







Carbon stock assessment and comparison in soybean plantations in Southwest Brazilian Amazon¹

Avaliação e comparação do estoque de carbono em plantios de soja no Sudoeste da Amazônia Brasileira

Emmanoella Costa Guaraná Araujo²^{*}, Allan Libanio Pelissari³, Ana Paula Dalla Corte³, Carlos Roberto Sanquetta³

Abstract: A significant proportion of deforestation in the Amazon rainforest is for the expansion of agriculture and livestock. Several studies have been dedicated to determining the carbon stock in natural forests, however agricultural areas are still poorly researched. This work aimed to quantify the above and belowground carbon stock (CS) in soybean plantations in the State of Rondonia, Southwest region of the Brazilian Amazon, as well as to compare the results with the estimate of other possible land uses in the same region. Thus, a total of 50 sampling units 1 m² were quantified at random in order to measure aboveground and belowground biomass. The total biomass found was 7.55 Mg ha⁻¹, with 6.73 Mg ha⁻¹ (89.14%) corresponding to aboveground biomass and 0.83 Mg ha⁻¹ (10.86%) corresponding to belowground biomass. The average total carbon stock was 3.49 Mg ha⁻¹, ranging from 2.14 to 6.36 Mg ha⁻¹. In comparing the study data with the Brazilian Inventory of Anthropogenic Emissions and Removals of Greenhouse Gases, it was observed that the change in the use of the mature Amazon Rainforest land for soybean cultivation resulted in the loss of 176.61 Mg ha⁻¹ of C. Therefore, soybean cultivation can be an alternative in the absence of natural vegetation with no possibility of natural recovery, because in addition to grain production, it contributes to the carbon stock and nitrogen fixation in the soil. However, replacing natural vegetation is not an adequate practice for biomass and carbon stocks.

Key words: Biomass. Atmospheric carbon. Amazon rainforest. Change in land use and occupation.

Resumo: Parcela significativa do desmatamento da Amazônia ocorre para a expansão da agricultura e da pecuária. Diversos estudos se dedicaram a determinar o estoque de carbono em florestas naturais, no entanto, áreas de agricultura ainda são pouco pesquisadas. Com isso, objetivou-se quantificar o estoque de carbono (EC), acima e abaixo do solo em plantios de soja, em Rondônia, Sudoeste da Amazônia brasileira, bem como comparar os resultados com a estimativa de outros possíveis usos do solo na mesma região. Foram quantificadas 50 unidades amostrais de 1 m² coletadas aleatoriamente, visando mensurar as biomassas acima e abaixo do solo. A biomassa total encontrada foi de 7,55 Mg ha⁻¹, sendo que 89,14% corresponderam à biomassa acima do solo e 10,86% à biomassa abaixo do solo. O estoque de carbono médio total foi de 3,49 Mg ha⁻¹, variando de 2,14 até 6,36 Mg ha⁻¹. Comparando os dados do estudo com os Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, foi possível observar que a mudança no uso do solo da Floresta Amazônica para o cultivo de soja resultou na perda de 176,61 Mg ha⁻¹ de C. Assim, em áreas não florestadas, sem possibilidade de recuperação natural da vegetação nativa, o cultivo da soja pode ser uma alternativa, pois, além da produção de grãos, contribui com o estoque de carbono no solo. Porém, a substituição de vegetação natural não é a prática adequada no que tange ao estoque de biomassa e carbono.

Palavras-chave: Biomassa. Fixação de carbono. Floresta amazônica. Mudança no uso e na ocupação do solo.

*Corresponding author

Submitted for publication on 26/09/2021, approved on 08/12/2021 and published on 15/01/2022

¹Trabalho oriundo de pesquisa de tese em andamento da autora correspondente.

²Discente de Pós-graduação em Engenharia Florestal/UFPR. E-mail: manugarana@gmail.com

³Docente de Pós-graduação em Engenharia Florestal/UFPR. E-mails: allanpelissari@gmail.com; anapaulacorte@gmail.com; carlossanquetta@gmail.com

INTRODUCTION

Changes in land use and occupation can influence the emission or fixation of greenhouse gases in the atmosphere, not only through carbon fixation through forming biomass or vegetation suppression, but also through the release of carbon from the soils, which remain exposed from the removal of the original vegetation cover (PEREIRA *et al.*, 2020). The impacts on the Amazon carbon stock caused by agriculture are still uncertain, mainly due to the scarce literature. This situation creates gaps in knowledge about the conversion of natural forest into soybean plantations, especially regarding the regional carbon balance (BONINI *et al.*, 2018).

Despite a reduction in the deforestation rate which has been occurring in the Amazon until the year 2019, and the implantation of pastures being the main cause of this deforestation, soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) appears as a high value activity in terms of change in land use (LIMA *et al.*, 2019). In addition, there is still little research on the impacts on native vegetation caused by soy cultivation in the Amazon deforestation arc, especially on how the carbon stock is reduced or redistributed in the biosphere (BONINI *et al.*, 2018).

According to the report by the National Supply Company (CONAB), Brazil had an area of 68.503 thousand ha for grain production in the 2020/2021 harvest, with the northern region responsible for 3.524 thousand ha (CONAB, 2021). Also according to the report, the state of Rondônia occupies the third position in agricultural cultivation area (648,000 ha), of which 59% is destined for soy cultivation. Despite the impact caused by converting forest land use and occupation to agricultural crops, conservation practices have used degraded areas or integrated production systems for planting soybeans, preventing new areas from being deforested (SILVA *et al.*, 2018). Even so, it is necessary to understand how the conversion of natural areas impacts maintaining carbon stocks in nature, so that adequate usage forms for production and conservation can be proposed.

