



Dinâmica do volume, biomassa e carbono na Mata Atlântica por ferramenta de detecção de mudanças

Ayrton MACHADO¹, Ana Paula Marques MARTINS^{1*}, Carlos Roberto SANQUETTA¹,
Ana Paula DALLA CORTE¹, Jaime WOJCIECHOWSKI¹, Sebastião do Amaral MACHADO¹,
Renan SANTOS¹, Isabela Alvarenga de Mattos LANDIM¹

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

*E-mail: anapaula_marques@yahoo.com.br

Recebido em julho/2018; Aceito em dezembro/2018.

RESUMO: A Mata Atlântica é reconhecida internacionalmente como uma das maiores e mais importantes florestas tropicais do continente sul-americano e além de sua importância para a biodiversidade, esse Bioma exerce importante função no ciclo de carbono. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma rotina de detecção de mudanças dos estoques de volume, biomassa e carbono de 2000 a 2015 na Bacia do Rio Iguaçu, Estado do Paraná. Foram utilizadas imagens Landsat-7 ETM+ para o ano 2000 e Landsat-8 OLI para o ano de 2015 totalizando dez cenas para cada período. Foi desenvolvido uma rotina em Python e implementado no *Software* ArcGIS 10.4 para realizar a automatização de um processo de cálculo de estimativa de volume, biomassa e carbono para os remanescentes de vegetação natural. Houve acréscimo de 15,21% em volume, 14,95% em biomassa, 14,96% em carbono não considerando os estágios sucessionais nem subdivisão por fitofisionomia na bacia do Rio Iguaçu. Desta forma, concluiu-se que a região de estudo está colaborando de forma positiva para a remoção de dióxido de carbono da atmosfera.

Palavras-chave: bacia do rio Iguaçu; mudanças climáticas; sequestro de carbono.

Dynamics of volume, biomass and carbon in the Atlantic Forest by a change detection tool

ABSTRACT: The Atlantic Forest is recognized internationally as one of the largest and most important tropical forests in the South American continent and besides its importance for biodiversity, this biome plays important role in the carbon cycle. The objective of this work was to develop and apply a routine of detection of changes in volume, biomass and carbon stocks from 2000 to 2015 in the Iguaçu River Basin, State of Paraná. They were used Landsat-7 ETM+ images for the year 2000 and Landsat-8 OLI images for the year 2015 totaling ten images for each period. A routine was developed in Python and implemented in ArcGIS 10.4 Software to perform the automation of a calculation process of volume, biomass and carbon estimation for the remnants of natural vegetation. There was an increase of 15.21% in volume, 14.95% in biomass, 14.96% in carbon, not considering successional stages nor subdivision by phytophysiology in the Iguaçu River basin. Thus concludes that the region of study is collaborating in a positive way for the removal of carbon dioxide from the atmosphere.

Keywords: Iguaçu river basin; climate changes; carbon sequestration.

1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é constituída por um conjunto de formações florestais e ecossistemas associados como as restingas, manguezais e campos de altitude. Originalmente essa formação se estendia por aproximadamente 1.300.000 km² em 17 estados do território brasileiro. Hoje os remanescentes de vegetação nativa estão reduzidos a cerca de 29% de sua cobertura original e encontram-se em diferentes estágios de regeneração (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2018a).

Ainda que reduzida e extremamente fragmentada, estima-se que na Mata Atlântica existam cerca de 20.000 espécies vegetais, o que representa cerca de 35% das espécies existentes no Brasil, incluindo diversas espécies endêmicas e ameaçadas de extinção. Sendo essa riqueza biológica maior que a de alguns continentes, como a América do Norte e a Europa (17.000 e 12.500 respectivamente), tornando a Mata Atlântica brasileira altamente prioritária para a conservação da biodiversidade mundial (MMA, 2018a).

O Rio Iguaçu é o maior rio do estado do Paraná e sua bacia cobre cerca de 28% desse estado (SEMA, 2010). Segundo Doubrava et al. (2014), a bacia do Rio Iguaçu compõe um importante corredor ecológico da Mata Atlântica entre os estados de Paraná e Santa Catarina, onde estão inseridos significativos remanescentes da Floresta Ombrófila Mista (FOM) e suas transições para outras fitofisionomias como a Floresta Estacional Semidecidual (FES), Floresta Ombrófila Densa (FOD) e os Campos das regiões dos planaltos e serras desses dois estados.

Segundo o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012), a FOM, conhecida como Floresta com Araucária, mata-de-arucária ou pinheiral tem sua composição florística dominada por gêneros primitivos como *Drymis* e *Araucaria* (australásicos) e *Podocarpus* (afro-asiático); a FES possui dominância de gêneros amazônicos de distribuição brasileira, como: *Parapiptadenia*; *Peltophorum*; *Cariniana*; *Lecythis*; *Handroanthus*; *Astronium*; já na FOD presente na Serra do Mar e nas ramificações da Serra Geral, as espécies

que dominam são *Miconia cinnamomifolia* (DC) Naudin, *Hieronyma alchorneoides* Allemão, *Xylopia brasiliensis* Spreng., *Nectandra lanceolata* e *Euterpe edulis* Mart.; a formação Campos ou Estepe sulino estende-se no Planalto das Araucárias é submetido a clima pluvial subtropical sem período seco e coexiste com a FOM cujas espécies vão constituir-lhe capões e florestas-de-galeria.

