



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Estimativa da Biomassa Florestal de Unidades de Conservação urbanas por uso de Geotecnologias

Sidney Henrique Campelo de Santana¹, Nara Tôrres Silveira², Gabriel Antonio Silva Soares³, Camila Gardenea de Almeida Bandim⁴, Jadson Freire e Silva⁵, Raphaela Karinne dos Santos Bello⁶, Eugênia Cristina Gonçalves Pereira⁷

¹Dr. em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 1235, CEP 50670-901, Recife, Pernambuco. (81) 2126-8000. sidney.campelo@abreuclima.ifpe.edu.br.

²Ma. em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 1235, CEP 50670-901, Recife, Pernambuco. (81) 2126-8000. nara.torres@ufpe.br.

³Licenciado em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 1235, CEP 50670-901, Recife, Pernambuco. (81) 2126-8000. gabriel.antonios@ufpe.br.

⁴Licenciada em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 1235, CEP 50670-901, Recife, Pernambuco. (81) 2126-8000. camila.bandim@ufpe.br.

⁵Dr. em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 1235, CEP 50670-901, Recife, Pernambuco. (81) 2126-8000. jadson.freire@ufpe.br.

⁶Graduanda em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 1235, CEP 50670-901, Recife, Pernambuco. (81) 2126-8000. raphaela.karinne@ufpe.br.

⁷Dra. em Botânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Dois Irmãos, s/n, CEP 52171-900, Recife, Pernambuco. (81) 3320-6001. verticillaris@gmail.com.

Artigo recebido em 26/04/2024 e aceito em 09/08/2024

RESUMO

Das 15 metrópoles brasileiras, 10 estão sob o domínio da Mata Atlântica. Neste sentido, o fenômeno da metropolização suprimiu o bioma em fragmentos florestais, sobretudo nas zonas próximas ao litoral. Com isso, as Geotecnologias se apresentam como ferramentas promissoras na análise e monitoramento das florestas urbanas. Dessa forma, o objetivo deste estudo consistiu em propor a estimativa e análise da biomassa florestal acima do solo (BAS) mediante geotecnologias. Os sítios selecionados correspondem às Unidades de Conservação mata de Dois Irmãos, mata Curado/Jardim Botânico e a mata do Engenho Uchôa, situadas no município do Recife, Pernambuco. Para execução deste trabalho, foi adquirida nuvem de pontos LiDAR junto à Prefeitura do Recife. Para estimar a biomassa foi feita dendrometria em 31 indivíduos arbóreos. A partir da nuvem de pontos construiu-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Copa (MDC). Posteriormente, foi realizada uma correlação entre a BAS estimada a partir de LiDAR, e a altura das árvores aferida sobre o modelo digital, em que se obteve um coeficiente de Pearson = 0,8. Com base nestes resultados, se estruturou uma equação para estimar a biomassa florestal total, utilizando como variável o MDC. A estimativa da biomassa florestal total da mata de Dois Irmãos resultou em 169,9 Gg, a da mata do Jardim Botânico, em 25,27 Gg e da mata de Engenho Uchôa, num total de 9,86 Gg. Considera-se, portanto, que o uso integrado das Geotecnologias responde bem à estimativa e monitoramento da biomassa florestal.

Palavras-chave: estoque de carbono, florestas urbanas, modelo digital de copa, LiDAR.

Forest Biomass Estimation in Conservation Units Using Geotechnologies

ABSTRACT

Out of the 15 Brazilian metropolises, 10 are located within the Atlantic Forest domain. In this context, the phenomenon of metropolitanization has led to the fragmentation of the biome into forests, especially in areas near the coast. Therefore, Geotechnologies emerge as promising tools for the analysis and monitoring of urban forests. Thus, the aim of this study was to propose the estimation and analysis of above-ground forest biomass (AGB) using geotechnologies. The selected sites correspond to Conservation Units Dois Irmãos forest, Curado/Jardim Botânico forest, and Engenho Uchôa forest, located in the municipality of Recife, Pernambuco. To carry out this investigation, a LiDAR point cloud was acquired from the Recife City Hall. Dendrometry was performed on 31 tree individuals to estimate biomass. Using the point cloud, a Digital Terrain Model (DTM) and a Digital Canopy Model (DCM) were constructed. Subsequently, a correlation was established between the AGB estimated from LiDAR and the tree height measured on the digital model, resulting in a Pearson coefficient of 0.8. Based on these results, an equation was structured to estimate the total forest biomass, using DCM as the variable. The estimated total forest biomass for Dois Irmãos forest was 169.9 Gg, for Jardim Botânico forest, it was 25.27 Gg, and for Engenho Uchôa forest, it totaled 9.86 Gg. Therefore, the integrated use of Geotechnologies is considered effective for the estimation and monitoring of forest biomass.

Keywords: carbon stock, urban forests, digital canopy model, LiDAR.

Introdução

Os avanços tecnológicos, em suas diversas esferas, têm-nos disponibilizado ferramentas que proporcionam melhor compreensão dos fenômenos naturais e o conhecimento detalhado dos fatores que exercem influência na dinâmica dos ecossistemas. Acompanhando essa evolução, as geotecnologias têm abarcado uma pluralidade de instrumentos, softwares e métodos que viabilizam análises mais amplas e complexas do meio ambiente. Neste sentido, parâmetros de estimativas ambientais desenvolvidos por meio de ferramentas das Geotecnologias, vêm ganhando credibilidade e espaço na comunidade científica por todo o planeta. Dentre estes, se encontram os propostos para a estimativa da biomassa florestal, que se apresentam como uma alternativa de análise relevante do ponto de vista ambiental e econômico, por dispensar métodos destrutivos de aferição, e por ser capaz de abranger, de forma prática, grandes áreas da superfície.

