UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS DE SENSORES ATIVOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM ÁREAS DE MANGUE NO LITORAL DO NORDESTE DO PARÁ, BR

Gabriel Máximo da Silva [1], Isadora Haddad [1], Philipe Souza Simões [1], Afonso Henrique Oliveira [2], Yosio Edemir Shimabukuro [1]

[1] Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - PGSER, Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 12.227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil, {gabriel.maximo; isadora.ruiz; philipe.simoes; yosio.shimabukuro}@inpe.br; [2] Universidade Federal do Oeste do Pará, 68040-255 – Santarém – PA, Brasil, afonsoholiveira@gmail.com.

RESUMO

Ecossistemas de manguezais desempenham forte atuação na ciclagem de carbono orgânico, conhecidos como "blue carbono". Na região Amazônica do Brasil, sensores ativos apresentam vantagens quando comparados aos sensores ópticos na obtenção de imagens, em decorrência da alta presença de nuvens nessa região. Pensando nisso, uma área de mangue localizada no litoral nordeste do estado do Pará foi selecionada como unidade de análise para a estimativa de biomassa acima do solo (BAS) sobre estes ecossistemas, baseado em equações alométricas disponíveis na literatura. Utilizaram-se os produtos: a) altura do dossel derivado de dados GEDI + Landsat; b) mosaico ALOS/PALSAR; e c) SRTM. A estimativa de BAS utilizando dados PALSAR HV, apresentou menor rRMSE (11,60%) em relação aos demais produtos. Produtos GEDI e SRTM representaram a variabilidade espacial, porém superestimaram os valores de BAS, exigindo investigações futuras. Ademais, sensores ativos podem favorecer o estudo de manguezais em regiões com alta incidência de nuvens.

Palavras-chave **—** SAR, GEDI, Amazônia, Mangue, Biomassa.

ABSTRACT

Mangrove ecosystems play a strong role in organic carbon cycling, known as "blue carbon". In the Amazon region of Brazil, active sensors have advantages when compared to optical ones in obtaining images, due to the high presence of clouds in this region. With that in mind, a mangrove area located in the northeastern coast of Pará state was selected as the unit of analysis for the estimation of aboveground biomass (AGB) on these ecosystems, based on allometric equations available in the literature. The following products were used: a) canopy height derived from GEDI + Landsat data; b) ALOS/PALSAR mosaic; and c) SRTM. The estimate of AGB using PALSAR HV data, presented lower rRMSE (11.60%) in relation to the other products. The GEDI and SRTM products represented the spatial variability, but overestimated the AGB values, requiring further investigations. In addition, active sensors can favor the study of mangroves in regions with high incidence of clouds.

Key words **—** *SAR, GEDI, Amazon, Mangrove, Biomass.*

1. INTRODUÇÃO

As regiões tropicais detêm características peculiares em seus ecossistemas florestais. Os cortes rasos, derrubada e queimada são tradicionalmente praticados nos trópicos, com a supressão total da vegetação, havendo perda e aprimorando a dinâmica do desmatamento [1]. Tal dinâmica tem sido acentuada nas regiões tropicais gerando desbalanceamento no ciclo global do carbono, logo, é notada a importância do conhecimento da dinâmica de biomassa nas regiões tropicais [2].

A concentração de CO_2 na atmosfera terrestre vem aumentando principalmente após a Revolução Industrial devido ao uso de combustíveis fósseis, desmatamento e queimada das florestas [3]. A retenção de energia em forma de calor na atmosfera possui consequências complexas devido ao elevado número de fatores que podem interferir na mesma. Com isso, os impactos nas alterações da concentração de CO_2 na atmosfera estão intimamente ligados aos processos bioquímicos dos componentes florestais.