Quanto aos estágios de sucessão, segundo Resolução CONAMA nº2/1994 (BRASIL, 1994), o estágio inicial de sucessão apresenta espécies predominantemente heliófitas, no Paraná as espécies mais comuns, indicadoras desse estágio são a bracatinga (*Mimosa scabrella*), vassourão (*Vernonia discolor*), aroeira (*Schinus terebinthi folius*), taquara e taquaruçu (*Bambusa* spp), entre outras; o estágio médio de sucessão conta com presença de espécies predominantemente facultativas, dentre as mais comuns e indicadoras desse estágio a congonha (*Ilex theezans*), canela guaica (*Ocotea puberula*), palmito (*Euterpe edulis*), guapuruvu (*Schizolobium parayba*), cedro (*Cedrela fissilis*), etc. Já no estágio Avançado as espécies são predominantemente umbrófilas, dentre as mais comuns e indicadoras desse estágio de regeneração, entre outras podem ser consideradas: pinheiro (*Araucaria angustifolia*), imbuia (*Ocotea porosa*), canafistula (*Peltophorum dubgium*), ipês (*Handroanthus* spp.), angico (*Parapiptadenia rigida*).

Além da importância da Mata Atlântica para a biodiversidade, esse bioma exerce importante função no ciclo de carbono, visto que as florestas tropicais são as maiores armazenadoras de carbono dentre os ecossistemas florestais (PAN et al., 2011). Dessa forma, tornam-se necessárias estimativas baseadas em modelos com maior acurácia para o setor, necessitando de estudos aprofundados, visto que estimativas de emissões e absorção em setores que envolvem componentes biológicos são as mais complexas e precisam de métodos adequados que garantam a sua credibilidade (OGLE et al., 2015).

Considerando a importância das florestas para o ciclo do carbono, vale ressaltar que técnicas de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e de sensoriamento remoto têm sido vastamente empregadas em estudos na área florestal, com destaque aos trabalhos que tem por objetivo quantificar o

estoque de carbono na biomassa aérea florestal (PONZONI, et al., 2012), por exemplo alguns trabalhos como os de Souza et al. (2007), Watzlawick et al. (2009), Ferraz et al. (2014), Santos et al. (2017), entre outros.

Avaliar o avanço ou retração da cobertura florestal em função de processos de recuperação ou desmatamento possibilita a compreensão da dinâmica entre fontes e sumidouros do carbono atmosférico (ECKERT et al., 2011). Portanto, essas técnicas de SIG e de sensoriamento remoto ganham destaque ao permitir gerar estimativas da biomassa e carbono em escala regional e global (DOUBRAWA, 2013; WATZLAWICK et al., 2009), embora ainda hajam poucos estudos com este enfoque na Mata Atlântica e as estimativas geradas ainda careçam de aperfeiçoamentos (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI 2013).

Dentre esses métodos de sensoriamento remoto, a técnica de detecção de mudanças pode ser definida como o processo de identificar diferenças no estado de um objeto ou fenômeno observando-o em momentos diferentes (SINGH, 1989). Essa técnica envolve essencialmente a capacidade de quantificar os efeitos temporais usando conjuntos de dados multitemporais (SINGH, 1989). Esse autor afirma ainda que a detecção de mudança é útil em diversas aplicações, tais como na análise de mudança de cultivo, na avaliação do desmatamento, no estudo de mudanças fenológicas na vegetação, nas mudanças sazonais na produção de pastagens, na avaliação de danos, na detecção de desastres, dentre outras alterações ambientais.

Por conseguinte, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma rotina de detecção de mudanças para a cobertura florestal e os estoques de volume, biomassa e carbono na Bacia do Rio Iguaçu, Estado do Paraná.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende a Bacia do Rio Iguaçu, que está localizada na Região Sul do Brasil, a qual fica na porção sul do Estado do Paraná e porção norte do Estado de Santa Catarina, todavia no presente estudo foi utilizada apenas a área abrangente ao estado do Paraná (Figura 1). A área total da bacia é de 5.513.028,626 hectares.

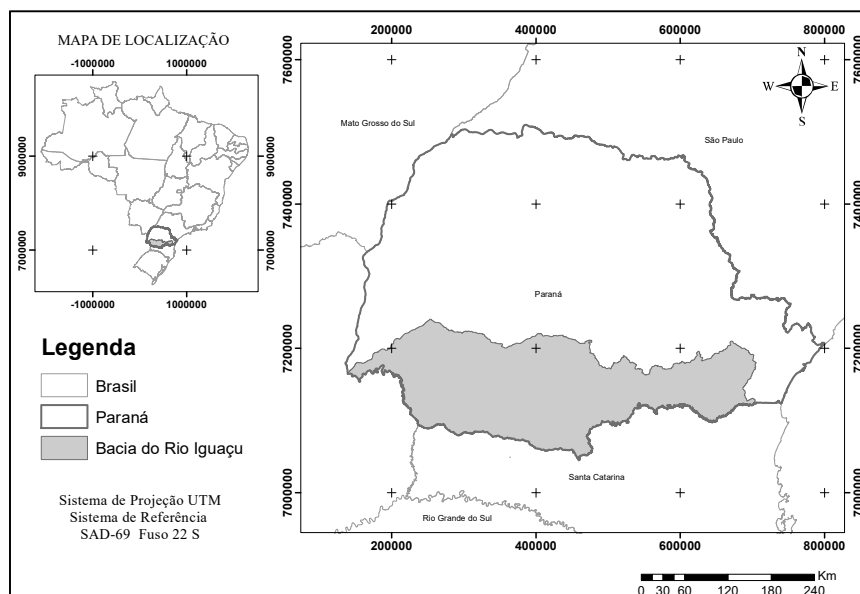


Figura 1. Localização da área de estudo.