Dessa maneira, as tecnologias de sensoriamento remoto ativo, mais especificamente as de varredura tridimensional da superfície, garantem maior precisão na descrição do alvo, refinando os parâmetros de medição. Dentre essas tecnologias se apresenta o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), também conhecido como laser scanner, ou em português, perfilamento a laser. Por meio de um sensor acoplado em um veículo aéreo ou terrestre, a tecnologia LiDAR, lança pulsos laser que são capazes de, até mesmo, transpassar os alvos e, com isso, realiza a leitura dos objetos da superfície através da contagem do tempo de retorno.

Esse instrumento se mostrou proveitoso nas pesquisas que envolvem os sistemas florestais, campo que vem se popularizando desde o século passado. De fato, a maior quantidade de estudos florestais envolvendo a tecnologia LiDAR é proveniente de zonas temperadas, ou sistemas silviculturais (pinos, eucalipto, entre outros). Comparado a esses ambientes, aplicações de LiDAR em florestas tropicais ainda são pouco frequentes, menos ainda quando se trata de estimativas de biomassa florestal. Neste contexto, o Brasil ainda carece de um bom aporte de dados florestais inventariados, assim como de disponibilidade de dados abertos oriundos da tecnologia LiDAR.

Neste contexto, Pernambuco foi a primeira unidade federativa do país a mapear todo o seu território e a disponibilizar gratuitamente a nuvem de pontos LiDAR. Portanto, a acessibilidade desse banco de dados tornou viável a execução deste trabalho, que tem como objetivo principal estimar a biomassa florestal de fragmentos urbanos de mata Atlântica situados no município do Recife.

Com essa investigação científica, propõe-se um método para estimar a biomassa florestal de fragmentos de Mata Atlântica recorrendo-se à tecnologia LiDAR, sem a necessidade de amparo de inventários florestais extensivos.

Material e métodos

Área de estudo

As áreas selecionadas para o estudo estão localizadas no município do Recife, capital de Pernambuco. Habitam neste município cerca de 1,5 milhão de pessoas, de acordo com o censo realizado pelo IBGE (2021) numa área de 218.562 km². A demografia da cidade apresentou um crescimento abrupto, a partir da segunda metade do século XX. O rápido crescimento populacional resultou em problemas urbanos nas esferas sociais, econômicas, estruturais e ambientais. A ocupação humana e o crescimento urbano modificaram expressivamente o sistema natural deste espaço. Houve, dessa forma, mudanças nas estruturas pedológicas e nos cursos dos rios. Igualmente, perdas importantes da qualidade da água, das propriedades dos solos e dos remanescentes florestais.

Ainda assim, remanescentes florestais resistem ao crescimento da cidade, os quais, hoje são protegidos por lei como Unidades de Conservação. Porém, muitas destas unidades passam por processo de degradação ambiental e necessitam de atenção maior da gestão pública. Desta forma, três destes fragmentos florestais foram selecionados para a realização desta investigação científica. São eles: UCN Curado, que incorpora o Jardim Botânico, a UCN Mata de Dois Irmãos e a APA Rousinete Falcão, popularmente conhecida como Mata do Engenho Uchôa. As delimitações das três UCNs estão destacadas na figura 1.

