento global e a agricultura de baixa emissão de carbono. Brasília: MAPA/EMBRAPA/FEBRAPDP, 75p, 2012.

\_\_\_\_\_. Projeções do Agronegócio: Brasil 2012/2013 a 2022/2023 Projeções de Longo Prazo. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Assessoria de Gestão Estratégica, 4.ed, 96p, Jun. 2013.

MARTORANO, L.G. Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT. 2007, 151f. Tese (Doutorado em Fitotecnia, Área de Concentração Agrometeorologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Jan. 2007.

MARUR, C.J.; RUANO, O. Escala do Algodão: Um método para determinação de estádios de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, n.105, p.3-4, Mar. 2004.

MCT - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: Emissões e remoções de dióxido de carbono por mudanças nos estoques de florestas plantadas. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, 44p, 2006.

\_\_\_\_\_. Segundo inventário Brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: Emissões de dióxido de carbono no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. Relatórios de Referência. Brasília: Fundação de Ciência Aplicações e Tecnologia Espaciais, 100p, 2010.

\_\_\_\_\_. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília: [s.n.], 81p, 2013.

MEDEIROS, G.A. et al. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.9, p.1733-1742, Set. 2000.

MÜLLER, M.M.L. et al. The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian amazon: a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.103, p. 279-288, Jul. 2004.

NEPSTAD, D. et al. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science AAAS*, New York, v.326, p.1350-1351, Dec. 2009.

NEVES, F.P. et al. Caracterização da estrutura da vegetação numa pastagem natural do Bioma Pampa submetida a diferentes estratégias de manejo da oferta de forragem. *Revista Brasileira de Zootecnia*, [s.l.], v.38, n.9, p.1685-1694, Nov. 2009.

NEVES, M.F. et al. O retrato da citricultura brasileira. *Centro de Projetos e Pesquisa em Marketing e Estratégia - CitrusBR*, Ribeirão Preto, 137p, 2010.

OLIVEIRA, L.J.C. et al. Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. *Environmental Research Letters*, [s.l.], v.8, n.2, May 2013.

OLIVEIRA, M.D.M. et al. Análise de custos, rentabilidade e de investimentos na produção de café cereja descascado: Estudo de caso. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL (SOBER), 43., 2005, Ribeirão Preto. *Anais...* [s.l.: s.n.], 2005.

OLIVEIRA, S.S.C. et al. Acúmulo e partição de matéria seca e fresca em quatro variedades de cana-de-açúcar na região dos tabuleiros costeiros de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA – ZOOTEC, 2006, Recife. *Anais...* Associação Brasileira de Zootecnistas, 2006.

OGLE, S.M. et al. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for US agricultural lands between 1982 and 1997. **Global Change Biology**, [s.l.], v.9, n.11, p.1521-1542, Nov. 2003.

OGLE, S.M.; CONANT, R.T.; PAUSTIAN, K. Deriving grassland management factors for a carbon accounting method developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Environmental Management**, New York, v.33, n.4, p.474-484, Aug. 2004.

OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; PAUSTIAN, K. Bias and variance in model results associated with spatial scaling of measurements for parameterization in regional assessments. **Global Change Biology**, [s.l.], v.12, n.3, p.512-523, Jan. 2006.

OTTMAR, R.D. et al. Séries de estereo-fotografias para quantificar a biomassa da vegetação do Cerrado do Brasil Central. USDA/USAID/UnB. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-519. US Department of Agriculture, Forest Service. Pacific Northwest Research Station, Portland, v.1, 87p, 2001.

PADOVAN, M.P. et al. Acumulação de massa e nitrogênio em cultivares de soja para fins de adubação verde, num sistema sob transição agroecológica em Dourados, MS. In: SEMINÁRIO DE AGROECOLOGIA DE MATO GROSSO DO SUL, 2., 2008, Dourados. A construção participativa da agroecologia em Mato Grosso do Sul. *Resumos...* **Revista Brasileira de Agroecologia**, [s.l.], v.3, (Suplemento especial), 2008.

PAIXÃO, F.A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, p.411-420, 2006.

PAUSTIAN, K. et al. CO<sub>2</sub> mitigation by agriculture: an overview. **Climatic Change**, [s.l.], v.40, p.135-162, Sep. 1998.

PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; MARIN, F.R. Mudanças climáticas globais e a agricultura no Brasil. **Revista Multiciência**, Campinas, n.8, p.139-162, Maio 2007.

PERESSIN, V.A. et al. Acúmulo de matéria seca na presença e na ausência de plantas infestantes no cultivar de mandioca SRT 59 - Branca de Santa Catarina. **Bragantia**, Campinas, v. 57, p. 135-148, 1998. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87051998000100016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87051998000100016)>. Acesso em Out. 2013

POMPEU, R.C.F.F. et al. Componentes da biomassa pré-pastejo e pós-pastejo de capim-tanzânia sob lotação rotativa com quatro níveis de suplementação concentrada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.3, p.383-393, Set. 2008.

POWLSON, D.S.; WHITMORE, A.P.; GOULDING, K.W.T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. **European Journal of Soil Science**, United Kingdom, v.62, p.42-55, Feb. 2011.

POZER, C.G.; NOGUEIRA, F. Flooded native pastures of the northern region of the Pantanal of Mato Grosso: Biomass and primary productivity variations. **Brazilian Journal of Biology**, v.64, n.4, p.859-866, 2004.

PREZOTTI, L.C. Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica. 2001. 93f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Mar. 2001.

QUIÑONES, A. et al. Allometric models for estimating carbon fixation in citrus trees. **Agronomy Journal**, v.105, n.5, p.1355-1366, Jul. 2013.

RICE, C.W.; REED, D. Soil carbon sequestration and greenhouse gas mitigation: A role for american agriculture. **Agriculture and Climate Change**, Arlington, 36p, Mar. 2007.

RIDESA - REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. Censo Varietal 2012. Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, Araras, SP, 55p, Jun. 2013.

RODRIGUES, D.C. Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas. 2004. 94f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Área de Concentração Ciência Animal e Pastagens) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, Ago. 2004.

RODRIGUES, J.D. Fisiologia da cana-de-açúcar (Apostila), Instituto de Biociências – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 99p, 1995.

RODRIGUES, M.G.V. et al. Distribuição da biomassa e minerais em “família” de bananeira ‘prata-anã’ adubada com zinco via broto desbastado. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.32, n.2, p.599-611, Jun. 2010.

RONQUIM, C.C. Dinâmica espaço temporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas do Nordeste do Estado de São Paulo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, (Documentos, 63), 52p, 2007.

ROSOLEM, C.A. et al. Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio pelo algodoeiro sob irrigação cultivado em sistemas convencional e adensado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.457-466, Mar.-Abr. 2012.

SANGOI, L.; KRUSE, N.D. Acúmulo e distribuição de matéria seca em diferentes frações da planta de mandioca no planalto catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.28, n.10, p.1151-1164, Out. 1993.