Several studies have been dedicated to understanding the role of forests in removing carbon from the atmosphere and maintaining their stocks in biomass (HEINRICH *et al.*, 2021; MAAS *et al.*, 2021; ROSA *et al.*, 2021; SANQUETTA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2021).

INTRODUÇÃO

A mudança no uso e na ocupação da terra pode influenciar na emissão ou fixação dos gases de efeito estufa na atmosfera, não apenas pela fixação do carbono por meio da formação da biomassa ou supressão da vegetação, mas pela liberação do carbono dos solos, que ficam expostos com a retirada da cobertura vegetal original (PEREIRA *et al.*, 2020). Os impactos no estoque de carbono da Amazônia causados pela agricultura ainda são incertos, sobretudo, devido à escassa literatura. Tal situação gera lacunas no conhecimento sobre a conversão da mata natural em plantios de soja, especialmente, sobre o balanço de carbono regional (BONINI *et al.*, 2018).

Apesar da redução na taxa de desmatamento que vem ocorrendo na Amazônia até o ano de 2019, e da implantação de pastagens ser a maior causadora desses desmatamentos, a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) aparece como uma atividade de alto valor na mudança no uso da terra (LIMA *et al.*, 2019). Além disso, ainda são escassas as pesquisas relacionadas aos impactos na vegetação nativa causados pelo cultivo da soja no arco do desmatamento da Amazônia, principalmente na forma como o estoque de carbono é reduzido ou redistribuído na biosfera (BONINI *et al.*, 2018).

De acordo com o relatório da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2020/2021, o Brasil apresentou uma área de 68,503 mil ha destinados à produção de grãos, sendo a região norte responsável por 3,524 mil ha (CONAB, 2021). Ainda de acordo com o relatório, o estado de Rondônia ocupa a terceira posição em área de cultivo agrícola (648 mil ha), da qual 59% destinam-se ao cultivo de soja. Apesar do impacto causado pela conversão no uso e na ocupação do solo de florestas para cultivos agrícolas, práticas conservacionistas têm utilizado áreas degradadas ou sistemas integrados de produção para o plantio da soja, evitando que novas áreas sejam desmatadas (SILVA *et al.*, 2018). Ainda assim, é preciso entender de que forma a conversão das áreas naturais impactam na manutenção dos estoques de carbono na natureza, para que sejam propostas formas adequadas de utilização para produção e conservação.

Diversos estudos vêm se dedicando a entender o papel das florestas na remoção do carbono da atmosfera e na manutenção dos seus estoques na biomassa (HEINRICH *et al.*, 2021; MAAS *et al.*, 2021; ROSA *et al.*, 2021; SANQUETTA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2021).

However, the causes of vegetation suppression, such as agriculture and pasture, are still poorly researched. Thus, based on the hypothesis that suppressing natural vegetation reduces the amount of carbon in an area, the objective of this study was to quantify the above and belowground carbon stock (CS) in soybean plantations in the Southwest region of the Brazilian Amazon, as well as to compare the results with the estimate of other possible land uses in the same region.

MATERIAL AND METHODS

The material was collected between 60 and 90 days after planting in the municipalities of Itapuã do Oeste and Cujubim, located in the state of Rondônia, southwest of the Brazilian Amazon. The region's soil is classified as dystrophic yellow latosol (SCHAEFER *et al.*, 2017) and the region's climate is classified as Aw according to the Köppen classification, with an average temperature of 25 °C, annual rainfall of 2,500 mm (ALVARES *et al.*, 2013) and predominant natural open ombrophilous forest vegetation.

A total of 50 aboveground biomass (AgB) and belowground biomass (BgB) samples were collected in soybean plantations. The collections were carried out with a template with a randomly distributed area of 1.0 m². Component masses were measured in a precision dynamometer to determine the green mass. A sample of the material was taken to later determine the dry mass. The material collected in the field was dried in a forced aeration oven in the laboratory at 65 ± 5 °C for 48 h until constant mass. After determining the dry mass, the samples were prepared to determine the carbon content by the dry combustion method in an elemental LECO C-144 analyzer.

The carbon stock was calculated for biomass through the product of the dry mass of each sample and the respective carbon content. Thus, the carbon stock was multiplied by the conversion factor 44/12 to determine the fixed equivalent CO₂ and simulate the equivalent CO₂ emitted, referring to the ratio between the molecular weight of CO₂ and C. Aboveground and belowground biomasses were considered for the purpose of carbon analysis. Plant biomass was removed within the sampling area for belowground biomass. Descriptive statistical analyses, Lilliefors normality test ($\alpha = 0.05$), Bartlett's homogeneity of variance test ($\alpha = 0.05$) and the t-test to compare the means of carbon fractions and stocks were also performed. The root/shoot ratio (R) was also calculated.

No entanto, as causas da supressão de vegetação, como agricultura e pastagem, ainda são pouco pesquisadas. Assim, partindo da hipótese que a supressão da vegetação natural reduz a quantidade de carbono de uma área, objetivou-se quantificar o estoque de carbono (EC), acima e abaixo do solo, em plantios de soja, na região Sudoeste da Amazônia brasileira, bem como comparar os resultados com a estimativa de outros possíveis usos do solo na mesma região.