Nas florestas tropicais de modo geral, durante o processo de fotossíntese, os vegetais retiram da atmosfera o CO_2 para a formação de compostos orgânicos para conversão de energia luminosa em energia química. Então, quando a fotossíntese excede a respiração, o carbono passa a ficar estocado nos ecossistemas e sua concentração na atmosfera diminui. No entanto, a capacidade de estocagem dos ecossistemas florestais varia de acordo com características dos vegetais (idade e composição das espécies) e do meio (clima e solo) [4]. Alguns estudos indicam que espécies pioneiras apresentam capacidade de estocagem de carbono menor que espécies de outros grupos ecológicos [5,6].

Dentre os diferentes ecossistemas, as áreas de mangues apresentam complexidade e características peculiares, principalmente pela sua relação com a água. Estes ecossistemas altamente produtivos, foram recentemente incluídos como estratégia de mitigação climática no Painel de Mudança Climática (IPCC), na sessão que se refere às terras alagadas [7]. Apesar de não serem áreas com dimensões grandes, são ecossistemas importantes para ciclo global do carbono e para população local que faz utilização dos seus recursos naturais [8].

Segundo dados do projeto MapBiomas, o Brasil possui 10.111,6 km² de mangue distribuídos em todo território

nacional, e o estado do Pará apresenta a segunda maior área, com aproximadamente 2.276,7 km² de extensão de manguezais [9], localizados principalmente na região costeira. Nos mangues, a composição da flora e fauna podem variar, assim como há variação nos níveis de água e tipos de raízes encontradas em cada região. A altura das árvores pode se aproximar de 60 metros, e a biomassa pode variar bastante levando em conta estas características [10]. Ao se tratar de biomassa, estes ecossistemas são capazes de apresentar grande quantidade, principalmente pela diferenciação de suas raízes [11].

Então, a quantificação de biomassa acima do solo por sensoriamento remoto pode ser estimada com sensores ativos ou passivos. Os sensores passivos possuem a desvantagem de sofrerem saturação na quantificação em áreas com grande quantidade de biomassa, possuindo eficiência em florestas com baixa quantidade de biomassa. Entretanto, sensores ativos como radar de abertura sintética são capazes de medir a estrutura e altura da floresta, e utilizar estas informações para obter estimativas de biomassa acima do solo (BAS) de forma indireta [12].

A partir do exposto, o presente estudo buscou: (i) estimar a biomassa acima do solo em áreas de mangue no nordeste paraense, utilizando diferentes produtos; e (ii) comparar as estimativas de BAS nos diferentes produtos com o dado de referência disponível na literatura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a porção nordeste do litoral do estado do Pará (Figura 1). Constituída por 11 municípios, a área refere-se a microrregião do Salgado Paraense, por onde se estende o cinturão contínuo de manguezais até o estado do Maranhão [13].



Figura 1. Área de estudo – Nordeste Paraense.

2.2. Base de dados

Neste estudo, considerou-se como referência para biomassa o produto de BAS de mangue global desenvolvido por Simard et al. (2019) [11]. Este produto é derivado de dados processados entre 2000 e 2009. Como delimitação da região de mangue, utilizou-se o produto da classe de mangue classificada pelo projeto MapBiomas [14] para o ano de 2009. Então, para a estimativa de BAS, foram utilizadas as seguintes equações alométricas (Tabela 1).

Produto	Equação	Referência
SRTM	$3.25*(1.08*SRTM)^{1.53}$	Simard et al. (2019) [10]
GEDI	$3.25*(1.08*GEDI_HEIGHT)^{1.53}$	Adaptado de Simard et al. (2019) [10]
PALSAR HV	$exp\left(\frac{HV\ Backscatter\ (dB) + 26.457}{2.586}\right)$	Duncanson et al. (2020) [15]

Tabela 1. Equações para a estimativa de biomassa acima do solo.

Como dado de entrada para a estimativa de BAS, um dos produtos utilizados foi o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com 30m de resolução espacial. Além deste, foi utilizado o produto *Global Forest Canopy Height*, produto com resolução espacial de 30m derivado da integração de dados LiDAR de medidas estruturais da floresta (*Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI)) com dados Landsat (Landsat analysis ready) [16]. Também, foram utilizados mosaicos anuais de imagens de radar de abertura sintética do sistema sensor ALOS/ PALSAR para o ano de 2009, com resolução espacial de 25m e banda-L. O produto SRTM, e mosaicos ALOS/PALSAR estão disponíveis na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), portanto, os demais dados foram inseridos na plataforma para processamento.