SANTOS, R.D. et al. Características agrônômicas de variedades de milho para produção de silagem. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v.32, n.4, p.367-373, 2010.

SANTOS, R.S.M. et al. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria spp.* em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s.l.], v.37, n.2, p.119-124, Jun. 2007.

SCANAVACA-JUNIOR, L.; GARCIA, J.N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.120-129, Jun. 2004.

SCHARLEMANN, J.P.W. et al. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management- Future Science**, [s.l.], v.5, p.81-91, Feb. 2014.

SCHEEREN, P.L. et al. Cultivares de trigo da Embrapa indicadas para cultivo no Brasil 2012/2013. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 72p, 2012.

SCOLFORO, J.R.S.; CARVALHO, L.M.T.; OLIVIERA, A.D. Monitoramento dos reflorestamentos e tendências da produção em volume, peso de matéria seca e carbono, 2005 - 2007. Lavras, Editora UFLA, 150p, 2008.

SILVA, A.F. et al. Interceptação de luz, matéria seca e área foliar de linhagens de algodoeiro herbáceo. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, p.67-73, Jan.-Abr. 2005.

SILVA, A.O. et al. Acúmulo da fitomassa seca da cultura do feijoeiro cultivado em diferentes densidades em Lagoa Seca-PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

SILVA-NETO, S.P. et al. Dependência espacial em levantamentos do estoque de carbono em áreas de pastagens de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Acta Amazonica**, Manaus, v.42, n.4, p.547-556, Dez. 2012.

SILVA, P.I.B. et al. Acúmulo de matéria seca de milho e braquiária consorciados em diferentes manejos de plantas daninhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 27., 2010, Ribeirão Preto. *Anais...* [s.l.;s.n.], p.2351-2353, Jul. 2010.

SILVA, S.O.; SANTOS-SEREJO, J.A.; CORDEIRO, Z.J.M. Variedades. In: BORGES, A. L.; SOUZA, L. S (Edits.). *O cultivo da bananeira*. Embrapa Mandioca e Fruticultura. Cruz das Almas, p.45-58, 2004. Disponível em <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Livro\\_Banana\\_Cap\\_4ID-F7QzQ9c5WB.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Livro_Banana_Cap_4ID-F7QzQ9c5WB.pdf)>. Acesso em Nov. 2013.

SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage. **Agronomie**, [s.l.], v.22, p.755-775, 2002.

SOARES-FILHO B.S.; RODRIGUES H.O.; COSTA, W.L. Modeling environmental Dynamics with Dinamica EGO. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto, 2009. Disponível em <[http://csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica\\_EGO\\_guidebook.pdf](http://csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guidebook.pdf)>. Acesso em Set. 2013.

SOARES-FILHO B.S *et al.*. Challenges for a low carbon agriculture and forest conservation in Brazil. Sustainability Report. IADB. Washington, 2012. Disponível em <<http://www.iadb.org/sustainability/soares>> . Acesso em Fev. 2014.

SOARES-FILHO B.S *et al.* SimMinas: uma plataforma integrada de modelagem das mudanças de uso da terra, emissões de CO<sub>2</sub> associadas e impactos ambientais para o estado de Minas Gerais. . Centro de Sensoriamento Remoto, CSR/UFMG. Relatório de Projeto - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, 2013a

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.O.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**, n.43, p.80-87, 2013b.

SOMARRIBA, E. et al. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.173, p.46-57, Jul. 2013.

SOUZA, A.P. Cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO<sub>2</sub> sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de *saccharum ssp.* 2007. 91f. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Estrutural na área de Biologia Celular) – Universidade Estadual de Campinas, Abr. 2007.

TEIXEIRA, L.B.; BASTOS, J.B.; OLIVEIRA, R.F. Biomassa vegetal em agroecossistema de seringueira consorciada com cacaueiro no nordeste Paraense. Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental (EMBRAPA-CPATU), Belém, Boletim de Pesquisa n.153, 15p, Abr. 1994.

TEIXEIRA, L.B.; OLIVEIRA, R.F. Biomassa vegetal e carbono orgânico em capoeiras e agroecossistemas no nordeste do Pará. Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental (CPATU), Belém, Boletim de Pesquisa n.6, 21p, Dez. 1999.

THOMAS, C.D. et al. Extinction risk from climate change. **Nature**, [s.l.], v.427, p.145-148, Jan. 2004.

TOLEDO-FILHO, M.R. Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas, 2001, 150f. Tese (Doutorado em Fitotecnia, Área de Concentração Agrometeorologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Jun. 2001.

URCHEI, M.A.; RODRIGUES, J.D.; STONE, L.F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.3, p.497-506, Mar. 2000.

VANDENBYGAART, A.J. et al. Uncertainty analysis of soil organic carbon stock change in Canadian cropland from 1991 to 2001. **Global Change Biology**, v.10, n.6, p.983-994, Jun. 2004.

VON PINHO, R.G. et al. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.8, n.2, p.157-173, 2009.

WALTER, M.K.C. et al. Estimativa do estoque de carbono em áreas de soja visando a análise de cenários de linha de base para projetos de créditos de carbono. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16.,2009, Belo Horizonte. *Anais...* Viçosa, UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

WALTER, M.K.C. Análise do estoque de carbono em sistemas agrícolas e florestais em Passo Fundo e Frederico Westphalen, RS, 2012, 188f. Tese (Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, Nov. 2012.

WANG, J. et al. Development and application of a detailed inventory framework for estimating nitrous oxide and methane emissions from agriculture. **Atmospheric Environment**, United Kingdom, v.45, n.7, p.1454-1463, Mar. 2011.

WATANABE, R.T. et al. Produtividade da cultura de soja em função da densidade populacional e da porcentagem de cátions (Ca, Mg e K) no complexo sortivo do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v.26, n.4, p.477-484, Out.-Dez. 2005.

WRI - WORD RESOURCES INSTITUTE .Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy. Washington, DC ,2005. Disponível em:<<http://www.wri.org/publication/navigating-the-numbers>>. Acesso em: 23.set.2013.

ZANCHI, F.B. et al. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v.39, n.2, p.335-348, Jun. 2009.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.84, p. 28-40, Nov. 2005.