MATERIAL E MÉTODOS

A coleta do material foi realizada entre 60 e 90 dias do plantio nos municípios de Itapuã do Oeste e Cujubim, localizados no estado de Rondônia, Sudoeste da Amazônia brasileira. O solo da região é classificado como LATOSSOLO AMARELO distrófico (SCHAEFER *et al.*, 2017) e o clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média de 25 °C, precipitação pluvial anual de 2.500 mm (ALVARES *et al.*, 2013) e vegetação natural predominante Floresta Ombrófila Aberta.

Foram coletadas 50 amostras de biomassa acima do solo (BACs) e biomassa abaixo do solo (BABs) em plantios de soja. As coletas foram realizadas com o auxílio de um gabarito com área de 1,0 m², distribuídas de forma aleatória. As massas dos componentes foram mensuradas em um dinamômetro de precisão para determinação da massa verde. Uma amostra do material foi retirada para posterior determinação da massa seca. Em laboratório, o material coletado no campo foi seco em estufa de aeração forçada a 65 ± 5 °C, por 48 h, até massa constante. Após determinação da massa seca, as preparadas para determinação do teor de carbono pelo método da combustão seca em analisador elementar LECO C-144.

O estoque de carbono foi calculado para biomassa, por meio do produto da massa seca de cada amostra pelo respectivo teor de carbono. Para determinação do CO₂ equivalente fixado e simulação do CO₂ equivalente emitido, o estoque de carbono foi multiplicado pelo fator de conversão 44/12, referente a razão entre o peso molecular de CO₂ e C. Para efeito da análise de carbono, foram consideradas as biomassas acima e abaixo do solo, para biomassa abaixo do solo, foi retirada biomassa vegetal dentro da área de amostragem. Também foram realizadas análises estatísticas descritivas, teste de normalidade de Lilliefors ($\alpha = 0,05$), teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett ($\alpha = 0,05$) e teste t para comparação de médias das frações e estoques de carbono. Também foi calculada a razão de raiz/parte aérea (R).

Carbon stocks in degraded areas were simulated based on literature values to compare the results found in this study, being considered as lack of vegetation, natural forest and pasture, whose carbon percentages were taken from the literature as IPCC reports. Reference values regarding biomass and carbon values in different scenarios were used for other land uses (IPCC, 2006; MCTIC, 2016; IPCC, 2019).

RESULTS

The mean total dry biomass value found was 7.55 Mg ha^{-1} , in which 6.73 Mg ha^{-1} (89.14%) refers to AgB and 0.83 Mg ha^{-1} (10.86%) to BgB, with coefficients of variation of 26.97% and 34.56%, respectively. The root-shoot ratio (R) was 0.12, with AgB representing most of the dry matter. Both above and belowground biomasses showed normal distribution ($p\text{-value} > 0.05$) according to the Lilliefors test.

Mean carbon contents were 46.27%, or $0.4627 \text{ tC (t dm)}^{-1}$ for AgB and 44.01%, or $0.4401 \text{ tC (t dm)}^{-1}$ for BgB, respectively (Figure 1). These mean contents differed statistically using the t -test ($p\text{-value} \leq 0.05$) for heterogeneous variances ($p\text{-value} \leq 0.05$ for Bartlett's test). The average total carbon stock was 3.49 Mg ha^{-1} , with minimum values of 2.14 Mg ha^{-1} and maximum of 6.36 Mg ha^{-1} (Figure 2), and coefficient of variation of 23.73%.

Para comparar os resultados encontrados neste estudo, foram simulados, com base em valores da literatura, os estoques de carbono em áreas degradadas, consideradas como ausência de vegetação, floresta natural e pastagem, cujas porcentagem de carbono foram retiradas da literatura, como relatórios do IPCC. Com relação aos valores de biomassa e carbono em diferentes cenários, foram utilizados valores de referência para outros usos da terra (IPCC, 2006; MCTIC, 2016; IPCC, 2019).

RESULTADOS

O valor médio de biomassa seca total encontrado foi de $7,55 \text{ Mg ha}^{-1}$, no qual $6,73 \text{ Mg ha}^{-1}$ (89,14%) se refere à BAcs e $0,83 \text{ Mg ha}^{-1}$ (10,86%) à BAbS, com coeficientes de variação de 26,97% e 34,56%, respectivamente. A razão raiz-parte aérea (R) foi de 0,12, representando a BAcs a maior parte da matéria seca. Tanto as biomassas acima quanto abaixo do solo apresentaram distribuição normal ($p\text{-valor} > 0,05$) de acordo com o teste de Lilliefors.

As médias dos teores de carbono foram 46,27%, ou $0,4627 \text{ tC (t d.m)}^{-1}$ para a BAcs e 44,01%, ou $0,4401 \text{ tC (t d.m)}^{-1}$ para a BAbS, respectivamente (Figura 1). Esses teores médios diferiam estatisticamente por meio do teste t ($p\text{-valor} \leq 0,05$) para variâncias heterogêneas ($p\text{-valor} \leq 0,05$ para o teste de Bartlett). O estoque de carbono total médio foi de $3,49 \text{ Mg ha}^{-1}$, com valores mínimo de $2,14 \text{ Mg ha}^{-1}$ e máximo de $6,36 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 2), já o coeficiente de variação foi de 23,73%.

