

**MUDANÇA NO ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS ESPECIAIS DE USO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IGUAÇU - PR EM 15 ANOS****CHANGE IN CARBON STOCK IN SPECIAL LAND USE AREAS IN THE IGUAÇU RIVER HYDROGRAPHIC BASIN - PR IN 15 YEARS****CAMBIO EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN ÁREAS DE USO ESPECIAL DE SUELO EN LA CUENCA HIDROGRAFICA DEL RÍO IGUAÇU - PR EN 15 AÑOS**

Ana Paula Marques Martins¹
Carlos Roberto Sanquetta²
Ana Paula Dalla Corte³
Sebastião Amaral Machado⁴
Jaime Wojciechowski⁵
Douglas Edson Carvalho⁶

RESUMO

Áreas destinadas à conservação desempenham papel essencial na regulação global do clima, pois, as florestas são o principal sumidouro de carbono terrestre, uma vez que, capturam dióxido de carbono da atmosfera e armazenam o carbono em sua biomassa, principalmente na madeira. O objetivo deste trabalho foi analisar a dinâmica nos estoques de volume, biomassa e carbono em área total da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu e em áreas especiais, como Matas Ciliares, Unidades de Conservação, Terras Indígenas e Assentamentos Rurais, entre os anos 2000 e 2015. Foram utilizados arquivos vetoriais da cobertura florestal da bacia para os anos-base para a estimativa das variáveis por formação florestal e estágio sucessional. A Bacia Hidrográfica do

1Doutora em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professora do curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Sul da Bahia. Bahia. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7148-1337>. E-mail: anapaula.martins@ufsb.edu.br

2Doutor (Ph.D.) em Ecologia e Manejo de Recursos Florestais pela United Graduate School of Agricultural Sciences, Japão (1994). Professor na Universidade Federal do Paraná. UFPR, Departamento de Ciências Florestais. Curitiba. Paraná. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6277-6371>. E-mail: carlos_sanquetta@hotmail.com

3 Doutora em Engenharia Florestal. Professora na Universidade Federal do Paraná. UFPR, Departamento de Ciências Florestais. Curitiba. Paraná. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8529-5554>. E-mail: anapaulacorte@gmail.com

4Pós-Doutor em Biometria e Manejo Florestal pela Universidade da Georgia, USA. Professor da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Paraná. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1010-4623>. E-mail: samachado@ufpr.br

5Doutor em Informática Aplicada em Engenharia Florestal pela UFPR. Professor Titular da Universidade Federal do Paraná-UFPR. Curitiba. Paraná. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0648-2859>. E-mail: jaimewo@gmail.com

6Doutor em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Paraná. Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2443-0510>. E-mail: douglasedsoncarvalho@gmail.com

Rio Iguaçu como um todo foi sumidouro de carbono nos 15 anos analisados, com aumento nos estoques na ordem de 14% para V, AGB, C e CO₂eq (sequestro de 116.173.629,91 t de CO₂eq) no período. As áreas especiais foram sumidouro de carbono, sendo que as Unidades de Conservação estocaram mais carbono (11,72% do total da bacia) e Matas Ciliares sequestraram mais carbono (3,54% do total da bacia).

Palavras-chave: Mata Atlântica; mudanças climáticas; floresta subtropical.

ABSTRACT

Areas destined for conservation play an essential role in global climate regulation, as forests are the main terrestrial carbon sink, since they capture carbon dioxide from the atmosphere and store carbon in their biomass, mainly in wood. The objective of this work was to analyze the dynamics in volume, biomass and carbon stocks in the total area of the Iguaçu River Basin and in special areas, such as Riparian Forests, Conservation Units, Indigenous Lands and Rural Settlements, between the years 2000 and 2015. Vector files of the basin's forest cover for the base years were used to estimate the variables by forest formation and successional stage. The Iguaçu River Basin as a whole acted as a carbon sink over the analyzed 15-year period, with an increase in stocks of approximately 14% for V, AGB, C, and CO₂eq (sequestering 116,173,629.91 tons of CO₂eq). The special areas acted as carbon sinks, with Conservation Units storing the most carbon (11.72% of the total watershed), and Riparian Forests sequestering the most carbon (3.54% of the total watershed).

Keywords: Atlantic forest; climate changes; subtropical forest.

RESUMEN

Las áreas destinadas a la conservación juegan un papel fundamental en la regulación del clima global, ya que los bosques son el principal sumidero de carbono terrestre, ya que capturan dióxido de carbono de la atmósfera y almacenan carbono en su biomasa, principalmente en la madera. El objetivo de este trabajo fue analizar la dinámica en volumen, biomasa y stocks de carbono en el área total de la Cuenca del Río Iguazú y en áreas especiales, como Florestas Ribereñas, Unidades de Conservación, Tierras Indígenas y Asentamientos Rurales, entre los años 2000 y 2015. Se utilizaron archivos vectoriales de la cobertura forestal de la cuenca para los años base para estimar las variables por formación forestal y etapa sucesional. La Cuenca Hidrográfica del Río Iguaçu en su conjunto actuó como un sumidero de carbono durante los 15 años analizados, con un aumento en las existencias de aproximadamente el 14% para V, AGB, C y CO₂eq (secuestrando 116,173,629.91 toneladas de CO₂eq) en ese período. Las áreas especiales fueron sumideros de carbono, siendo que las Unidades de Conservación almacenaron la mayor cantidad de carbono (11.72% del total de la cuenca) y los Bosques de Ribera secuestraron más carbono (3.54% del total de la cuenca).

Palavras clave: Bosque Atlántico; cambios climáticos; bosque subtropical.

Como citar este artigo: MARTINS, Ana Paula Marques *et al.* Mudança no estoque de carbono em áreas especiais de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu - PR em 15 anos. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 13, p. 433-460, 01 nov. 2023. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v13.4692>.

Artigo recebido em: 20/01/2023

Artigo aprovado em: 15/08/2023

Artigo publicado em: 01/11/2023

1 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é reconhecida internacionalmente como uma das maiores e mais importantes florestas tropicais da América do Sul. Esse bioma é constituído por um conjunto de formações florestais e ecossistemas associados como as restingas, manguezais e campos de altitude. Ocupava originalmente cerca de 1.300.000 km² distribuído por 17 Estados brasileiros, os quais basicamente acompanham a costa oceânica (BRASIL, 2023). Dado que o processo de desenvolvimento do Brasil também acompanhou a faixa litorânea, naturalmente, esse foi o bioma mais devastado da Federação.

Estima-se que aproximadamente metade da cobertura original da Mata Atlântica já tenha desaparecido, e as taxas atuais de desmatamento estão em torno de 1% ao ano (HANSEN *et al.*, 2013). Os impactos humanos nas florestas tropicais vão além do desmatamento, uma vez que a degradação florestal também exerce um impacto significativo e duradouro na biodiversidade florestal e nos estoques de biomassa, resultando em uma redução de até 42% do que seria previsto em um cenário sem interferência humana (LIMA *et al.*, 2020). Isso significa que a degradação da riqueza e biomassa da Mata Atlântica está acompanhada por uma diminuição paralela das espécies que desempenham um papel crucial na provisão de serviços ecossistêmicos e na preservação do valor de conservação dessa região (BELLO *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2020).

Ainda que muito devastada, a Mata Atlântica é detentora de riqueza biológica mais expressiva que de alguns continentes como um todo, o que a torna altamente prioritária para a conservação da biodiversidade mundial. Visto que, as florestas tropicais são as maiores estocadoras de carbono dentre os ecossistemas florestais, a importância da Mata Atlântica é exaltada, pois a mesma exerce importante função no ciclo de carbono e, conseqüentemente, nos impactos das mudanças climáticas globais.

Assim, avaliar o avanço ou retração da cobertura florestal em função de processos de recuperação ou desmatamento, possibilita a percepção da dinâmica entre fontes e sumidouros do carbono atmosférico. Essas informações servem como subsídio para a tomada de decisões quanto ao manejo dos remanescentes florestais, assim como, podem orientar políticas públicas quanto à conservação de biomas, como a Mata Atlântica.

Tendo em vista a grande extensão da Mata Atlântica, a análise de porções territoriais menores pode fornecer informações com maior riqueza de detalhes e mais adequadas a cada região. A Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu está sob os domínios do Bioma Mata Atlântica e ocupa cerca de 30% do Estado do Paraná e 10% de toda a Região Sul; portanto, essa bacia é uma importante porção desse Bioma no Sul do Brasil (PARANÁ, 2010). Além disso, a análise

de áreas com especiais condições e propósitos quanto à conservação do meio ambiente proporciona o diagnóstico mais aprofundado sobre o alcance dos objetivos atrelados ao aumento e manutenção dos serviços ecossistêmicos que tais áreas se propõem.

Então, o objetivo deste estudo foi analisar a mudança nos estoques de volume, biomassa aérea acima do solo e carbono da biomassa em área acima do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu e em áreas especiais quanto ao uso do solo dessa bacia, entre os anos 2000 e 2015.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As mudanças climáticas são definidas como alterações de longo prazo no clima de uma determinada localidade, região ou do planeta como um todo (IPCC, 2013). O clima da Terra tem variado significativamente ao longo de seu passado geológico, apresentando momentos com temperaturas inferiores as atuais durante as Glaciações e outros momentos em que a temperatura foi superior às registradas atualmente. Essas variações foram causadas por alterações nos ciclos do Sol, atividade vulcânica e por variações na concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera (McBEAN *et al.*, 2001).

O Efeito Estufa aquece a superfície terrestre a partir da radiação advinda do Sol e o balanço energético do processo é mantido através da emissão de ondas longas, na forma de radiação termal, da superfície terrestre de volta à atmosfera. Alguns gases, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), os clorofluorcarbonos (CFCs), o ozônio (O₃) e até mesmo o vapor de água (H₂O) presentes na atmosfera, promovem uma forte absorção da radiação termal e a emitem novamente em direção à superfície terrestre (EVEREST, 1989). Segundo a Agência Espacial Americana (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*), este processo contribui para que a temperatura média da Terra seja em torno de 30°C mais quente, se comparada na ausência da atmosfera (NASA, 2009).

Dentre os gases de efeito estufa (GEEs), o dióxido de carbono (CO₂) configura entre um dos principais responsáveis pelo aquecimento global. A sua emissão é decorrente da queima de combustíveis fósseis, tais como carvão, petróleo e gás, desmatamento e degradação do solo devido a práticas agrícolas impróprias (BACH, 1985).