## ANEXO FIGURAS

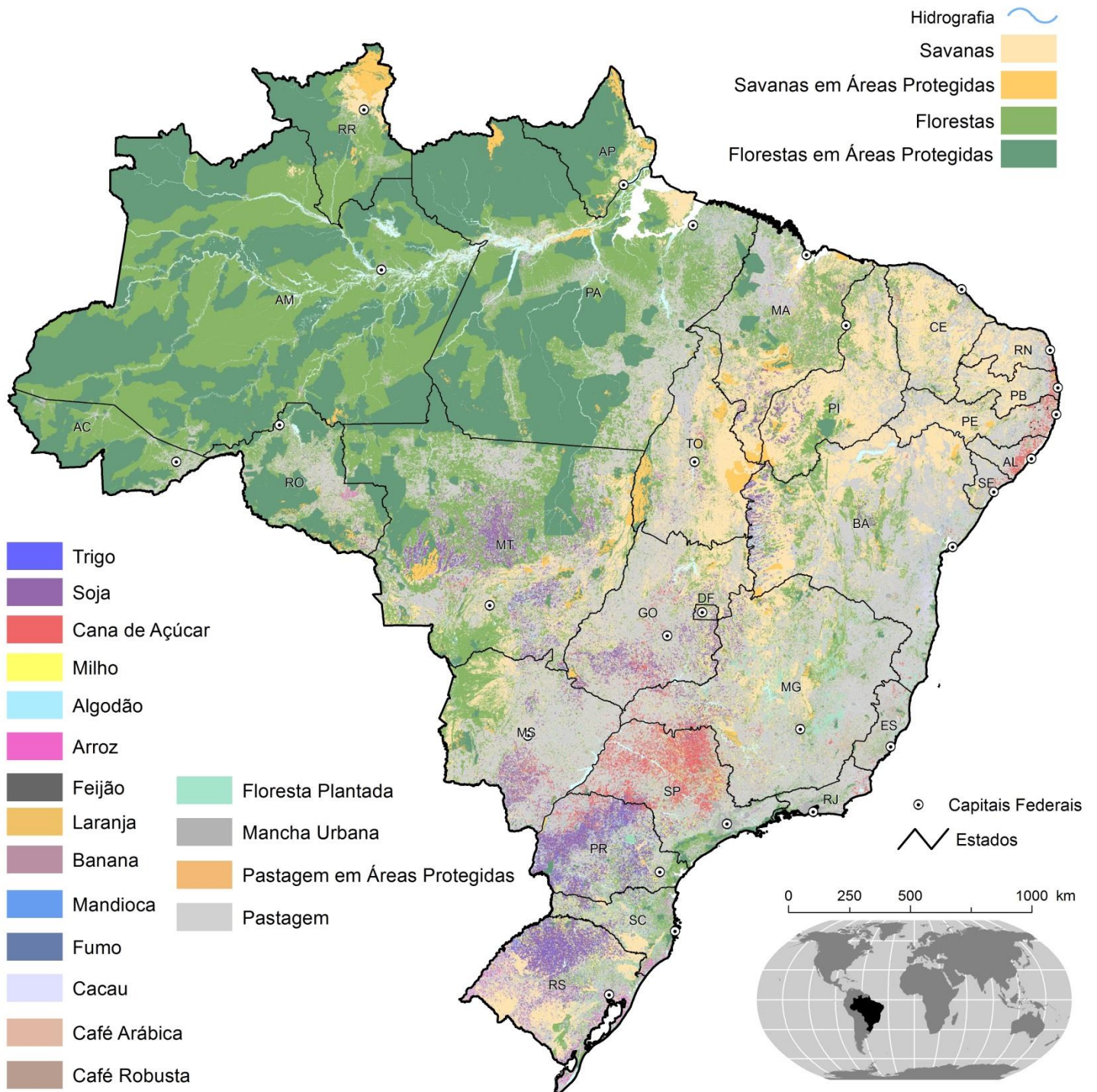


Figura A1- Mapa de uso do solo gerado pelo modelo OTIMIZAGRO como resultado do cenário Baixo Carbono para o ano de 2011



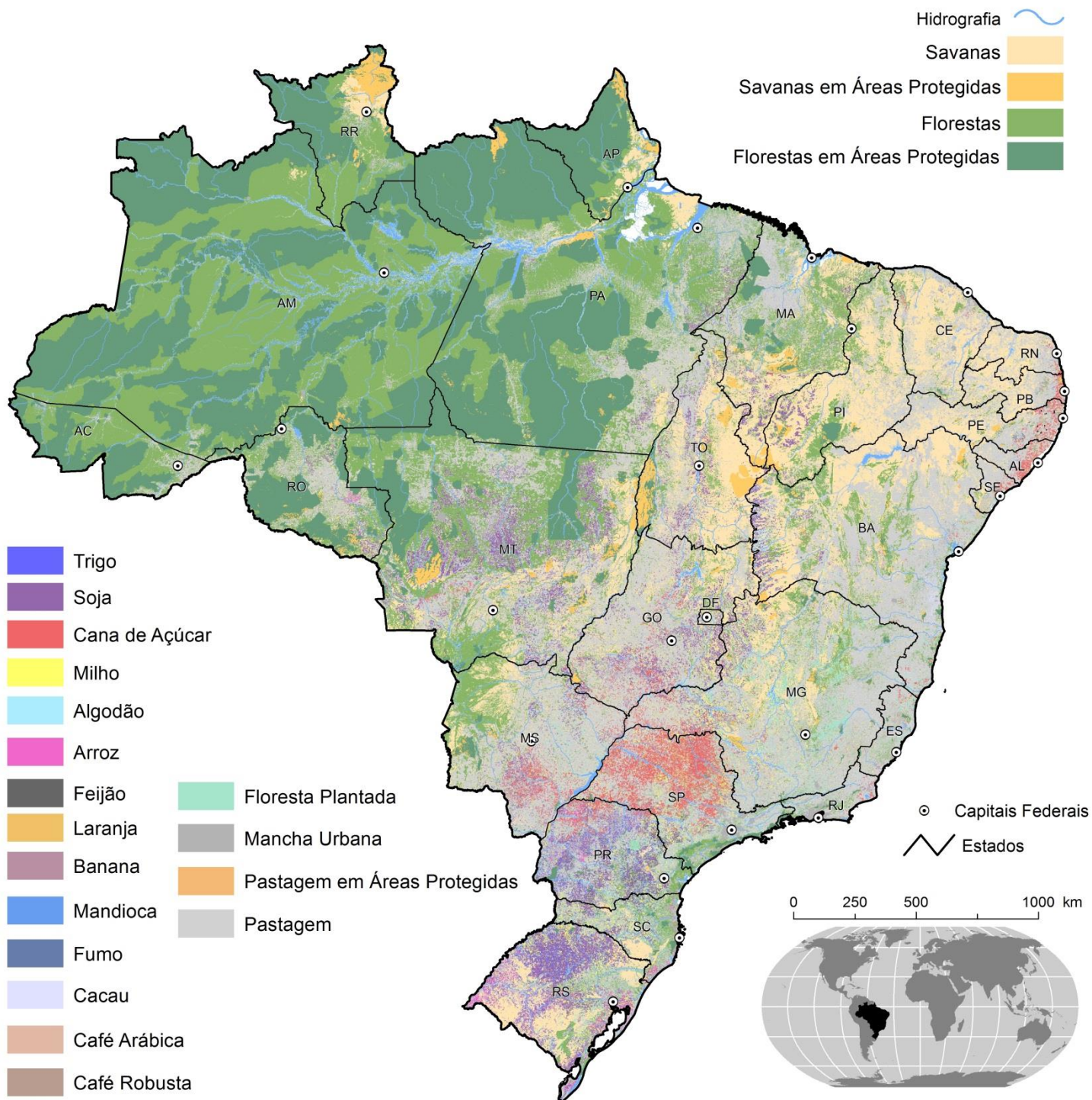


Figura A2- Mapa de uso do solo gerado pelo modelo OTIMIZAGRO como resultado do cenário Baixo Carbono para o ano de 2022