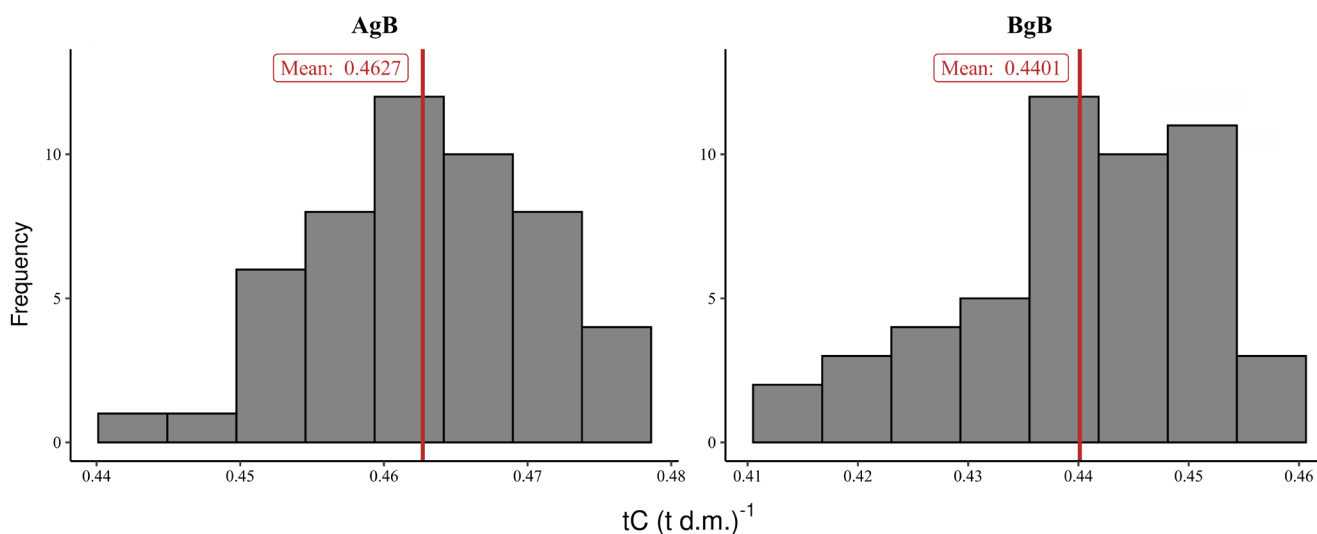


Figure 1 - Distribution of carbon contents in aboveground (AgB) and belowground (BgB) biomasses in soybean plantations in the Southwest of the Brazilian Amazon.

Figura 1 - Distribuição dos teores de carbono nas biomassas acima (BAcs) e abaixo do solo (BAbS) em plantios de soja no Sudoeste da Amazônia brasileira.

