

## POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SOJA ATÉ 2030

**Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia**

Fundação Getúlio Vargas

Janeiro, 2022

Camila Genaro Estevam

Cicero Zanetti de Lima

Eduardo de Moraes Pavão

Eduardo Delgado Assad

Talita Priscila Pinto

### 1. INTRODUÇÃO

O presente estudo tem por objetivo apresentar o potencial de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) da soja brasileira cultivada sob o plantio direto (PD) e sistema de plantio direto (SPD). Visa também mensurar o incremento de remoção de carbono resultante da introdução do componente florestal em lavouras de soja por meio da implementação de sistema integração-lavoura-floresta (ILF) em diferentes cenários para o Brasil até 2030, sendo eles: implementação de ILF em 10%, 20% e 30% da área total de soja ao final do período.

Para atingir esse objetivo, utilizou-se um **modelo de projeção e mitigação para diferentes ações de descarbonização da agropecuária**, considerando as projeções de produção e de área plantada de soja e diferentes cenários de adoção de sistemas ILF até o ano de 2030, prevendo-se um incremento na área de sistemas ILF.

A metodologia de cálculo foi baseada na estrutura metodológica dos protocolos para cálculos de inventários de emissões de GEE que vêm sendo desenvolvidos há quase duas décadas pelo *World Resources Institute* (WRI) em parceria com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD). Atualmente, as métricas estabelecidas pelo GHG Protocol são internacionalmente aceitas e utilizadas para o desenvolvimento de inventários corporativos, projetos e estudos relacionados a emissões e remoções de GEE.

Especificamente, em 2012 o WRI iniciou o Projeto GHG Protocol Agropecuário com novos recursos técnicos e desenvolver ferramentas para mensurar e gerir de forma mais efetiva as emissões agrícolas. Inicialmente o projeto gerou dois recursos técnicos, as Diretrizes Agrícolas Brasileiras (DAB) e a Ferramenta de Cálculo de Emissões e Remoções da Agropecuária.

As DAB consistem em um protocolo de contabilização de emissões das atividades agrícolas, pecuárias e de mudança de uso de solo. O protocolo propõe uma estrutura consistente e uniforme para o mapeamento e delimitação das fontes de emissões que devem ser incluídas no inventário de GEE de uma empresa do setor agrícola ou de uma unidade rural, assim como

uma forma de reporte dos dados de emissão destes inventários. A Ferramenta de Cálculo é um produto proveniente de uma parceria entre WRI, Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), que permite o cálculo das emissões de GEE utilizando fatores de emissões adequados para a realidade brasileira. Combinando estes recursos e utilizando dados atualizados de fatores de emissão derivados dos relatórios de referência da Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, foi possível calcular a trajetória de mitigação de emissões de GEE da cultura da soja por meio de modelagem de cenário considerando a adoção das estratégias citadas.

Esse trabalho faz parte das atividades do **Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia**<sup>1</sup>. A próxima seção deste documento faz, de forma breve, uma contextualização do panorama da produção de soja no Brasil e das tecnologias foco do estudo: plantio direto e sistema de plantio direto, fixação biológica de nitrogênio e sistemas de produção de integração lavoura-floresta. Na sequência é feita uma breve apresentação do método utilizado, seguida dos resultados do estudo.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO

O agronegócio desempenha um papel fundamental para a economia brasileira e concedeu ao Brasil um protagonismo global na produção e exportação de produtos agropecuários. O setor responde por 27% do Produto Interno Bruto<sup>2</sup> do país, 20% de todos os empregos e 48% das exportações<sup>3</sup>. Essa relevância econômica se apoia num cenário de crescimento setorial constante ao longo das últimas décadas.

A disponibilidade de terras agricultáveis e as condições climáticas, associadas à constante geração e adoção de tecnologias, possibilitou que o Brasil ocupasse papel de destaque na produção e comércio global de alimentos. Paralelo a esse crescimento, houve aumento da pressão sobre os recursos naturais, evidenciando a importância da sustentabilidade da agropecuária e da economia como um todo. Dessa forma, fez-se necessário a contínua busca por sistemas produtivos que sejam ao mesmo tempo mais eficientes e poupem recursos naturais.

Um dos grandes desafios relacionados ao crescimento econômico e setorial é o impacto ambiental das atividades agropecuárias e as mudanças climáticas. A agropecuária se destaca de forma dual: de um lado há a vulnerabilidade do setor a mudanças do clima e de outro tem-se as emissões de GEE geradas por seus processos de produção. Com isso, há a eminente preocupação em garantir o avanço sustentável dos sistemas produtivos agrícolas, necessário inclusive para a sobrevivência do próprio setor.

---

<sup>1</sup> <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>

<sup>2</sup> Disponível em: [www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx](http://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx)

<sup>3</sup> Disponível em: [www.indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm](http://www.indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm)

Dados da oitava edição do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)<sup>4</sup> indicam que o setor é responsável por 28% das emissões totais de GEE no país, ficando em segundo lugar atrás do setor de mudanças do uso da terra. No entanto, apesar de apresentar elevadas emissões, o setor é fundamental quando se trata de estratégias e políticas de mitigação.

O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), estabelece seis práticas que visam o desenvolvimento sustentável e com isso, a mitigação das emissões do setor. São elas: (i) recuperação de pastagens degradadas; (ii) integração lavoura pecuária floresta e suas variações; (iii) sistema de plantio direto; (iv) florestas plantadas; (v) tratamento de dejetos animais e (vi) fixação biológica de nitrogênio. O Plano ABC+ (Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária<sup>5</sup>) - novo ciclo do Plano ABC a ser executado de 2020 a 2030 - continua a promover a adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis (sps<sub>abc</sub>) citados anteriormente, com adição de metas relacionadas à (vii) bioinsumos (bi), (viii) sistemas irrigados (si) e (ix) terminação intensiva (ti).

Dentre as nove atividades indicadas pelo ABC+, destacam-se neste estudo, em relação ao potencial de mitigação de emissões relacionadas à cultura da soja, as seguintes tecnologias: Integração Lavoura-Floresta (ILF), Sistema de Plantio direto (SPD) e Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN).

## 2.1 PANORAMA DA PRODUÇÃO DE SOJA

A cultura da soja tem se mostrado cada vez mais importante tanto para a agricultura quanto para a economia brasileira. Os subprodutos da oleaginosa abastecem de forma ampla o mercado interno, seja com óleo utilizado em preparos alimentares, produção de biodiesel e com farelo para produção de ração para suínos e aves. Além disso, a *commodity* e seus subprodutos têm papel de destaque na pauta exportadora e projetam o Brasil no mercado externo.

A produção de soja cresceu 532,9% entre 1990 e 2020, enquanto a área plantada cresceu 229,0%. A diferença entre o crescimento da produção e área plantada reflete os ganhos de produtividade. Atualmente a produção de soja gira em torno de 3,3 toneladas por hectare (t/ha), 92,4% a mais do que os 1,7 t/ha produzidos em 1990. É a principal cultura agrícola brasileira e seu valor bruto da produção (VBP) atingiu R\$250,8 bilhões em 2020<sup>6</sup>, representando 42,0% do total do VBP agrícola e 28,0% dos R\$896,7 bilhões de toda a

---

<sup>4</sup> Disponível em: [www.seeg.eco.br/](http://www.seeg.eco.br/)

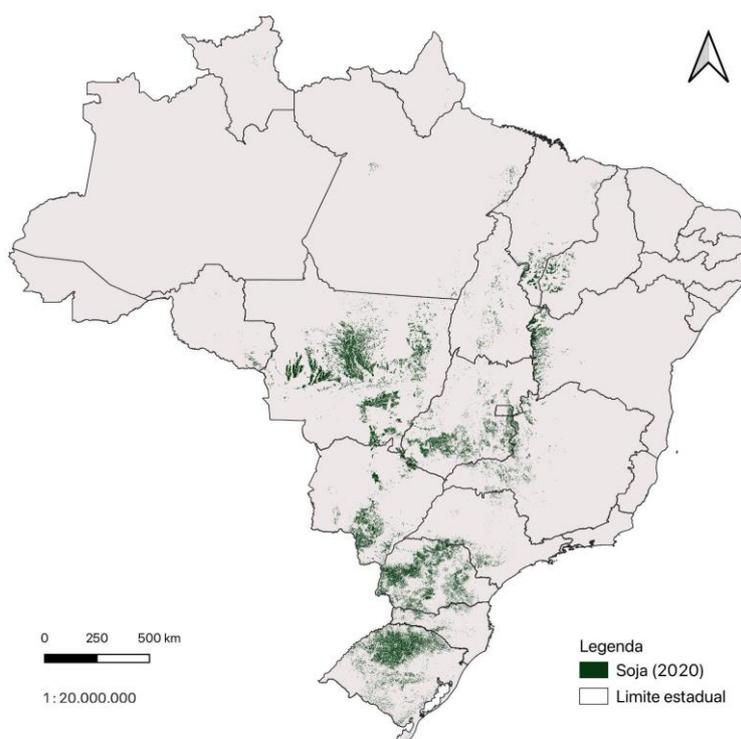
<sup>5</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/abc-portugues.pdf>

<sup>6</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/valor-bruto-da-producao-agropecuaria-vbp>

agropecuária nacional. Dados de 2021<sup>7</sup> mostram resultados ainda mais expressivos, com o VBP da soja estimado em R\$326,8 bilhões, que representaria 47,5% do total da agricultura e 32,6% do total da agropecuária. Vale ressaltar que se estima um valor recorde de R\$1.002,9 bilhões para o VBP da agropecuária em 2021.

A **Figura 1** mostra a distribuição espacial das lavouras de soja, identificadas pelo mapeamento do projeto Mapbiomas, para o ano de 2020.

**Figura 1. Distribuição espacial das lavouras de soja no Brasil em 2020.**



Fonte: Projeto Mapbiomas, 2020.

A evolução da produção permitiu que a soja se tornasse o produto mais exportado na pauta comercial brasileira. Em 2020 o Complexo da Soja respondeu por 35,0% dos US\$100,7 bilhões<sup>8</sup> exportados pelo agronegócio, atingindo a marca de US\$35,2 bilhões. Dados mais recentes mostram que até novembro de 2021 os valores da exportação de soja superam todo o ano anterior, atingindo US\$45,8 bilhões. A oleaginosa tem como principal destino a China, que importa aproximadamente 60,0% de todo o valor exportado pelo Brasil. Além da China, a soja brasileira chegou a outros 115 países em 2020 e a, pelo menos, outros 104 em 2021<sup>9</sup>.

<sup>7</sup> Dados levantados na primeira quinzena de novembro de 2021.

<sup>8</sup> Disponível em: [www.indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm](http://www.indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm)

<sup>9</sup> Dados referentes até novembro de 2021.

## 2.2 PLANTIO DIRETO (PD) E SISTEMA DE PLANTIO DIRETO (SPD)

O plantio direto (PD) é uma técnica de cultivo conservacionista em que o plantio é efetuado sem as etapas de aração e gradagem, consistindo na mobilização de solo apenas na linha ou cova de semeadura. As suas principais técnicas são, portanto, ausência ou mínimo revolvimento no solo; cobertura do solo com palhada e rotação de culturas. Práticas agrícolas como o PD viabilizam a exploração de agrossistemas produtivos, com uso reduzido de defensivos agrícolas. O PD é utilizado no Brasil desde a década de 1970 com bons resultados (CRUZ, 2008).

Apesar do desempenho favorável, o PD apresentou limitações, principalmente relacionadas à não-diversificação de culturas, comprometendo a produção e incremento de matéria orgânica no sistema, condição necessária para o êxito da prática. Com isso a tecnologia passou por adaptações que culminaram no Sistema de plantio direto (SPD), que tem como premissa técnica obrigatória a diversificação de culturas (DENADIN, 2012).

Observa-se que em grande parte das lavouras o PD ainda não tem sido manejado de forma adequada. Dentre os problemas gerados estão a compactação do solo, que afeta o desenvolvimento de raízes e os fluxos de água no solo, além de prejuízos econômicos e ambientais causados pela erosão<sup>10</sup>. A **Figura 2** apresenta as diferenças observadas na lavoura de soja sob PD e sob SPD.

---

<sup>10</sup> Disponível em: <https://www.embrapa.br/trigo/videos/spd>

**Figura 2. Diferença entre a adoção de plantio direto e sistema de plantio direto na lavoura de soja.**



Fonte: Embrapa - Programa Soja Carbono Neutro, 2021.