Figura A3- Regiões traçadas de acordo com os biomas e histórico de uso do solo para a aplicação das taxas de mudança nos estoques de carbono no solo



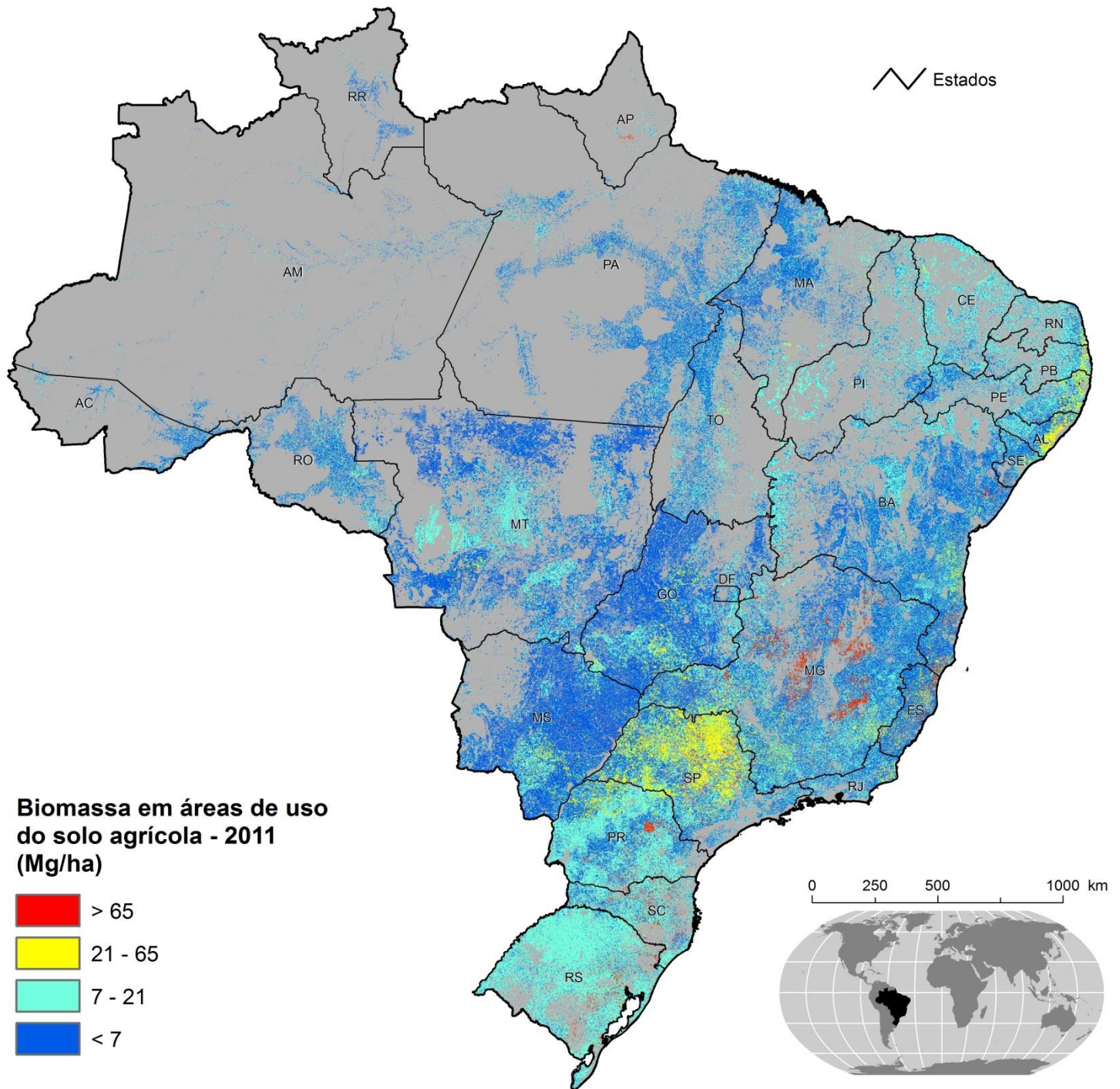


Figura A4- Distribuição espacial da biomassa dos cultivos agrícolas no Brasil em 2011 em toneladas de carbono por hectare (Mg de C/ha)