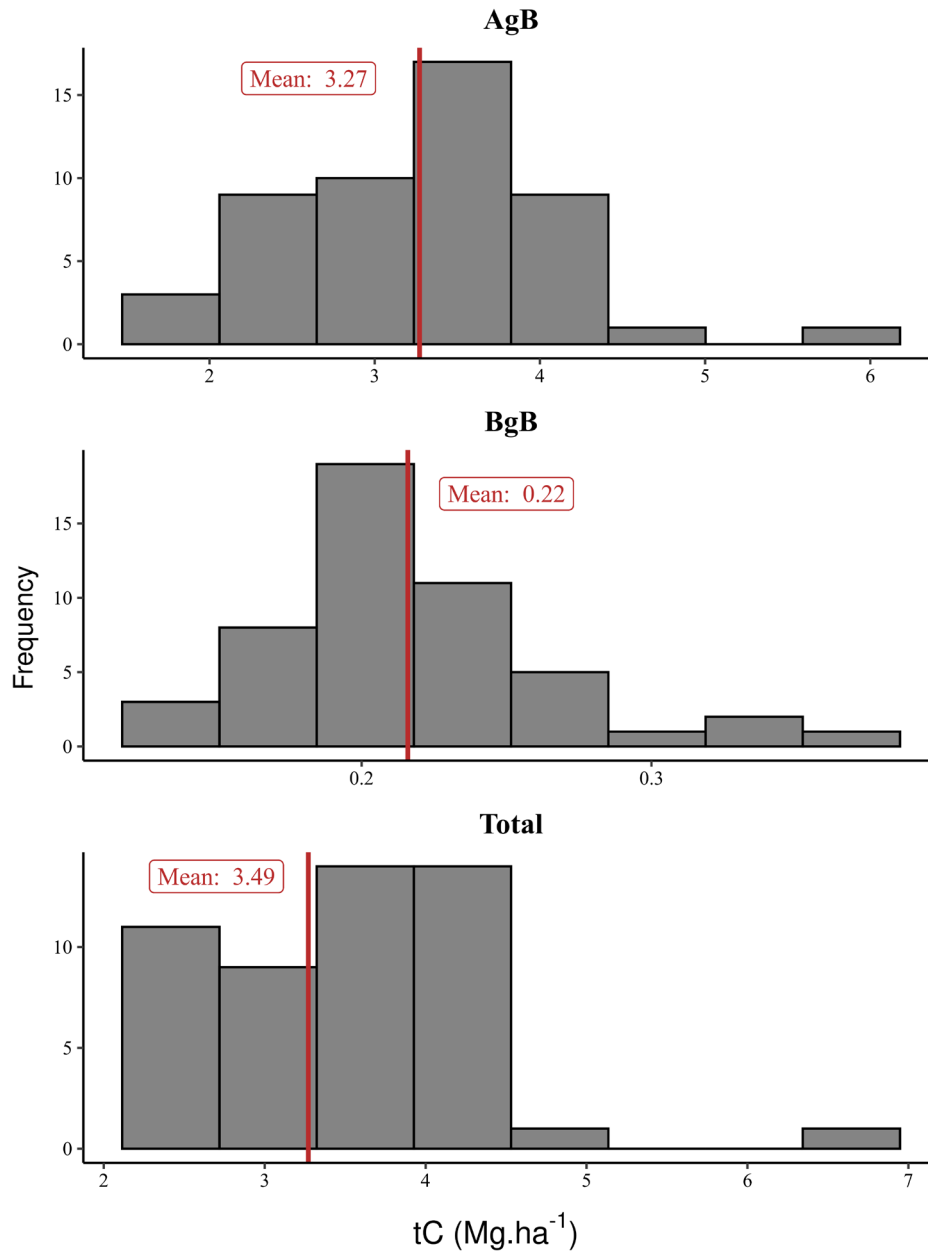


Figure 2 - Distribution of carbon stocks in aboveground (AbG) and belowground (BgB) and total biomasses in soybean plantations in the Southwest of the Brazilian Amazon.

Figura 2 - Distribuição do estoque de carbono na biomassa acima (BacS) e abaixo do solo (BAbS) e total em plantios de soja no Sudoeste da Amazônia brasileira.

The AgB portion accounted for 93.81% of the total carbon stock, while BgB accounted for 6.19%. The mean carbon stock found in this work differed (p -value ≤ 0.05) by about 1.21 Mg ha⁻¹ from the reference value of 4.7 Mg ha⁻¹ indicated by the IPCC. However, there was no significant difference (p -value = 0.7056) between carbon stocks when using the carbon content indicated by the IPCC (equal to 47%) (Table 1).

A porção da AGB foi responsável por 93,81% do estoque total de carbono, enquanto BGB correspondeu à 6,19%. O estoque médio de carbono encontrado neste trabalho diferiu (p -valor $\leq 0,05$) cerca de 1,21 Mg ha⁻¹ do valor de referência, que é de 4,7 Mg ha⁻¹, indicado pelo IPCC. Entretanto, ao utilizar o teor de carbono indicado pelo IPCC, igual a 47%, não foi observada diferença significativa (p -valor = 0,7056) entre os estoques de carbono (Tabela 1).

Table 1 - Carbon stocks and difference in the CS between soybean plantations and other land uses in Southwestern Brazilian Amazon

Tabela 1 - Estoques de carbono e diferença no EC entre plantios de soja e em outros usos do solo no Sudoeste da Amazônia brasileira

	CS (Mg ha ⁻¹)	Difference in the CS (Mg ha ⁻¹)
Soybean	3.49	-
MCTIC Forest (2016)	180	-176.51
IPCC pasture (2006)	6.44	-2.95
No vegetation area	0	3.49

In comparing the value found in this study with the reference values in natural forest and pasture, it is possible to observe that the carbon stock in soybean is smaller than in natural forest and pasture, according to reference data. It is noteworthy that the simulation data represent an average value stipulated by the IPCC and MCTIC. The mean total carbon stock is equivalent to 12.79 Mg ha⁻¹ of CO₂eq, but the value rises to 13.01 Mg ha⁻¹ of CO₂eq using the levels suggested by the IPCC. The difference in calculations using a conversion factor and the values found in the laboratory reinforces the need for local studies.

DISCUSSION

According to data from the IPCC annual report (2019), the carbon stock accumulated in agricultural crops after one year of land conversion is approximately 4.7 Mg ha⁻¹, which is higher than that found in this study. However, one must take into account the amount of rotations, cultivated species, as well as soil management. Furthermore, the reference value represents an average of both the cultivation types and the total production, and should be used for environments where there is a lack of local data.

According to the Technical Report of the III National Inventory of Greenhouse Gas Emissions (MCTIC, 2016), tropical forests have a carbon stock of approximately 180 Mg of C ha⁻¹, which gives a difference of 176.61 Mg of C ha⁻¹ from carbon stock between forest and soybean plantations. While the discrepancy between the environments is obvious, it is hoped to draw attention to the loss of carbon caused by conversion to land use and occupation. The figure in CO₂eq values in the forest area is equivalent to the removal of 647.58 Mg ha⁻¹ of CO₂eq. Despite the loss of stock generated by soy planting, the conversion of forest to agricultural cultivation conserved 1.92% when compared to the original vegetation.

Comparando o valor encontrado nesta pesquisa com os de referência em floresta natural e pastagem, é possível observar que o estoque de carbono na soja é menor que os de floresta natural e pastagem, de acordo com dados de referência. Ressalta-se que os dados da simulação representam um valor médio, estipulado pelo IPCC e MCTIC. O estoque total médio de carbono é equivalente à 12,79 Mg ha⁻¹ de CO₂eq, utilizando os teores sugeridos pelo IPCC, o valor sobe para 13,01 Mg ha⁻¹ de CO₂eq. A diferença nos cálculos, utilizando um fator de conversão e os valores encontrados em laboratório, reforça a necessidade de estudos locais.