Estudos com base em reconstruções do clima passado e nas concentrações de CO₂ aprisionado em camadas de gelo nos polos da Terra têm demonstrado uma correlação direta entre o aumento na concentração de carbono atmosférico e o aumento na temperatura média global. Embora as metodologias utilizadas para a estimativa destes parâmetros passados sejam questionadas (ETHERIDGE *et al.*, 1996, LEROUX, 2005; FLORIDES e CHRISTODOULIDES, 2008) e haja falta de consenso sobre a capacidade de uma única temperatura média global ser capaz de representar fidedignamente as alterações climáticas ao longo do tempo (ESSEX; McKITRICK, 2006), a comunidade científica, em geral, concorda que as alterações recentes no clima são decorrentes das atividades antropogênicas (HEGERL *et al.*, 2006), que envolvem, além da emissão acentuada de CO₂, outros fatores decorrentes da industrialização e urbanização do planeta.

O Brasil é um dos maiores emissores mundiais de gases de efeito estufa (GEEs) (CLIMATE WATCH, 2023) e diante disso, em 2015, o governo brasileiro comprometeu-se com frente à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC -

United Nations Framework Convention on Climate Change) em reduzir as emissões de GEEs em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, e ainda, até 2030 reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005 (BRASIL, 2015).

Historicamente no Brasil, o setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Floresta (LULUCF) tem sido o principal responsável pelas emissões (SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG)), 2023). Nesse setor as estimativas são baseadas em dados de satélite e estão associadas à mudança de uso e ocupação do solo, incluindo os dados referentes ao desmatamento. Contudo, estimativas do inventário de GEEs no Brasil, revelam que, desde 2009 as emissões ligadas ao setor LULUCF diminuíram significativamente em relação aos anos anteriores, porém, apresentam aumento consecutivo desde 2017 (BRASIL, 2022).

O balanço global do CO₂, que consiste no equilíbrio entre emissões e sequestro (armazenamento ou estoque), é fortemente influenciado pelas florestas, uma vez que essas são capazes de absorver e armazenar esse composto em diversos componentes, como na biomassa das árvores, no sub-bosque, na serapilheira e no solo. Diferentes tipologias florestais possuem capacidades distintas de armazenar carbono em função dos diferentes estágios de sucessão, idade, regime de manejo, composição florística e teor de carbono nos componentes das diferentes espécies (WATZLAWICK *et al.*, 2004).

Quando há o corte ou queima de madeira, há a liberação do carbono estocado na biomassa para a atmosfera. Então, o desmatamento pode ser considerado uma das principais causas do aumento das concentrações desse gás na atmosfera, podendo refletir no incremento de aproximadamente 2°C na temperatura do ar na América do Sul entre os anos de 2010 e 2040 (REBOITA *et al.*, 2014).

A quantificação da mudança de estoque de carbono da biomassa florestal é importante para entender os impactos da dinâmica florestal com as mudanças climáticas, além de auxiliar no sucesso na implementação de estratégias para o manejo do carbono florestal (XU *et al.* 2016). Desse modo, estudos sobre metodologias que visem avaliar dinâmicas de sequestro de carbono tornam-se muito relevantes, especialmente frente aos desafios de monitoração de áreas extensas com floresta, da complexidade da monitorização e da quantificação desses estoques (XU *et al.* 2016).

A Mata Atlântica é reconhecida internacionalmente como uma das maiores e mais importantes florestas tropicais da América do Sul, todavia, esse bioma sofreu redução significativa de sua cobertura original (METZGER *et al.*, 2009). A maioria de seus remanescentes ocorre na forma de fragmentos pequenos, isolados e compostos por florestas secundárias em diferentes estágios sucessionais (METZGER *et al.*, 2009). Essa configuração dos fragmentos, aliada à diversidade de espécies abrigada pela Mata Atlântica, confere ao Bioma um status de *hotspot* global para conservação da biodiversidade (DELGADO *et al.*, 2018). Diante do exposto, fica evidente a necessidade de pesquisas relacionadas ao monitoramento de carbono em áreas do bioma Mata Atlântica. Todavia, existe a necessidade de que os levantamentos sejam feitos em áreas representativas da Mata Atlântica em estudos relacionados a mudanças na paisagem e no estoque de carbono (DELGADO *et al.* 2018).

Os estoques de carbono de remanescentes florestais nativos podem variar significativamente, sendo dependente do estágio sucessional e da fitofisionomia da floresta. O

Inventário Florestal Nacional (IFN) revela dados em que florestas paranaenses apresentam em média 112 t.ha⁻¹ de biomassa aérea e 55 t.ha⁻¹ carbono, sendo que o levantamento computou folhas, galhos, casca e lenho das árvores vivas e mortas (necromassa) (SFB, 2018). Azevedo *et al.* (2018) analisando o estoque de carbono nas áreas de restauração florestal em Floresta Ombrófila Densa na Mata Atlântica fluminense, constataram aumento gradativo de biomassa e carbono com o aumento da idade da floresta, indo de 39,88 t.ha⁻¹ a 71,24 t.ha⁻¹ de biomassa aérea nas áreas de restauração florestal com 3 a 7 anos, respectivamente, sendo o estoque de carbono considerado 50% da biomassa. Gaspar *et al.* (2014) constataram 58,3 t.ha⁻¹ em média para o estoque de carbono de um fragmento de floresta em estágio Médio de sucessão em Floresta Estacional Semidecidual (FES) em Minas Gerais. Além disso, outros estudos em FES madura apontam cerca de 80 t.ha⁻¹ de carbono no Estado de São Paulo (MELO e DURIGAN, 2006); 20 t.ha⁻¹ de carbono em uma capoeira de FES Montana em Minas Gerais (RIBEIRO *et al.*, 2010).

O Decreto 5.092, de 21 de maio de 2004, definiu regras para identificação de áreas prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade. A Portaria 126, de 27 de maio de 2004 do Ministério do Meio Ambiente estabeleceu o mapa "Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira" (BRASIL, 2004). Sendo que as áreas prioritárias estão subdivididas nos biomas brasileiros e são, basicamente, Terras Indígenas e Unidades de Conservação (BRASIL, 2004).

De acordo com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2023), as Unidades de Conservação (UCs) são espaços territoriais, incluindo seus recursos ambientais, com características naturais relevantes, que têm a função de assegurar a representatividade de amostras significativas e ecologicamente viáveis das diferentes populações, habitats e ecossistemas do território nacional e das águas jurisdicionais, preservando o patrimônio biológico existente. Estas áreas estão sujeitas a normas e regras especiais e são legalmente criadas pelos governos federal, estadual e municipal após a realização de estudos técnicos dos espaços propostos e, quando necessário, consulta à população.

De acordo com a legislação vigente, os povos indígenas detêm o direito originário e o usufruto exclusivo sobre as terras que tradicionalmente ocupam. As Terras Indígenas podem ser classificadas em algumas modalidades, tais como: I) Terras Indígenas Tradicionalmente Ocupadas, que são as Terras Indígenas que trata o art. 231 da Constituição Federal de 1988 (CF/88), a qual dá direito originário dos povos indígenas, cujo processo de demarcação é disciplinado pelo Decreto n.º 1775/96; II) Reservas Indígenas, que são as terras doadas por terceiros, adquiridas ou desapropriadas pela União, que se destinam à posse permanente dos povos indígenas; III) Terras Dominais, aquelas de propriedade das comunidades indígenas, havidas, por qualquer das formas de aquisição do domínio, nos termos da legislação civil; e IV) Interditadas, cujas áreas foram interditadas pela Fundação Nacional do Índio (FUNAI) para proteção dos povos e grupos indígenas isolados, com o estabelecimento de restrição de ingresso e trânsito de terceiros na área (FUNAI, 2023).

Além das áreas prioritárias, as Áreas de Preservação Permanente (APP) também são consideradas áreas protegidas com a função de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012). Segundo o Código

Florestal Brasileiro, Área de Preservação Permanente (APP) é definida como “área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas” (BRASIL, 2012).

Os Assentamentos Rurais são conjuntos de unidades agrícolas independentes entre si, estabelecidos pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), em áreas que anteriormente pertenciam a um único proprietário rural. Cada uma dessas unidades é destinada a uma família que não possui condições econômicas para adquirir e manter uma propriedade rural por outros meios (INCRA, 2023). O propósito dessas terras é promover a agricultura familiar, ou seja, são áreas destinadas à produção agropecuária e não à conservação ambiental, diferentemente de Matas Ciliares, Unidades de Conservação ou Terras Indígenas. No entanto, é importante destacar que há uma relação significativa entre a ocupação de terras e o desmatamento, um desafio enfrentado por pesquisadores, ativistas e formuladores de políticas no Brasil. Em geral, as políticas que incentivam interações sociais contenciosas são ineficientes e acarretam importantes externalidades, incluindo impactos prejudiciais ao meio ambiente. Portanto, há uma oportunidade relevante para pesquisas que informem a forma como a distribuição de terras é conduzida em países em desenvolvimento (BROWN *et al.*, 2016).

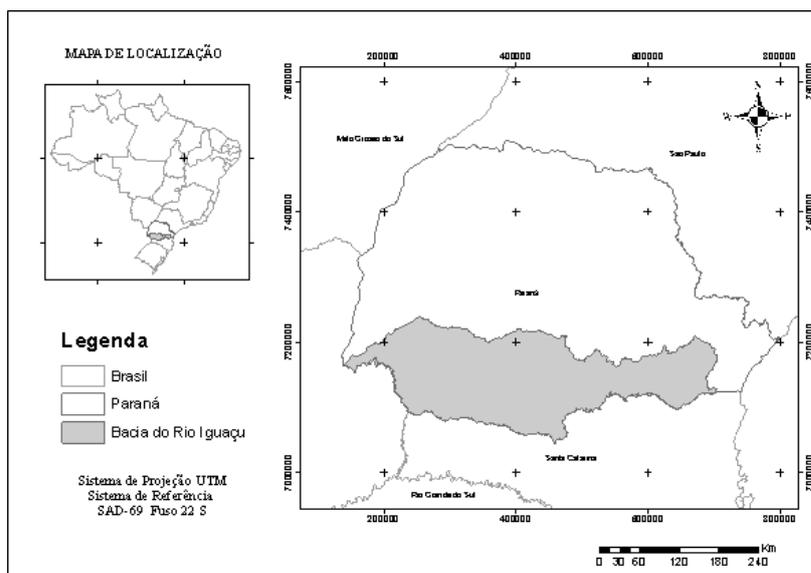
Dessa forma, tão importante quanto compreender os processos que envolvem o desmatamento é entender a dinâmica de uso e cobertura da terra, que é reflexo de questões socioeconômicas regionais, ou seja, compreender que o desflorestamento pode levar a migração de populações rurais e causar mudanças significativas na paisagem (ROSA *et al.*, 2016). Portanto, a percepção da relação espacial entre variáveis ambientais, sociais e econômicas torna-se fundamental para o embasamento de políticas públicas que incentivem e facilitem o processo de regeneração e conservação florestal e, conseqüente, desenvolvimento socioeconômico regional (ARAÚJO *et al.*, 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O Rio Iguaçu é o maior rio do Estado do Paraná e tem origem na borda ocidental da Serra do Mar, percorrendo cerca de 1.320 km cruzando os três planaltos paranaenses até desaguar no Rio Paraná (PARANÁ, 2010). Sua bacia localiza-se na porção sul do Estado do Paraná e na porção norte do Estado de Santa Catarina, entre as latitudes 25°05'00”S e 26°45'00”S e as longitudes 48°57'00”W e 54°50'00”W (MERENDA, 2004) (Figura 1).