A adoção do SPD proporciona um aprofundamento do sistema radicular da soja e contribui para o aumento da matéria orgânica e dos estoques de carbono do solo (**Figura 3**) (NEPOMUCENO, 2021; FUENTES-LLANILLO, 2021). Além disso, também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis utilizados no maquinário agrícola devido à redução da quantidade de operações mecanizadas. O SPD também reduz custos de produção e os níveis de riscos relacionados à vulnerabilidade climática. É considerado, portanto, um sistema de produção cujas características e benefícios são aderentes aos preceitos de sustentabilidade da produção agrícola (NEPOMUCENO, 2021).

Figura 3. Solo de lavoura com SPD.



Fonte: Embrapa - Programa Soja Carbono Neutro, 2021.

Desse modo, além de integrar práticas de manejo que promovem a produção agrícola sustentável, o SPD proporciona maior resiliência produtiva e rentabilidade ao produtor rural, configurando-se como estratégia relevante para o planejamento estratégico de políticas públicas relacionadas ao agronegócio do país.

### **2.3 FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO (FBN)**

O nitrogênio (N) é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura da soja, pois os grãos são muito ricos em proteínas, apresentando um teor médio de 6,5% N (Hungria, 2001). As fontes de fornecimento desse nutriente são provenientes do solo, fixação não-biológica resultante de descargas elétricas, de combustão e de vulcanismo, fertilizantes nitrogenados e fixação biológica do nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) (Hungria et al., 2001).

O nitrogênio proveniente da matéria orgânica (MO) do solo é limitado, podendo ser esgotado rapidamente após alguns cultivos. Além disso, as condições climáticas brasileiras aceleram os processos de decomposição da MO, causando perdas desse nutriente. A fixação não-biológica independe de microrganismos, ocorre em taxas muito variáveis e se dá em taxas relativamente muito pequenas.

A adubação nitrogenada representa uma forma eficiente e rápida de assimilação pelas plantas, porém a um elevado custo financeiro e impacto ambiental. Isso ocorre uma vez que

a produção desses fertilizantes depende de fontes não renováveis (derivados de petróleo), com emissões de GEE. Além disso, a aplicação de adubos nitrogenados nas lavouras provoca emissões de gás carbônico e óxido nitroso na atmosfera. Ademais, a aplicação incorreta de fertilizantes pode ocasionar a contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo em que a planta adquire o nitrogênio (N) através de uma associação com bactérias presentes nas raízes que fixam o  $N_2$  presente na atmosfera, transformando-o em amônia ( $NH_3$ ) e posteriormente em amônio ( $NH_4^+$ ) ou nitrato ( $NO_3^-$ ), formas assimiláveis pelas plantas. Essa técnica de fornecimento de N via utilização de microrganismos é mais barata que o fornecimento de adubos nitrogenados, além de contribuir para a sustentabilidade do sistema agrícola, já que não acarreta contaminações ou emissões de GEE (HUNGRIA, 2001; CÂMARA, 2014).

A FBN, atualmente potencializada pela utilização de inoculantes, é uma grande vantagem competitiva da soja brasileira. A elevada eficiência da fixação de nitrogênio dispensa a utilização de adubos nitrogenados, eliminando essa fonte de emissão de GEE. Além disso, segundo o programa Soja de Baixo Carbono<sup>11</sup>, o processo de fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja traz uma economia aproximada de US\$ 14 bilhões por safra ao país e evita a emissão de cerca de 68 milhões de toneladas de  $CO_2eq^{12}$  (Mt  $CO_2eq$ ).

Por fim, áreas com adoção de plantio direto aumentam a eficiência da FBN, uma vez que a prática de cobertura do solo protege a biomassa microbiana e os microrganismos de importância agrícola, como as bactérias fixadoras de  $N_2$  no solo.

#### **2.4. SISTEMA DE INTEGRAÇÃO-LAVOURA-FLORESTA (ILF)**

Os sistemas integrados de produção possibilitam a diversificação da produção, reduzindo os riscos da atividade agrícola relacionados ao clima e a variação de preços de mercado. Além disso, esses sistemas podem atuar como sumidouros de carbono atmosférico. No caso da integração lavoura-floresta (ILF), o sistema produtivo é composto pela combinação de agricultura e produção madeireira na mesma área, de forma que o balanço entre competição por luz e nutrientes seja otimizado entre as culturas, gerando o máximo de rentabilidade ao produtor e prestando serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono atmosférico.

Portanto, uma vez que o ILF apresenta o componente lavoura e floresta tem potencial de contribuir para a retenção de carbono no solo e na biomassa, bem como para a redução de emissões de GEE. Adicionalmente, em sistemas integrados parte do  $CO_2$  removido poderá contribuir para o balanço de GEE de outros setores além da agricultura, se a madeira for comercializada por exemplo para o mercado de móveis ou para a geração de energia.

---

<sup>11</sup> Disponível em: [contato.cbsoja.com.br/soja-baixo-carbono](http://contato.cbsoja.com.br/soja-baixo-carbono)

<sup>12</sup> Resultado da pesquisa

Este sistema promove benefícios para o solo e plantas, tais como a conservação do carbono orgânico, melhoria da estrutura do solo, aumento da infiltração da água e maior retenção e ciclagem de nutrientes, reduzindo as perdas por lixiviação e indisponibilidade de nutrientes para as plantas (Bungenstab et al. 2014).

### 3. METODOLOGIA

Para a avaliação do potencial de mitigação de emissões de GEE da produção de soja, foi desenvolvido um modelo de projeção visando o cálculo do potencial de mitigação das emissões sob sistema de plantio direto, bem como produção integrada em sistema ILF.

A metodologia de cálculo e de fatores de emissões utilizados seguem os relatórios técnicos de referência do GHG Protocol agropecuário. Os fatores de emissão consideram as emissões da aplicação de insumos, emissões dos resíduos da lavoura, da queima de combustíveis fósseis e de biodiesel oriundos das operações mecanizadas, bem como as remoções do componente florestal e do SPD. Adicionalmente, o modelo considera a heterogeneidade espacial da expansão da produção de soja nos diferentes biomas do Brasil.

Foram consideradas as emissões em quatro grandes grupos **insumos, resíduos, operações mecanizadas, remoções** (ILF, PD e SPD) e **balanço do sistema**. No grupo de insumos, considerou-se apenas o uso de calcário para adubação pois o estudo parte da premissa que toda produção nacional de soja utiliza a tecnologia de FBN para captação de N, dispensando o uso do fertilizante nitrogenado sintético.

As premissas consideradas no modelo para a projeção da produção de soja e da mitigação nas ações previstas para a descarbonização da cultura de soja estão descritas no **Quadro 1**. O Apêndice contém informações detalhadas sobre o modelo e as projeções realizadas.

**Quadro 1. Premissas assumidas para modelagem do potencial de mitigação de gases de efeito estufa visando a descarbonização da soja até 2030.**

Variável	Valor	Fonte
Área de soja (hectares)	37.201.992 <sup>1</sup>	PAM-IBGE, 2021
Produção (milhões toneladas)	121,8 <sup>1</sup>	
Taxa de crescimento da área plantada (% a.a.) <sup>2</sup>	2,4	FIESP
Taxa de crescimento da produtividade (% a.a.)	1,7	
Taxa de crescimento da produção implícita (% a.a.)	4,0	Dados da pesquisa
Área com SPD <sup>3</sup> (hectares)	3.000.000	
Taxa de crescimento da área sob SPD	6,9	
Componente florestal: floresta de eucalipto (plantas/ha)	400	Premissa do estudo baseada no conhecimento dos autores e em conversas com especialistas
Ciclo (anos)	7	
Aplicação de ureia para o eucalipto (kg/ha)	10	ESALQ

<sup>1</sup> Dados para 2020 em nível municipal; <sup>2</sup> % a.a. = porcentagem ao ano; <sup>3</sup> SPD = sistema de plantio direto; <sup>4</sup> Gonçalves, 1995.

A estratégia adotada para mensurar o potencial de mitigação de GEE da produção de soja foi a construção de cenários que consideram a aceleração da taxa de implementação de SPD e ampliação da área de produção de soja em sistemas de produção de integração lavoura-floresta (ILF). Foram definidos os seguintes cenários, todos assumindo uma aceleração do sistema SPD chegando a 6 Mha em 2030:

- (i) **Cenário 10%:** considerou-se que 10% da área total da produção de soja em cada ano ocorrerá em sistemas ILF, com eucalipto como componente florestal;
- (ii) **Cenário 20%:** considerou-se que 20% da área total da produção de soja em cada ano ocorrerá em sistemas ILF, com eucalipto como componente florestal;
- (iii) **Cenário 30%:** considera-se que 30% da área total da produção de soja em cada ano ocorrerá em sistemas ILF, com eucalipto como componente florestal.

Uma vez que o objetivo principal do estudo é mensurar o potencial de mitigação da produção de soja, os cenários são semelhantes entre si e suficientemente simples para facilitar a análise e comparação dos resultados.

#### 4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados encontrados neste estudo. O ponto de partida foi mapear, segundo dados da Pesquisa Agrícola Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (PAM-IBGE), as variáveis de área, produção e produtividade em nível municipal da produção de soja. Em seguida, realizou-se a projeção dessas variáveis, atingindo uma produção de 176,3 Mt em 2030 em uma área plantada de 47,3 Mha o que representa uma produtividade média de 3,6 t/ha. Por fim, foram considerados os cenários de adoção de sistemas integrados (ILF) em 10%, 20% e 30% da área plantada de soja até 2030.

##### 4.1. PRODUÇÃO DE SOJA

Segundo dados do IBGE<sup>13</sup>, no período de 1990 a 2020 a área plantada de soja foi ampliada em 229,0%, saltando de 11,6 Mha para 37,2 Mha. Já os dados entre 2010 e 2020, apontam um crescimento de 59,4% na área plantada. A projeção do modelo utilizado neste relatório indica um crescimento de 10,1 Mha na área plantada de soja até 2030, fazendo com que a área total atinja 47,3 Mha, ou seja, um crescimento de 27,1% comparado a 2020.

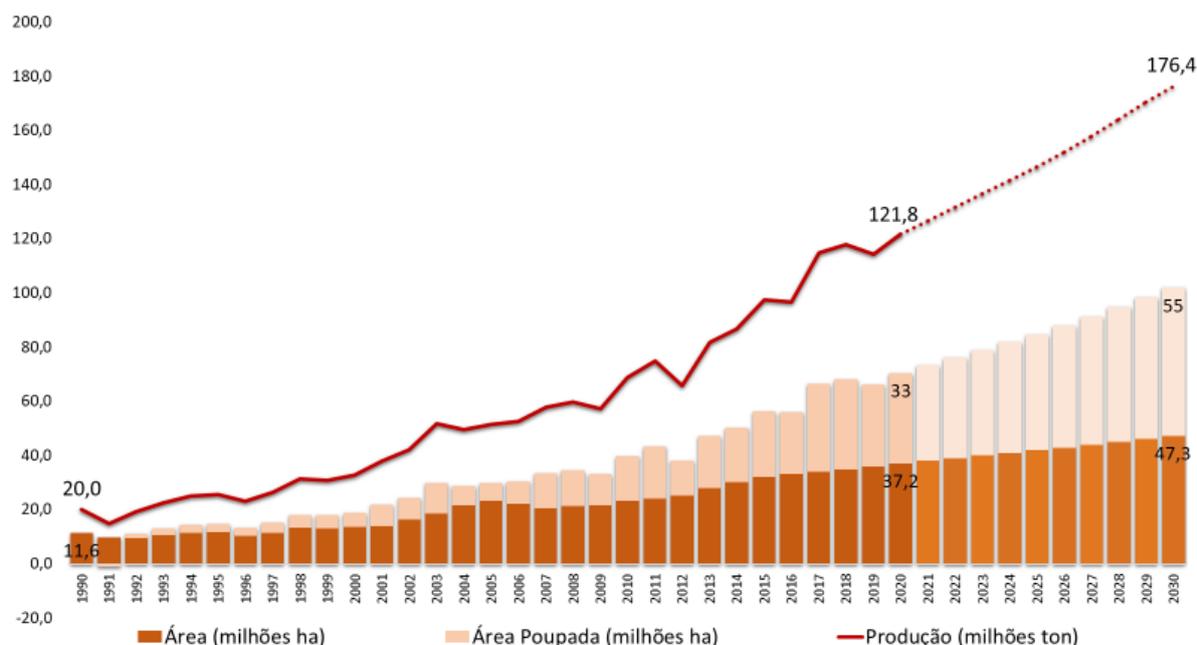
Quando se considera o volume de produção, entre 1990 e 2020, a produção teve expansão de 532,9%, saltando de 20 Mt em 1990 para 121,8 milhões em 2020. Como ilustração, se em 2020 o Brasil mantivesse a produtividade observada em 1990, seria necessário um incremento de 35,2 Mha para manter o nível atual de produção. Em outras palavras, os ganhos observados em produtividade permitiram que 35,2 Mha fossem poupados e liberados para outros usos, conforme mostra o **Gráfico 1**.