2.3. Processamento

O processamento dos dados foi feito na plataforma Google Earth Engine (GEE). Para a estimativa de BAS, foi realizado o recorte da imagem SRTM com o vetor da região de mangue segundo a classificação do produto MapBiomas [14]. A partir disso foi extraída a altura de Lorey, que corresponde à altura ponderada da área basal gerada pela elevação do terreno [17]. Foi aplicada uma equação alométrica diretamente no modelo digital de elevação para a obtenção da estimativa de biomassa acima do solo. Para a estimativa da BAS foi utilizada a seguinte equação:

$$BAS = 3{,}25 * \mathrm{Hba}^{1{,}53}$$

onde Hba = 1,08 * SRTM. Portanto a equação final para a estimativa de biomassa utilizada foi:

$$BAS\ (Mg/ha) = 3{,}25\ .\ (1{,}08.SRTM)^{1{,}53}\ [17]$$

De modo a explorar os produtos existentes, esta mesma equação foi aplicada no produto *Global Forest Canopy Height*, apenas substituindo o dado SRTM, visto que este dado utiliza a altura do dossel.

Os dados polarizados ALOS/PALSAR foram obtidos em números digitais (DN) de 16-bits, portanto foi realizada a transformação para valores gama zero em unidade de decibéis (dB) utilizando a seguinte equação: $\gamma_0 = 10\log_{10}(DN^2) - 83.0$ dB. Para processamento das imagens SAR, aplicou-se um filtro de 30m para a redução do *speckle*. Este produto na biblioteca já é ortorretificado e corrigido a inclinação utilizando o modelo digital de elevação SRTM [18]. Então, para a estimativa de biomassa utilizando o mosaico ALOS/PALSAR, foi utilizada a seguinte equação:

$$BAS\ (Mg/ha) = exp\left(\frac{HV\ Backscatter\ (dB)+26.457}{2.586}\right) \quad [15]$$

A partir das estimativas de biomassa geradas pelos diferentes modelos e produtos, foram gerados 1.000 pontos aleatórios em toda a extensão da área de mangue estudada para extrair a quantidade de biomassa gerada em cada modelo. Com isso, utilizou-se como referência o mapa de BAS de mangue global [10], comparando este com os demais produtos resultantes para verificar o erro e correlação dentro da amostragem aleatória para estimativas de BAS com base na referência. Então, foram calculados como métrica de avaliação dos produtos em relação à referência, a distribuição dos resíduos padronizados (rRMSE).

3. RESULTADOS

A Figura 2 ilustra a estimativa espacial da BAS pelos produtos SRTM, GEDI e ALOS/PALSAR HV, em relação a referência para um recorte da área de estudo. É possível observar a diferença na magnitude dos dados estimados, principalmente em relação ao dado de referência. Neste recorte (Figura 2), observa-se, de modo geral, a medida em que o mangue é mais presente na inserção do continente, ou seja, menor fronteira direta com o oceano aberto, a biomassa tende a ser maior, pelas influências das águas interiores. Entre as estimativas obtidas, foram observados valores similares a referência a partir da BAS recuperada pelo produto PALSAR HV. Os produtos SRTM e GEDI apresentaram uma superestimativa para biomassa na região de inserção ao continente, onde a referência indica cerca de 200 Mg/ha e os produtos resultaram em cerca de 350 Mg/ha.

A variabilidade da BAS foi caracterizada pelos dados SRTM e GEDI, no entanto os valores preditos apresentam-se superestimados em relação à referência. Um aspecto interessante em todos os dados, foi a compatibilidade na estimativa para as regiões dentro do continente, com menor acumulo de biomassa. Ao mesmo tempo, áreas de borda com o oceano aberto possuem grande influência das condições estabelecidas neste meio. Portanto, a quantidade de biomassa acima do solo nas bordas continentais tende a ser menor, devido às próprias adaptações naturais que as espécies estabelecem para seu desenvolvimento, além da erosão causada pelos efeitos de maré e vento, e por ações antrópicas.