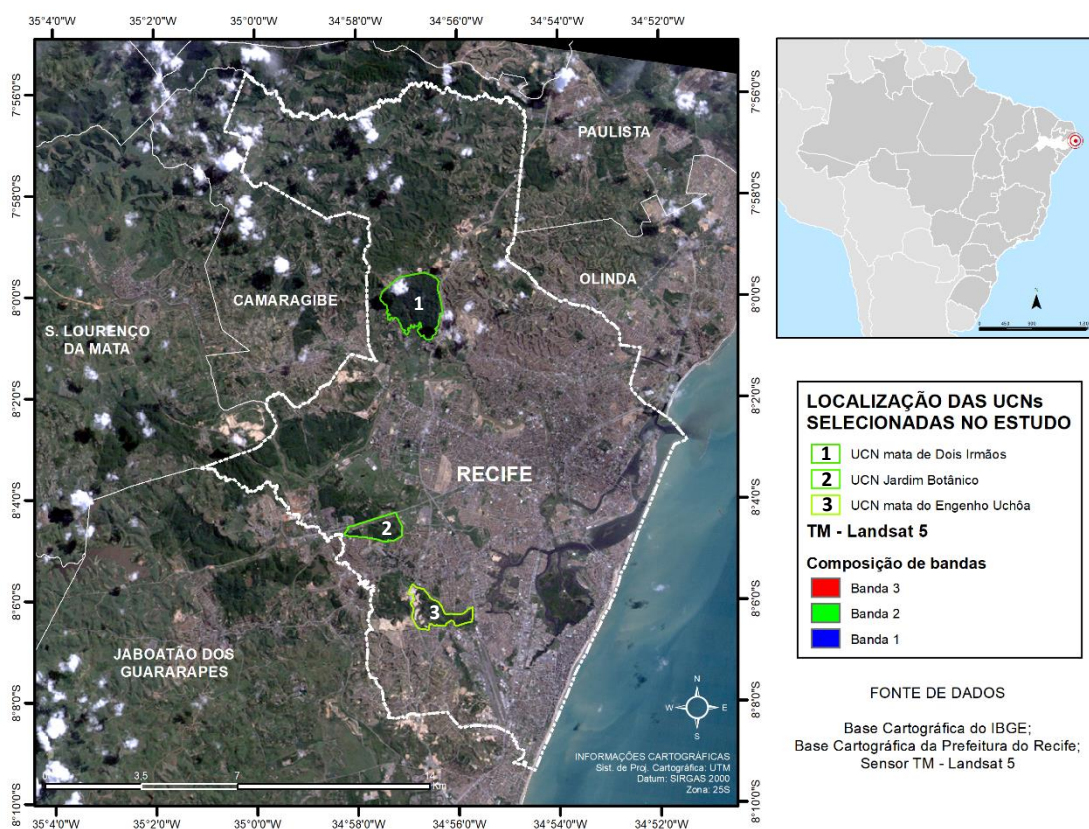


Figura 1. Localização das UCNs contempladas neste estudo, localizadas do município de Recife, PE.

Seleção das amostras em campo para a dendrometria

Para a realização da amostragem, foram coletados dados dendrométricos de árvores situadas na UCN Curado, mata do Jardim Botânico. Aferiram-se métricas dimensionais de 31 indivíduos arbóreos distribuídos pelo fragmento florestal. Foram selecionadas para a dendrometria, as árvores as quais fosse possível identificar com nitidez nos *rasteres* gerados pela nuvem de pontos. Por questões de logística e segurança da equipe, não foram realizadas amostragens mata do Engenho Uchôa. Da mesma forma, por questões de acessibilidade e densidade florestal, constatou-se ser inviável a realização da amostragem na mata de Dois Irmãos, tendo em vista a limitação técnica da equipe.

Na UCN Curado foi realizada a dendrometria em áreas distintas da mata, levando em consideração a acessibilidade aos indivíduos arbóreos, tamanho e estado de conservação. Buscou-se priorizar espécies nativas da Mata Atlântica, porém, por conta da acessibilidade, também foram incluídas nas aferições alguns indivíduos do gênero *Mangifera* (mangueira), que são espécies exóticas, mas são oriundas de florestas ombrófilas. Deste modo, na figura 2 se mostra a localização dos indivíduos aferidos na realização da dendrometria.

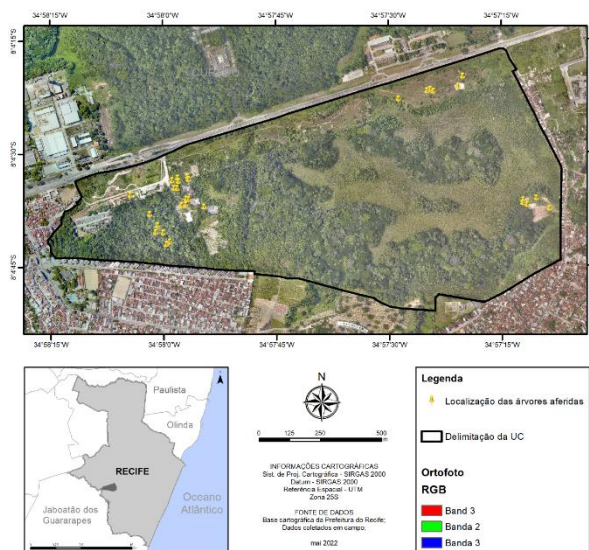


Figura 2. Localização dos indivíduos arbóreos incluídos na dendrometria, na UCN Curado, Recife (PE).

Os dados dendrométricos coletados correspondem às coordenadas geográficas de cada árvore; altura total do indivíduo, aferida por aplicativos de clinômetro florestal instalados em smartphones; o diâmetro da copa, aferido por trena métrica tomando como referência a sombra da copa, ou, a observação em ângulo perpendicular do limite da base da copa em relação ao solo.

A posteriori, os dados de CAP foram utilizados para calcular o diâmetro do tronco na altura do peito (DAP). Da mesma maneira, os dados de diâmetro da copa foram obtidos para estimar o diâmetro médio da copa, através da equação 1, e o volume da copa, aplicando-se a equação 2, propostas por Batista *et al.* (2014).

$$d_c = \sqrt{d_M \cdot d_m} \quad (1)$$

$$v_c = \left[\frac{l}{2r+l} \right] \left(\frac{\pi}{4} \right) d_c^2 \cdot l_c \quad (2)$$

Em que, d_c corresponde ao diâmetro médio da copa, d_M , ao diâmetro maior, d_m , ao diâmetro menor, v_c , ao volume da copa e l_c , ao comprimento da copa.

Para estimar a biomassa arbórea acima do solo (BAS) recorreu-se às equações alométricas propostas por Brown (1997), Chave *et al.* (2001), Arevalo *et al.* (2002), Lima *et al.* (2008), Pearson (2013) e Saha *et al.* (2021). A partir de então, obteve-se a média final com os resultados de todas as equações para cada indivíduo.

Análise e processamento dos dados LiDAR

Os dados LiDAR foram obtidos por meio de ofícios direcionados ao Instituto Pelópidas Silveira da Prefeitura da Cidade do Recife. Estes produtos são oriundos do levantamento LiDAR e aerofotogramétrico realizado pela empresa ENGEFOTO. A cobertura aerofotogramétrica digital apresenta resolução espacial de 8 cm e escala de 1:1000, enquanto o levantamento a laser gerou uma nuvem de pontos com densidade de 5,51 pontos por m², disponibilizada em formato tabular '.xyz' (<http://www.engefoto.com.br/port/recife/>).