As projeções realizadas até 2030 mostram que a produção de soja atingiria 176,4 Mt, utilizando uma área de 47,3 Mha e uma produtividade média de 3,7 t/ha. Com essa produtividade o Brasil pouparia 20 Mha, quando comparado aos níveis de 2020 e 55 Mha se comparado aos níveis de 1990.

---

<sup>13</sup> Disponível em: [www.sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas](http://www.sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas)

**Gráfico 1. Projeção da Área Plantada e da Produção de Soja entre 2020 e 2030.**



O modelo considera que haverá uma aceleração da produção em direção a região Norte do país e na região conhecida como MATOPIBA - nova fronteira agrícola do Cerrado brasileiro. Dos **176,4 Mt** produzidos em 2030, **42,0 Mt** estariam no Norte e **18,9 Mt** no MATOPIBA. Juntas essas duas regiões responderiam por 34,5% de toda a soja produzida no Brasil, conforme **Tabela 1** e **Figura 4**. Ainda assim, regiões tradicionais como o Centro Oeste e o Sul do país representariam a maior parte da produção de soja, respectivamente **62,7 Mt** e **31,0 Mt**, equivalentes a 53,2% de toda a produção nacional.

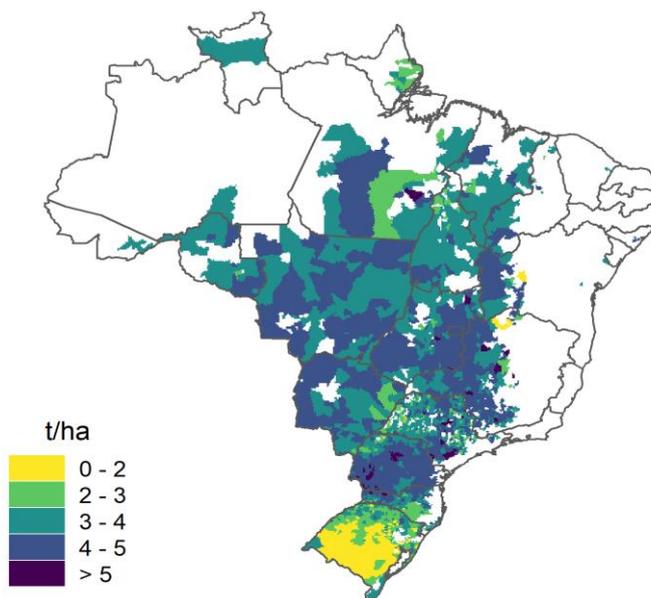
**Tabela 1. Produção, produtividade e área de soja em 2020 e 2030**

Região	2020			2030		
	Produção (Mt)	Produtividade (t/ha)	Área (mil ha)	Produção (Mt)	Produtividade (t/ha)	Área (mil ha)
Norte	3,5	3,2	1.112,0	42,0	3,5	11.862,7
MATOPIBA	14,6	3,4	4.303,8	18,9	3,8	4.843,6
Centro-Oeste	59,1	3,5	16.759,9	62,7	4,1	15.134,7
Sul	34,4	2,7	12.196,0	31,0	2,7	10.394,6
Sudeste	10,1	3,5	2.828,7	21,8	4,2	5.071,3
Nordeste	0,006	3,5	1,7	0,01	4,1	2,4
<b>BRASIL</b>	<b>121.8</b>	<b>3,2</b>	<b>37.202,0</b>	<b>176.4</b>	<b>3,6</b>	<b>47.309,3</b>

Ao final do período, o Brasil atingiria uma produtividade média de **3,6 t/ha** em 2030, variando entre **4,2 t/ha** na região Sudeste, melhor performance produtiva, e **2,7 t/ha** na região Sul, região de mais baixa produtividade. O estado do Rio Grande do Sul se destaca por concentrar municípios com baixas produtividades quando comparados com os demais municípios produtores do país. A produtividade reflete diretamente no índice de intensidade de emissão de GEE, que será discutido neste relatório. A **Figura 4** apresenta a distribuição espacial da produtividade por município no ano de 2030.

**Figura 4. Distribuição Espacial da Produtividade da Soja por Município em 2030.****Produtividade da Soja**

2030



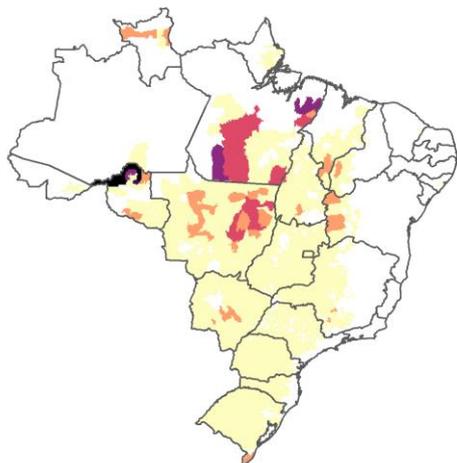
A distribuição espacial da produção de soja sob diferentes sistemas - PD e SPD - é apresentada na **Figura 5**. A ampliação da adoção do SPD é fundamental para aumentar a sustentabilidade da produção de soja, uma vez que as lavouras sob SPD apresentam produtividades mais elevadas devido às características de qualidade superiores quando comparadas ao PD. Em 2030, projeta-se um aumento da adoção do SPD nos municípios com altos índices de produtividade, como pode ser observado no oeste do Paraná e da Bahia, e em diversos municípios da região Centro-Oeste<sup>14</sup>. Contudo, o avanço da produção de soja sob SPD é dependente da migração de áreas em PD para um regime de alta qualidade do plantio direto. Como pode ser observado, a produção sob PD é amplamente utilizada na cultura de soja com destaque para o estado do Mato Grosso, sul do Pará e oeste da Bahia. Portanto, são essas regiões e municípios que apresentam grande potencial para uma migração entre sistemas de plantio direto, ou seja, aumentar a qualidade tecnológica em níveis elevados de produção.

<sup>14</sup> Para mais detalhes do mapeamento dos municípios sob SPD ver apêndice metodológico.

**Figura 5. Distribuição Espacial da Produção de Soja em 2030.**

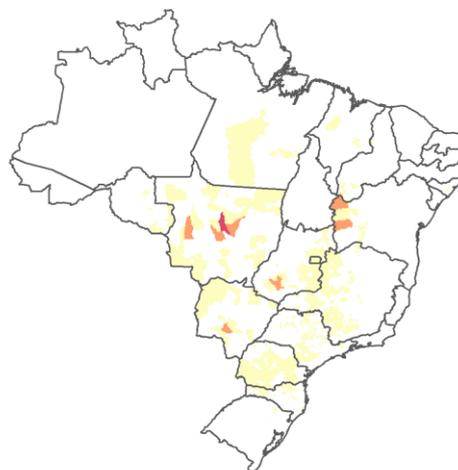
**Produção de Soja**

Plantio direto - 2030

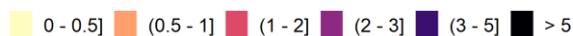


**Produção de Soja**

Sistema Plantio Direto - 2030



Milhões toneladas



## 4.2. POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE GEE

### 4.2.1. EMISSÕES DA PRODUÇÃO DE SOJA

O **Gráfico 2** apresenta as emissões de GEE anuais, por fonte de emissão, para a produção de soja até 2030. As principais fontes de emissões são provenientes da aplicação de insumos (calcário) e da decomposição dos resíduos da lavoura, que representam 78% e 21% das emissões do sistema, respectivamente. Já as emissões oriundas das operações mecanizadas representam apenas 1% das emissões em 2030.

**Gráfico 2. Emissões Anuais de GEE, por Fonte de Emissão, para a Produção de Soja até 2030, em Plantio Direto (PD) e em Sistema de Plantio Direto (SPD).**

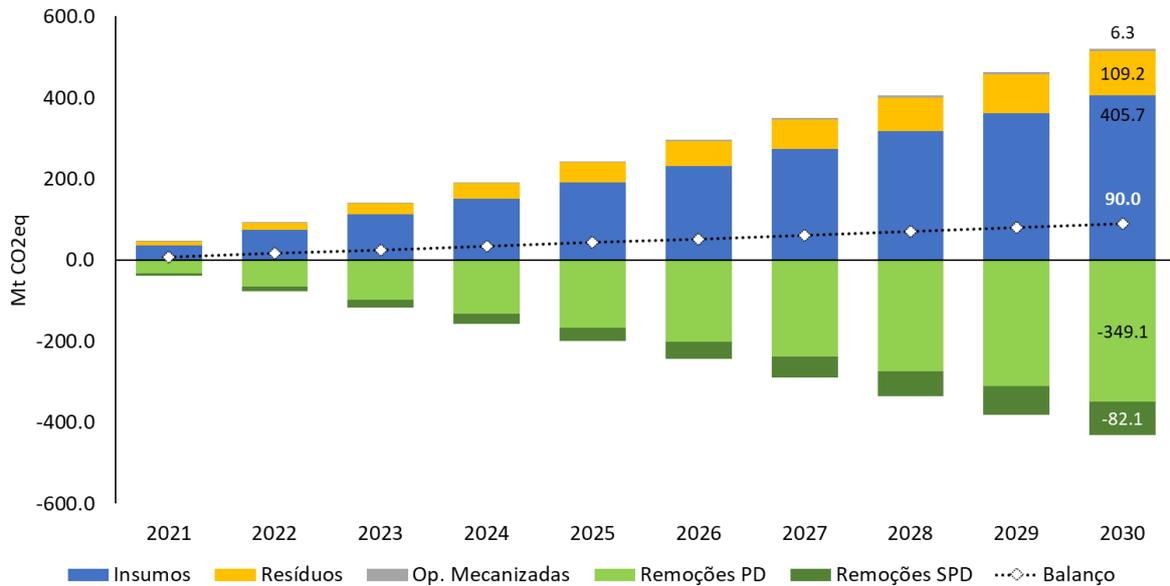


O **Gráfico 3** apresenta as emissões de GEE acumuladas ano a ano por fonte de emissão para a produção de soja até 2030. As categorias insumos e resíduos representam 405,7 e 109,2 Mt CO<sub>2</sub>eq, respectivamente, totalizando uma emissão acumulada de **514,9 Mt CO<sub>2</sub>eq** em 2030. Já as operações mecanizadas totalizam apenas **6,3 Mt CO<sub>2</sub>eq** para o mesmo período.

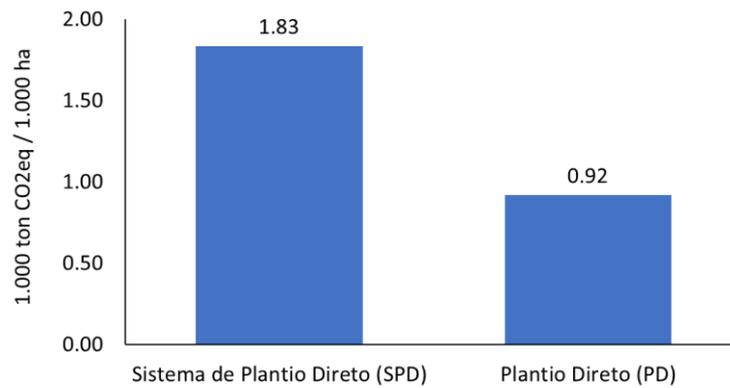
O potencial de remoção de emissões da produção de soja, ou seja, a capacidade da produção em acumular carbono no solo, **depende diretamente da qualidade do plantio direto** aplicado à produção. As remoções acumuladas de GEE oriundas do PD (baixa qualidade) atingem **349,1 Mt CO<sub>2</sub>eq** em 2030, enquanto as remoções do SPD (alta qualidade) chegam a **82,1 Mt CO<sub>2</sub>eq**. Entretanto, o potencial de acúmulo de carbono no solo da tecnologia de SPD é superior à de técnicas tradicionais de PD. O **Gráfico 4** mostra que a capacidade de remoção da tecnologia SPD é de 1,83 mil tCO<sub>2</sub>eq / 1.000 ha de soja, enquanto para a tecnologia PD é de apenas 0,92 mil tCO<sub>2</sub>eq / 1.000 ha. Naturalmente, esses resultados estão conectados ao tamanho da área sob cada sistema. As projeções consideram que apenas **6 Mha**, do total de **47,3 Mha**, utilizariam a tecnologia de SPD em 2030, portanto as remoções do sistema SPD ainda seriam menores do que as remoções do sistema PD, porém com um grande potencial de crescimento da primeira tecnologia.