Figure 1. Location of the study area.

As bases utilizadas para a elaboração do arquivo (Shapefile) final que foi submetido ao sistema de estimativa de volume, biomassa e carbono foram oriundas do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO) e disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018b). Os Produtos cartográficos utilizados foram: Limite da Bacia do Rio Iguçu; Municípios que fazem parte da Bacia do Rio Iguçu; Delimitação dos Biomas para o Estado do Paraná; Levantamento das áreas reflorestadas do Estado do Paraná.

Para abranger toda a área de estudo foram utilizadas cenas dos satélites da série Landsat, sendo utilizadas imagens Landsat-7 ETM para o ano 2000 e Landsat-8 OLI para o ano de 2015. Foi utilizado o total de dez imagens para cada período. As imagens utilizadas apresentavam como critério de seleção 10% de cobertura máxima de nuvens para todos os quadrantes.

Para o georreferenciamento foram utilizadas como base cenas do satélite SPOT, fornecidas pelo Instituto Ambiental do Paraná, dos anos de 2006 e 2007 com resolução de cinco metros com o método de georreferenciamento imagem a imagem, sendo realizada a retificação e o recorte da área útil da bacia adicionando a essa 20 metros de área de segurança (Buffer). O georreferenciamento foi realizado no programa ArcGIS 10.4 com Sistema de Projeção UTM, Datum SAD-69.

Foi realizada a segmentação digital das imagens de satélite utilizando a classificação orientada a objetos no programa eCognition/Definiens (versão 5.0.10) com parâmetro de escala 20 pixels e posterior reambulação no *Software* ArcGIS. Os critérios utilizados para a coleta de amostras para a classificação das tipologias florestais consideraram as variações dos padrões de cor e textura dessas formações nas imagens orbitais. A característica de vegetação em estágio Inicial apresenta textura mais lisa e cor mais clara, sendo que para o estágio Médio-Avançado o contrário é verdadeiro.

A classificação das imagens foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa os polígonos foram classificados como Floresta ou Não Floresta. Na segunda etapa, os polígonos previamente classificados como Floresta foram sub-classificados em: Floresta Secundária em Estágio Inicial (FSEI), Floresta Secundária em Estágio Médio/Avançado (FSEMA) e Reflorestamento. Essa classificação foi realizada de acordo com a Resolução CONAMA nº02/1994 (BRASIL, 1194), que versa sobre os estágios de sucessão da Mata Atlântica no Estado do Paraná. Os estágios Médio e Avançado foram agrupados na mesma classe devido à dificuldade de diferenciá-los em imagens de média resolução espacial, como é o caso das imagens da família Landsat. As classes de Não Floresta e Reflorestamento não foram analisadas quanto à dinâmica do volume e estoques de biomassa e carbono.

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 de acordo com Roderjan et al. (2002), a qual foi comparada com arquivo vetorial gerado da classificação da cobertura florestal. Essa comparação foi realizada com a ferramenta *Spatial Join* no programa ArcGIS 10.4 e o produto foi o mapa de fitofisionomias, subdivididas nos estágios inicial e médio-avançado de sucessão para a área de estudos.

Os conceitos e definições utilizados para caracterizar o bioma Mata Atlântica e suas fitofisionomias foram baseados no Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012). As informações sobre as fitofisionomias da Bacia do Rio Iguçu são oriundas do mapa de distribuição das fisionomias vegetais mais representativas do estado do Paraná, segundo Roderjan et al., (2002).

Para a obtenção da estimativa de volume, biomassa e carbono para as áreas de vegetação foram utilizados os dados cadastrados no *Software* JCarbon® de acordo com a localização dos polígonos. Essas informações foram convertidas em tabela Excel® e importadas para o ArcGIS. Na tabela de dados dos polígonos foram incluídos campos para deixar a estrutura dentro do padrão necessário para o processamento de cálculos da estimativa de biomassa e carbono.

O JCarbon® é um programa para auxiliar nas estimativas de volume, biomassa e carbono. Esse sistema tem implementadas as principais técnicas empregadas para realizar tais estimativas, além de propor uma nova técnica proveniente da ciência da computação conhecida como Mineração de Dados ou, no inglês, *Data Mining* (TAN et al., 2009). Possui um banco de dados capaz de armazenar informações de locais cadastrados que podem ser visualizados espacialmente com o *Google Maps*. O *Software* traz informações referentes à localização, área e características de plantio, tais como, parcelas, dimensões das árvores, equações e modelos utilizados para os cálculos e, principalmente, os valores de volume, biomassa e carbono total calculados automaticamente (WOJCIECHOWSKI, 2015).

O software *JCarbon* possui um cadastro de valores e equações padrões de volume, biomassa e carbono para florestas nativas aplicáveis ao bioma Mata Atlântica por características do local, apresentadas no Quadro 1, as quais são válidas para todos os níveis de estágios sucessionais (WOJCIECHOWSKI, 2015).

Quadro 1. Equações padrões do programa *JCarbon* para florestas nativas

Chart 1. Standard equations of the JCarbon program for native forests.