O primeiro passo do processamento consistiu em converter as cenas de arquivo de extensão '.xyz' para o formato de nuvem de pontos de extensão '.las'. A seguinte etapa consistiu em unir as cenas adquiridas, correspondentes aos fragmentos florestais selecionados para o estudo. Este procedimento resultou em três nuvens de pontos de extensão '.las', cada uma referente a uma UCN específica.

Para viabilizar a sequência da metodologia, foi necessário realizar a classificação da nuvem de pontos após a conversão para a extensão '.las'. Este processamento seguiu as orientações de código específicas da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), entidade proprietária da extensão '.las' (Gorgens *et al.*, 2014).

Para corrigir e reclassificar os pontos pré-classificados erroneamente, foi feito um processo

manual de reclassificação dos pontos. Com o propósito de refinar a filtragem e eliminar pontos ruidosos, recorreu-se à função '*GroundFilter*' do software FUSION LDV, que tem como finalidade depurar, ainda mais, a filtragem desses dados, pois como em floresta densa, muitos dos pulsos a laser, lançados por sensor aerotransportado, não conseguem alcançar o solo. Por isso, a função *GroundFilter* considera os pontos mais baixos da nuvem como solo, ainda que estes não tenham sido estabelecidos como tal na primeira etapa de classificação. Com isso, cria-se uma nova nuvem de pontos contendo, apenas, os retornos laser classificados como solo exposto (Gorgens *et al.*, 2014).

Na filtragem final foram utilizados os *switches* opcionais '*surface*' e '*outlier:high*', seguindo as orientações de Reutebuch *et al.* (2005) e Gorgens *et al.* (2014), com a finalidade de amenizar os erros residuais. Contudo, neste estudo as classes relativas à vegetação baixa, média e alta (2, 3 e 4) foram incluídas na sintaxe do comando, para que a nova nuvem de pontos apresentasse os retornos concernentes a, apenas, solo e vegetação.

Para a construção do MDT foi utilizado o comando *GridSurfaceCreate*, resultando em um arquivo em formato *raster* de extensão '.dtm'. Cada uma das células contém um valor médio das alturas dos pontos nela compreendidos. Entretanto, alguns *switches* opcionais podem ser acrescentados na sintaxe do comando, com o objetivo de refinar o produto, neste caso, os parâmetros adicionados foram '*median:#*' e '*minimun*' (Gorgens, 2014), que variaram entre 3, 5 e 7. Após realização de testes, o valor que mais se adequou a esta realidade foi o '*median:5*'.

Construção do MDC

O Modelo Digital de Copa (MDC) é um modelo digital de superfície desenvolvido para indicar a elevação arbórea em relação ao solo. Para a criação deste modelo é necessário adicionar um parâmetro opcional ao comando *CanopyModel* do FUSION LDV, que inclui o MDT como referência. A partir de então, a coordenada z deixa de representar a altitude e passa a indicar a altura da árvore que, neste caso, é determinada por uma interpolação pela média dos vizinhos adjacentes (Gorgens *et al.*, 2014). Este modelo, portanto, é fundamental para a estimativa da biomassa florestal por processamento dos dados LiDAR, uma vez que fornece os parâmetros florestais de altura da vegetação através das ferramentas do FUSION LDV.

Assim como o MDT, o MDC também se configura em um formato de matriz de dados em

extensão '.dtm'. Para visualização do produto e elaboração do mapa, os MDSs foram exportados para formato de arquivo de imagem '.img' e, com a finalidade de dar sequência metodológica, foram exportados para arquivo '.ascii'.

Estimativa da biomassa arbórea acima do solo

Por meio do MDC foram feitas as comparações entre as respectivas alturas de cada árvore projetada por este modelo com as alturas aferidas em campo. Para a validação destes dados foi realizada a regressão linear simples entre essas duas séries. Da mesma forma, foi feita a comparação entre o volume de copa estimado a partir de dados aferidos em campo e o volume de copa estimado através das medidas aferidas no MDC, com as ferramentas de geoprocessamento. Em seguida foram realizados testes de correlação entre algumas variáveis com o propósito de se estimar o DAP das árvores com base no produto LiDAR.

A partir da obtenção dos valores de DAP estimados via produtos LiDAR (DAP_{LiDAR}), foi possível aplicar as equações dos autores supracitados para a estimativa da nova biomassa florestal, a BAS_{LiDAR} . O procedimento para se obter a BAS_{LiDAR} final foi o mesmo para se obter a biomassa final com o DAP obtido em campo. Isto é, através da média calculada sobre as seis equações.

Posteriormente, foi calculada a regressão linear entre os valores de biomassa obtidos em campo e os valores de BAS_{LiDAR} , com o propósito de se obter a validação dos resultados. Em seguida, foi feita uma nova correlação entre a biomassa obtida por meio do DAP estimado em cima de métricas feitas sobre os dados LiDAR e a altura das árvores aferidas sobre o MDC, utilizando-se ferramentas de geoprocessamento. A partir de então, obteve-se a equação para estimar a biomassa florestal das três matas.