Assim, o balanço final das emissões da produção de soja é positivo em cerca de **90 Mt CO<sub>2</sub>eq** acumuladas em 2030, como indicado na **Tabela 2**. O sinal do balanço das emissões do sistema de produção da soja poderia se inverter caso houvesse uma aceleração da adoção do SPD em diferentes regiões do país, passando de uma “soja baixo carbono” para uma produção carbono neutro já em 2030.

**Gráfico 3. Emissões Acumuladas de GEE, por Fonte de Emissão, para a Produção de Soja até 2030, em Plantio Direto (PD) e em Sistema de Plantio Direto (SPD).**



**Gráfico 4. Capacidade de remoção de carbono das tecnologias SPD e PD a cada 1.000 ha.**



**Tabela 2. Emissões, Remoções e Balanço Acumulado de GEE até 2030, por Fonte de Emissão, nas Diferentes Regiões do Brasil.**

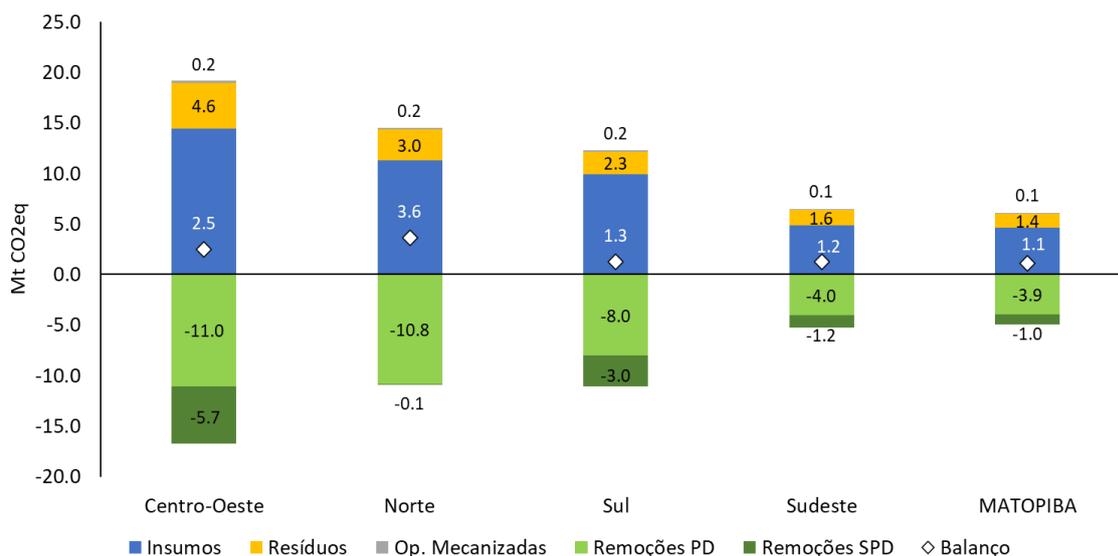
Região	Emissões (Mt CO <sub>2</sub> eq)			Remoções (Mt CO <sub>2</sub> eq)		Balanço (Mt CO <sub>2</sub> eq)
	Insumos	Mecanização	Resíduos	PD	SPD	
Norte	44.0	0.7	11.5	-41.9	-0.8	13.5
MATOPIBA	45.5	0.7	12.7	-40.1	-7.3	11.5
Centro-Oeste	158.8	2.4	46.5	-131.5	-42.4	33.9
Sul	117.2	1.8	26.2	-101.4	-22.6	21.2
Sudeste	40.2	0.6	12.2	-34.2	-9.1	9.9
Nordeste	0.02	0.00	0.01	-0.02	-0.01	0.01
<b>Brasil</b>	<b>405.7</b>	<b>6.3</b>	<b>109.2</b>	<b>-349.1</b>	<b>-82.1</b>	<b>90.0</b>

#### 4.2.2. DISTRIBUIÇÃO REGIONAL DAS EMISSÕES EM 2030

O **Gráfico 5** apresenta as emissões da produção de soja por grande região no Brasil em 2030. As regiões Centro-Oeste, Norte e Sul concentram cerca de 75% do balanço das emissões. O saldo das emissões chega a **3,6 Mt CO<sub>2</sub>eq** na região Norte, enquanto no Centro-Oeste **2,5 Mt CO<sub>2</sub>eq** e **1,3 Mt CO<sub>2</sub>eq** na região Sul. Vale destacar que o modelo considera uma aceleração da expansão da produção de soja nas regiões Norte e MATOPIBA relativamente às demais regiões, aumentando as emissões dessas regiões no período.

Adicionalmente, a expansão do sistema SPD nas regiões mais produtivas do país, como Centro-Oeste e Sul (Estado do Paraná), aumenta consideravelmente a capacidade de remoção de carbono nessas regiões. No Centro-Oeste as remoções do SPD chegam a **5,7 Mt CO<sub>2</sub>eq**, cerca de 34% das remoções da região (16,7 Mt CO<sub>2</sub>eq). Já no Sul, esse valor é de **3 Mt CO<sub>2</sub>eq**, o que representa cerca de 27% das remoções (11 Mt CO<sub>2</sub>eq).

**Gráfico 5. Emissões da Produção de Soja por Região e por Fonte de Emissão em 2030, em Plantio Direto (PD) e em Sistema de Plantio Direto (SPD).**



#### 4.2.3. INTENSIDADE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (IEGEE)

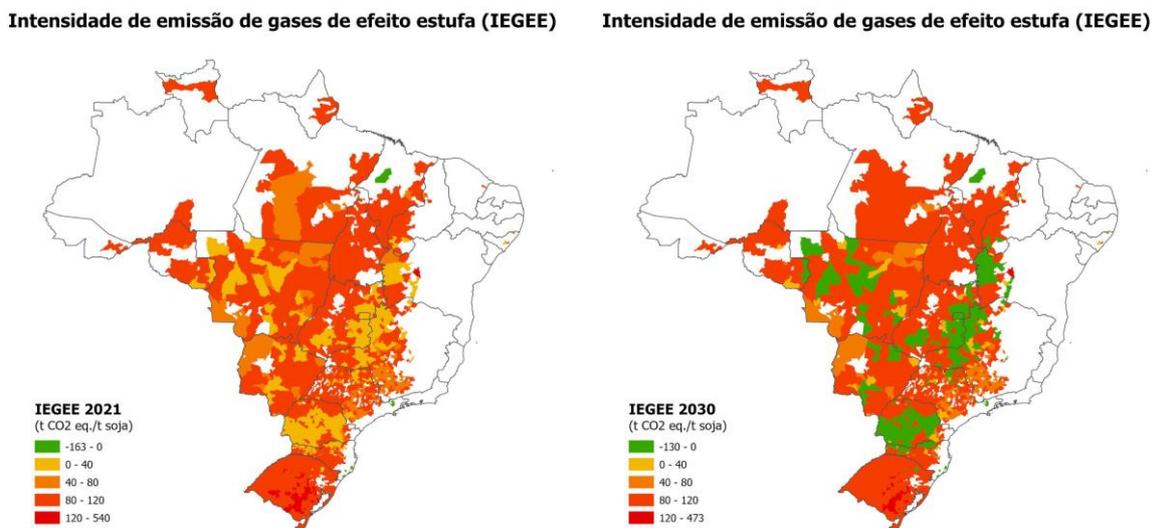
A intensidade de emissões de gases de efeito estufa expressa a quantidade de GEE emitidos para produzir uma tonelada de soja. O IEGEE leva em consideração o balanço de emissões e remoções da lavoura (BAYER, 2014). Portanto, o indicador considera as quantidades de CO<sub>2</sub>eq emitidas e fixadas no sistema, sendo um indicativo da eficiência produtiva relacionada às emissões de GEE da produção. Quanto menor o valor do indicador mais eficiente é a produção em termos de emissões de GEE por tonelada produzida. O indicador pode assumir valores menores do que zero (negativos) quando o valor das remoções de CO<sub>2</sub>eq da lavoura é maior do que o valor das emissões.

A **Figura 6** ilustra a distribuição do IEGEE, calculado para cada município para os anos de 2021 e 2030. Destaca-se que há semelhança no padrão de distribuição espacial do IEGEE com a distribuição da produtividade, ou seja, os municípios com menores produtividades, em geral, são os municípios que apresentam os maiores valores de intensidade de emissões. Por exemplo, diversas áreas de produção no Rio Grande do Sul apresentam baixa produtividade em 2021, consequentemente o indicador IEGEE é superior a 100t de CO<sub>2</sub>eq por cada tonelada de soja produzida nessas áreas. Já em regiões com alta produtividade, por exemplo, oeste do Paraná, o indicador IEGEE é baixo atingindo no máximo 40t CO<sub>2</sub>eq/t soja.

Em 2030, destaca-se o surgimento de diversos municípios em diferentes regiões do Brasil com indicador IEGEE negativo, ou seja, essas áreas conciliam produção de soja com sequestro de carbono da atmosfera. Em grande medida, esse resultado é oriundo da conversão de PD para SPD no qual o aumento de matéria orgânica no solo faz com que o sistema de produção seja um sumidouro de carbono da atmosfera. Como consequência, reduz-se a necessidade de

intervenções na lavoura e uso de maquinário, reduzindo o balanço total das emissões de GEE, adicionalmente com uma maior produção por hectare.

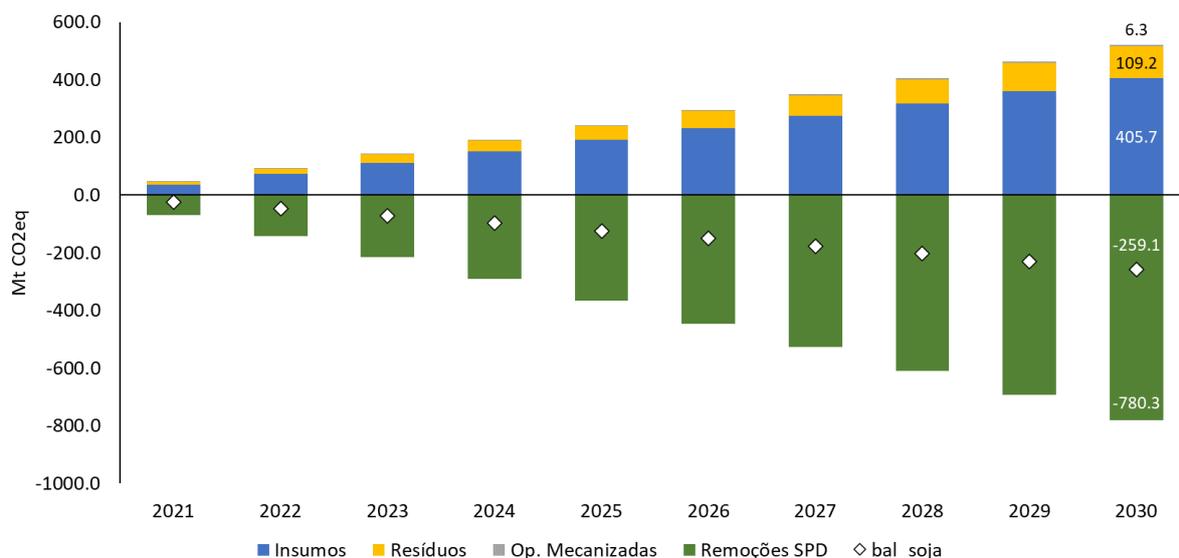
**Figura 6. Distribuição Espacial da Intensidade de Emissões de Gases de Efeito Estufa (IEGEE) para os Anos de 2021 e 2030.**



#### 4.2.4. SOJA INTEGRADA: A INVERSÃO DO SINAL DAS EMISSÕES

Atualmente a produção de soja utiliza em larga escala a tecnologia de PD, que apresenta deficiências quando comparada ao SPD. Com isso a cultura tem emitido GEE ao longo dos anos. As emissões são derivadas, principalmente, da aplicação de calcário no solo e da decomposição dos resíduos da lavoura. Estima-se que o PD seja aplicado em mais de 90% da área total da cultura da soja e que nos 10% restantes haja a aplicação do SPD (EMBRAPA, 2018). As projeções realizadas neste estudo mostram que entre 2021 e 2030, em um cenário com completa implementação do SPD, as remoções geradas por esse sistema possibilitarão a transformação de uma soja baixo-carbono em uma soja carbono-neutro. Em 2030, conforme **Gráfico 6**, a remoção acumulada pelo sistema SPD atingiria cerca de **780 Mt CO<sub>2</sub>eq**, com isso, o balanço das emissões do sistema seria de uma remoção líquida de **259 Mt CO<sub>2</sub>eq**.