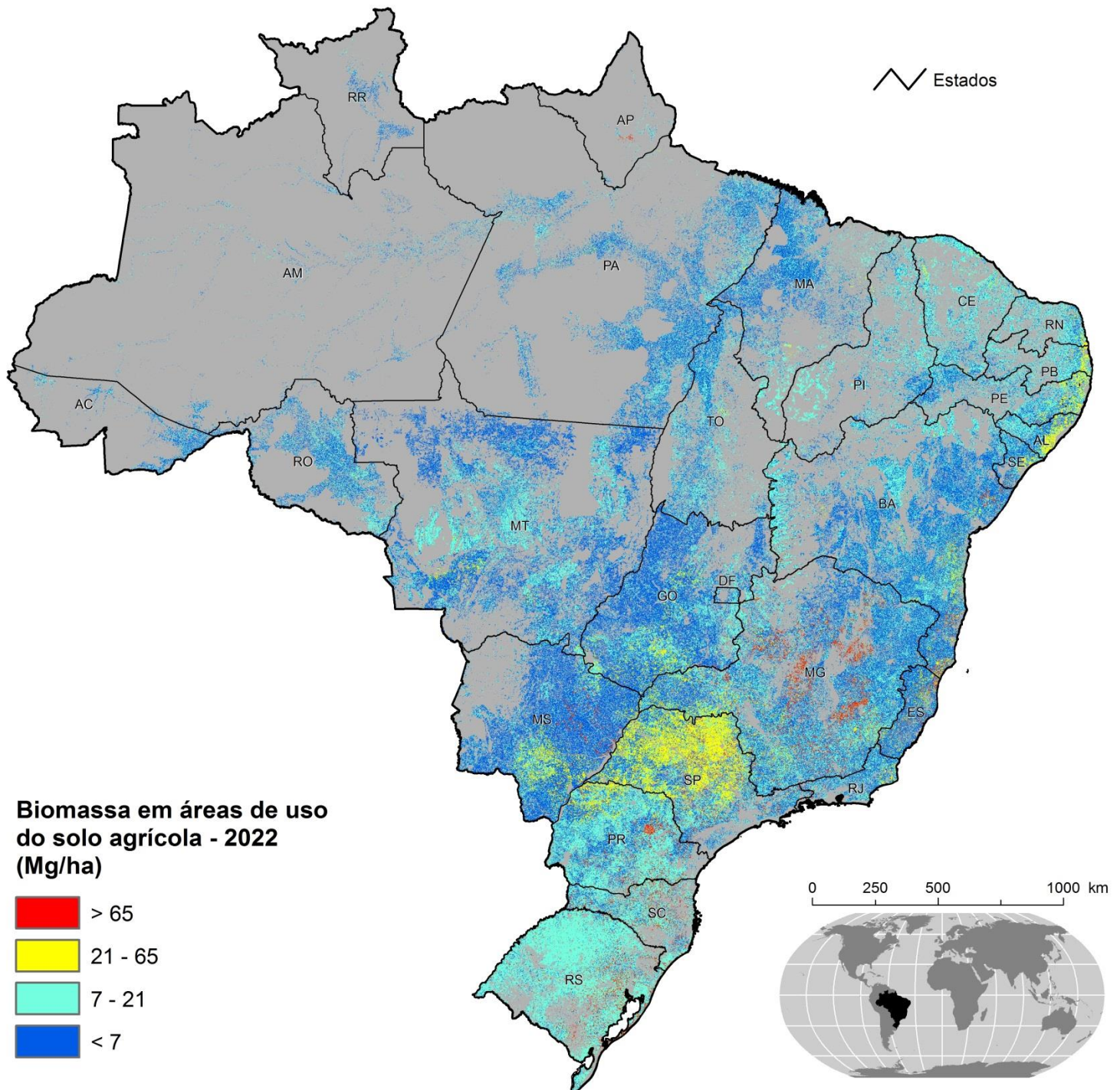


Figura A5- Distribuição espacial da biomassa dos cultivos agrícolas no Brasil em 2022 em toneladas de carbono por hectare (Mg de C/ha)

## ANEXO METODOLÓGICO

### 1- Espacialização das subcategorias de pastagens

A categoria de pastagem foi dividida em subcategorias de acordo com sua natureza e seu manejo, conforme define o Censo Agropecuário do IBGE de 2006: pastagens nativas, pastagens plantadas em boas condições pastagens plantadas degradadas (IBGE, 2006)<sup>10</sup>. As áreas dessas categorias divulgadas por municípios no Censo foram analisadas e verificou-se que a proporção das pastagens plantadas degradadas declaradas, 5%, não é condizente com as estimativas dessas áreas divulgadas por estudos recentes (DIAS- FILHO, 2011). Optou-se então por adaptá-las da seguinte maneira:

- As duas categorias de pastagens plantadas foram somadas, e uma nova proporção de pastagens plantadas degradadas foi atribuída. Isso foi feito de forma que a soma das áreas de pastagens degradadas, por estados ou regiões, representassem uma porcentagem condizente com as publicações consultadas, mas mantendo-se a proporção dessas áreas entre os municípios;

- Para a adaptação dos dados para região Norte, foram usadas as referências de Dias-Filho & Soares de Andrade (2005) de porcentagem da área de pastagem plantada com degradação moderada e avançada. Para os estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima, esses dois níveis de degradação somaram 40%, 35%, 40% e 60%, respectivamente, e para os outros estados da região foi usada a média desses valores, 44%.

- Para a adaptação dos dados para a região Centro-oeste, não foram encontradas informações desagregadas por estados e, por isso, foi usada a estimativa de 80% de degradação das pastagens plantadas, publicada por Peron & Evangelista (2004) e por Dias-Filho (2011).

- Para as demais regiões, nordeste, sul e sudeste, não foram encontradas informações específicas. Assim, por falta de dados, foi considerado para o restante do país a média das

---

<sup>10</sup>Definições do IBGE (2006):

**Pastagem natural: campos naturais, faxinal e outros** - compreenderam as áreas de pastos não plantados, mesmo que fossem objetos de limpeza, gradeação ou outras, utilizadas ou destinadas ao pastoreio dos animais, existentes no estabelecimento;

**Pastagem plantada degradada por manejo inadequado ou por falta de conservação, que se encontrava degradada ou pouco produtiva** - abrangeram as áreas plantadas com espécies vegetais destinadas ao pastoreio dos animais existentes no estabelecimento, nestas condições;

**Pastagem plantada em boas condições** - compreenderam as áreas plantadas ou em preparo para o plantio de espécies vegetais destinadas ao pastoreio dos animais existentes no estabelecimento, e que não estivessem degradadas, pois recebiam manutenção frequente. Foram incluídas as pastagens que estavam em processo de recuperação.



regiões norte e centro-oeste de 60% de degradação das pastagens plantadas, também comumente divulgada como proporção geral de pastagens degradadas do país (DIAS- FILHO, 2011).

- A proporção das pastagens naturais foi mantida por municípios e ao longo do tempo;

Além disso, foi considerada a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas prevista pelo Plano ABC (MAPA, 2012). Como não existem estimativas de quando e onde essa recuperação vai acontecer nem uma série histórica da evolução das subcategorias, foi considerada a recuperação linear dessas áreas com 1,25 milhões de hectares recuperados por ano, distribuídos uniformemente pelo país.

A espacialização dessas áreas foi realizada de forma em que as proporções das categorias foram distribuídas as nas áreas de pastagens de cada um dos mapas do modelo OTIMIZAGRO (2011-2022).

Abaixo, encontram-se os resultados encontrados para o ano de 2011 e de 2022.