Estimativa da biomassa florestal por meio dos dados LiDAR

A equação da biomassa florestal foi aplicada sobre o MDC. Entretanto, para que os valores de biomassa não fossem dados pixel a pixel foram construídas malhas com quadrículas de 10 m, 15 m e 20 m de lado. Dessa forma, cada quadrícula contém um ponto que dispõe do valor de biomassa representante daquela área específica.

Para realizar a estimativa de estoque de carbono florestal de cada UCN, foi aplicada a equação 3, proposta por Bazezew *et al.* (2018), sobre a biomassa florestal.

$$\text{Estoque de Carbono} = BAS_{LiDAR} \cdot 0,47 \quad (3)$$

Em seguida, o resultado da estimativa de estoque de carbono foi especializado numa malha de quadrículas de 20 m de lado cada.

Resultados e discussão

Estimativa de biomassa arbórea acima do solo

A predição da biomassa arbórea acima do solo foi realizada por meio da aplicação das equações alométricas propostas por Brown (1997), Chave *et al.* (2001), Arevalo *et al.* (2002), Lima *et al.* (2008), Pearson (2013) e Saha *et al.* (2021). Essas equações foram estruturadas sobre os valores DAP obtidos em campo.

A biomassa arbórea foi estimada no intuito de se obter um parâmetro de análise da coerência entre os valores resultantes diante das dimensões das árvores (altura, DAP e volume). A altura média entre os indivíduos medidos em campo resultou em 13,91 m, enquanto o DAP médio foi de 87,84 cm e, a média entre os volumes da copa foi de 4347,6 m³. Por fim, a biomassa arbórea média resultou em 7800 kg. Ao se considerar resultados atingidos por outros pesquisadores, constata-se que os valores de biomassa obtidos neste estudo estão coerentes com as métricas dendrométricas aferidas em campo. Neste sentido, Popescu (2007) realizou estimativas de biomassa arbórea individual sobre 45 árvores da espécie *Pinus taeda* L., utilizando ferramentas de LiDAR, atingindo um valor médio de biomassa de 486,55 kg com um DAP médio de 29,55 cm e altura média de 19,72 m. Por outro lado, Bazezew *et al.* (2018) estimaram uma biomassa arbórea média de 8176,2 kg, sobre o DAP médio de 19,98 cm, em espécies de floresta tropical da Malásia.

Estimativa de biomassa florestal

Ao realizar estudos de predição de biomassa baseados nos produtos LiDAR, os pesquisadores geralmente recorrem à extração da bateria de estatísticos relativos à altura da vegetação e os correlacionam com os dados florestais inventariados, como propõem Gorgens *et al.* (2014). Foi o caso dos estudos realizados por Santana *et al.* (2016; 2021) para estimar a biomassa florestal de bosques de *Pinus sylvestris* e *P. uncinata*. Outros casos de estimativa de biomassa florestal em bosques de coníferas por meio da associação estatística entre dados de inventário e LiDAR correspondem aos estudos realizados por Latif *et al.* (2012), Silva *et al.* (2017), Domingo *et al.* (2018), Carvalho *et al.* (2021) e Torre-Tojal *et al.* (2018).

al. (2022). Além destes, outros pesquisadores aplicaram correlações estatísticas entre dados de inventário e LiDAR para estimar a biomassa florestal em florestas tropicais, como foi o caso de Figueiredo *et al.* (2016), Knapp *et al.* (2018) e Oliveira *et al.* (2021). Neste estudo, entretanto, devido à inviabilidade de se obter dados de inventários dos fragmentos florestais adotados, recorreu-se à coleta de amostras individuais em campo. Deste modo, optou-se por métodos comparativos entre os dados observados do indivíduo arbóreo em campo e, os dados preditos deste mesmo indivíduo modelados por meio dos dados LiDAR.

Vale ressaltar, portanto, que o perfilamento a laser foi realizado nos anos 2013/2014, enquanto as coletas em campo, no início do ano de 2022. Dessa forma, um intervalo de tempo de oito anos pode representar mudanças significativas tanto no ambiente quanto em cada indivíduo arbóreo, principalmente quando se trata de áreas situadas em meio urbano.

Testes de correlação entre a altura da árvore e o DAP observados em campo não apresentaram boa relação entre si, o que revela que, neste caso, estas duas variáveis não se explicam. Concebe-se que a baixa correlação entre estas duas variáveis condiz com a diferença ambiental entre as quatro zonas onde estão situadas as árvores. Se por um lado, as árvores que estão inseridas numa zona densamente florestada apresentam maior crescimento vertical, devido à competição por luz, por outro, as árvores situadas em espaço aberto têm a oportunidade de expandir horizontalmente a sua copa, devido à boa disponibilidade de luz solar. Além disso, existem outros fatores que influenciam

na relação DAP/Altura, como diferenças anatômicas entre espécies, por exemplo. Diante destas condições, para que se pudesse obter uma boa correlação entre estas variáveis, estima-se que seria necessária a inclusão de um maior número de indivíduos na análise. Por isso, para que fosse possível estimar o DAP através do produto LiDAR, foram testadas outras variáveis. Com a realização de testes de correlação entre as variáveis obtidas em campo, obteve-se o resultado satisfatório com a correlação entre o DAP e o Volume da copa, que resultou num coeficiente de 0,84. Com esse resultado, estabeleceu-se uma expressão empírica (equação 4) para estimar o DAP a partir dos dados LiDAR (DAP_{LiDAR}), obtida através da regressão linear simples.

$$DAP_{LiDAR} = 0,0083 * VC_{LiDAR} + 44,653 \quad (4)$$

Em que DAP_{LiDAR} corresponde ao diâmetro do tronco da árvore na altura do peito e VC_{LiDAR} , ao volume da copa da árvore obtido através do MDC.