Figura 1- Área de Abrangência da Bacia do Rio Iguaçu no Estado do Paraná.



A bacia cobre uma área de aproximadamente 70.800 km² sendo que deste total, 79% pertence ao Estado do Paraná, 19% ao Estado de Santa Catarina e 2% à Argentina (PARANÁ, 2010). Ocupa cerca de 28% da área total do Estado do Paraná (54.800 Km² aproximadamente), e sua população é estimada em 4,5 milhões de habitantes (PARANÁ, 2010). No presente trabalho apenas a porção paranaense foi utilizada.

O clima da região é subtropical úmido, com verão quente e inverno fresco, sem estação seca definida. Em média o somatório da precipitação anual da bacia vai de 1.200 mm a 2.500 mm, o mês mais seco excede o acumulado de 75 mm em média, sendo o período com maior volume de chuva entre dezembro e fevereiro e o mais seco entre julho e setembro, normalmente (IAPAR, 2018).

3.2 MAPEAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA E USO DO SOLO

O mapeamento e classificação da cobertura e uso do solo foram realizados com sensoriamento remoto, em que, foram analisados os anos-base 2000 e 2015 utilizando dez imagens de satélite de cada ano-base, as quais recobriam toda a área da Bacia do Rio Iguaçu situada no Estado do Paraná. As datas dos anos-base selecionados foram as mais próximas possíveis com no máximo 10% de recobrimento de nuvens nos quatro quadrantes.

Para o ano-base 2000 foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7, sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), e para 2015 do Landsat 8, sensor OLI (*Operational Land Imager*), ambas com resolução espacial de 30 m, UTM, WGS-84.

As composições das bandas utilizadas para a interpretação da cobertura florestal foram: RGB: 3,2,1 Landsat 7 (L7), RGB: 4,3,2 Landsat 8 (L8), Falsa cor: 1,2,3 (L7), Falsa Cor: 2,3,4 (L8) e Infravermelho: 2,3,4 (L7), Infravermelho: 3,4,5 (L8). Este processo foi realizado no programa Envi, sendo que após a combinação das bandas, as imagens foram salvas em formato

GeoTIFF e exportadas para o programa ArcGIS 10.4 para o georreferenciamento, no qual foram utilizadas imagens ortorretificadas do satélite SPOT.

Após o georreferenciamento, foi realizada a segmentação de imagens utilizando a classificação orientada a objetos no programa e-Cognition versão 5.0.10. A classificação das imagens foi dividida em dois níveis: 1º nível classificou-se as áreas como floresta e não floresta; e no 2º nível as áreas de floresta foram subdivididas em três classes: Floresta Secundária em Estágio Inicial (FSEI), Floresta Secundária em Estágio Médio-Avançado (FSEMA) e Reflorestamento.

O Bioma Mata Atlântica e suas fitofisionomias foram caracterizados conforme os conceitos e as definições do Manual Técnico da Vegetação Brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 2012). O mapeamento e identificação dos remanescentes florestais nas fitofisionomias da Mata Atlântica foram feitos com a base cartográfica de distribuição das unidades fitogeográficas mais representativas do Estado do Paraná, conforme Roderjan *et al.* (2002).

Dentre as fitofisionomias da Mata Atlântica no Paraná que compõem a Bacia do Rio Iguaçu, quatro são as mais representativas, sendo elas: Estepe ou Campos do Sul do Brasil, aqui denominado como “Campos”; Floresta Estacional Semidecidual (FES); Floresta Ombrófila Densa (FOD) e Floresta Ombrófila Mista (FOM).

Para a análise da mudança da cobertura florestal das Áreas de Preservação Permanentes (APP) referentes às Matas Ciliares da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu foram utilizados os arquivos vetoriais de hidrografia do Paraná disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA). Para simular a largura mínima dos rios foi realizado preliminarmente o comando *buffer* sobre o arquivo vetorial de linhas da hidrografia, sendo aplicada a largura de 5 metros resultando em uma largura de 10 metros para os rios secundários; e de 50 metros para o rio principal (Rio Iguaçu) resultando em 100 metros de largura para esse rio.

As Unidades de Conservação foram analisadas utilizando como base os dados do Mapa de Unidades de Conservação do Ministério do Meio Ambiente (MMA). Para o presente estudo foram utilizadas todas as UCs presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu totalizando 23 UCs das esferas municipal, estadual e federal. As terras indígenas foram analisadas com base em arquivo vetorial Fundação Nacional do Índio (FUNAI), em que cinco terras indígenas foram utilizadas no presente estudo. Já os assentamentos rurais foram analisados de acordo com arquivo vetorial do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), dentre os quais 135 assentamentos rurais estão localizados nos limites da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu.

A acurácia do mapeamento foi verificada a partir de matriz de confusão e índices da acurácia temática da classificação, tais como a Exatidão Global (G) e o índice Kappa (K) baseados em 397 pontos de referência distribuídos aleatoriamente pela bacia. A Exatidão Global (G) da classificação alcançou 85,4% de acerto, enquanto o índice Kappa atingiu o valor de 0,81, sendo considerado “Excelente” o desempenho da classificação de acordo com Landis e Koch (1977).

3.3 ESTIMATIVA DE VOLUME, BIOMASSA E CARBONO

O volume lenhoso (V), biomassa aérea acima do solo (AGB) e o carbono aéreo (C) foram estimados utilizando como base as imagens do 2º nível da classificação orientada a objetos do mosaico de imagens Landsat 7 e 8 para os anos-base 2000 e 2015. O cálculo de V, AGB e C foi realizado com o auxílio da ferramenta GEOBIOMASS desenvolvida por Machado *et al.* (2019). para o ArcGIS 10.x, em linguagem *Python*, adicionada como ferramenta do módulo *Toolbox* deste programa. A referida ferramenta faz o cálculo dessas variáveis atribuindo valores padrão para cada polígono de vegetação identificado na classificação das imagens, e consequentemente, permite a estimativa de V, AGB e C para a vegetação natural conforme a fitofisionomia e estágio de sucessão.

Foram utilizados os Valores Padrão de acordo com Wojciechowski (2015) com uma alteração, que consiste na utilização da média aritmética dos valores para o estágio médio e o estágio avançado de regeneração, uma vez que neste trabalho, esses estágios foram dispostos na classe Médio-Avançado (Tabela 1). Para a fitofisionomia Campos foram utilizados os mesmos valores padrão empregados em FOM, uma vez que, quando há formações florestais nos domínios de Campos, essas caracterizam-se por FOM, pois, a formação Campos coexiste com a FOM cujas espécies constituem capões e florestas-de-galeria (IBGE, 2012).

Tabela 1 - Valores padrões de volume lenhoso (V), biomassa aérea acima do solo (AGB) e carbono da biomassa (C) por fitofisionomia e estágio sucessional de florestas nativas do bioma Mata Atlântica.

FITOFISIONOMIA	ESTÁGIO	V (m ³ .ha ⁻¹)	AGB (t.ha ⁻¹)	C(t.ha ⁻¹)
Campos	FSEI	34,69	69,37	28,84
	FSEMA	158,71	283,27	117,625
FES	FSEI	28,13	56,25	24,28
	FSEMA	79,73	143,305	61,62
FOD	FSEI	31,55	63,1	26,49
	FSEMA	112,745	202,64	85,08
FOM	FSEI	34,69	69,37	28,84
	FSEMA	158,71	283,27	117,625

Em que: FES: Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista; FSEI: Floresta secundária em estágio inicial de regeneração; FSEMA: Floresta secundária em estágio médio-avançado de regeneração.

Fonte: Adaptado de Wojciechowski (2015)

O cálculo dos estoques de V, AGB e C foi realizado basicamente pela multiplicação da área dos fragmentos pelo respectivo valor padrão, conforme fitofisionomia e estágio sucessional:

$$X = \text{área} * VP$$

Em que X é a variável a ser estimada (V, AGB ou C); área corresponde ao tamanho do fragmento florestal analisado, em hectares; e VP corresponde ao Valor Padrão de C, AGB ou C para a fitofisionomia e estágio sucessional do fragmento florestal.

A quantidade em Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂eq) foi determinada pela multiplicação da estimativa de C (t.ha⁻¹) pelo fator de conversão obtido pela razão entre as massas atômicas do CO₂ e do C, ou seja, por 3,666 (C=12, O=16, CO₂=44/12).

V, AGB e C foram computados para a cobertura florestal nos anos-base 2000 e 2015 para a área total da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu e para as áreas especiais localizadas nos domínios da bacia: Mata Ciliar - APP, Unidades de Conservação, Terras Indígenas e Assentamentos Rurais. A mudança dos estoques de V, AGB e C foi realizada por meio da comparação das estimativas calculadas para os anos-base 2000 e 2015 por formação florestal e estágio sucessional para área total e por área especial, ou seja:

$$\text{Mudança de estoque} = \text{Estoque 2015} - \text{Estoque 2000}$$

A validação das estimativas foi realizada a partir da comparação das mesmas com levantamento direto dessas variáveis a partir de 20 parcelas de campo georreferenciadas e classificadas quanto à formação florestal e estágio de sucessão. Em que o arquivo vetorial dessas parcelas foi submetido à estimativa de biomassa e carbono a partir da ferramenta GEOBIOMASS e os resultados comparados pelo teste qui-quadrado (χ^2) com 95% de confiabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÁREA TOTAL

Os estoques de V, AGB, C e CO₂eq dos remanescentes florestais por estágio sucessional e fitofisionomia da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu - PR em 2000 e 2015 podem ser observados na Tabela 2. Houve aumento dos estoques de V, AGB e C e, conseqüentemente, de CO₂eq na ordem de 14,57% para V, 14,28% para AGB e 14,30% para C e CO₂eq nos remanescentes florestais da bacia no período analisado. De modo geral, a bacia comportou-se como sumidouro de carbono, uma vez que sequestrou 116.173.629,91 t de CO₂eq no período (diferença entre o estoque inicial (2000) e final (2015)).