**Gráfico 6. Emissões Acumuladas da Soja sob Sistema de Plantio Direto (SPD) entre 2021 e 2030.**

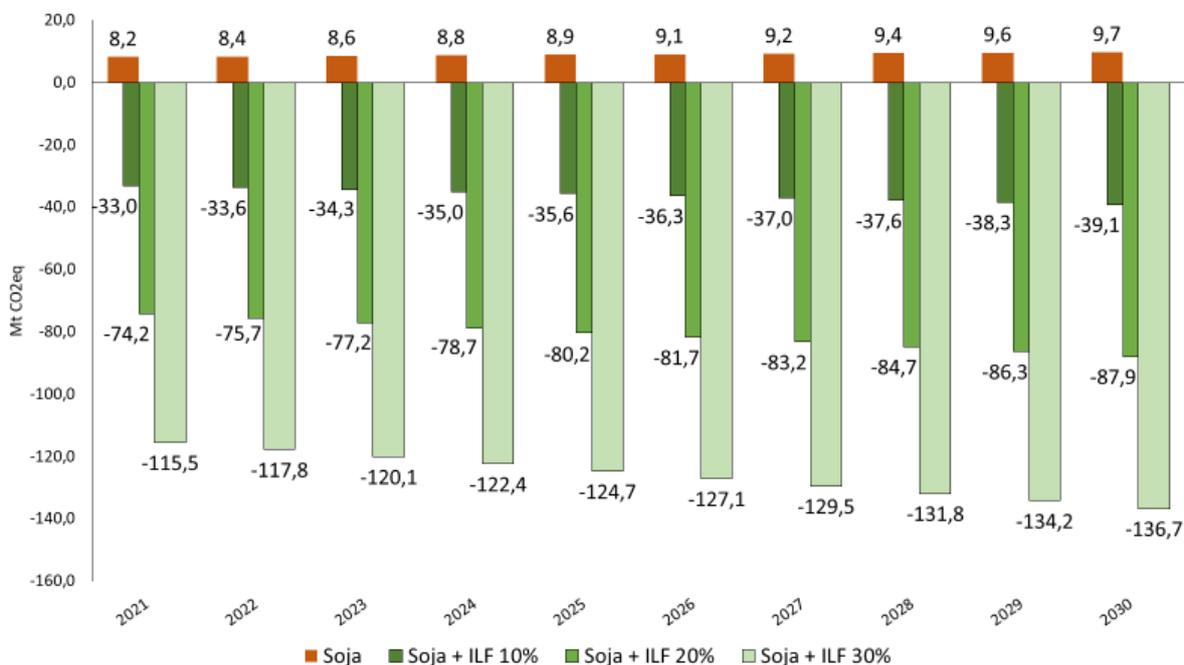


Nota: os resultados representam um cenário onde o SPD (alta qualidade) é amplamente adotado na produção de soja no Brasil. O fator de emissão utilizado considera uma remoção de 0,5 t C / ha nas áreas sob SPD.

O **Gráfico 7** apresenta o balanço das emissões quando se considera a soja como produção solteira e associada a um sistema integrado de produção - nesse caso integração Lavoura-Floresta (ILF). Como mencionado, os cenários de integração consideram diferentes níveis de adoção do ILF nas lavouras de soja - 10%, 20% e 30% da área. O modelo considera o avanço do sistema integrado em áreas que adotam sistema PD e que apresentam potencial para produção florestal (mais informações no Apêndice metodológico). Como resultado, espera-se um crescimento das áreas sob ILF de até **8,2 Mha** em 2030 (Cenário 20%), o que equivale a uma adoção anual de 826 mil hectares. Esses valores podem chegar a 12,3 Mha adicionais em um cenário de ampla adoção dos sistemas integrados (Cenário 30%).

A adoção de uma produção integrada gera um grande potencial de remoção de GEE devido ao maior acúmulo de carbono no solo, bem como o acúmulo de carbono no componente florestal do sistema. Em valores acumulados, o potencial de mitigação pode atingir **809,8 Mt CO<sub>2</sub>eq** até 2030 (Cenário 20%). Em um cenário de ampla adoção de integração esse valor pode chegar a **1.259,7 Mt CO<sub>2</sub>eq** (Cenário 30%). Esses resultados mostram que a produção de soja em sistema ILF mais do que compensa o balanço positivo de emissões da soja em produção “solteira”. O potencial de remoção do sistema ILF é de aproximadamente 10 vezes o balanço positivo das emissões da soja. Ou seja, em termos agregados, **as remoções do sistema ILF são de 899,8 Mt CO<sub>2</sub>eq enquanto as emissões da soja são de 90 Mt CO<sub>2</sub>eq**, conforme Tabela 2. Portanto, adotando-se o sistema ILF tem-se que para cada 1 Mt CO<sub>2</sub>eq emitida pela soja aproximadamente outros 10 Mt CO<sub>2</sub>eq são mitigados.

**Gráfico 7. Balanço Anual das Emissões da Soja com Sistema Integração Lavoura-Floresta entre 2021 e 2030.**



A **Tabela 3** indica os valores acumulados das emissões, remoções e balanço de GEE da produção de soja considerando a adoção de sistemas integrados de produção (ILF). Destaca-se o potencial da região Sul, projetado em **413,8 Mt CO<sub>2</sub>eq** acumulados no final do período. Tal fato justifica-se pelo potencial de implantação dos sistemas integrados nessa região, atrelado à tradição de cultivo e concentração de áreas de florestas plantadas no país, principalmente com pinus e eucalipto.

**Tabela 3. Emissões de GEE por fonte de emissão e grande região para os sistemas integrados de produção (ILF) (Cenário 20% - Mt CO<sub>2</sub>eq)**

Região	Emissões (Mt CO <sub>2</sub> eq.)		Remoções (Mt CO <sub>2</sub> eq.)	Balanço (Mt CO <sub>2</sub> eq.)
	Insumos	Mecanização	ILF	
Norte	0,2	0,1	-39,7	<b>-39,5</b>
MATOPIBA	0,2	0,1	-48,7	<b>-48,4</b>
Centro-Oeste	0,8	0,3	-186,0	<b>-184,9</b>
Sul	1,8	0,7	-416,3	<b>-413,8</b>
Sudeste	0,9	0,4	-214,4	<b>-213,2</b>
Nordeste	0,00	0,00	-0,07	<b>-0,07</b>
<b>Brasil</b>	<b>3,8</b>	<b>1,6</b>	<b>-905,2</b>	<b>-899,8</b>

## 1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou contribuir com uma análise quantitativa do potencial de mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) da produção de soja no Brasil até o ano de 2030, considerando cenários de adoção da tecnologia de Integração Lavoura-Floresta (ILF), além da utilização da tecnologia de Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) e aceleração da adoção de Sistemas de Plantio Direto (SPD). Para tal, desenvolveu-se um modelo de projeção e mitigação para ações de descarbonização da soja, bem como os cenários de incremento gradual de ILF até o ano de 2030. Os cenários consideram a adoção de ILF em 10%, 20% e 30% da área total de plantio da soja, respectivamente.

Os resultados do estudo em relação à projeção da área plantada e produção da soja, considerando a trajetória recente da evolução do plantio da cultura, resultou em uma área plantada total de **47,3 Mha** em 2030, que representa um crescimento de 27,2% quando comparado aos **37,2 Mha** observados em 2020. Já a produção apresentaria crescimento de 44,9%, saltando de 121,8 para 176,4 milhões de toneladas. A diferença entre a taxa de crescimento da área e da produção é explicada por ganhos de produtividade. Enquanto a taxa média de produtividade de soja em 2020 é de 3,3 t/ha, em 2030 chegaria a 3,6 t/ha.

A produção de soja brasileira atualmente já adota majoritariamente a tecnologia FBN por meio do uso de sementes inoculadas, evitando assim a aplicação de nitrogênio via fertilizantes nitrogenados e, conseqüentemente, a emissão de GEE associados aos produtos (adubos e fertilizantes) e às operações mecanizadas. O uso de sementes inoculadas evita a emissão de cerca de **68 Mt CO<sub>2</sub>eq** por ano.

A soja brasileira é uma cultura “baixo carbono”, emitindo cerca de **9 Mt CO<sub>2</sub>eq** ao ano. Entretanto, há grande potencial para que a cultura se torne não só “carbono neutro”, como também um sumidouro de carbono potencializando a participação dessa atividade/produção em um futuro mercado de carbono (permissão de emissões) em que o Brasil estaria inserido.

Atualmente a cultura é cultivada sob plantio direto (PD) ou sistema de plantio direto (SPD). Este último é caracterizado por uma melhor qualidade do cultivo, já que apresenta maiores volumes de palhada de cobertura do solo gerada pela prática de rotação de culturas entre os ciclos de produção de soja. Essa característica do SPD é crucial quando se trata do potencial de sequestro de carbono da soja, pois esse sistema, através do seu alto potencial de sequestro de carbono atmosférico, é capaz de viabilizar que o balanço de emissões da produção seja negativo. Dessa forma, a produção de soja carbono neutro é viabilizada somente via ampliação da adoção de SPD.

Os resultados deste estudo mostram que uma maior adoção do SPD já seria o suficiente para que houvesse a remoção média líquida de **25,9 Mt CO<sub>2</sub>eq** ao ano até 2030. Paralelamente, a adoção da produção em sistemas ILF (cenário 20%) possibilitaria a remoção líquida média de **81,0 Mt CO<sub>2</sub>eq** ao ano.

O estudo também mostra o impacto no balanço de carbono, a partir da adoção de sistemas ILF, em diferentes porcentagens da área de soja plantada no Brasil. A implantação de eucalipto consorciado com a lavoura de soja é feita de forma que a produtividade de ambas e as operações necessárias à condução dos cultivos não sejam comprometidas. Assim, sob o cenário de adoção do sistema ILF em 20% da área cultivada de soja, a remoção líquida média seria de **81,0 Mt CO<sub>2</sub>eq** ao ano, atingindo valores acumulados de **809,8 Mt CO<sub>2</sub>eq** até 2030. Um cenário mais otimista em que a adoção do sistema ILF atinge 30% da área plantada de soja pode gerar uma remoção acumulada de **1.259,7 Mt CO<sub>2</sub>eq**.

É importante reforçar que as tecnologias e práticas relacionadas a FBN, sistemas integrados de produção e plantio direto estão contempladas no Plano Setorial de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+), bem como a necessidade da adoção das tecnologias propostas para a viabilização e adaptação da agricultura brasileira, visando o desenvolvimento integrado, a proteção ambiental e a adaptação e mitigação das mudanças climáticas. Por fim, o SPD de alta qualidade e a adoção de sistemas integrados de produção no Brasil são estratégias para a garantia de uma produção de soja carbono neutro já nos próximos anos.

Por fim, as tecnologias aqui apresentadas comprovam uma enorme possibilidade de remoção de GEE associando-se à integração de grãos com árvores na produção agrícola. Argumento válido e provado neste trabalho. Entretanto, caso o desmatamento para expansão da cultura seja persistente, como observado nos anos de 2020 e 2021, todo o esforço tecnológico será em vão. É importante ter consciência que um hectare desmatado na Amazônia emite cerca de **406 tCO<sub>2</sub>**. Já no cerrado, a emissão do desmatamento seria em média de **281 tCO<sub>2</sub>**. Portanto a inversão das emissões da cultura da soja estaria atrelada a pelo menos 3 fatores:

- 1 ° Migração do plantio direto, para o sistema plantio direto;
- 2 ° Adoção dos sistemas integrados onde a prioridade seria o sistema Integração lavoura florestas; e
- 3 ° Redução ou eliminação do desmatamento.