Formação	Equação
Floresta Ombrófila Densa	$V = 0,00824 + 0,00006d^2h$ $BA = -1,13617 + 0,03128d^2h$ $BR: \exp^{(-2,96 + 1,072\ln(d^2))}$ $CA: -0,44653 + 0,01229d^2h$ $CR: \exp^{(-2,960 + 1,072\ln(d^2) \times 0,3909)}$
Floresta Estacional Semidecidual	$V = 0,000074d^{1,707348} \times h^{1,16873}$ $BA = 10^{(-0,88239 + 2,40959 \log(d))}$ $BR = \exp^{(-2,960 + 1,072 \times \ln(d^2))}$ $CA = 10^{(-0,88239 + 2,40959 \times \log(dap))} \times 0,39301$ $CR = \exp^{(-2,960 + 1,072 \times \ln(dap^2))} \times 0,3909$
Floresta Ombrófila Mista	$V = 0,000074d^{1,707348} \times h^{1,16873}$ $BA = -3,025d + 0,425d^2 + 0,006d^2h$ $BR = \exp^{(-2,960 + 1,072 \times \ln(d^2))}$ $CA = -3,025d + 0,425d^2 + 0,006d^2h \times 0,4147$ $CR = \exp^{(-2,960 + 1,072 \times \ln(d^2))} \times 0,3909$

Em que V: volume; BA: Biomassa aérea; BR: Biomassa de Raízes; CA: Carbono Aéreo; CR: Carbono de Raízes; d: diâmetro a altura do peito (medido a 1,30 metros do solo) (cm); h: altura total (m). Fonte: WOJCIECHOWSKI, (2015).

A automatização de todo o processo de cálculo de estimativa de volume, biomassa e carbono para os

remanescentes de vegetação natural foi desenvolvido um Script em Python 2.7 adicionada como ferramenta do módulo *toolbox* do *Software* ArcGIS 10.4. As etapas desse *Script* foram basicamente: identificação da fitofisionomia do polígono, que pode ser, por exemplo, Floresta Ombrófila Mista (FOM) e Floresta Estacional Semidecidual (FES); reconhecimento do estágio sucessional do polígono (Inicial ou Médio-Avançado); associação desse polígono com informação cadastrada no JCarbon®; cálculo da estimativa de volume, biomassa e carbono para área do polígono.

A dinâmica do estoque de volume, biomassa e carbono foi realizada por meio da comparação das estimativas calculadas a partir do *Script* para as imagens de 2000 e 2015. A detecção de mudanças foi realizada por consulta de atributos.

O processo para detecção de mudanças teve início com a ferramenta *Union* do *ArcToolBox* do ArcGIS. Após esse processo, na tabela de atributos dos novos arquivos vetoriais formados pela ferramenta “*Union*”, foram geradas colunas referidas aos dados do ano 2000 e 2015, respectivamente com valores iguais a “-1”. Estes valores representam polígonos que não estão presentes em um dos períodos de análise, ou seja, quando na coluna “2000” apresentasse valor igual a “-1”, então, este polígono só existe no período de 2015 indicando regeneração da cobertura florestal entre 2000 a 2015. Quando o valor “-1”, estiver presente na coluna “2015”, então este polígono só existe para o período de 2000 indicando supressão de floresta no período analisado. Do mesmo modo, tudo que for diferente de “-1” em ambas as colunas, representa a não alteração de cobertura florestal naquele polígono.

Portanto, entende-se como “Área Restaurada” aquele polígono que no primeiro momento (2000) não continha cobertura florestal e que no segundo momento da análise (2015) foi constatada presença de vegetação. Por outro lado, “Área Suprimida” foi aquela que no ano de 2000 havia cobertura florestal e que no ano de 2015, não. Já as áreas identificadas como “Área Inalterada” foram assim classificadas aquelas em que a vegetação existente no ano 2000 continua existindo no ano de 2015, porém, essa classificação não faz a distinção entre áreas que passaram por transição do estágio Inicial para Médio ou Avançado e aquelas em que essa transição não ocorreu.

A acurácia da classificação foi calculada a partir dos índices Kappa e Exatidão Global. Para tanto, foi realizada a verificação da cobertura florestal de 167 pontos aleatórios sob a Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu. Dentre esses pontos, 102 foram levantados a campo em 2009 e atualizados com Google Earth para o ano de 2015; outros 65 pontos aleatórios foram lançados sobre a área da bacia, os quais foram verificados quanto à cobertura florestal, também com o auxílio de imagens do Google Earth para o ano de 2015.

Todos os *Softwares* utilizados possuem licenças pela Fundação de Pesquisas Florestais – FUFPEF e pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná UFPR.

3. RESULTADOS

As fitofisionomias vegetais constatadas foram: Campos, Floresta Estacional Semidecidual (FES), Floresta Ombrófila Densa (FOD) e Floresta Ombrófila Mista (FOM), sendo que a área de domínio de cada fisionomia corresponde a 16,62% (Campos), 17,01% (FES), 0,55% (FOD) e 65,82% (FOM)

dentro da bacia do Rio Iguaçu de acordo com a distribuição das unidades fitogeográficas do Paraná (Roderjan et al. 2002).

A classificação atingiu 78,4% de Exatidão Global e índice Kappa de 0,68, o qual indica uma classificação “Muito Boa” de acordo com a classificação desenvolvida por Landis; Koch (1977) para acurácia de classificadores.