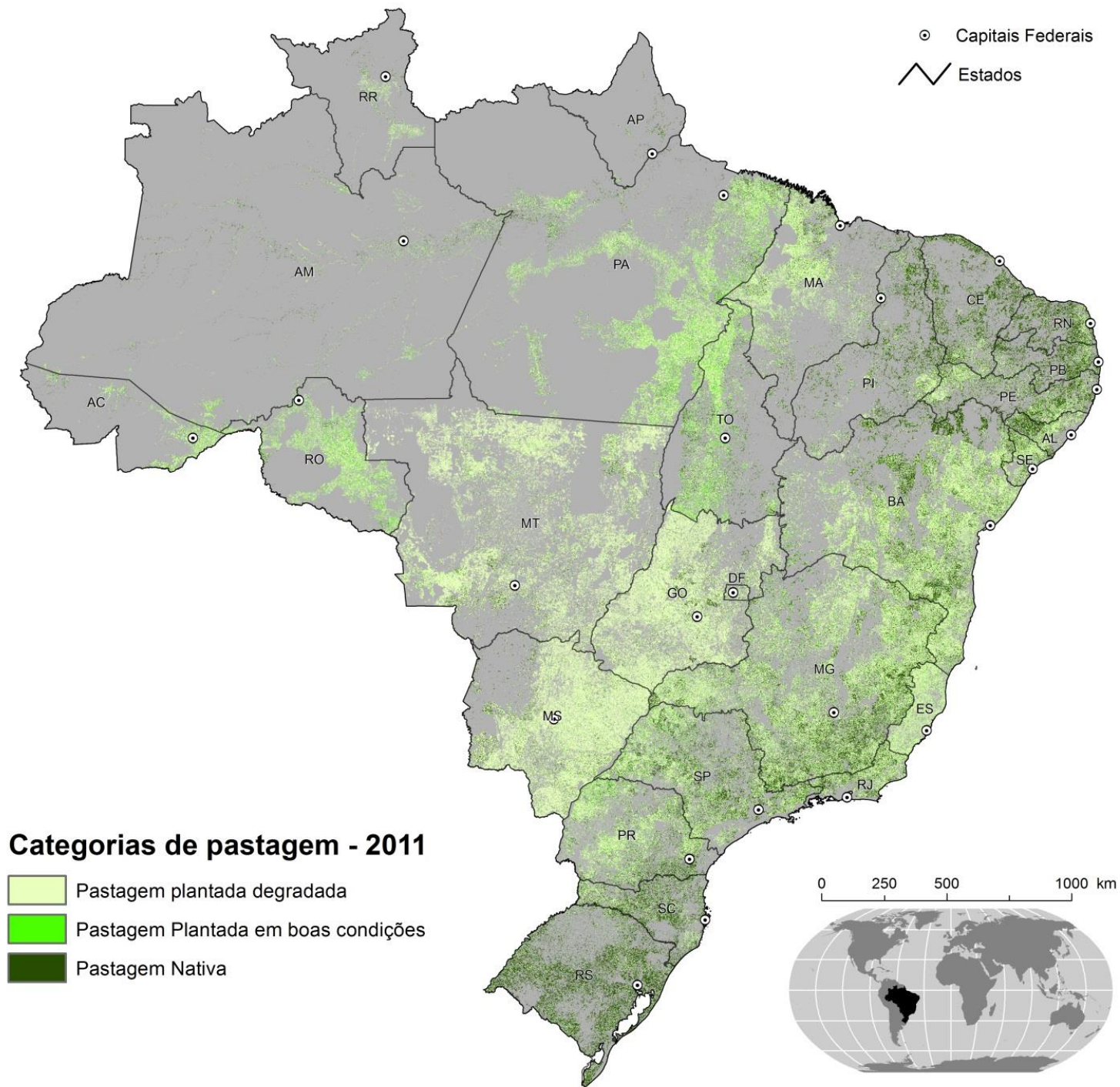


Figura A6- Distribuição espacial das subcategorias de pastagens no ano de 2011

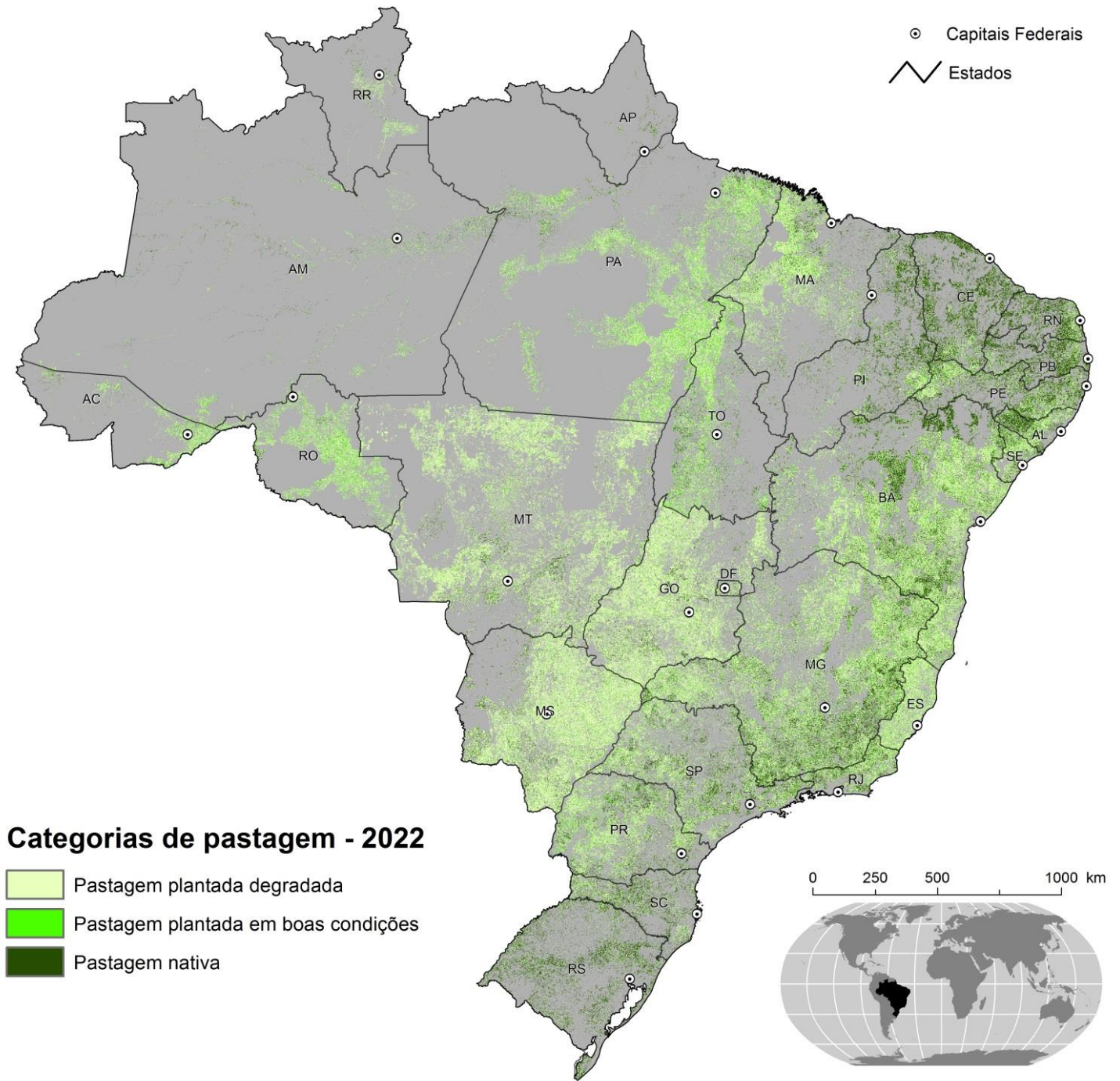


Figura A7- Distribuição espacial das subcategorias de pastagens no ano de 2022



## 2- Especialização das subcategorias de plantio anual

A categoria de plantio anual foi subdividida em duas subcategorias de acordo com o tipo de plantio: plantio convencional e plantio direto (PD). As informações referentes às áreas de plantio direto no Brasil têm duas fontes principais, o Censo Agropecuário de 2006 do IBGE e as informações da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha – FEBRAPDP. As informações do IBGE consistem na quantidade de área de PD por municípios apenas no ano de 2006. Já as informações da FEBRAPDP são agregadas para o país inteiro, mas contêm uma série histórica de 1972 a 2012 (Figura A8). Para a estimativa da evolução das áreas de plantio direto até o ano de 2022, essas informações foram combinadas com a projeção do governo federal de área de PD para o ano de 2020 de 32 milhões de hectares.