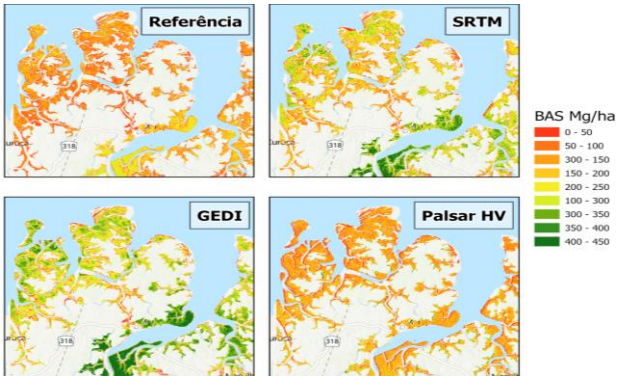

Figura 2. Biomassa acima do solo (BAS) para a referência e os diferentes produtos

A estimativa de BAS oriunda do modelo alométrico que utiliza a base de dados SRTM apresenta em alguns pontos superestimativa em relação a base de referência, embora em uma análise de distribuição verificou-se a presença de *outliers*. Todavia, a amplitude da variação é menor nos demais dados, mas os erros quando comparados à referência são maiores.

Corroborando com a estimativa de biomassa espacializada, a distribuição dos resíduos padronizados (Figura 3) junto ao RMSE relativo (rRMSE) indicam que os melhores resultados foram obtidos a partir do dado PALSAR HV. Os rRMSE observados foram: 24,10% (SRTM), 17,72% (GEDI) e 11,60% (PALSAR HV). Mesmo com a distribuição dos resíduos similares no histograma, foi verificado alta incidência de valores *outliers* no produto SRTM, o que pode ter condicionado ao aumento do rRMSE.

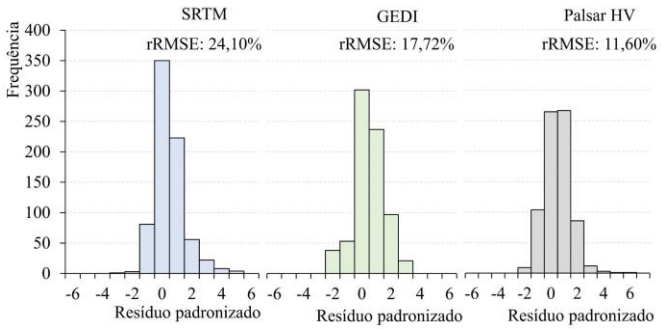

Figura 3. Distribuição dos resíduos padronizados

4. DISCUSSÃO

As áreas de mangues são muito sensíveis às mudanças climáticas, visto sua localização geográfica. Conforme o relatório do IPCC [7], com o aumento da temperatura da superfície, o risco de detecção dos impactos atribuídos ao clima possui grande relevância em áreas de mangue. Estas áreas estão em constante fluxo de mudanças, visto as próprias influências diárias do nível de água e por forças de antropização [19]. Estes ecossistemas, como observado ao longo do tempo, sofrem pressão das mudanças climáticas, que são desencadeadas pelo constante desmatamento de florestas maduras por meio do corte e queima e constantes mudanças de uso e cobertura da terra [20].

A utilização de dados de radares imageadores, banda-L, apresenta como vantagem o imageamento mesmo com nuvens, especialmente na região de estudo que está inserida no bioma Amazônia. Para a análise dos mangues, em especial, a interação do sinal com este ecossistema possui mecanismo de espalhamento predominante por *double bounce*, o que se faz sensível a níveis de inundação [21]. Entretanto, os mangues possuem como característica as raízes pneumatóforas que são expostas acima da água e reduzem o espalhamento por *double bounce*.