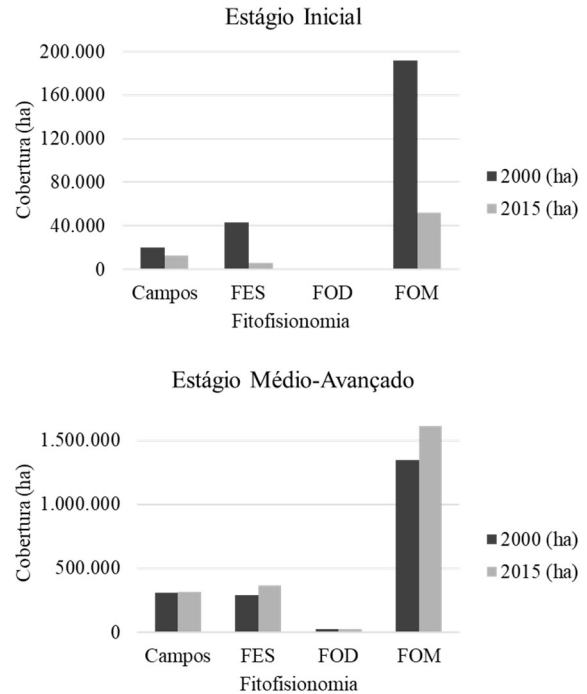


Figura 2. Mudança em extensão na cobertura do solo na bacia do Rio Iguaçu entre os anos 2000 e 2015.

Figure 2. Changes in soil cover extension in the Iguaçu River basin between 2000 and 2015.

O estágio inicial de sucessão continha 256.004,73 ha de cobertura no ano-base 2000 e 70.419,12 ha em 2015. A cobertura florestal em estágio Médio-Avançado foi de 1.966.756,12 ha em 2000 para 2.316.703,03 ha em 2015. Portanto, e de maneira geral, a cobertura florestal contem 2.222.760,85 ha em 2000 e passou a ter 2.387.122,15 ha em 2015, totalizando um acréscimo de 164.361,30 ha no período analisado (Figura 2). Da área total da bacia (5.513.028,626 ha), 40,3% e 43,3% correspondem à cobertura florestal nos anos 2000 e 2015, respectivamente. Portanto, houve aumento de 3% na cobertura florestal na bacia hidrográfica do rio Iguaçu.

A cobertura florestal em estágio inicial e médio-avançado identificadas na área de domínio da fitofisionomia Campos apresentaram redução de 36,9% na área em estágio inicial e um aumento de 3,03% na área de estágio médio-avançado, porém, de modo geral houve aumento na área de cobertura de 1.989,07 ha. A dinâmica da cobertura florestal para FES foi análoga à área de Campos, havendo a redução da cobertura florestal nativa em estágio inicial de 86,46% e o aumento de 27,22% em médio-avançado, sendo que, de maneira geral, observou-se o aumento de 40.891,63 ha.

Já na área de domínio da FOD ocorreu a maior redução percentual em área de vegetação inicial, 94,41% e o menor aumento em área de vegetação médio-avançada, 0,93%, havendo, portanto, a redução da cobertura vegetal nativa em 344,84 ha. Na área de domínio da fitofisionomia de FOM houve redução de 72,97% na vegetação classificada em

estágio inicial e aumento de 19,44% em áreas com vegetação em estágio médio-avançado totalizando o aumento da área com vegetação nativa em 121.825,43 ha nessa fitofisionomia.

Com uso da ferramenta desenvolvida a partir de *script* desenvolvida em *Python* e adicionada ao módulo *toolbox* do *Software* ArcGIS foi realizado o cálculo da estimativa de volume (m³), biomassa (t) e carbono (t). Os resultados separados em estágios sucessionais e fitofisionomia para os anos 2000 e 2015 podem ser observados na Tabela 1.

Houve redução no volume e nos estoques de biomassa e carbono na vegetação em estágio inicial em todas as fitofisionomias, isso deve-se a redução da área de cobertura, a qual pode ter ocorrido em razão de supressão da vegetação ou evolução do para médio-avançado (M-A). Por outro lado, nas áreas da bacia classificadas em estágio médio-avançado de sucessão, em todas as fitofisionomias, houve aumento nos estoques das variáveis em consequência da evolução do estágio inicial e novas áreas de restauração.

Ponderando apenas a vegetação secundária em estágio inicial, de modo geral, houve redução de 72,03% para todas as variáveis no período de 2000 a 2015. Contudo, quando subclassificada por fitofisionomia, para Campos houve a redução das estimativas em 36,90%, para FES de 86,46%, para FOD de 94,41% e para FOM de 72,97%.

Por outro lado, quando considerada a vegetação secundária em estágio médio-avançado, de modo geral, para o mesmo período, houve um aumento total de 17,04% para todas as estimativas. Sendo que na fitofisionomia de Campos houve um aumento em volume, biomassa e carbono globais de 3,03%, na FES, 27,22%, FOD, 0,93%, e na FOM, de 19,44%.

Porém, no “Total Geral” verificou-se o aumento nas estimativas, do ano 2000 para o ano 2015, de 15,21% em

volume, 14,95% em biomassa, 14,96% em carbono levando à afirmação de que essa região de estudo está colaborando de forma positiva para a remoção de dióxido de carbono da atmosfera.

Em geral, houve o acréscimo médio no volume de madeira de 4.258.969,11 m³.ano⁻¹, o que correspondeu a 7.303.517,30 t.ano⁻¹ e 3.041.605,11 t.ano⁻¹ nos estoques de biomassa e carbono sucessivamente. Sendo a fitofisionomia FOM a mais expressiva nesse total, contribuindo com cerca de 86% para o volume, biomassa e carbono, seguida pela FES com 11%, Campos com 3% e FOD com apenas 0,02% para as mesmas variáveis, o que está relacionado à extensão de área pertencente a cada fitofisionomia, uma vez que, a FOM ocupa cerca de 65,82% da área enquanto que a FOD 0,55% da área da bacia do Rio Iguaçu.