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAD, E. D. Agricultura de Baixa Emissão de Carbono: A Evolução de um Novo Paradigma. **Observatório ABC**, 2015. [s.l: s.n.].

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BUNGENSTAB, Davi José et al (Ed.). ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: **Embrapa**, 2019. Cap. 11. p. 153-167.

BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; PEDROSO, G. M.; ROSA, C. M. da; CAMARGO, E. S.; MARCOLIN, E.; DOS REIS, C. E. S.; SANTOS, D. C. dos. A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate. **Soil & Tillage Research**, v. 145, p. 118-125, 2014.

CÂMARA, G. M. S. Fixação biológica de nitrogênio em soja. **Informações agrônômicas**, n. 147, p. 1-9, 2014.

CRUZ, J.C. et al. Manejo de solos: sistema plantio direto. In: CRUZ, J. C. (Ed.). Cultivo do milho. 4. ed. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2008.

DENARDIN, J. E. et al. Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, 2012.

EMBRAPA – Programa Soja Baixo Carbono (SBC). Embrapa soja, 2021. Acessado em 10/11/2021 através do link: [<https://contato.cbsoja.com.br/soja-baixo-carbono>]

EMBRAPA. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. – Brasília, DF: **Embrapa**, 2018.

FUENTES-LLANILLO, R. et al. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. *Soil Till Res.* 2021; 208:104877. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104877>.

GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de Adubação para Eucalyptus, Pinus e Espécies Típicas da Mata Atlântica. ESALQ - Documentos Florestais. Piracicaba: 1 –23, 1995.

HINGRIA, M.; CAMPOS, R.J., MENDES, I.C., 2001. Fixação biológica do nitrogênio na cultura de soja. Londrina: Embrapa Soja. (Circular Técnica, Embrapa Soja). 48 p.

NEPOMUCENO, A. L. et al. Programa SBC - Soja Baixo Carbono: um novo conceito de soja sustentável. Londrina: **Embrapa Soja**, 2021.

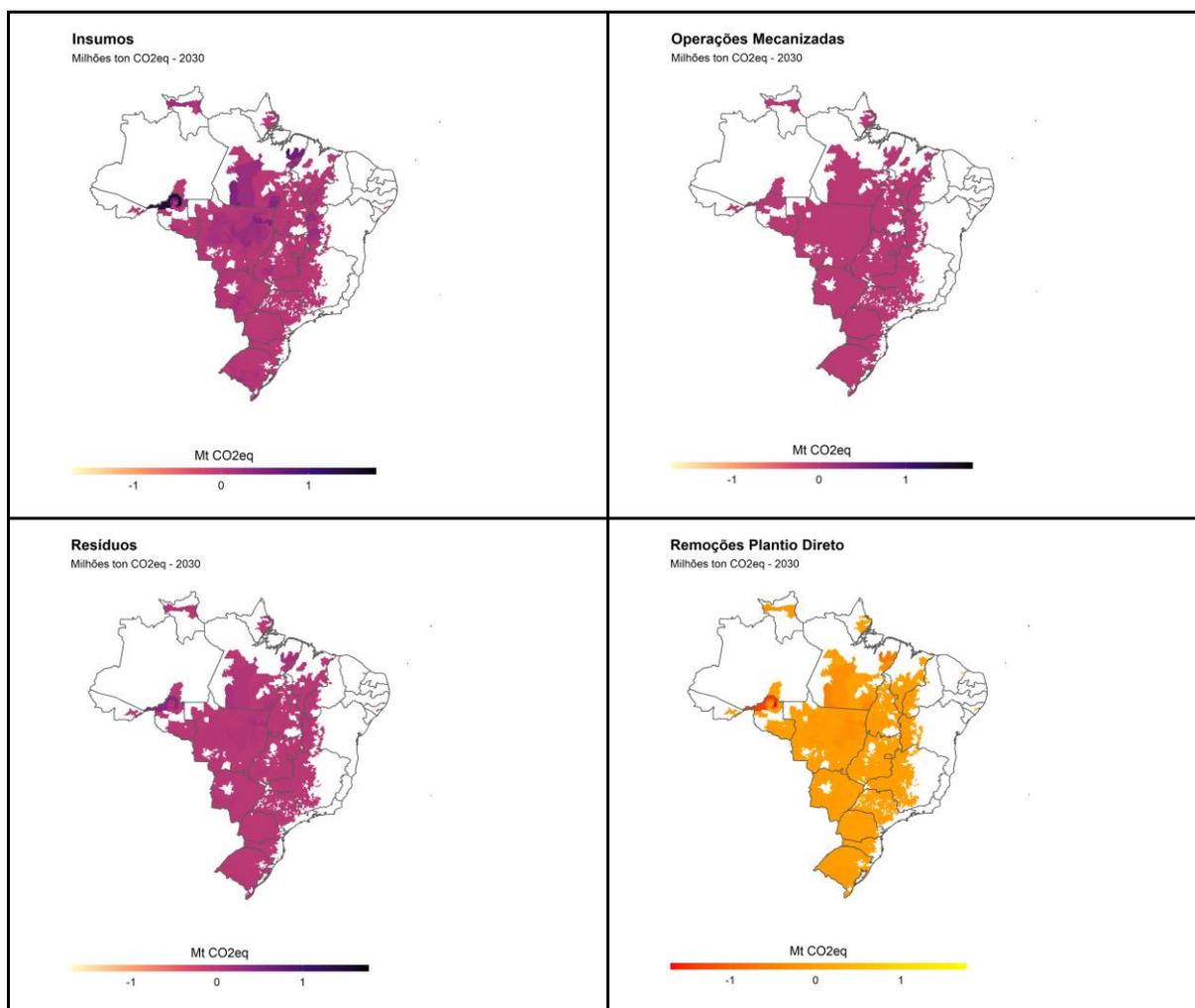
PROJETO MAPBIOMAS. Coleção 2020 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, acessado em 01/11/2021 através do link: [<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>]

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). Metodologia do GHG protocol da agricultura. 2013.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). Greenhouse Gas Protocol Calculation Tool for Forestry in Brazil. 2020.

## APÊNDICE A

**Figura 1.A. Emissões e Remoções De GEE por Categoria da Produção de Soja em 2030.**



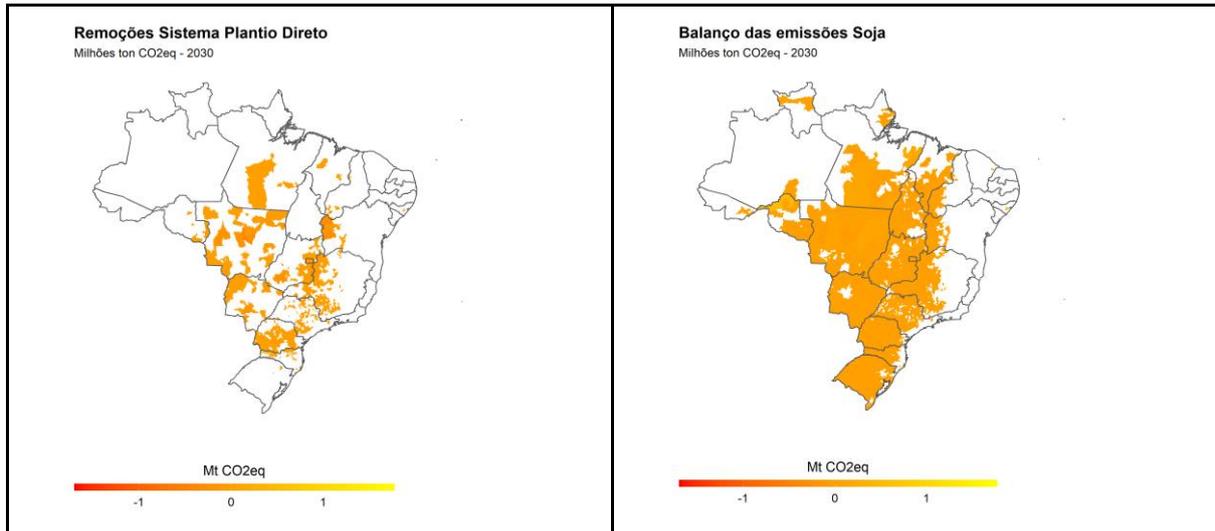
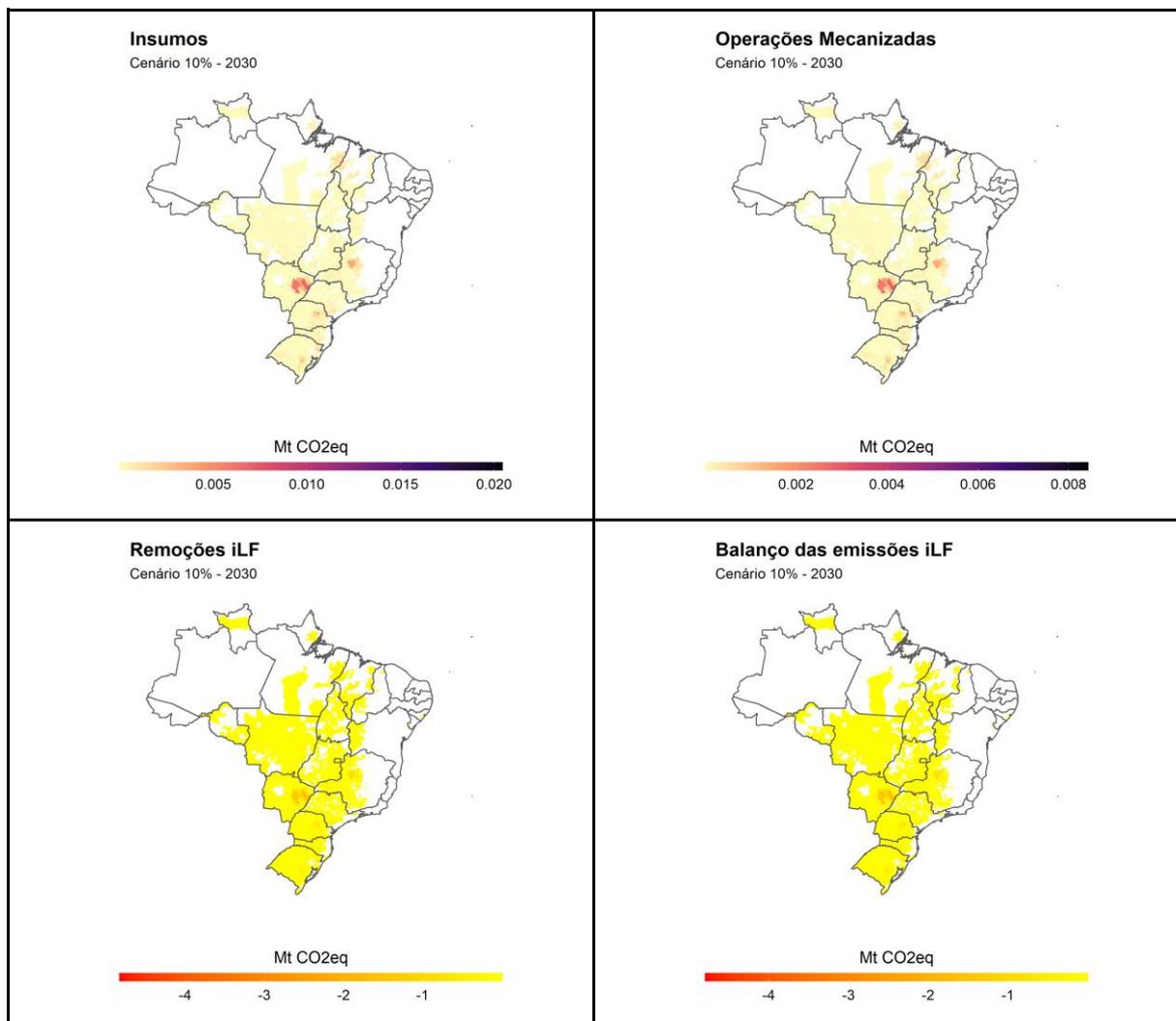
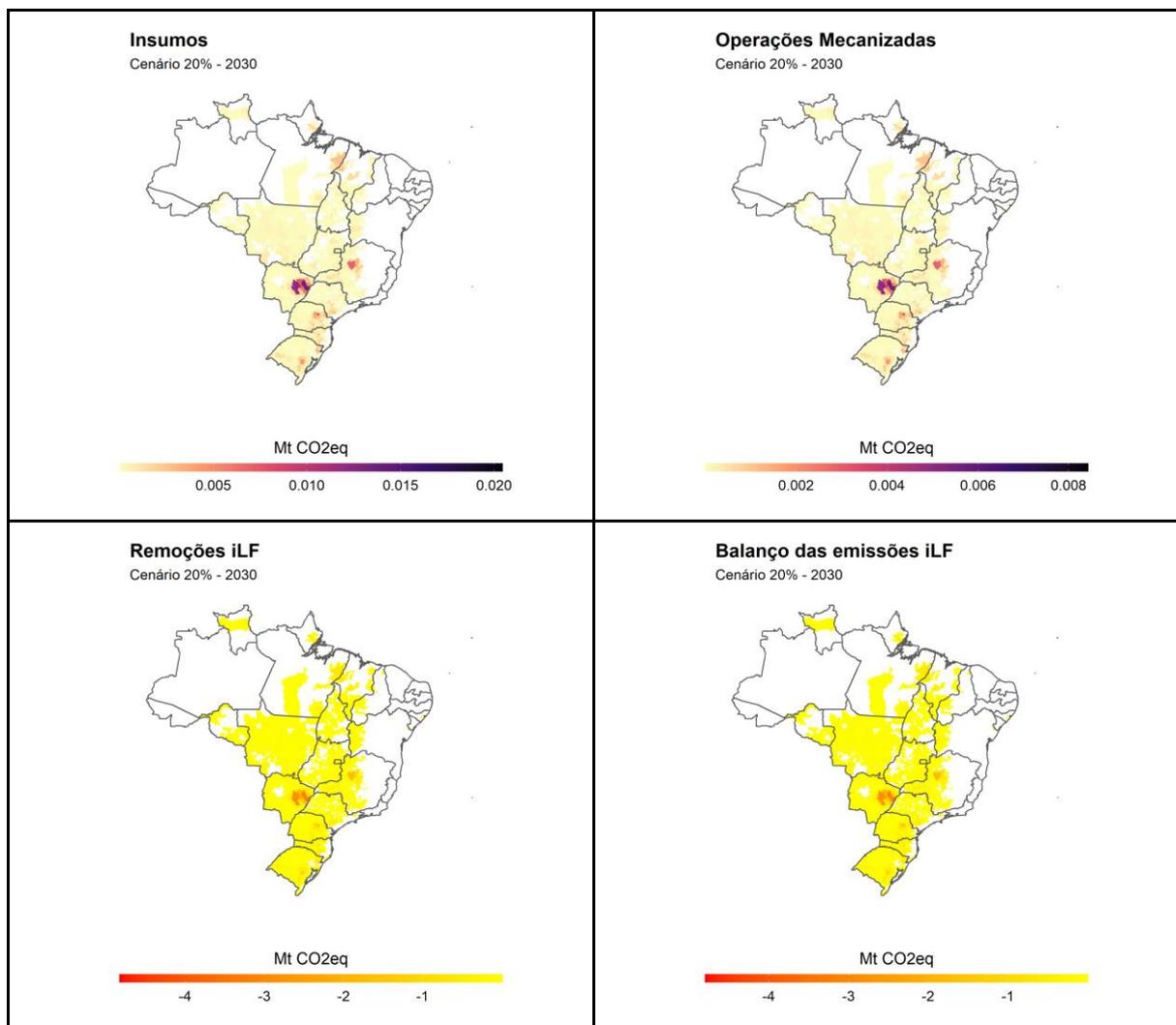