Para efeitos de validação, testou-se a correlação entre o DAP estimado pela equação 4, fruto do processamento dos dados LiDAR, e o DAP obtido em campo, resultando em um coeficiente de 0,6. O DAP médio resultante da dendrometria realizada em campo é de 87,84 cm, enquanto que o DAP médio estimado a partir dos dados LiDAR resulta num valor de 70,03 cm.

Em seguida foram aplicados os valores do DAP_{LiDAR} nas equações de biomassa utilizadas neste estudo. As descrições dos seus resultados se apresentam na tabela 1.

Tabela 1. Descrição de biomassa arbórea acima do solo dos indivíduos selecionados da mata do Jardim Botânico (Recife, PE), estimada por meio de dados LiDAR.

Descrição	Biomassa arbórea acima do solo (Mg) predita por dendrometria	Biomassa arbórea acima do solo (Mg) estimada por dados LiDAR
Máxima	38,5	22,5
Mínima	1,4	1,9
Média	7,8	5,4
Mediana	6,9	3,4

É possível averiguar, mediante observação da tabela 1, que os valores correspondentes à mediana e a média da biomassa predita via dendrometria em campo, são maiores que a mediana e a média da biomassa estimada a partir dos dados LiDAR. Um fator que pode explicar essa diferença nos resultados é um intervalo de tempo de oito anos entre o perfilamento a laser realizado sobre o território do Recife e as medidas realizadas em campo. Portanto, neste período, é provável que

as árvores tenham obtido ganho de volume e de massa.

Para efeito de validação, foi feita a correlação estatística entre a biomassa predita a partir de dados em campo com a biomassa estimada por meio dos dados LiDAR, cujo coeficiente de Pearson resultou em 0,73.

Como a estimativa da biomassa florestal para toda a área da mata foi feita com base no MDC, foi testada a correlação entre a Biomassa estimada a

partir dos dados LiDAR com os valores de altura das árvores obtidos a partir desse modelo. O coeficiente de correlação de Pearson obtido neste caso foi de 0,83. Por outro lado, o coeficiente de determinação R^2 resultou em 0,69. Nessas conjunturas, não é raro se encontrar pesquisas que envolvem a relação entre dados LiDAR e valores obtidos em campo que alcançam coeficientes de correlação R^2 abaixo de 0,9. Como levantado anteriormente, com o objetivo de estimar a biomassa florestal, Estornell *et al.* (2012) obtiveram um valor de R^2 de 0,72 na correlação entre a biomassa arbustiva e métricas de altura derivadas de nuvem de pontos LiDAR. Utilizando varredura a laser terrestre, Srinivasan *et al.* (2014) também estimaram a biomassa recorrendo à correlação entre dados de campo e métricas de altura obtidas pela nuvem de pontos LiDAR, em que obtiveram um R^2 de 0,7. Galvêncio e Popescu (2016) obtiveram um coeficiente R^2 0,69 ao correlacionar a altura das árvores estimada por LiDAR *versus* altura das árvores aferidas em campo, numa floresta de mangue em Recife. Torre-Tojal *et al.* (2022) desenvolveram modelos para estimar a biomassa de *Pinus radiata*, associando dados de inventário florestal com indicadores extraídos de nuvem de pontos LiDAR, no qual obtiveram um coeficiente R^2 de 0,7. Brovkina *et al.* (2017) obtiveram coeficientes R^2 que variaram desde 0,78 a 0,85 ao estimarem a biomassa de floresta de coníferas na República Tcheca, utilizando dados de LiDAR, sensores hiperspectrais e coletas em campo.

Quando se trata de pesquisas feitas em florestas tropicais secas, podemos encontrar coeficiente de correlação R^2 ainda mais baixos, como foi o caso de Oliveira *et al.* (2021), que obtiveram um coeficiente R^2 ajustado de 0,42 e 0,53 ao correlacionar indicadores de altura oriundos de dados LiDAR com métricas de campo, em sítios no semiárido de Pernambuco. Da mesma forma, adotando regressão linear entre estatísticos provenientes de LiDAR e dados de campo, Anderson *et al.* (2018) e Hernández-Stefanoni (2015) obtiveram R^2 de 0,71 e 0,77, respectivamente, em florestas secas no Estados Unidos e México.

Portanto, para este estudo, considera-se um coeficiente R^2 de 0,69 como satisfatório. A partir de então, se obteve a expressão (equação 5) para se estimar biomassa florestal em todo o fragmento florestal da Mata do Jardim Botânico (UCN Curado).

$$Biomassa_{Florestal} = 866,35 * MDC - 5639,3 \quad (5)$$

Em que $Biomassa_{Florestal}$ corresponde à biomassa aérea total da UCN, e MDC corresponde ao Modelo Digital de Copa, o qual contém os valores de altura por pixel.