É importante salientar que, no presente estudo, as estimativas de volume, biomassa e carbono não foram analisadas para as áreas de Reflorestamento, uma vez que objetivou-se a análise da dinâmica dessas variáveis para a vegetação nativa dessa porção do Bioma Mata Atlântica em vista da importância da redução do desmatamento em áreas remanescentes desse bioma, além da redução da emissão e aumento da fixação de carbono.

A Figura 3 é o mapa de detecção de mudança resultante da ferramenta desenvolvida, onde é possível observar as áreas que foram suprimidas, restauradas e inalteradas. Pode-se observar que houve mais áreas restauradas (verde) do que suprimidas (vermelho), no entanto, as áreas inalteradas (amarelo) são maioria em toda extensão da bacia.

Tabela 1. Dinâmica dos estoques de volume, biomassa e carbono em diferentes estágios sucessionais e fitofisionomias em na bacia do Rio Iguaçu nos anos 2000 e 2015.

Table 1. Dynamics of volume, biomass and carbon stocks in different successional and phytophysiognomies in the Iguaçu River basin in the years 2000 and 2015.

Estágio	FIT.	Volume total (m ³)		Estoque de Biomassa (t)		Estoque de Carbono (t)	
		2000	2015	2000	2015	2000	2015
Inicial	C	691.051,3	436.078,2	1.381.903,3	872.030,6	574.514,8	362.539,5
	FES	1.218.391,8	164.935,4	2.436.350,5	329.812,2	1.051.637,2	142.361,6
	FOD	18.457,5	1.031,1	36.915,0	2.062,1	15.497,3	865,7
	FOM	6.666.934,0	1.802.228,4	13.331.946,2	3.603.937,2	5.542.645,7	1.498.306,9
Inicial Total		8.594.834,6	2.404.273,0	17.187.115,0	4.807.842,1	7.184.294,9	2.004.073,7
M-A	C	70.551.383,6	72.685.933,8	122.761.136,1	126.475.305,7	50.938.000,2	52.479.142,4
	FES	29.447.172,9	37.461.477,4	51.237.505,1	65.182.238,3	22.032.127,2	28.028.362,5
	FOD	3.223.514,1	3.253.530,9	5.608.727,3	5.660.954,9	2.354.907,8	2.376.836,4
	FOM	308.086.045,5	367.982.272,2	536.077.267,6	640.298.169,6	222.437.693,5	265.682.685,3
M-A Total		411.308.116,0	481.383.214,3	715.684.636,1	837.616.668,5	297.762.728,7	348.567.026,6
Total Geral		419.902.950,6	483.787.487,3	732.871.751,1	842.424.510,6	304.947.023,6	350.571.100,2

FIT.: Fitofisionomia; M-A: Médio-Avançado; C: Campos; FES: Floresta Estacional Semidecidual; FOD: Floresta Ombrófila Densa; FOM: Floresta Ombrófila Mista.

4. DISCUSSÃO

Uma das justificativas que pode explicar esse aumento em área de florestas nativas foi exigência do governo do Estado do Paraná no cumprimento do Decreto 387/99 (PARANÁ, 1999), que instituiu o SISLEG e a obrigatoriedade das áreas rurais do Estado do Paraná em recuperar, manter e proteger as Áreas de Reserva Legal e de Preservação Permanente.

Outros possíveis justificativas, segundo Doubrava (2013), seriam pela própria diminuição na taxa de desmatamento em nível nacional no bioma da Mata Atlântica; a criação das áreas prioritárias para conservação pelo Ministério do Meio

Ambiente, estabelecidas pelo Decreto de 5.092/2004 (BRASIL, 2004); e a criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Lei n° 9.985/2000) (BRASIL, 2000), sendo que na bacia do Rio Iguaçu localiza-se quatro unidades de conservação, além de outras áreas enquadradas dentro do SNUC.

Abdalla et al. (2011) simulando por meio da Cadeia de Markov a dinâmica do sequestro de carbono em uma área da Mata Atlântica entre os municípios de Niterói e Maricá, Estado do Rio de Janeiro, utilizando imagens do satélite Landsat TM de 1993 e 2009, concluíram que o estoque de carbono estimado

teve o aumento de 217.817 t.km⁻² de carbono entre 1993 e 2009 e 15.698 t.km⁻² entre 2009 e a projeção referente ao ano de 2025 para floresta, pastagem e solo exposto.

Silva et al. (2015) estimando a biomassa e o carbono estocado em espécies florestais presentes em uma Unidade de Conservação no bioma Mata Atlântica, encontraram 212,39 e 106,19 t.ha⁻¹ para os estoques de biomassa e carbono respectivamente, sendo o grupo das espécies secundárias responsável por 38,95% desse estoque. Enquanto que, no presente trabalho, de maneira geral o estoque para 2015 correspondeu a 152,81 t.ha⁻¹ e 63,59 t.ha⁻¹ de biomassa e carbono, respectivamente.

Ribeiro et al. (2009) quantificando os estoques de volume, de biomassa total com casca e de carbono em um fragmento de FES em estágio secundário médio na Zona da Mata mineira, constatarem 38,99 t.ha⁻¹ de biomassa total média das árvores, o que correspondeu a um estoque de carbono de 19,50 ± 8,08 tC.ha⁻¹. Valor esse considerado baixo pelos próprios autores quando comparado com o de outros estudos.