Tabela 2 - Estoques de volume lenhoso (V), biomassa aérea acima do solo (AGB), carbono da biomassa aérea acima do solo (C) e dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) de remanescentes florestais por estágio sucessional e fitofisionomia da Bacia Hidrográfica do Rio

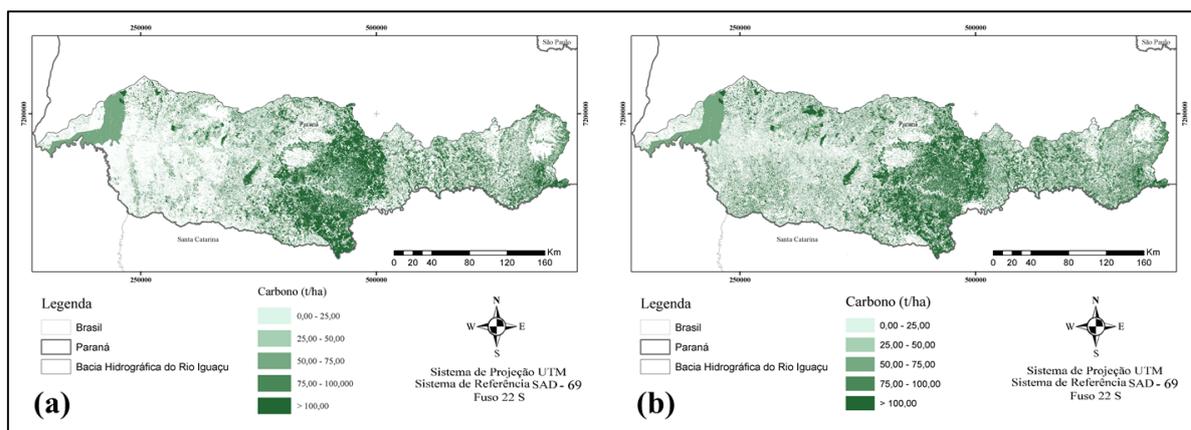
	E. S.	Fitof.	Área (ha)	V (m ³)	AGB (t)	C (t)	CO ₂ EQ (t)
Ano-base 2000	FSEI	CAMPOS	19.920,76	691.051,25	1.381.903,29	574.514,79	2.106.171,22
		FES	43.312,90	1.218.391,88	2.436.350,63	1.051.637,21	3.855.302,02
		FOD	585,02	18.457,38	36.914,76	15.497,18	56.812,66
		FOM	192.186,05	6.666.934,07	13.331.946,29	5.542.645,68	20.319.339,07
		Total	256.004,73	8.594.834,58	17.187.114,97	7.184.294,86	26.337.624,97
	FSEMA	CAMPOS	308.677,74	48.990.243,67	87.439.142,62	36.308.218,84	133.105.930,26
		FES	287.851,15	22.950.372,19	41.250.509,05	17.737.387,86	65.025.263,91
		FOD	22.283,38	2.512.339,68	4.515.504,12	1.895.869,97	6.950.259,31
		FOM	1.347.943,85	213.932.168,43	381.832.054,39	158.551.895,36	581.251.248,38
		Total	1.966.756,12	288.385.123,97	515.037.210,18	214.493.372,03	786.332.701,85
Total 2000			2.285.737,35	296.979.958,56	532.224.325,15	221.677.666,89	812.670.326,83
Ano-base 2015	FSEI	CAMPOS	12.570,72	436.078,15	872.030,59	362.539,46	1.329.069,65
		FES	5.863,33	164.935,47	329.812,31	142.361,65	521.897,82
		FOD	32,68	1.031,05	2.062,11	865,69	3.173,63
		FOM	51.952,39	1.802.228,41	3.603.937,29	1.498.306,93	5.492.793,20
		Total	70.419,12	2.404.273,08	5.052.052,77	2.106.593,11	7.722.770,32
	FSEMA	CAMPOS	318.016,86	50.472.456,03	90.084.636,24	37.406.733,29	137.133.084,23
		FES	366.192,35	29.196.516,07	52.477.194,72	22.564.772,61	82.722.456,38
		FOD	22.490,88	2.535.734,27	4.557.551,92	1.913.524,07	7.014.979,24
		FOM	1.610.002,94	255.523.566,61	456.065.532,81	189.376.595,82	694.254.600,27
		Total	2.316.703,03	337.728.272,96	603.184.915,70	251.261.625,78	921.125.120,12
Total 2015			2.605.957,33	340.253.203,50	608.234.384,36	253.367.145,86	928.843.956,74

Em que: E. S.: Estágio Sucessional; Fitof.: Fitofisionomia; FSEI: Floresta Secundária em Estágio Inicial de Regeneração; FSEMA: Floresta Secundária em Estágio Médio-Avançado de Regeneração; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista.

A distribuição dos estoques de C, em toneladas por hectare, dos remanescentes florestais da Bacia do Rio Iguaçu pode ser observada na Figura 2. A maior concentração de carbono em ambos os anos é na região central da bacia, também conhecida por Médio Iguaçu.

Segundo a 4^o edição do Inventário nacional de Emissões de GEEs, em 2015, o bioma mais emissor de GEEs foi a Mata Atlântica, com 127.962 GtCO₂eq emitidos, seguido do Cerrado e da Amazônia. Mesmo assim, a Mata Atlântica ainda apresentou queda de 6% das emissões de 2000 para 2015 para todo território brasileiro (BRASIL, 2017). Segundo esse inventário, no setor de Mudança de Uso da Terra e Florestas, as emissões de CO₂ ocorrem devido ao desmatamento e outras mudanças de uso da terra, enquanto que as remoções são provenientes de reflorestamentos, crescimento de vegetação secundária, bem como de áreas consideradas manejadas, conforme a metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) (BRASIL, 2017).

Figura 2 - Distribuição de Carbono Aéreo (t.ha⁻¹) na cobertura florestal da Bacia Hidrográfica do Rio Iguazu em 2000 (a) e 2015 (b).



Em um panorama nacional, no setor de Mudança de Uso da Terra e Florestas houve aumento considerável das emissões entre 1995 e 2004, que levou à aplicação do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), resultando em considerável redução do desmatamento no bioma Amazônia até 2017 (BRASIL, 2017).

Paiva e Fernandes (2015) analisando a fixação de carbono da Floresta da Tijuca (RJ) de 2003 a 2011, a qual pertence à Mata Atlântica, constataram que a área foi uma discreta fonte de carbono para a atmosfera, todavia, observaram que a área oscilou entre fonte e sumidouro de carbono, não sendo observada nenhuma tendência no período analisado. Souza *et al.* (2011) estudando o estoque e crescimento em volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em Floresta Estacional Semidecidual no Vale do Rio Doce (MG) constataram os volumes totais de 29.368,90 m³ em 2002 e 31.390,54 m³ em 2007, já os estoques de CO₂eq foram de 35.805,60 t e 36.479,26 t, respectivamente, em 2002 e 2007 em 302 ha para floresta em estágio Médio e Avançado de regeneração, o que resulta em uma taxa de 0,45 t/ha/ano de CO₂eq removidos. Já a Bacia Hidrográfica do Rio Iguazu apresentou uma taxa de 2,97 t/ha/ano de CO₂eq removidos no período analisado.

O aumento dos estoques de V, AGB, C e CO₂eq vem associado ao aumento de área com cobertura florestal nativa da Bacia Hidrográfica do Rio Iguazu, a qual registrou acréscimo de cerca de 3% de 2000 para 2015. Ou seja, a redução do desmatamento contribuiu para o sequestro de carbono pela área da bacia. A mudança no uso e cobertura da terra influenciam fortemente as emissões e a fixação de carbono em ecossistemas tropicais, pois, geram alterações no armazenamento de carbono no solo e na vegetação (VIEIRA *et al.*, 2008). Esse panorama demonstra a necessidade de restauração em áreas desflorestadas, que além de contribuir para a conservação da biodiversidade, fato de relevante importância no âmbito da Mata Atlântica, também colabora para o aumento do sequestro e estoque de carbono global (AZEVEDO *et al.* 2018).

As mudanças no uso e cobertura da terra são resultado de fatores naturais e atividades humanas, que exercem influência significativa no fornecimento de diversos serviços ecossistêmicos, tais como o armazenamento e sequestro de carbono. Devido à escala das intervenções, as grandes mudanças, seja na agricultura ou na cobertura vegetal, resultam em alterações expressivas nos serviços ecossistêmicos disponíveis (TALUKDAR *et al.*, (2020);

FERNANDES *et al.*, 2021). Logo, o aumento da cobertura florestal observada na Bacia do Rio Iguaçu contribuiu significativamente para o aumento dos estoques de carbono nesta região.

Comportamento contrário foi encontrado em bacias hidrográficas importantes do mundo, como na Bacia do Rio São Francisco, a qual teve perda total estimada de 7.496.128 hectares em diferentes tipos de vegetação nativa, o que corresponde a 133.187.028 t em estoques de carbono, de 1997 a 2017. Essa é uma das maiores bacias hidrográficas do Brasil e inclui parte dos biomas Caatinga, Mata Atlântica e Cerrado, além disso, abriga diversas atividades econômicas, porém, encontra-se sob vulnerabilidades socioeconômicas e ambientais, advindas do aumento das áreas agrícolas, principalmente, sobre as áreas de vegetação nativa (FERNANDES *et al.*, 2021). Em outras partes do mundo observa-se diminuição de estoques de carbono acompanhadas de perdas de cobertura vegetal nas última década, como nas florestas temperadas subtropicais e úmidas do Paquistão, nas proximidades do Himalaia, por exemplo, provocadas pelo aumento da urbanização e da pecuária de 1998 a 2018, a qual registrou perda de 626.600 t de Carbono por hectares no período de vinte anos analisados (MANNAN *et al.*, 2019).