Biomassa florestal total das UCNs

Após analisar os resultados de biomassa florestal acima do solo total nas três UCNs, decidiu-se pela espacialização do produto final em quadrículas de 20 m. Optou-se por essa dimensão de quadrícula, pois a média dos diâmetros das copas aferidas a partir do MDC resultou em 16,8 m e a média dos diâmetros das copas dimensionadas em campo resultou em 19,1 m. Com isso, cada quadrante passou a conter um valor único de biomassa representativo para aquele espaço, que se sobressai frente aos demais valores de biomassa. É evidente, entretanto, que um espaço de 400 m² pode abrigar mais de um indivíduo arbóreo de CAP superior a 150 cm e, com isso, o quadrante deveria conter a soma da biomassa de todos os indivíduos ali compreendidos. Porém, o *raster* criado a partir da estimativa da biomassa florestal sobre o MDC, apresenta os valores de biomassa por pixel, e cada um representa 1 m² da superfície. Dessa forma, a soma de todos os valores presentes em uma parcela 400 m² sobrestimaria demasiadamente a situação real. Por outro lado, existem indivíduos arbóreos com porte bastante elevado, com diâmetro acima de 20 m, que ultrapassam os limites do quadrante estabelecidos aqui. Por essa razão, estima-se que esses contraditórios se compensam. Em outras palavras, considerou-se que, atentando-se ao porte da floresta, parcelas menores que 20 m de comprimento de lado poderiam sobrestimar árvores grandes elevando o valor total da biomassa florestal. Por outro lado, a probabilidade de se excluir árvores menores do modelo aumentaria, caso utilizássemos parcelas com comprimento de lado maior que 20 m, o que tenderia a atrair para baixo o valor total de biomassa florestal.

Ao traçarem caminhos similares, outros pesquisadores também delimitaram parcelas em floresta tropical úmida com dimensões aproximadas às deste estudo, quando o método incluía a dimensão da copa da árvore na modelagem com os dados LiDAR. Neste sentido, para estimar a biomassa florestal acima do solo em floresta tropical no Congo, Kashongwe *et al.* (2020) utilizaram parcelas amostrais de 25 m de lado, levando em consideração o tamanho da copa das árvores. Knapp *et al.* (2018), concluíram que, quando se trata de LiDAR, resoluções de 10 e 20 m são suficientes para estimar a biomassa a partir do dossel das árvores. Ioki *et al.* (2014) determinaram parcelas de 20 e 30 m de lado para estimar a

biomassa utilizando os dados LiDAR em floresta tropical úmida em Borneo.

Isto posto, partiu-se para representar cartograficamente a distribuição da biomassa

florestal das matas em quadrantes de 20 m de lado. Dessa forma, a primeira projeção espacial da estimativa de biomassa florestal corresponde à mata de Dois Irmãos, exposta na figura 3.

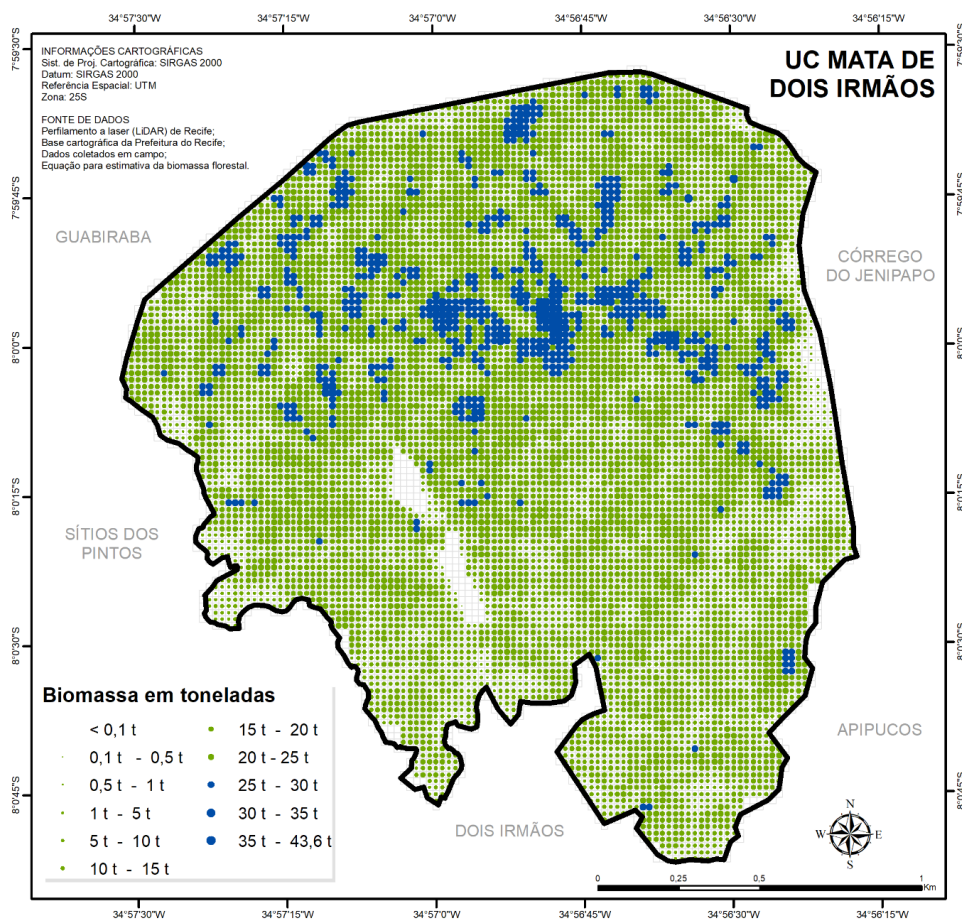


Figura 3. Distribuição espacial dos valores de biomassa florestal por quadrantes de 400 m² ao longo da mata de Dois Irmãos, Recife (PE).