Doubrawa et al. (2014) analisando a dinâmica da cobertura florestal e os estoques de carbono na bacia hidrográfica do Rio Iguazu, dentro dos limites do estado do Paraná, entre 2000 e 2010, observaram o aumento de 131.110.000 t de biomassa para os estágios Inicial e Médio-Avançado da floresta nativa ao longo desses 10 anos e de 54.520.000 t de carbono na bacia. Doubrawa et al. (2014) consideram os resultados de sua

pesquisa um aumento significativo para o período analisado e afirmam que a região contribuiu positivamente para a remoção de dióxido de carbono da atmosfera, assim como no presente trabalho.

Observou-se que o estoque de volume, biomassa e carbono são muito superiores para o estágio Médio-Avançado. Segundo Sanquetta (2017), isso deve-se, porque nos estágios mais avançados encontram-se indivíduos de maiores dimensões e, provavelmente, com maior massa específica das árvores, já que nesses estágios a composição florística é mais rica ocorrendo espécies clímax que tem, geralmente, madeiras duras. Já nos estágios inferiores, os indivíduos têm menores diâmetros e alturas e, mesmo que apresentem maior densidade de plantas por hectare, esses estágios não chegam a atingir valores análogos de biomassa e carbono em relação os estágios de maior complexidade estrutural, pois os indivíduos que compõem esses estratos são menores e, portanto, com menor quantidade de biomassa.

Percebe-se que a ferramenta de detecção automática de mudanças desenvolvida na presente pesquisa mostrou-se eficiente ao relacionar as informações cadastradas do JCarbon® para estimativa de variáveis biométricas com informações espacializadas trazendo maior agilidade na estimativa dessas variáveis em escala regional, podendo ser considerado o avanço para o setor florestal e ambiental (Figura 3).

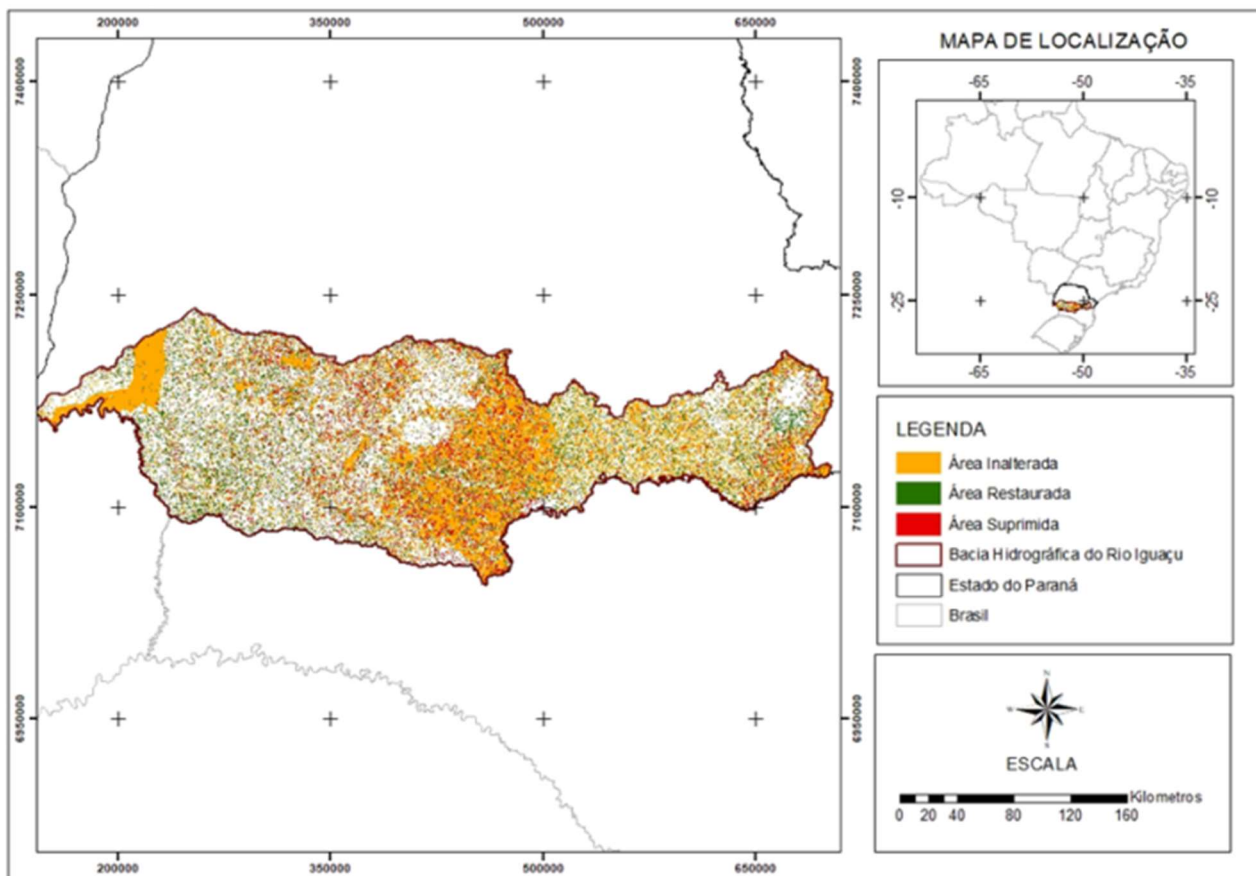


Figura 3. Mapa de detecção de mudanças nas áreas com vegetação entre o ano de 2000 a 2015 para a bacia do Rio Iguazu - PR.
Figure 3. Map of detection of changes in vegetation areas between the year 2000 and 2015 for the Iguazu River basin - PR.