Para isso, primeiramente foi feita uma média dos dados do IBGE e da FEBRAPDP (com base em informações de especialistas de que os dados do IBGE poderiam estar subestimados e de que os dados da FEBRAPDP poderiam estar superestimados) da área total de PD para o Brasil no ano de 2006. Depois, a série histórica da FEBRAPDP foi retificada de acordo com esse valor. Em seguida, os dados dessa nova série histórica, de 1990 até 2012, junto com a projeção do governo em relação à área de PD em 2020, foram usados como dados de entrada para a projeção de um modelo logístico de expansão das áreas de PD até o ano de 2022. Este tipo de trajetória teve um bom ajuste e foi escolhido para representar a expansão de PD, já que segundo informações de especialistas as áreas relativas a esse tipo de plantio não devem crescer além dos incentivos governamentais (Gouvello *et al.*, 2010) (Figura A9).



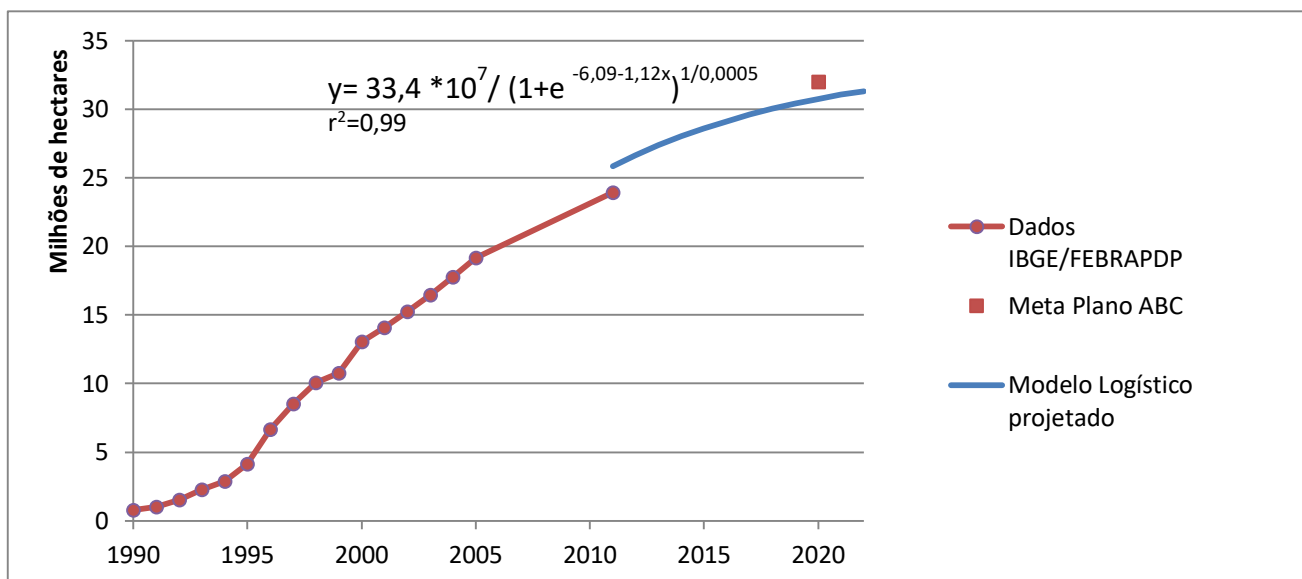


Figura A9- Dados de entrada, IBGE/FEBRAPDP e Meta do Plano ABC, e modelo logístico projetado que representa a evolução das áreas de PD até 2022

Finalmente, a quantidade de áreas de plantio direto de cada ano foi alocada espacialmente, seguindo as proporções de ocorrência dessas áreas em cada estado de acordo com os dados do Censo Agropecuário 2006. Dessa forma, devido à falta de informações mais atualizadas, adotou-se como pressuposto que essas proporções permaneceram as mesmas até o ano de 2011.

Dentro de cada estado, as áreas de plantio direto foram distribuídas segundo informações sobre a sua ocorrência dentre os cultivos estudados, sendo as áreas de trigo, soja, milho e feijão as que receberam as maiores probabilidades para alocação deste tipo de plantio, em ordem decrescente (FIDELIS *et al.*, 2003; CONAB, 2011; EMBRAPA, 2008).

Seguem abaixo as áreas de plantio direto e convencional nos anos de 2011 e 2022.