DISCUSSÃO

Conforme os dados do relatório anual do IPCC (2019), o estoque de carbono acumulado em cultivos agrícolas, após um ano de conversão da terra, é de aproximadamente 4,7 Mg ha⁻¹, sendo o valor superior ao encontrado neste estudo. No entanto, deve-se levar em conta a quantidade de rotações, espécie cultivada, bem como o manejo do solo. Além disso, o valor de referência representa uma média, tanto dos tipos de cultivo quanto do total da produção, e deve ser utilizado para ambientes nos quais há ausência de dados locais.

De acordo com o Relatório Técnico do III Inventário Nacional de Emissão de Gases de Efeito Estufa (MCTIC, 2016), as florestas tropicais apresentam um estoque de carbono aproximado de 180 Mg de C ha⁻¹, o que dá uma diferença de 176,61 Mg de C ha⁻¹ de estoque de carbono entre floresta e plantios de soja. Apesar da discrepância entre os ambientes ser óbvia, espera-se chamar atenção para a perda de carbono causada pela conversão no uso e ocupação da terra. Em valores de CO₂eq, a cifra na área florestal equivale a remoção de 647,58 Mg ha⁻¹ de CO₂eq. Apesar da perda de estoque gerado pelo plantio de soja, a conversão de floresta em cultivo agrícola conservou 1,92%, quando comparado à vegetação original.

A total of 348.4 thousand ha were cultivated with soybeans in the state of Rondônia in 2019, which represents an average yield of 3,541 kg ha⁻¹. The cultivated area increased to 381.1 thousand ha in 2020, representing an increase of 9%, with an average yield of 3,368 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021). Also according to the CONAB report (2021), the area occupied by soy plantations represented 17% of all soy plantations in the North region in 2020, ranking the state third in the region in terms of land area destined for grain production. Although the IPCC and the MCTIC present values referring to the carbon content and stock of different segments, they represent an average in which each condition/species will present deviations related to the values. Thus, it is recommended to carry out laboratory tests for specific conditions, especially for the first assessments (ASNER *et al.*, 2011).

However, the conversion of forest environments to any other uses generates a significant loss of stored carbon to the atmosphere. Although pastures have a greater carbon stock than soybean plantations, it is necessary to pay attention to soil degradation caused by animal trampling (NEVES JR. *et al.*, 2013; SHANG *et al.*, 2014). In turn, soybean is a nitrogen-fixing legume which can bring numerous benefits to the edaphic region, such as symbiosis with diazotrophic bacteria (HUNGRIA *et al.*, 2007).

The conversion of a natural system for implanting agricultural crops causes a loss of soil carbon due to the change of species, agricultural inputs and an increase in the erosion process. Perennial crops store a greater amount of carbon than annuals, especially in the edaphic region where there is a greater proportion of roots in perennial crops. In addition, the use of nitrogenous inputs for agricultural crops, is highlighted which increases the decomposition of senescent plant material, as well as cultivation in the surface layer, favoring the soil erosion process (BODDEY *et al.*, 2015).

Soil represents about four times the carbon stored in vegetation and three times the value of the atmosphere (IPCC, 2001; ANOKYE *et al.*, 2021). Changes in land use and occupation cause disturbances in the edaphic region, responsible for the greatest contribution to the organic carbon reserve (PACHECO *et al.*, 2018). Despite acting as a sink for atmospheric CO₂, soil organic carbon is dynamic, since changes in land use, occupation or management by anthropogenic changes can cause the emission of greenhouse gases (FAO, 2017).

Em 2019, 348,4 mil ha foram cultivados com soja no estado de Rondônia, o que representa um rendimento médio de 3.541 kg ha⁻¹. Em 2020, a área cultivada passou para 381,1 mil ha, representando um aumento de 9%, com rendimento médio de 3.368 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021). Ainda de acordo com o relatório do CONAB (2021), a área ocupada por plantios de soja representava 17% de toda plantação de soja da região Norte no ano de 2020, ocupando o estado a terceira posição na região em extensão de terra destinada para a produção de grãos. Embora o IPCC e o MCTIC apresentem valores referentes ao teor e estoque de carbono de diversos segmentos, eles representam uma média, em que cada condição/espécie apresentará desvios referentes aos valores. Desse modo, é indicado a realização de ensaios laboratoriais para condições específicas, principalmente para as primeiras avaliações (ASNER *et al.*, 2011).

No entanto, a conversão de ambientes florestais para quaisquer outros usos gera perda significativa de carbono armazenado para atmosfera. Apesar das pastagens apresentarem maior estoque de carbono do que os plantios de soja, é preciso atentar à degradação dos solos ocasionada pelo pisoteio dos animais (NEVES JR. *et al.*, 2013; SHANG *et al.*, 2014). A soja, por sua vez, é uma leguminosa fixadora de nitrogênio que pode trazer inúmeros benefícios para a região edáfica, como a simbiose com bactérias diazotróficas (HUNGRIA *et al.*, 2007).

A conversão de um sistema natural para implantação de cultivos agrícolas acarreta a perda de carbono do solo, devido à mudança das espécies, insumos agrícolas e aumento do processo de erosão. Culturas perenes estocam maior quantidade de carbono do que anuais, com destaque para região edáfica, na qual há uma maior proporção das raízes em cultivos perenes. Além disso, para cultivos agrícolas, destaca-se o uso de insumos nitrogenados que aumenta a decomposição do material vegetal senescente, bem como o cultivo na camada superficial favorecendo o processo de erosão dos solos (BODDEY *et al.*, 2015).