Em comparação às estimativas realizadas pelo Inventário Florestal Nacional (IFN), os estoques de V, AGB e C da Bacia do Rio Iguaçu para o ano de 2015 correspondeu a 27% do volume de madeira, 93% da biomassa acima do solo e 79% do carbono aéreo das florestas paranaenses levantadas no ano de 2017 (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO – SFB, 2018). Levando em consideração que a Bacia do Rio Iguaçu possui 44,6% da cobertura de floresta nativa do Paraná, esses são percentuais bastante significativos, principalmente em relação à biomassa e carbono. Porém, vale ressaltar que, a porção da Bacia do Iguaçu abriga importantes unidades de conservação que mantêm suas coberturas em bom estado de conservação e mantém grande parte com vegetação em estágio Médio-Avançado de regeneração em 2015.

Dentre os estágios de regeneração, verifica-se que para Floresta Secundária em Estágio Inicial de sucessão (FSEI) houve diminuição de mais de 70% dos estoques de 2000 para 2015 para todas as variáveis. Já para FSEMA houve incremento nos estoques na ordem de 17% no período, também para todas as variáveis analisadas. A diminuição dos estoques para FSEI e aumento para FSEMA demonstra o reflexo da dinâmica da estrutura dos remanescentes florestais da bacia, os quais apresentaram tendência de amadurecimento, ou seja, muitos fragmentos passaram do estágio Inicial para Médio-Avançado de 2000 para 2015.

Ao longo da sucessão ecológica, o incremento de biomassa em florestas tropicais ocorre em função do aumento da abundância de espécies exclusivas de estágios sucessionais mais avançados, as quais apresentam troncos com maior volume (CHAZDON, 2012). Vieira *et al.* (2008), destacaram que em florestas neotropicais maduras, a captação líquida anual de CO₂ atmosférico pode ser tão grande que possibilita ser comparada em magnitude às emissões de combustíveis fósseis da comunidade europeia.

Remanescentes nos domínios da Floresta Ombrófila Densa (FOD) em FSEI sofreram os maiores decréscimos nos estoques, redução superior a 94%. Essa redução vem acompanhada da significativa redução da área da referida fitofisionomia nesse estágio sucessional, ao qual foi de 585,02 ha em 2000 para apenas 32,68 ha em 2015. Seguida da FOD em FSEI, FES também expressaram significativa redução dos estoques de V, AGB e C nos 15 anos analisados, cerca de 86%, para o mesmo estágio de sucessão (FSEI).

Em contrapartida, os maiores aumentos nos estoques para o período foram registrados para remanescentes em estágio Médio-Avançado (FSEMA), com acréscimos de 27% na FES, 19% na Floresta Ombrófila Mista (FOM), 3% em Campos e 0,93% na FOD.

4.2 ÁREAS ESPECIAIS

Área de Preservação Permanente - Mata Ciliar

Mudanças ocorridas no Código Florestal Brasileiro em 2012 geraram preocupações sobre o relaxamento da área requerida para proteção das margens de rios e dos impactos importantes sobre os serviços ecossistêmicos fornecidos pelas florestas ribeirinhas. Enquanto o setor do agronegócio elogiava a mudança legislativa, outros setores estavam menos entusiasmados, citando um risco maior de desmatamento e deterioração dos serviços ecossistêmicos (GARRASTAZÚ *et al.*, 2015).

Apesar desse cenário, de 2000 a 2015 as Matas Ciliares da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu removeram (sequestraram) 4.116.889,92 t de CO₂eq, o que corresponde a 274.459,33 t de CO₂eq por ano retiradas da atmosfera, isso porque, houve redução do desmatamento ou restauração de áreas ciliares nesse período para essa área (Tabela 3).

A dinâmica dos estoques de V, AGB, C e CO₂eq e para os fragmentos florestais nativos em áreas de Mata Ciliar nos diferentes estágios de sucessão, seguiu comportamento semelhante ao apresentado pelos fragmentos florestais na área total da bacia no período analisado (2000 a 2015), ou seja, houve diminuição dos estoques dessas variáveis para FSEI em todas as fitofisionomias e acréscimo nos estoques para a maioria das fitofisionomias em FSEMA. A única fitofisionomia em FSEMA que apresentou decréscimo dos estoques foi a FOD, com ligeira diminuição de -1,77%, isso devido à redução da cobertura florestal constatada para essa formação nesse estágio sucessional de modo geral, inclusive em área de Mata Ciliar.

Segundo Doubrava (2013), o processo de adequação das propriedades rurais, que coincide com o período de análise (2000 -2015), no que diz respeito à manutenção e principalmente à recuperação das áreas de preservação permanente, em especial às Matas Ciliares, foi e continua sendo um mecanismo potencial para o aumento do sequestro de carbono na região.

Tabela 3 - Mudança dos estoques de volume (V), biomassa aérea acima do solo (AGB), carbono da biomassa aérea acima do solo (C) e carbono equivalente (CO₂eq) dos remanescentes florestais em mata ciliar na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu – PR para os anos 2000 e 2015

ANO	E. S.	FITOF.	V (m ³)	AGB (t)	C (t)	CO ₂ eq (t)
2000	FSEI	CAMPOS	15.839,86	31.675,14	13.168,68	48.276,37
		FES	30.873,75	61.736,53	26.648,23	97.692,41
		FOD	201,55	403,09	169,22	620,37
		FOM	141.095,31	282.149,94	117.301,49	430.027,26
		Total	188.010,46	375.964,71	157.287,62	576.616,41
	FSEMA	CAMPOS	1.404.159,71	2.506.183,10	1.040.667,16	3.815.085,82
		FES	713.858,38	1.283.073,81	551.711,44	2.022.574,14
		FOD	60.520,75	108.775,78	45.670,37	167.427,56
		FOM	5.890.987,01	10.514.396,63	4.365.996,76	16.005.744,14
		Total	8.069.525,84	14.412.429,31	6.004.045,73	22.010.831,66
Total Geral - 2000			8.257.536,30	14.788.394,02	6.161.333,35	22.587.448,07
2015	FSEI	CAMPOS	14.729,19	29.454,14	12.245,31	44.891,32
		FES	2.486,64	4.972,40	2.146,31	7.868,36
		FOD	22,59	45,17	18,96	69,52
		FOM	51.134,87	102.255,00	42.511,67	155.847,77
		Total	68.373,29	136.726,71	56.922,25	208.676,97
	FSEMA	CAMPOS	1.597.702,13	2.851.622,97	1.184.107,57	4.340.938,36
		FES	888.904,61	1.597.698,18	686.997,40	2.518.532,45
		FOD	59.451,59	106.854,14	44.863,55	164.469,79
		FOM	7.166.655,36	12.791.244,81	5.311.434,92	19.471.720,43
		Total	9.712.713,69	17.347.420,10	7.227.403,44	26.495.661,02
Total Geral - 2015			9.781.086,98	17.484.146,81	7.284.325,69	26.704.338,00

Em que: E. S.: Estágio Sucessional; FSEI: Floresta Secundária em Estágio Inicial de Regeneração; FSEMA: Floresta Secundária em Estágio Médio-Avançado de Regeneração; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista.

Garrastazú *et al.* (2015) destacam a importância de uma análise mais detalhada dos impactos das Matas Ciliares obrigatórias (em área de APP) no sequestro de carbono em consequência do impacto que elas têm sobre os agricultores e a produtividade agrícola. Esses autores simularam os impactos da adequação das áreas de Mata Ciliar ao Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012) em uma área no município de Caçador (SC), e concluíram que, caso 100% das Matas Ciliares da área fossem recuperadas, em 40 anos seriam sequestrados 130% a mais de carbono, porém, embora importantes, os autores concluíram que esses números não adicionariam muito ao total de sequestro de carbono quando comparados com outras classes de uso da terra naquela área.

Diante disso, Garrastazú *et al.* (2015) afirmam que as Matas Ciliares desempenham um papel mais relevante na prestação de outros serviços ecossistêmicos, como qualidade da água e biodiversidade, do que no sequestro de carbono. Então, pode-se dizer que a recuperação e manutenção das áreas protetivas de Mata Ciliar beneficiam localmente a população pela

melhoria da qualidade ambiental promovida e globalmente, pela absorção de carbono da atmosfera que colabora na mitigação do efeito estufa (MARTINS, 2005).

Unidades de Conservação

A cobertura florestal nativa nas Unidades de Conservação (UCs), foi sumidouro de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) ao longo dos 15 anos analisados (Tabela 4). Foi verificado acréscimo de 52.771,93 t de CO₂eq na floresta secundária em estágio Inicial (FSEI) e 23.893,46 t de CO₂eq na floresta secundária em estágio Médio-Avançado (FSEMA), perfazendo um total de 76.665,39 t de CO₂eq sequestrados de 2000 a 2015.

Tabela 4 - Mudança dos estoques de volume (V), biomassa aérea acima do solo (AGB), carbono da biomassa aérea acima do solo (C) e carbono equivalente (CO₂eq) dos remanescentes florestais em unidades de conservação da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu – PR para os anos 2000 e 2015

ANO	E. S.	FITOF.	V (m ³)	AGB (t)	C (t)	CO ₂ eq (t)
2000	FSEI	CAMPOS	28.754,33	57.500,38	23.905,30	87.636,84
		FES	1.473,64	2.946,76	1.271,95	4.662,98
		FOD	12.091,99	24.183,97	10.152,67	37.219,68
		FOM	89.861,26	179.696,62	74.707,37	273.877,23
		Total	132.181,22	264.327,72	110.037,30	403.396,73
	FSEMA	CAMPOS	2.517.361,81	4.493.057,02	1.865.696,45	6.839.643,17
		FES	12.337.404,49	22.174.987,47	9.535.066,66	34.955.554,38
		FOD	1.466.836,10	2.636.388,90	1.106.908,65	4.057.927,09
		FOM	23.023.170,78	41.092.392,34	17.063.199,95	62.553.691,00
		Total	39.344.773,19	70.396.825,74	29.570.871,70	108.406.815,65
Total Geral			39.476.954,41	70.661.153,46	29.680.909,00	108.810.212,38
2015	FSEI	CAMPOS	60.764,05	121.510,59	50.517,01	185.195,38
		FES	3,60	7,20	3,11	11,39
		FOD	553,92	1.107,84	465,08	1.704,99
		FOM	88.345,30	176.665,13	73.447,06	269.256,90
		Total	149.666,87	299.290,75	124.432,26	456.168,66
	FSEMA	CAMPOS	2.725.749,80	4.864.993,67	2.020.139,37	7.405.830,95
		FES	12.472.057,09	22.417.009,17	9.639.134,05	35.337.065,43
		FOD	1.488.338,25	2.675.035,37	1.123.134,67	4.117.411,70
		FOM	22.661.266,43	40.446.455,44	16.794.981,19	61.570.401,03
		Total	39.347.411,57	70.403.493,66	29.577.389,28	108.430.709,11
Total Geral			39.497.078,44	70.702.784,41	29.701.821,54	108.886.877,77

Em que: E. S.: Estágio sucessional; FSEI: Floresta Secundária em Estágio Inicial de Regeneração; FSEMA: Floresta Secundária em Estágio Médio-Avançado de Regeneração; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista.