5. CONCLUSÕES

Houve aumento de 3% na cobertura florestal na bacia hidrográfica do rio Iguazu, ou seja, houve diminuição do

desmatamento, e conseqüente aumento de cerca de 15% de volume, biomassa e carbono estocados na área de estudos, o que contribui positivamente para a mitigação dos efeitos do

aquecimento global na Mata Atlântica, sendo considerada, portanto, sumidouro de carbono atmosférico.

A ferramenta de detecção automática de mudanças desenvolvida na presente pesquisa mostrou-se eficiente, para detecção das alterações na cobertura e estoques de volume, biomassa e carbono na área de estudos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para execução de projeto científico cujo a presente pesquisa foi fruto. Também agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudos.

7. REFERÊNCIAS

- ABDALLA, L. S.; BARREIRA NETO, A. J.; FONSECA, K. T. Análise da dinâmica da cobertura vegetal e estocagem de carbono pelo modelo de Cadeias de Markov. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 1902-1909.
- BRASIL. **Decreto N° 5.092**, de 21 de maio de 2004. Define regras para identificação de áreas prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade, no âmbito das atribuições do Ministério do Meio Ambiente.
- BRASIL. **Lei n° 9.985**, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.
- BRASIL. **Resolução n° 2**, 18 de março de 1994. Conselho Nacional Do Meio Ambiente. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/res/res94/res0294.html. Acesso em: 02 junho de 2018.
- DOUBRAWA, B.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; HENTZ, A. M. K. Remoção de CO₂ associada à dinâmica da cobertura florestal na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu no período 2000-2010. **Interciencia**, Caracas, v. 39, n. 8, p. 562-569, 2014.
- DOUBRAWA, B. **Dinâmica da cobertura florestal e dos estoques de carbono na bacia hidrográfica do Rio Iguaçu: 2000 a 2010**. 2013. 127f. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba. 2013.
- ECKERT, S.; RATSIMBA, H. R.; RAKOTONDRAO, L. O.; RAJOELISON, L. G.; EHRENSPERGER, A. Deforestation and forest degradation monitoring and assessment of biomass and carbon stock of lowland rainforest in the Analanjirofo region, Madagascar. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 11, p. 1996-2007, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.041>
- FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Estimativa do Estoque de Biomassa em um Fragmento Florestal Usando Imagens Orbitais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 286-296, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.052213>
- IBGE INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271 p.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Arlington, v. 33, p.159-174,1977.
- MCTI MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília: MCTI, 2013. 76 p.
- MMA MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomass: Mata Atlântica**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/biomass/mata-atlantica>. Acesso em 23 de junho de 2018a
- MMA MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Mapas: Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros**. Disponível em <http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>. Acesso em 04 de outubro de 2018b
- OGLE, S. M.; DAVIS, K.; LAUVAUX, T.; SCHIH, A.; COOLEY, D.; WEST, T. O.; HEATH, L. S.; MILES, N. L.; RICHARDSON, S.; BREIDT, F. J.; SMITH, J. E.; MCCARTY, J. L.; GURNEY, R. K.; TANS, P.; DENNING, A. S. An approach for verifying biogenic greenhouse gas emissions inventories with atmospheric CO₂ concentration data. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 3, p. 034012, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034012>
- PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, A. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADELL, J.G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. J.; STEPHEN PACALA, S. W.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A large persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, Washington, v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1126/science.1201609>
- PARANÁ, **Decreto 387/99** - Decreto de criação do SISLEG – 03.03.1999. Diário Oficial em 03/03/1999
- PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, E. KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. rev. e aum. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V.; NARDELLI, A. M. B.; SOUZA, A. L. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da zona da Mata Mineira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 495-504, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000300013>
- RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, T. S.; HATSCHBACH, G. G. As regiões fitogeográficas do Estado do Paraná. **Revista Ciência e Ambiente**, Santa Maria, n. 24, n. 1, p. 75- 92, 2002.
- SANQUETTA, C. R. **Fixação de carbono em florestas com araucária**. Disponível em <http://www.nossofuturoroubado.com.br/portal/old/0606te%20carbono.htm>. Acesso em 23 de junho de 2017.
- SANTOS, M. M.; MACHADO, I. E. S.; CARVALHO, E. V.; VIOLA, M. R.; GIONGO, M. Estimativa de parâmetros florestais em área de Cerrado a partir de imagens sensor OLI Landsat 8. **Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 75-83, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rev.v47i1.47988>
- SEMA SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **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 de agosto de 2018.
- SILVA, L. C.; ARAÚJO, E. J. G; CURTO, R. A.; NASCIMENTO, A. M.; ATAÍDE, D. H. S.; MORAIS, V. A. Estoques de biomassa e carbono em unidade de conservação no Bioma Mata Atlântica. **Biofix Scientific Journal**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 243-251, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i2.59592>
- SINGH, A. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989. Doi: <https://dx.doi.org/10.1080/01431168908903939>
- SOUZA, C. C.; AZEVEDO MOREIRA, A.; SCHIMITH, R. S.; BRANDÃO, P. C.; SILVA, E. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de Florestas implantadas no Brasil – uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/198050981972>
- TAN, P. N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. **Introduction to Data Mining**. [S.l.]: Editora Ciência Moderna, 2009. 978 p.
- WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em Floresta com Araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098408>
- WOJCIECHOWSKI, J. **Carbon – Software na web com data mining para estimativas de volume, biomassa e carbono em florestas**. 2015. 172f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.