O solo representa cerca de quatro vezes o carbono estocado na vegetação e três vezes o valor da atmosfera (IPCC, 2001; ANOKYE *et al.* 2021). As alterações no uso e na ocupação do solo acarretam distúrbios na região edáfica, responsável pela maior contribuição na reserva de carbono orgânico (PACHECO *et al.*, 2018). Apesar de atuar como sumidouro de CO₂ atmosférico, o carbono orgânico do solo é dinâmico, uma vez que mudanças no uso, na ocupação ou no manejo do solo por alterações antrópicas podem ocasionar a emissão de gases de efeito estufa (FAO, 2017).

Atmospheric CO₂ emissions are not the only inconvenience caused by the conversion of forests to agricultural production. Other greenhouse gases such as nitrous oxide and nitric oxide are widely emitted in soils from agricultural systems, mainly through the use of nitrogenous agricultural inputs (ALVES *et al.*, 2015). However, as a legume, soybeans demand less agricultural inputs of this nature, in addition to contributing to nitrogen fixation (CONNOR, 2018). Furthermore, soy cultivation in degraded areas contributes to carbon stock in both plant biomass and in the edaphic region (MARANHÃO *et al.*, 2019).

This fact makes the soy scenario favorable, especially when compared to degraded areas in cases where the degradation does not enable natural vegetation to resume, drastically reducing the carbon stock in all compartments of a system (ZELARAYÁN *et al.*, 2015). Thus, the use of mixed crops in an already anthropized scenario, such as crop-livestock-forest integration systems, promotes an increase in biodiversity and favors the system balance.

CONCLUSIONS

Soybean crops reduce carbon stocks in biomass when compared to natural environments in the Amazon forest. However, when compared to degraded areas with no possibility of natural recovery, they contribute to remove atmospheric CO₂, especially through biomass from the shoots, in addition to contributing to nitrogen fixation and producing inputs to meet food demand and industry;

Studies of this nature should be encouraged to assess the impacts on changes in land use and occupation, especially due to the increasing replacement of natural vegetation for implanting soybean cultivation in the Amazon.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was partially funded by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES) - Financial Code 001, and by the Rioterra Study Center. We give thanks to our collaborators Alexis Bastos, Alexandre Queiroz, Iara Barberena, Mateus Sanquetta, Thiago Cardoso and Gabriel Orso, who all greatly contributed to this study.

A emissão de CO₂ atmosférico não é o único inconveniente causado pela conversão de florestas para produção agrícola. Outros gases de efeito estufa, como óxido nitroso e óxido nítrico são amplamente emitidos em solos de sistemas agrícolas, sobretudo pelo uso de insumos agrícolas nitrogenados (ALVES *et al.*, 2015). No entanto, por ser uma leguminosa, a soja demanda menos insumos agrícolas dessa natureza, além de contribuir com a fixação de nitrogênio (CONNOR, 2018). Além disso, em áreas degradadas, a cultura da soja colabora com o estoque de carbono, tanto na biomassa vegetal, quanto na região edáfica (MARANHÃO *et al.*, 2019).

Tal fato torna o cenário da soja favorável, sobretudo quando comparado com áreas degradadas, nos casos em que a degradação não possibilita a retomada da vegetação natural, reduzindo drasticamente o estoque de carbono em todos os compartimentos de um sistema (ZELARAYÁN *et al.*, 2015). Assim, em um cenário já antropizado o uso de cultivos mistos, como sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, promove aumento da biodiversidade e favorece o equilíbrio do sistema.

CONCLUSÕES

Os cultivos de soja reduzem os estoques de carbono na biomassa, quando comparados com ambientes naturais em floresta Amazônica. No entanto, quando comparados com áreas degradadas, sem possibilidade de recuperação natural, contribuem com a retirada do CO₂ atmosférico, sobretudo por meio da biomassa da parte aérea, além de contribuir com a fixação de nitrogênio e produzir insumos para suprir a demanda alimentícia e da indústria;