O montante de CO₂eq estocado pela cobertura florestal das UCs representa 11,7% do total estocado por toda a Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu em 2015, sendo que as UCs cobrem 8,45% da área da bacia. Isso demonstra o quanto essas áreas protegidas são importantes sobre a dinâmica natural da biomassa e as relações existentes entre a floresta e a fixação do CO₂ atmosférico, tanto em captura quanto em imobilização. Além disso, a imobilização de CO₂ por Unidades de Conservação corresponde a uma alternativa em projetos de Pagamentos por Serviços Ambientais, contribuindo para a manutenção dessas áreas e conservação da biodiversidade (SILVA *et al.*, 2018).

Barni *et al.* (2016) avaliando a distribuição espacial da biomassa florestal, confrontando áreas protegidas (UCs e Terras Indígenas) e de uso agrícola no Estado de Roraima, concluem que as UCs da região contribuíram com 21,8% do estoque total de biomassa na zona sem influência savânica no Estado, principalmente em florestas abertas ou em florestas menos densas (por exemplo, ecótonos), esses autores reforçam o papel importante de áreas protegidas em projetos de Redução de Emissões do Desmatamento e da Degradação Florestal (REDD) para a conservação do carbono florestal na Amazônia.

Quanto à dinâmica por fitofisionomia, percebe-se considerável incremento nos estoques das variáveis para a formação Campos tanto para FSEI, quanto para FSEMA. A formação Campos contribuiu substancialmente para o saldo positivo dos estoques das variáveis para FSEI de modo geral, uma vez que para as demais fitofisionomias houve decréscimo nos estoques de V, AGB, C e CO₂eq.

Para FSEMA, a maioria das fitofisionomias removeram carbono no período analisado, com exceção de FOM, que teve esse comportamento em decorrência da diminuição de sua área de cobertura (-2.280,29 ha), que correspondeu à 1,57 % a menos da área de cobertura dessa formação nesse estágio de sucessão em UCs, ou seja, o desmatamento na área de FOM levou essa fitofisionomia ser fonte de carbono atmosférico no período analisado em UCs.

FSEMA apresentou a maior concentração dos estoques das variáveis analisadas, pois o grupo das secundárias tardias é o de maior concentração de carbono por árvore e consequentemente o de maior potencial de fixação de CO₂, isso devido ao diâmetro acentuado destes indivíduos, o que acarreta em maior volume e, consequentemente, corrobora com maior poder de imobilização de carbono no material lenhoso da parte aérea (SILVA *et al.*, 2018).

Terras Indígenas

Em Terras Indígenas localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu houve sequestro de 321.155,84 t de CO₂eq considerando o balanço no período (Tabela 5). Por fitofisionomia nos estágios de sucessão, observou-se a mesma tendência da dinâmica do total de remanescentes florestais da bacia, ou seja, diminuição dos estoques para todas as formações em FSEI e o aumento das mesmas em FSEMA nos quinze anos analisados.

O total de CO₂eq sequestrado representa 0,27% do total removido pela bacia no período analisado (2000-2015); esse baixo percentual se deve à baixa representatividade em área de ocupação das florestas nativas em Terras Indígenas na bacia, as quais ocupam apenas 0,58% da cobertura total da bacia. Todavia, em nível global, recentemente as comunidades indígenas surgiram como atores importantes nos esforços para reduzir as emissões de carbono florestal, em parte porque são vistos como manejadores conscientes das terras florestais que têm título legal (BLACKMAN; VEIT, 2018).

Tabela 5 - Mudança dos estoques de volume (V), biomassa aérea acima do solo (AGB), carbono da biomassa aérea acima do solo (C) e carbono equivalente (CO₂Eq) dos remanescentes florestais em terras indígenas na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçú – PR de 2000 a 2015

ANO	E. S.	FITOF.	V (m ³)	AGB (t)	C (t)	CO ₂ eq (t)
2000	FSEI	CAMPOS	543,81	1.087,45	452,10	1.657,40
		FES	1.706,02	3.411,43	1.472,53	5.398,28
		FOD	0,00	0,00	0,00	0,00
		FOM	13.023,28	26.042,81	10.827,08	39.692,08
		Total	15.273,11	30.541,69	12.751,71	46.747,76
	FSEMA	CAMPOS	167.389,46	298.761,34	124.057,62	454.795,24
		FES	447.828,80	804.917,93	346.108,25	1.268.832,85
		FOD	3.268,01	5.873,70	2.466,12	9.040,79
		FOM	3.933.707,98	7.020.990,86	2.915.395,38	10.687.839,48
		Total	4.552.194,26	8.130.543,83	3.388.027,38	12.420.508,36
Total Geral			4.567.467,36	8.161.085,53	3.400.779,08	12.467.256,12
2015	FSEI	CAMPOS	0,00	0,00	0,00	0,00
		FES	8,56	17,11	7,38	27,07
		FOD	0,00	0,00	0,00	0,00
		FOM	0,00	0,00	0,00	0,00
		Total	8,56	17,11	7,38	27,07
	FSEMA	CAMPOS	181.589,05	324.105,15	134.581,38	493.375,36
		FES	499.095,20	897.063,05	385.729,91	1.414.085,87
		FOD	3.238,29	5.820,27	2.443,69	8.958,55
		FOM	4.001.476,26	7.141.945,56	2.965.620,60	10.871.965,12
		Total	4.685.398,79	8.368.934,04	3.488.375,58	12.788.384,89
Total Geral			4.685.407,35	8.368.951,15	3.488.382,97	12.788.411,96

Em que: E. S.: Estágio Sucessional; FSEI: Floresta Secundária em Estágio Inicial de Regeneração; FSEMA: Floresta Secundária em Estágio Médio-Avançado de Regeneração; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista.

Em estudo sobre o estoque total de biomassa no Estado de Roraima, Amazônia brasileira, Barni *et al.* (2016), constataram que o maior estoque de carbono foi encontrado em Terras Indígenas (76%) quando comparado à UCs e terras de uso agrícola. Isso porque, a área das Terras Indígenas em Roraima é maior que o total de todas as Unidades de Conservação, as Terras Indígenas também possuem as maiores áreas de floresta ombrófila densa e aberta em Roraima, armazenando grandes quantidades de biomassa.

De acordo com Blackman e Veit (2018), o Acordo de Paris, que estabelece uma arquitetura internacional de política climática pós-2020, contém numerosas referências as Terra Indígenas, como por exemplo, o reconhecimento da necessidade de fortalecer o conhecimento, as tecnologias, as práticas e os esforços das comunidades locais e dos povos indígenas relacionados à abordagem e resposta às mudanças climáticas.

Um relatório realizado por Organizações de Povos Indígenas e Comunidades Locais da América, África e Indonésia em parceria com Organizações Não Governamentais (ONGs) e instituições de pesquisa para 21^a Conferência das Partes (COP21), na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (UNFCCC), revela que os territórios indígenas localizados na Bacia Amazônica, na região mesoamericana, na República Democrática do Congo e na Indonésia contêm 20,1% do carbono armazenado acima do solo nas florestas

tropicais do planeta. Este número demonstra o papel histórico que os territórios indígenas têm desempenhado na conservação dessas florestas e seu potencial para enfrentar um desafio fundamental na manutenção de longo prazo da estabilidade climática: manter essas florestas em pé (TROPICAL FOREST CARBON IN INDIGENOUS TERRITORIES, 2015).

Popkin (2015) faz uma análise sobre o relatório acima citado e afirma que os autores do relatório argumentam que, para as florestas tropicais continuarem a ser um importante sumidouro de carbono, os grupos indígenas precisarão de maior controle sobre suas florestas. Ferretti-Gallon e Busch (2014) afirmam que florestas geridas por povos indígenas são significativamente menos prováveis de serem desmatadas do que a média para floresta tropical, todavia, esses autores afirmam que poucos estudos investigaram diretamente o efeito das políticas de posse da terra no armazenamento de carbono.

Então, de fato as Terras Indígenas conservam mais as suas florestas do que outras áreas, uma vez que mais de 80% do território das Terras Indígenas da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu foram cobertas por floresta nativa e grande parte em estágio Médio-Avançado de regeneração, sendo esse percentual superior até as Unidades de Conservação (77% em 2015). Logo, a contribuição dessas áreas no balanço global do carbono também é indiscutível, todavia, pesquisas mais sólidas são necessárias para embasar as decisões quanto à posse e gestão dessas áreas.

Assentamentos Rurais

Os valores dos estoques de V, AGB e C, além do CO₂eq, para Floresta Secundária em estágio Inicial (FSEI) e em estágio Médio-Avançado (FSEMA) para as fitofisionomias presentes em Assentamentos Rurais da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu podem ser observados na Tabela 6.

Os Assentamentos Rurais ocupam 3,11% da área total da Bacia do Rio Iguaçu e 44,85% de seu território continham cobertura florestal nativa em 2000, a qual foi reduzida para 42,14% em 2015, sendo que essa cobertura contribuiu com 3,05% de todo o CO₂eq estocado pela bacia em 2015. Esses percentuais parecem baixos, porém, quando comparados com as demais áreas especiais analisadas no presente estudo, ocupa segunda colocação em termos de estoque de carbono, atrás apenas das Unidades de Conservação.

Claro que a quantidade de V, AGB, C e CO₂eq estocada está intimamente ligada à extensão de área coberta pelas classes analisadas, porém, vale ressaltar que os assentamentos foram diagnosticados com proporção de áreas com florestas nativas comparáveis às áreas protegidas como as Matas Ciliares, as quais cobriam 40,96% em 2000 e 45,41% em 2015.