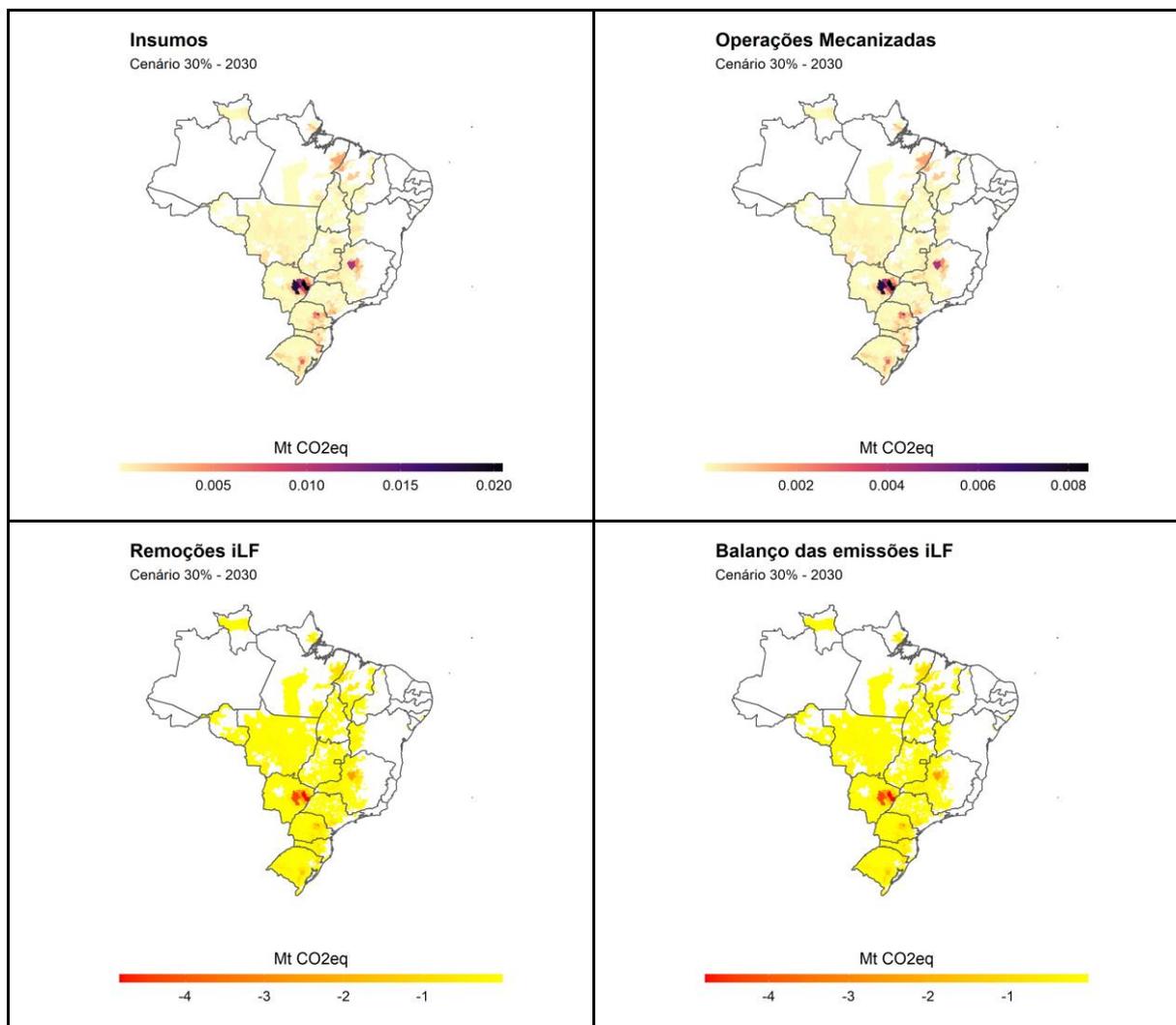
Figura 2.a. Emissões e remoções de gee por categoria da produção de soja em integração lavoura floresta em 2030 – cenário 10%



**Figura 3.a. Emissões e remoções de gee por categoria da produção de soja em integração lavoura floresta em 2030 – cenário 20%**



**Figura 4.a. Emissões e remoções de gee por categoria da produção de soja em integração lavoura floresta em 2030 – cenário 30%**



**APÊNDICE B**

O **Modelo de projeção e mitigação para diferentes ações de descarbonização da produção de soja** considera a evolução temporal da produção, área plantada e da produtividade da cultura em nível municipal. A evolução da área plantada de soja no modelo depende do histórico recente de crescimento da atividade. Em nível nacional, a expressão a seguir determina em cada ano a área plantada de soja de acordo com a taxa de crescimento  $g$ , portanto:

$$AP_t = AP_{t-1} \times e^g \quad (1)$$

onde  $AP_t$  é a área plantada (hectares) no tempo  $t$ ;  $AP_{t-1}$  é a área plantada de soja no tempo  $t - 1$ ; e  $g$  é a taxa de crescimento da área destinada a soja no Brasil. O valor de  $g$  é determinado de modo exógeno no modelo<sup>15</sup>.

A expressão (1) nos dá as condições agregadas de crescimento da área plantada de soja. Entretanto, como o modelo é determinado em nível municipal é necessário garantir que o crescimento das áreas destinadas à soja em cada município, quando agregadas, reflitam os valores observados na equação (1). Para isso, determina-se a série temporal de participação de cada município na área plantada do Brasil (equação 2). Em seguida, determina-se em nível municipal suas respectivas taxas de crescimento da parcela de área, tal que:

$$\omega_{m,t} = \frac{AP_{m,t}}{\sum_m AP_{m,t}} \quad (2)$$

onde  $\omega_{m,t}$  é a participação do município  $m$  no ano  $t$  na área plantada total de soja no Brasil. O modelo garante que  $\sum_m \omega_{m,t} = 1 \forall t$ . Cada município  $m$  segue sua tendência histórica de crescimento, conforme determinado pela expressão abaixo:

$$\omega_{m,t+1} = \omega_{m,t} \times e^{gap_m} \quad (3)$$

onde  $gap$  é a taxa de crescimento municipal da área plantada específica para cada município. Vale destacar que a base de dados em nível municipal não é completa para todos os anos e municípios, ou seja, um município pode não ter apresentado produção de soja em um determinado ano e, recentemente, ter produção de soja (ou vice-versa). Nesse caso, seria impossível determinar a taxa de crescimento da área com uma ou poucas observações. Para contornar esse problema, para aqueles municípios que apresentam produção de soja em 2020, porém não possuem uma série histórica recente completa (2010-2020) utilizou-se a taxa de crescimento da microrregião em que esse município está localizado. Eventualmente,

<sup>15</sup> Utiliza-se a taxa do Outlook FIESP 2029 – Projeções para o Agronegócio. Disponível em: <https://outlookdeagro.azurewebsites.net/OutLookDeagro/pt-BR>

na impossibilidade de determinar a taxa de crescimento em nível de microrregião, utilizou-se a taxa da mesorregião em que o município está localizado<sup>16</sup>.

Procedimento semelhante é utilizado para determinar o crescimento da produtividade em nível municipal. A produtividade cresce à taxa exógena e constante para todos os municípios, tal que:

$$yield_{m,t+1} = yield_{m,t} \times e^{gyield} \quad (4)$$

onde  $yield_{m,t}$  é a produtividade em tonelada/hectare (ton/ha) do município  $m$  no ano  $t$ ; e  $gyield$  é a taxa de crescimento da produtividade. Assim, a produção total de soja em nível municipal é determinada de modo endógeno:

$$Y_{m,t+1} = yield_{m,t+1} \times AP_{m,t+1} \quad (5)$$

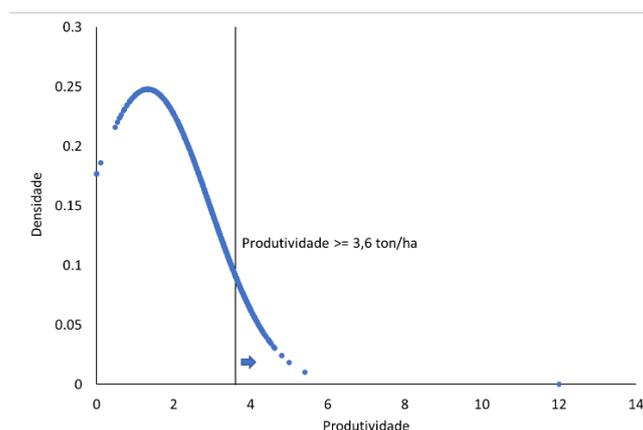
onde  $Y_{m,t}$  é o volume de produção de soja em tonelada do município  $m$  no ano  $t$ .