Novos sensores estão sendo desenvolvidos com bandas em comprimentos de onda que favorecem a quantificação de

biomassa devido a sua interação com a estrutura da vegetação, e a identificação de áreas de mangue. Isso potencializa o monitoramento dos ecossistemas e melhoram as estimativas de variáveis biológicas da floresta por métodos indiretos e não destrutivos.

5. CONCLUSÕES

Com base no que foi exposto pode-se concluir que: (i) os radares de abertura sintética possuem capacidade de identificação e interação com áreas de mangue e através disso é possível quantificar a biomassa e as mudanças nestas regiões; (ii) os modelos digitais de elevação do terreno e produtos que levam em consideração a estrutura da vegetação podem ser alternativas para a estimativa de biomassa acima do solo em regiões de mangue. A partir dos dados foi verificado uma detecção mais detalhada da variabilidade espacial de BAS. No entanto, é necessário um aprofundamento para reduzir as superestimativas obtidas a partir dos dados SRTM e GEDI.

Portanto, espera-se que com a evolução de sensores ativos em diferentes comprimentos de onda, seja possível estimar com maior precisão e acurácia as medidas dos recursos naturais em concomitância com dados de campo para a calibração dos modelos e validação das estimativas.

6. REFERÊNCIAS

[1] M. C. Hansen, et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 15 nov. 2013.

[2] L. Poorter, et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, v. 530, n. 7589, p. 211–214, 2016.

[3] C. A. Nobre, J. Reid. A. P. S. Veiga. *Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas.* São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. v. 1a edição. 2012.

[4] S. Brown, A. E. Lugo. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, v. 6, n. 1, p. 1–32, 10 fev. 1990.

[5] D. R. Aguiar, J. R. V. Gama, T. P. Beldini. Estoque de carbono por grupo ecológico na Floresta Nacional do Tapajós. *Espacios*, v. 38, n. 32, p. 21, 2017.

[6] W. F. Laurance, Biomass Collapse in Amazonian Forest Fragments. *Science*, v. 278, n. 5340, p. 1117–1118, 7 nov. 1997.

[7] IPCC, 2018: Summary for policymakers. In: global warming of 1.5°c. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°c above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate. In press. 2018.

[8] EB. Barbier, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, v. 81(2), n. 2, p. 169–193, 2011.

[9] Projeto MapBiomas – Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 5 de outubro através do link: https://mapbiomas.org/.

[10] M. Simard, et al. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*, v. 12, n. 1, p. 40–45, 20 jan. 2019.

[11] D. C. Donato, J. B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, M. Stidham, and M. Kanninen, "Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics," *Nat. Geosci*., vol. 4, no. 5, pp. 293–297, 2011

[12] N. Knapp, et al. Model-Assisted Estimation of Tropical Forest Biomass Change: A Comparison of Approaches. *Remote Sensing*, v. 10, n. 5, p. 731, 9 maio 2018.

[13] M. P. M. Menezes, U. Berger, U. Mehlig. Mangrove vegetation in Amazonia : a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil. *Acta Amazonica*. 38(3), 403–420. 2008.

[14] C. M. Souza, et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*. 12, 2735, 2020.

[15] L. Duncanson, et al. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California. *Remote Sensing of Environment*, 242 Abril, 2020.

[16] P. Potapov, et al. Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 112165. 2020

[17] M. Simard, et al. Global Mangrove Distribution, Aboveground Biomass, and Canopy Height. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. 2019.

[18] M. Shimada, et al. New global forest / non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007 – 2010). *Remote Sensing of Environment*, p. 19, 2014.

[19] C. Giri, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogreography*, v. 20, p. 154–159, 2011.

[20] F. Blasco, F., Aizpuru, M. & Gers, C. Depletion of the mangroves of Continental Asia. *Wetlands Ecology and Management*, 9, 245–256. 2001.

[21] M. Simard. Radar Remote Sensing of Mangrove Forests. In: *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Huntsville: [s.n.]. p. 255–267. 2019.