Apesar da diminuição de cerca de 6% da área da cobertura florestal nativa (FSEI+FSEMA) dos Assentamentos Rurais no período analisado, houve acréscimo nos estoques de V, AGB, C e CO₂eq. Isso porque, apesar dessa diminuição da área florestal, quando analisada a vegetação nos diferentes estágios sucessionais, a FSEMA apresentou aumento em área para todas as fitofisionomias e esse estágio de sucessão tem maior contribuição na soma dos estoques devido aos valores padrão mais elevados dessas variáveis. Pois, como já mencionado, devido à ocorrência de indivíduos de maior diâmetro e proporções em estágios de

regeneração mais avançados, esses têm maior quantidade de biomassa e, por consequência, também de carbono (WATZLAWICK *et al.*, 2002).

Tabela 6 - Mudança dos estoques de volume (V), biomassa aérea acima do solo (AGB), carbono da biomassa aérea acima do solo (C) e carbono equivalente (CO₂eq) dos remanescentes florestais em assentamentos rurais na Bacia Hidrográfica Do Rio Iguaçu – PR para os anos 2000 e 2015

ANO	E. S.	FITOF.	V (m ³)	AGB (t)	C (t)	CO ₂ eq (t)
2000	FSEI	CAMPOS	46.399,92	92.786,46	38.575,20	141.416,68
		FES	41.172,23	82.329,82	35.537,21	130.279,41
		FOD	0,00	0,00	0,00	0,00
		FOM	230.669,85	461.273,21	191.770,50	703.030,64
		Total	318.242,00	636.389,49	265.882,90	974.726,73
	FSEMA	CAMPOS	1.846.253,35	3.295.244,07	1.368.316,74	5.016.249,18
		FES	844.017,29	1.517.018,66	652.305,85	2.391.353,25
		FOD	0,00	0,00	0,00	0,00
		FOM	7.129.881,98	12.725.610,67	5.284.181,01	19.371.807,58
		Total	9.820.152,62	17.537.873,40	7.304.803,60	26.779.410,01
Total Geral			10.138.394,62	18.174.262,89	7.570.686,51	27.754.136,74
2015	FSEI	CAMPOS	2.424,95	4.849,21	2.016,02	7.390,72
		FES	2.818,46	5.635,91	2.432,71	8.918,31
		FOD	0,00	0,00	0,00	0,00
		FOM	6.137,56	12.273,35	5.102,54	18.705,92
		Total	11.380,97	22.758,47	9.551,27	35.014,96
	FSEMA	CAMPOS	1.574.391,81	2.810.018,08	1.166.831,56	4.277.604,51
		FES	944.783,47	1.698.133,63	730.183,83	2.676.853,94
		FOD	0,00	0,00	0,00	0,00
		FOM	7.853.028,69	14.016.302,92	5.820.127,90	21.336.588,90
		Total	10.372.203,97	18.524.454,63	7.717.143,30	28.291.047,34
Total Geral			10.383.584,94	18.547.213,11	7.726.694,57	28.326.062,30

Em que: E. S.: Estágio Sucessional; FSEI: Floresta Secundária em Estágio Inicial de Regeneração; FSEMA: Floresta Secundária em Estágio Médio-Avançado de Regeneração; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista.

Por se tratar de uma categoria de áreas que tem por objetivo a agricultura familiar e não a conservação da natureza em primeiro plano, os Assentamentos Rurais podem ser comparados ao setor de Agropecuária nas estimativas de emissões de GEEs. Do ano 2000 para 2015 esse setor expressou aumento de 23% das emissões de GEEs e, portanto, caracterizaram-se por fontes de carbono atmosférico para o país no período (BRASIL, 2017), ao passo que os Assentamentos Rurais da bacia tiveram comportamento contrário, pois, foram sumidouros. Todavia, é importante ressaltar que a estimativa da mudança de V, AGB e C foi baseada apenas em comparação a cobertura florestal dos assentamentos da Bacia do Rio do Iguaçu, enquanto que o levantamento para o setor Agropecuário em nível nacional leva em consideração outros aspectos da área, tais como: animais em pastagem, uso de fertilizantes, resíduos agrícolas, etc. (BRASIL, 2017).

Wandelli e Fearnside (2015) avaliaram os efeitos da história do uso da terra na AGB em terrenos que foram usados para agricultura e para pastagens em um Assentamento Rural na Amazônia central, e apontaram que uma vegetação secundária de seis anos derivada da

agricultura de corte e queima tem 50,3 t.ha⁻¹ de AGB, enquanto que uma área da mesma idade derivada de pastagem tem AGB de 31,1 t.ha⁻¹, logo a vegetação secundária em pastagens abandonadas cresce 38% mais lentamente até os seis anos de idade, além disso, o número de queimadas também afeta negativamente a recuperação de biomassa.

Estudos como o de Wandelli e Fearnside (2015) levantam a importância da inclusão de informações sobre o histórico do uso da terra nas estimativas de biomassa, em especial o tempo sob agricultura ou uso de pastagens e número de queimadas, principalmente em áreas com recente uso agrícola, como o caso de Assentamentos Rurais, para que essas estimativas sejam mais confiáveis do que as baseadas apenas na idade da vegetação secundária.

Poucas informações sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) em pequenas propriedades rurais são encontradas na literatura. Essa constatação também foi feita em um estudo realizado pela Organização Solidaridad em parceria técnica com o Instituto de Manejo e Certificação Agrícola (IMAFLOA), o qual afirma que essa insuficiência de dados tem representado um fator limitante na caracterização das emissões dessas importantes unidades produtivas, constituindo, assim, uma lacuna no conhecimento sobre o efeito das práticas adotadas e as medidas necessárias para promover mudanças (SOLIDARIDAD, 2018).

A falta dessas informações, do acesso a tecnologias e de incentivos públicos, reduz a capacidade dos agricultores familiares no Brasil de realizar uma transição para um desenvolvimento territorial rural de baixas emissões de carbono. Nesse contexto, o acesso a políticas públicas direcionadas pode garantir oportunidades para atrair fundos de investimentos inclusivos para mitigação das emissões de carbono, além de demonstrar o papel da agricultura familiar nas cadeias de fornecimento globais que possuem comprometimento com a agenda climática (SOLIDARIDAD, 2018).

4.3 ESTOQUE E REMOÇÃO DE CO₂EQ DA COBERTURA FLORESTAL DAS ÁREAS ESPECIAIS

Confrontando as áreas especiais, percebe-se que as Unidades de Conservação (UCs) representam a maior porção do estoque de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) total da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu em 2015, com 11,72% (Tabela 7). Este comportamento se deve a maior porção de área ocupada por UCs na bacia em relação a outras áreas especiais, e consequentemente, maior cobertura florestal (6,51%) dessa área especial em comparação com as outras. Do mesmo modo, assentamentos rurais ocupam o segundo lugar em representatividade do estoque de CO₂eq, pois ocupam segunda posição em área de ocupação e cobertura florestal em 2015, seguidos pelas APP – Mata Ciliar e finalmente pelas Terras Indígenas.

Quanto ao estoque de CO₂eq armazenados em áreas especiais em 2015 é importante ressaltar que, juntas representam aproximadamente 20% do CO₂eq estocado em toda a bacia, apesar de representarem cerca de 15% da área total e 10% da área floresta de toda a bacia, demonstrando a relevância dessas categorias de áreas no armazenamento de carbono nas suas florestas.

Tabela 7 - Estoque de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) em 2015 e remoção de CO₂eq de 2000 a 2015 de áreas especiais Da Bacia Hidrográfica (BH) do Rio Iguaçu - PR.

Área Especial	% área	% Floresta	Estoque CO ₂ eq	%	Remoção CO ₂ eq	%
BH do Rio Iguaçu	100,00	47,27	928.843.956,74	100,00	116.173.629,91	100,00
APP – Mata Ciliar	2,74	1,33	26.704.338,00	2,88	4.116.889,92	3,54
Unidades de Conservação	8,45	6,51	108.886.877,77	11,72	76.665,39	0,07
Terra Indígena	0,72	0,59	12.788.411,96	1,38	321.155,84	0,28
Assentamentos Rurais	3,11	1,34	28.326.062,30	3,05	571.925,56	0,49
Total Áreas Especiais	15,02	9,77	176.705.690,03	19,02	5.086.636,71	4,38

Em que APP: Área de Preservação Permanente; % área: porcentagem de área em relação à área total da bacia; % Floresta: porcentagem de floresta em relação à área total de floresta da bacia no ano de 2015; Estoque CO₂eq: CO₂eq estocado em 2015; Remoção CO₂eq: diferença nos estoques de CO₂eq de 2000 para 2015; %: representatividade relativa da coluna à esquerda em relação à toda a bacia.

Em relação à remoção de CO₂eq pelas áreas especiais percebe-se inversão na representatividade, ou seja, as UCs passam a ser as menos representativas em relação a remoção total da bacia (0,07%). Este comportamento se deve a pequena mudança ocorrida na cobertura florestal no período analisado, com um aumento de apenas 0,41% de 2000 para 2015. Este comportamento revela que, em termos de remoção ou sequestro de CO₂eq, é necessário que haja dinâmica na cobertura florestal para que as taxas de remoção sejam relevantes.

Neste sentido, áreas que passam por maior regeneração florestal apresentam maior impacto na remoção de CO₂eq, como as APPs – Mata Ciliar as quais apresentaram aumento de 12,77% de sua cobertura florestal no período, sendo a categoria mais recomposta dentre as áreas especiais da bacia. Este comportamento revela a importância de projetos de restauração e de recuperação florestal no âmbito do mercado de carbono, uma vez que, para serem elegíveis, os projetos devem comprovar a diferença entre os estoques, ou seja, é necessário que haja a remoção de CO₂eq atmosférico sequestrado na vegetação, em casos de projetos florestais.

Todavia, é importante ressaltar que áreas como Unidades de Conservação, apesar de não apresentarem grande remoção de CO₂eq, uma vez que possuem uma cobertura florestal estabilizada, desempenham papel importante na fixação ou imobilização do CO₂eq. Pois, se a cobertura florestal desse tipo de área fosse desmatada, grande quantidade de CO₂eq seria liberado para a atmosfera, contribuindo negativamente para o aumento dos fenômenos relacionados às mudanças climáticas.