Estudos desta natureza devem ser encorajados para avaliar os impactos da mudança no uso e ocupação do solo, sobretudo devido à crescente substituição de vegetação natural para a implantação do cultivo da soja na Amazônia.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001 e pelo Centro de estudos Rioterra. Nossos agradecimentos aos colaboradores Alexis Bastos, Alexandre Queiroz, Iara Barberena, Mateus Sanquetta, Thiago Cardoso e Gabriel Orso, que contribuíram grandemente com esta pesquisa.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M.; JANTÁLIA, C. P.; MADARI, B. E.; URQUIAGA, S.; SANTOS, J. C. F.; SANTOS, H. P. S.; CARVALHO, C. J. R. Emissions of nitrous oxide and nitric oxide from soils in agricultura systems. In: BODDEY, R. M.; LIMA, M. L.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. EMBRAPA, Brasília, Distrito Federal, p. 157-188, 2015.
- ANOKYE, J.; LOGAH, V.; OPOKU, A. Soil carbon stock and emission: estimates from three land-use systems in Ghana. **Ecological Processes**, v. 10, n. 11, p. 1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00279-w>
- ASNER, G. P.; MASCARO, J.; CLARK, J. K.; POWELL, G. Regarding high-resolution carbon stocks and emissions in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 4, p. 1-2, 2011.
- BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; MARTIN-NETO, L.; MADARI, B. E.; MILORI, D. M. B. P.; MACHADO, P. L. O. A. Quantity and mechanisms for accumulation and preservation. In: BODDEY, R. M.; LIMA, M. L.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. (Ed.) **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. EMBRAPA, Brasília, Distrito Federal, p. 33-82, 2015.
- BONINI, I.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MATRICARDI, E.; PHILLIPS, O.; PETTER, F.; OLIVEIRA, B.; MARIMON, B. S. Collapse of ecosystem carbon stocks due to forest conversion to soybean plantations at the Amazon-Cerrado transition. **Forest Ecology and Management**, v. 414, p. 64-73, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.038>
- CONAB. Companhia Brasileira de Abastecimento. Boletim de Monitoramento de Cultivos de Verão – Março de 2021. Relatório Técnico, Brasília. 2021.
- CONNOR, D. J. Land required for legumes restricts the contribution of organic agriculture to global food security. **Outlook on Agriculture**, v. 47, n. 4, p. 277-282, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0030727018805765>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Soil Organic Carbon: the hidden potential. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6937e/i6937e.pdf>
- HEINRICH, V. H. A.; DALAGNOL, R.; CASSOL, H. L. G.; ROSAN, T. M.; de ALMEIDA, C. T.; SILVA JUNIOR, C. H. L., CAMPANHARO, W. A., HOUSE, J. I., SITCH, S.; HALES, T. C.; ADAMI, M.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>
- HUNGRIA, M.; MENDES, I. C.; CAMPO, R. J. A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. **Documento 28**. EMBRAPA Soja, Londrina, 2007. 79 p.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for national greenhouse gas inventories. 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2019. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch05_Cropland.pdf
- LIMA, M.; SILVA J. R. C. A.; HOLLY, L. R.; JERRY, A. J. Demystifying sustainable soy in Brazil. **Land Use Policy**, v. 82, p. 349-352, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.016>
- MAAS, G. C. B.; SANQUETTA, C. R.; MARQUES, R., Machado, S. D. A., SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D.; SCHMIDT, L. N. Combining Sample Designs to Account for the Whole Necromass Carbon Stock in Brazilian Atlantic Forest. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, n. 7, p. 639-655, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1796710>

- MARANHÃO, R. L. A.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; HERMUCHE, P. M.; GOMES, R. A. T.; MCMANUS PIMENTEL, C. M.; GUIMARÃES, R. F. The Spatiotemporal Dynamics of Soybean and Cattle Production in Brazil. **Sustainability**, v. 11, n. 7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11072150>
- MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 3 ed. 2016. Disponível em: https://sirene.mctic.gov.br/portal/export/sites/sirene/backend/galeria/arquivos/2018/10/11/Estimativas_3ed.pdf
- NEVES, J. R. A. F.; SILVA, A. P.; NORONHA, N. C.; CERRI, C. C. Soil management systems in the recovery of a degraded pasture in Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 232-241, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100024>
- PACHECO, F. A. L.; SANCHES FERNANDES, L. F.; VALLE JUNIOR, R. F.; VALERA, C. A.; PISSARRA, T. C. T. Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 5, p. 79-86, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>
- PEREIRA, M. G.; MENDONÇA, V. M. M.; SANTOS, G. L.; PICCOLO, M. C. Carbon and nitrogen in soils and humic fractions of different pedoforms in the Atlantic Forest biome. **Revista Floresta**, v. 50, p. 1527-1536, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v50i3.64171>
- ROSA, L.; PIVA, D. O.; SANQUETTA, C. R.; WOJCIECHOWSKI, J.; PAULA, A.; CORTE, D.; AMB, R. A.; JÚNIOR, F. Estoques de biomassa e carbono na Amazônia brasileira: uma nova abordagem Biomass and carbon stocks in the Brazilian Amazon : a new approach. **Revista Em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, 1-20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.2.e8820>
- SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; PELISSARI, A. L.; TOMÉ, M.; MAAS, G. C. B.; SANQUETTA, M. N. I. Dynamics of carbon and CO₂ removals by Brazilian forest plantations during 1990-2016. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0106-4>
- SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; VALE, J. R. J. F.; SOUZA, K. W.; CORREIA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. P. Solos da Região amazônica. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, 2017, p.111-175.
- SHANG, Z. H.; GIBB, M. J.; LEIBER, F.; ISMAIL, M.; DING, L. M.; GUO, X. S.; LONG, R. J. The sustainable development of grassland-livestock systems on the Tibetan plateau: problems, strategies and prospects. **The Rangeland Journal**, v. 36, p. 267-296, 2014.
- SILVA, A. C. F.; FREIRE, F. J.; BORGES, C. H. A.; ARAUJO, E. C. G.; CUNHA NETO, E. M.; SANQUETTA, C. R. Carbon in forest species of the Atlantic Forest as an indicator of stocks and quality. **Floresta**, v. 51, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v51i3.71644>
- SILVA, J. C. N.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; DANTAS, E. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, p. 837-842, 2018.
- ZELARAYÁN, M. L. C.; CELENTANO, D.; OLIVEIRA, E. C.; TRIANA, S. P.; SODRÉ, D. N.; MUCHAVISOY, K. H. M.; ROUSSEAU, G. X. Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 45, p. 271-282, 2015.