### **Determinação das áreas sob sistema de plantio direto**

O modelo de descarbonização da soja utilizado considera diferentes fatores de remoção de carbono para cada tipo de tecnologia empregado na lavoura. Assim, diferencia-se a capacidade de remoção de carbono da atmosfera do plantio direto convencional (PD) e do sistema de plantio direto (SPD). O desafio aqui é determinar a localização das áreas em cada sistema. Assume-se que os municípios com maiores produtividades são aqueles com maior probabilidade de adoção do sistema SPD relativo ao sistema PD. A Figura 1A apresenta a função de distribuição da produtividade da soja em 2020. Os municípios produtores de soja foram classificados de acordo com sua faixa de produtividade e posteriormente divididos em quartis, sendo os pertencentes ao quarto quartil (25% mais produtivos, produtividade igual ou maior do que 3,6 ton/ha) selecionados para a distribuição e projeção das áreas de adoção de SPD.

---

<sup>16</sup> Mais detalhes e acesso a base de dados: <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>

**FIGURA 1.B. DISTRIBUIÇÃO DAS PRODUTIVIDADES MUNICIPAIS DE SOJA EM 2020**

Fonte: Resultados da pesquisa.

Adicionalmente, assume-se que a taxa de crescimento da adoção da tecnologia SPD é maior do que a tecnologia PD. A área inicial sob SPD é de 3 Mha com crescimento esperado de 6,9% a.a. atingindo em 2030 cerca de 6 Mha. Após a distribuição inicial dos 3 Mha sob sistema SPD, o modelo, endogenamente, transfere áreas em sistema PD para áreas em sistemas SPD. Naturalmente, alguns municípios em 2030 terão áreas remanescentes sob PD e, da mesma forma, aqueles com maior adoção de SPD terão maior capacidade de remoção de carbono<sup>17</sup>.

### ***Determinação das áreas sob sistema de integração lavoura-floresta***

O modelo considera a projeção de três cenários de produção de soja em sistemas integrados do tipo lavoura-floresta. Os cenários nomeados como Cenário 10%, Cenário 20% e Cenário 30%, consideram, respectivamente, que 10%, 20% e 30% da área total da produção de soja estaria sob sistema integrado. O sistema integrado considera uma floresta de eucalipto no componente floresta e segue os parâmetros de produção e mitigação do SISILPF\_Eucalipto da EMBRAPA Florestas<sup>18</sup>.

O modelo aloca as novas áreas dos sistemas integrados para os municípios com maior aptidão para a adoção de sistemas integrados de produção. A aptidão é determinada pelo cruzamento dos dados de produção de soja e produção histórica de silvicultura obtidos, respectivamente, na Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) e Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) do IBGE. Os municípios que apresentam produção de soja em 2020 e historicamente apresentam produção de silvicultura efetivamente recebem as novas áreas de produção de soja em sistemas integrados.

<sup>17</sup> Mais detalhes e acesso a base de dados: <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>

<sup>18</sup> Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/6418/sisilpf-eucalipto---software-para-manejo-de-eucalipto-em-ilpf>

### **Emissões da produção de soja**

As emissões da produção de soja são divididas em 4 (quatro) categorias: insumos (aplicação de calcário), resíduos da lavoura, operações mecanizadas e remoções de carbono. A seguir são apresentadas as equações utilizadas e os principais fatores de emissões, bem como os valores utilizados. Cada fonte de emissão emite um ou diversos gases de efeito estufa representados nas equações a seguir pelo índice *ghg*. Ao final, é considerado o potencial de aquecimento global de cada *ghg* considerado.

#### **QUADRO 1.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DA UTILIZAÇÃO DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO**

Descrição	Modelo	Equação
Calcário dolomítico	$E_{Calc_{m,t,ghg}} = AP_{m,t} \times Calc \times F_{Calc}$	(E1)

onde:

$E_{Calc_{m,t,ghg}}$  = emissões totais do município *m* no ano *t*, Kg CO<sub>2</sub>;

$AP_{m,t}$  = área plantada do município *m* no ano *t*, hectares;

*Calc* = quantidade de calcário aplicada, 2 toneladas/hectare;

$F_{Calc}$  = fator de emissão do calcário, 0,4766667 Kg CO<sub>2</sub>/ton;

#### **QUADRO 2.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DOS RESÍDUOS DA LAVOURA**

Descrição	Modelo	Equação
Resíduo da lavoura	$E_{Resid_{m,t,ghg}} = AP_{m,t} \times yield_{m,t} \times F_{Resid}$	(E2)

onde:

$E_{Resid_{m,t,ghg}}$  = emissões totais do município *m* no ano *t*, Kg N<sub>2</sub>O;

$yield_{m,t}$  = produtividade do município *m* no ano *t*, toneladas/hectare;

$F_{Resid}$  = fator de emissão do resíduo da lavoura, 0,00024362485 Kg N<sub>2</sub>O/ton;

#### **QUADRO 3.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DAS OPERAÇÕES MECANIZADAS**

Descrição	Modelo	Equação
Operações mecanizadas	$E_{Opmec_{comb,m,t,ghg}} = AP_{m,t} \times H_{maq} \times D_{comb} \times F_{D_{comb,ghg}}$	(E3)

onde:

$E_{Opmec_{comb,m,t,ghg}}$  = emissões totais do município *m* no ano *t* por tipo de combustível *comb*, Kg *ghg*;

$Hmaq$  = hora máquina, 5,6 horas / hectare;

$D_{comb}$  = teor do combustível utilizado (diesel, biodiesel), biodiesel = 0,1;

$FD_{comb,ghg}$  = fator de emissão da utilização de diesel e biodiesel, ver tabela abaixo.

**TABELA 1.B. FATORES DE EMISSÕES DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS: DIESEL E BIODIESEL**

Fonte	Fator de emissão	Unidade	Referência
Óleo diesel	0,002681	tonelada CO2/litro	IPCC, 2006; DEFRA GHG, 2009/2010
Óleo diesel	0,0000003	tonelada CH4/litro	IPCC, 2006; DEFRA GHG, 2009/2010
Óleo diesel	0,00000002	tonelada N2O/litro	IPCC, 2006; DEFRA GHG, 2009/2010
Biodiesel (biogênico)	0,002	tonelada CO2/litro	IPCC, 2006; DEFRA 2009/2010

**QUADRO 4.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DAS OPERAÇÕES MECANIZADAS**

Descrição	Modelo	Equação
Remoções da lavoura	$REM_{s,m,t} = AP_{s,m,t} \times FREM_s \times \frac{44}{12}$	(E4)

onde:

$REM_{s,m,t}$  = remoções totais do município  $m$  no ano  $t$  por tecnologia  $s$ , ton CO2;

$AP_{s,m,t}$  = área plantada do município  $m$ , no ano  $t$  por tecnologia  $s$ , hectare;

$FREM_s$  = fator de remoção por tecnologia  $s$ , PD = -0,25 C/ha e SPD = -0,5 C/ha;

As emissões totais (balanço) da produção de soja são determinadas pela expressão:

$$ECO2eq_{m,t} = \sum_{ghg} \left[ \left( ECalc_{m,t,ghg} + EResid_{m,t,ghg} + \sum_{comb} EOpmec_{comb,m,t,ghg} \right) \times PAG_{ghg} \right] - \sum_s REM_{s,m,t}$$

onde

$ECO2eq_{m,t}$  = emissões totais em CO2eq;

$PAG_{ghg}$  = potencial de aquecimento global de cada gas de efeito estufa  $ghg$ ;

### ***Emissões da produção de soja em sistema integrados***

As emissões da produção de soja em sistemas integrados estão divididas em três categorias: insumos (ureia), operações mecanizadas e remoções. Diferentemente da produção solteira, agora considera-se a aplicação de ureia na formação e manutenção das áreas de sistemas integrados com componente florestal.

#### **QUADRO 5.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR A QUANTIDADE DE UREIA APLICADA**

Descrição	Modelo	Equação
Aplicação de ureia	$Q_{ureia_{m,t,sc}} = A_{iLF_{m,t,sc}} \times \frac{10}{1000}$	(E5)

onde:

$Q_{ureia_{m,t,sc}}$  = quantidade aplicada de ureia no município  $m$  no ano  $t$  em cada cenário  $sc$ , tonelada/hectare;

$A_{iLF_{m,t,sc}}$  = área plantada de soja em sistema integrado no município  $m$ , no ano  $t$  em cada cenário  $sc$ , hectare;

Considera-se 400 plantas por hectare nas áreas em sistemas integrados. Isso exige 10 kg de ureia / ha, aproximadamente 23g de ureia/planta, ~10g N/planta.

#### **Quadro 6.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DA APLICAÇÃO DE UREIA.**

Descrição	Modelo	Equação
Aplicação de ureia	$E_{ureia_{m,t,sc,ghg}} = Q_{ureia_{m,t,sc}} \times FE_{ureia_{ghg}}$	(E6)

onde:

$E_{ureia_{m,t,sc,ghg}}$  = emissões totais por  $ghg$  de ureia no município  $m$  no ano  $t$  em cada cenário  $sc$ , ton  $ghg$ ;

$FE_{ureia_{ghg}}$  = fator de emissão por  $ghg$  e processo (ver tabela abaixo);

Para volatilização e lixiviação considera-se o fator de 0,45 %-N na ureia.

**TABELA 2.B. FONTES DE EMISSÃO DA APLICAÇÃO DE UREIA**

Fonte de emissão	Gás	Fator Emissão	Unidade
Adubação nitrogenada (ureia)	CO2	0,73300	kg CO2/kg
	N2O	0,00880	kg N2O/kg
Volatilização e deposição atmosférica	N2O	0,01	kg N2O-N/kg N
Lixiviação/escoamento superficial	N2O	0,0025	kg N2O-N/kg N

**QUADRO 7.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DAS OPERAÇÕES MECANIZADAS NOS SISTEMAS INTEGRADOS**

Descrição	Modelo	Equação
Operações mecanizadas	$E_{Opme}iLF_{comb,m,t,sc,ghg} = A_iLF_{m,t,sc} \times H_{maq} \times D_{comb} \times FD_{comb,ghg}$	(E7)

onde:

$E_{Opme}iLF_{comb,m,t,sc,ghg}$  = emissões totais do município  $m$  no ano  $t$  por tipo de combustível  $comb$  em cada cenário  $sc$ , Kg  $ghg$ ;

$H_{maq}$  = hora máquina, 7,9 horas / hectare;

$D_{comb}$  = teor do combustível utilizado (diesel, biodiesel), biodiesel = 0,1;

$FD_{comb,ghg}$  = fator de emissão da utilização de diesel e biodiesel.

**Quadro 8.B. EQUAÇÃO UTILIZADA PARA DETERMINAR AS EMISSÕES DAS OPERAÇÕES MECANIZADAS NOS SISTEMAS INTEGRADOS.**

Descrição	Modelo	Equação
Remoções ILF	$REMiLF_{m,t,sc} = A_iLF_{m,t,sc} \times \frac{FREM_{Ciclo}}{Ciclo}$	(E8)

onde:

$REMiLF_{m,t,sc}$  = remoções totais do município  $m$  no ano  $t$  por em cada cenário  $sc$ , ton CO2eq;

$FREM_{Ciclo}$  = fator de remoção no ciclo (componente madeira), ton CO2eq / ano;

$Ciclo$  = período do componente florestal, anos;

COMPONENTE FLORESTAL			
INPUTS	Qtde.	Unidade	Obs
Densidade	400	plantas/ha	Eucalipto
Ciclo	7	anos	
Fator de remoção no ciclo (componente madeira)	-83,2	t/CO2eq/ha	Fonte: SisILPF Embrapa
Fator de remoção anual do componente madeira	-11,88571429	t/CO2eq/ha	

As emissões totais (balanço) da produção de soja em sistemas integrados são determinadas pela expressão:

$$EiLFCO2eq_{m,t,sc} = \sum_{ghg} \left[ \left( E_{ureia_{m,t,sc,ghg}} + \sum_{comb} E_{OpmeCiLF_{comb,m,t,sc,ghg}} \right) \times PAG_{ghg} \right] - REMiLF_{m,t,sc}$$

onde

$EiLFCO2eq_{m,t,sc}$  = emissões totais em CO2eq;