Juntas as áreas especiais representam cerca de 5% do montante de CO₂eq sequestrado no período, revelando que as áreas especiais são mais eficientes na imobilização de CO₂eq em seus estoques devido a manutenção de suas coberturas florestais, do que na remoção de CO₂eq atmosférico, uma vez que não há mudanças consideráveis na cobertura florestal dessas áreas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A redução do desmatamento refletiu positivamente nos estoques de volume, biomassa, carbono e carbono equivalente da cobertura florestal nativa da bacia fazendo com que a mesma fosse sumidouro de carbono atmosférico no balanço dos estoques de 2000 para 2015. A Bacia

Hidrográfica do Rio Iguaçu apresentou aumento nos estoques na ordem de 14% para V, AGB, C e CO₂eq, o que corresponde a um sequestro de 116.173.629,91 t de CO₂eq no período.

As áreas especiais analisadas, também foram sumidouro de carbono atmosférico no período. Inclusive os Assentamentos Rurais da bacia tiveram esse comportamento, isso porque, apesar da redução total da cobertura florestal nativa, os remanescentes de 2015 encontravam-se em sua grande maioria em estágio médio-avançado de regeneração, que é um estágio com maior poder de sequestro de carbono. As áreas especiais juntas representam cerca de 20% do CO₂eq estocado na bacia e cerca de 5% do CO₂eq removido. Dentre as áreas especiais, Unidades de Conservação contribuem mais para o estoque, enquanto as APP – Mata Ciliar contribuem mais para a remoção de carbono.

AGRADECIMENTOS E INFORMAÇÕES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e, portanto, os autores agradecem à instituição.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. S.; GREGO, C. R.; BOLFE, E. L. Dados geoespaciais e socioeconômicos na análise da dinâmica florestal em São Paulo. **Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 1, p. 29-38, 2015.
- AZEVEDO, T. R. *et al.* SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. **Scientific Data**, v. 5, 2018.b.
- BACH, W. Modeling the transient and equilibrium climate response to greenhouse gases. **Annual Review in Automatic Programming**, v.12, n. 2, p.40-49, 1985.
- BARNI, P. E. *et al.* Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.377, n.1, p. 170-181, 2016.
- BELLO, C. *et al.* Defaunation affects carbon storage in tropical forests. **Sci. Adv.** 1, e1501105, 2015.
- BLACKMAN, A.; VEIT, P. Titled Amazon Indigenous Communities Cut Forest Carbon Emissions. **Ecological Economics**, v. 153, p. 56-57, 2018.
- BRASIL. **Decreto nº 5.092, de 21 de maio de 2004**. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5092.htm. Acesso em: 20 jan. 2023.
- BRASIL. **Lei n.12.651 de 25 de maio de 2012**. Código Florestal Brasileiro. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 27 ago. 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTI. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 4.ed. 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/estimativas_4ed.pdf. Acesso em: 27 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 6.ed. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2023.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Mata Atlântica. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atl%C3%A2ntica_emdesenvolvimento.html. Acesso em: 20 jan. 2023.

BRASIL. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima**. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mre/pt-br/arquivos/documentos/clima/brasil-indc-portugues.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2023.

CHAZDON, R. Regeneração de florestas tropicais. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, Belém, v. 7, n. 3, p. 195 - 218, 2012.

CLIMATE WATCH. **Historical GHG Emissions**. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2019&start_year=1990. Acesso em: 18 jan. 2023.

DELGADO, R. C. *et al.* Seasonality of gross primary production in the Atlantic Forest of Brazil. **Global Ecology and Conservation**, v.14, 2018.

DOUBRAWA, B. **Dinâmica da cobertura florestal e dos estoques de carbono na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu: 2000 a 2010**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

ESSEX, C.; MCKITRICK, R.; ANDRESEN B. Does a global temperature exist? **Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics**, v. 32, p.1–27, 2007.

ETHERIDGE, D. M. *et al.* Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctica ice and firn. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p.101:4115–28, 1996.

EVEREST, D. A. The greenhouse effect: issues for policymakers. **Energy Policy**, v. 17,n. 2, p.177-181, 1989.

FERNANDES, M. M. *et al.* Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco river basin, Brazil. **Environmental Challenges**, v. 5, 100247, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100247>

FERRETTI-GALLON, K.; BUSCH, J. **What Drives Deforestation and What Stops It? A Meta-Analysis of Spatially Explicit Econometric Studies**. Center for Global Development, Washington, Working Paper 361, Climate and Forest Paper Series #2, April, 2014.

FLORIDES, G. A.; CHRISTODOULIDES, P. Global warming and carbon dioxide through sciences. **Environment International**, v.35, n. 2, p. 390-401, 2009.

FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO – FUNAI. **Índios no Brasil: Terras Indígenas**. Disponível em <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/demarcacao-de-terras-indigenas>. Acesso em 20 jan. 2023.

GARRASTAZÚ, M. C. *et al.* Carbon sequestration and riparian zones: Assessing the impacts of changing regulatory practices in Southern Brazil. **Land Use Policy**, v.42, p. 329–339, 2015.

GASPAR, R. O. *et al.* Análise fitossociológica e do estoque de carbono no estrato arbóreo de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual. **Ciência Florestal**, v.24, n.2, p. 313-324, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.5902/1980509814569>

HANSEN, M. C. *et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, v. 342, p. 850–853, 2013.

HEGERL, G. C. *et al.* Understanding and Attributing Climate Change. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR; H.L. MILLER. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná: Mapas de Precipitação**. Disponível em <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=856>. Acesso em 15 set. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio. **SNUC**. Disponível em <https://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/politicas/snuc.html>. Acesso em 20 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA - INCRA. **Assentamentos**. Disponível <https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/reforma-agraria/assentamentos>. Acesso em 20 jan. 2023.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Stocker, T. F. *et al.*]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. **Biometrics**, Arlington, v. 33, p.159-174,1977.

LEROUX, M. **Global warming - myth or reality? The erring ways of climatology**. Chichester: Springer, 2005.

- LIMA, R.A.F. *et al.* The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Nat Commun** v. 11, 6347, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20217-w>
- MACHADO, A.; *et al.* Dinâmica do volume, biomassa e carbono na Mata Atlântica por ferramenta de detecção de mudanças. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 4, p. 437-444, jul./ago. 2019.
- MANNAN, A. *et al.* Application of land-use/land cover changes in monitoring and projecting forest biomass carbon loss in Pakistan. **Glob. Ecol. Conserv.**, 17, p. e00535, 2019. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00535.
- MARTINS, O. S. **Determinação do potencial de sequestro de carbono na recuperação de matas ciliares na região de São Carlos – SP.** 2005. 136 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- MCBEAN, G.; WEAVER, A.; ROULET, N. The science of climate change - what do we know? Isuma **Canadian Journal of Policy Research**, v. 2, n. 4, p. 16–25, 2001.
- MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 149-154, 2006.
- MERENDA, E. A. **Reservatório de Segredo e área de entorno: aspectos legais e modificações no uso do solo.** 2004. 70 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia – Universidade Federal de Maringá, Maringá, 2004.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, Revisões Temáticas. v.1, n.1, BN00701122001. 2001.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Climate and Earth’s Energy Budget.** 2009. Disponível em <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page1.php>. Acesso em 11 jan. 2019.
- PAIVA, C. M.; FERNANDES, F. R. Estudo da Produtividade Primária do Bioma Mata Atlântica via Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 05-14, 2015.
- PARANÁ. SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DO TURISMO. **Bacias Hidrográficas do Paraná: Série Histórica.** Disponível em www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/file/corh/revista_bacias_hidrograficas_do_parana.pdf. Acesso em 22 ago. 2018.
- POPKIN, G. Indigenous people could be key to storing carbon in tropical forests, new report concludes. **Science**, dec., 2015.
- REBOITA, M. S. *et al.* Climate Projections for South America: RegCM3 Driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, v. 2014, Article ID 376738, 17 p, 2014.
- RIBEIRO, S. C. *et al.* Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da Zona da Mata Mineira. **Árvore**, v. 34, p. 495-504, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000300013>

RODERJAN, C. V. *et al.* As regiões fitogeográficas do Estado do Paraná. **Revista Ciência e Ambiente**, v. 24, p. 75- 92, jan/jun 2002.

ROSA, P. A *et al.* Relação entre população rural e cobertura florestal no noroeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68, v.10, p. 1993-2006, 2016.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Inventário Florestal Nacional: principais resultados: Paraná**. Brasília, DF: MMA, 2018.

SILVA, L. C. *et al.* A. Estoques de biomassa e carbono em unidade de conservação no bioma Mata Atlântica. **Biofix Scientific Journal**, v. 3, n. 2, p. 243-251, 2018.

SOLIDARIDAD. **Balço de carbono na produção agrícola familiar na Amazônia: cenários e oportunidades**. Solidaridad; Imaflora. São Paulo, 2018. Disponível em https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/5af45af8065f9_low_carbon_family_agriculture_in_the_amazon_0.pdf. Acesso em 23 de novembro de 2018

SOUZA, A. L. *et al.* Estoque e crescimento em volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em Floresta Estacional Semidecidual. **Árvore**, Viçosa, v.35, n.6, p.1277-1285, 2011.

TALUKDAR, S. *et al.* Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. **Ecol. Indic.**, v. 112, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106121>

TROPICAL FOREST CARBON IN INDIGENOUS TERRITORIES: A GLOBAL ANALYSIS. **A report prepared for UNFCCC COP21**. Dec. 2015. Disponível em: <https://www.edf.org/sites/default/files/tropical-forest-carbon-in-indigenous-territories-a-global-analysis.pdf>. Acesso em 22 nov. 2018.

VIEIRA, S. A. *et al.* Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. **Biota Neotropica**, v.8, n.2, p.21-29, 2008.

WANDELLI, E. V.; FEARNESIDE, P. M. Secondary vegetation in central Amazonia: Land-use history effects on aboveground biomass. **Forest Ecology and Management**, v.347, n.1, p. 140-148, Jul, 2015.

WATZLAWICK, L. F. *et al.* Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLIOTO, M. A. B. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: AM Impressos; 2004. p. 95-109.

WATZLAWICK, L. F. *et al.* Fixação de carbono em floresta ombrófila mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLIOTTO, M. A.; GOMES, F. S. (Org.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 153-173.

WOJCIECHOWSKI, J. **JCarbon**: Software na web com data mining para estimativas de volume, biomassa e carbono em florestas. 2015. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

XU, B.; *et al.* Decadal change of forest biomass carbon stocks and tree demography in the Delaware River Basin. **Forest Ecology and Management**, v.374, n.15, p. 1-10, 2016.