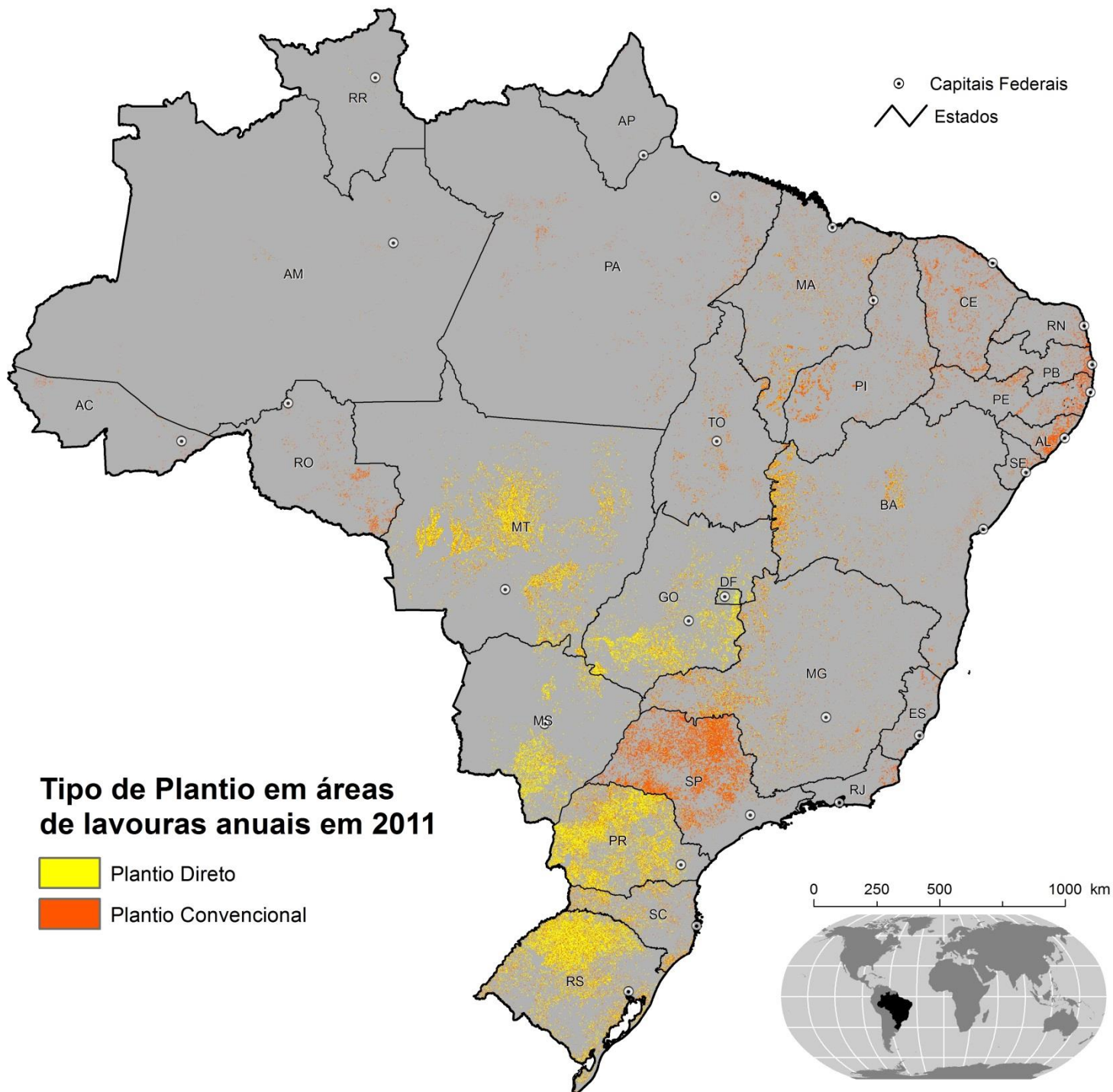


Figura A10- Distribuição espacial das subcategorias de lavouras anuais no ano de 2011

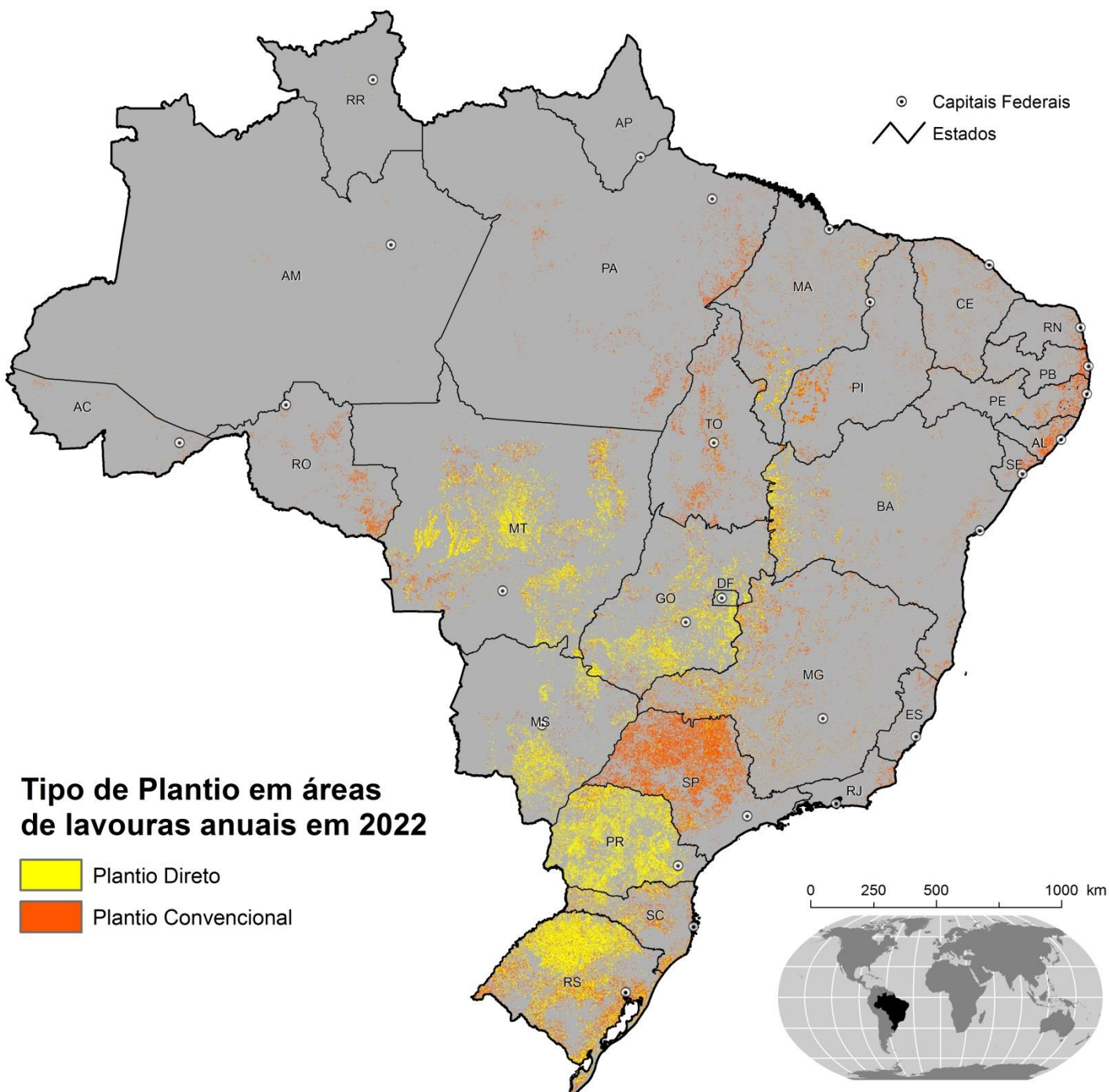


Figura A11- Distribuição espacial das subcategorias de lavouras anuais no ano de 2022

## REFERÊNCIAS – ANEXO METODOLÓGICO

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra Brasileira: grãos, sexto levantamento, março 2011. Brasília: Conab, 39p, 2011.

DIAS-FILHO, M.B.; ANDRADE, C.M.S. Pastagens no ecossistema do trópico úmido. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSSISTEMAS BRASILEIROS: Alternativas viáveis visando a sustentabilidade dos ecossistemas de produção de ruminantes nos diferentes ecossistemas, 2005, Goiânia, *Anais...*Goiânia: SBZ. p.95-104, 2005.

DIAS-FILHO, M.B. Degradação de pastagens: Processos, causas e estratégias de recuperação. Belém: Ed. do Autor, 4.ed, 215p, 2011.

FIDELIS, R.R. et al. Alguns aspectos do plantio direto para a cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.19, p.23-31, Jan.-Abr. 2003.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: IBGE, 777p, 2006.

PERON, A.J.; EVANGELISTA, A.R. Degradação de pastagens em regiões de cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, n.3, p.655-661, Maio-Jun. 2004.

GOUVELLO C., SOARES FILHO B.S., NASSAR A. Estudo de baixo carbono para o Brasil: Uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas. Relatório de Síntese Técnica. Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial, 292p, 2010.