A quantidade total de biomassa florestal acima do solo estimada por meio dos dados LiDAR resultou em 169,9 gigagramas (Gg), enquanto o carbono total estocado na floresta viva resultou em 79,87 Gg. Ao se observar a figura 3, nota-se que a maior quantidade de biomassa florestal está compreendida na porção setentrional da mata, onde

é possível encontrar áreas com concentração de biomassa superior a 700 Mg/ha.

Entretanto, a concentração de biomassa florestal é menor nos outros dois fragmentos florestais. Neste sentido, a figura 4 expõe a distribuição espacial da biomassa florestal acima do solo por quadrante de 20 m compreendida na mata do Jardim Botânico.

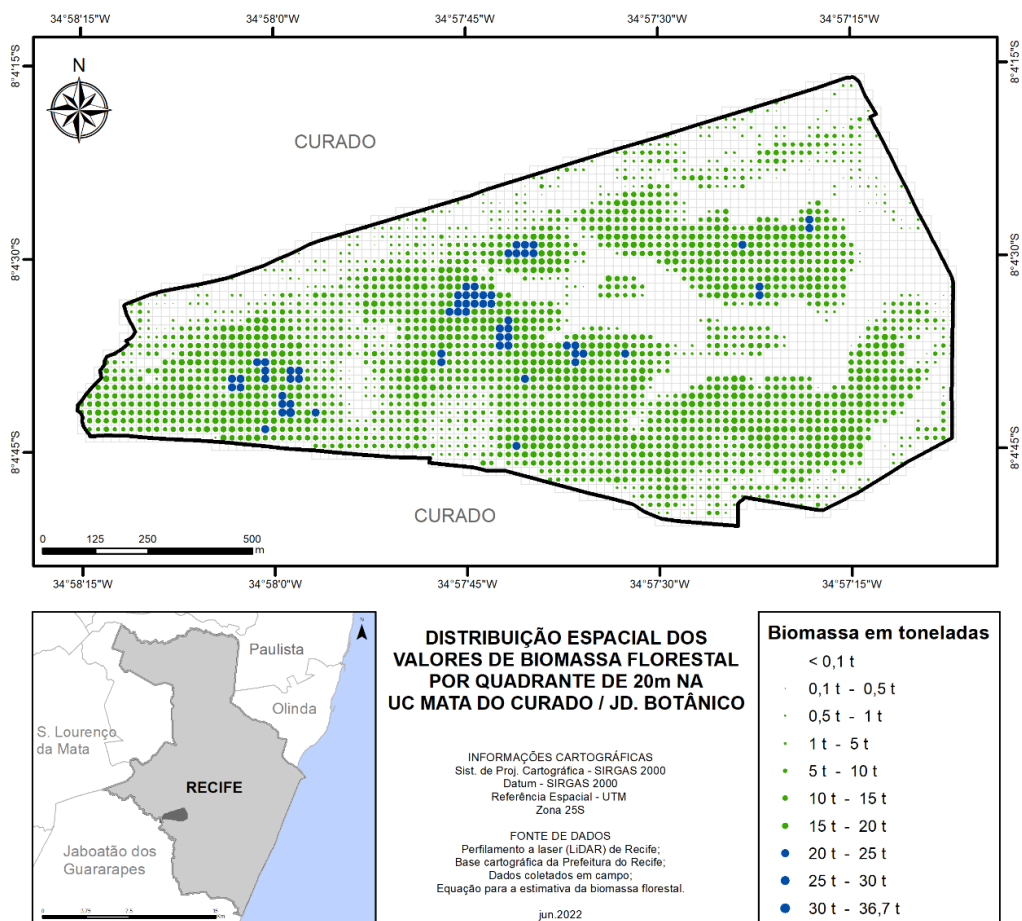


Figura 4. Distribuição espacial dos valores de biomassa florestal por quadrantes de 400 m² ao longo da mata do Jardim Botânico, Recife (PE).

A biomassa florestal total estimada por meio do tratamento dos dados LiDAR obtida para a mata do Jardim Botânico resultou em 25,26 Gg, enquanto o estoque de carbono total na floresta resultou em 11,8 Gg. As maiores concentrações de biomassa florestal se encontram na área que compreende o parque do Jardim Botânico, e em dois fragmentos situados na porção centro-norte da mata. Nestas áreas, os valores totais de biomassa por hectare circundam os 500 Mg/ha. Contudo, como se pode observar no cartograma, existem áreas onde há significativa ausência de biomassa florestal. São áreas que compreendem as instalações do Parque do Jardim Botânico, o canteiro frontal, e outras edificações. Além destas, há ausência de biomassa florestal significativa por

toda a faixa norte da UCN, por onde passam as linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. Da mesma forma, há uma grande área na porção oriental da mata onde se ausenta a biomassa florestal, a qual compreende a uma zona de solos encharcados e alguns pontos de solo exposto observados em campo.

Em um contexto ambiental diferente da Mata do Jardim Botânico, a presença expressiva de áreas com baixa ou nenhuma biomassa florestal na mata do Engenho Uchôa tem como razão preponderante a degradação ambiental sofrida por este remanescente florestal ao longo dos anos. À vista disso, a figura 5 representa a distribuição espacial da biomassa florestal acima do solo por quadrantes de 400 m² da mata do Engenho Uchôa.

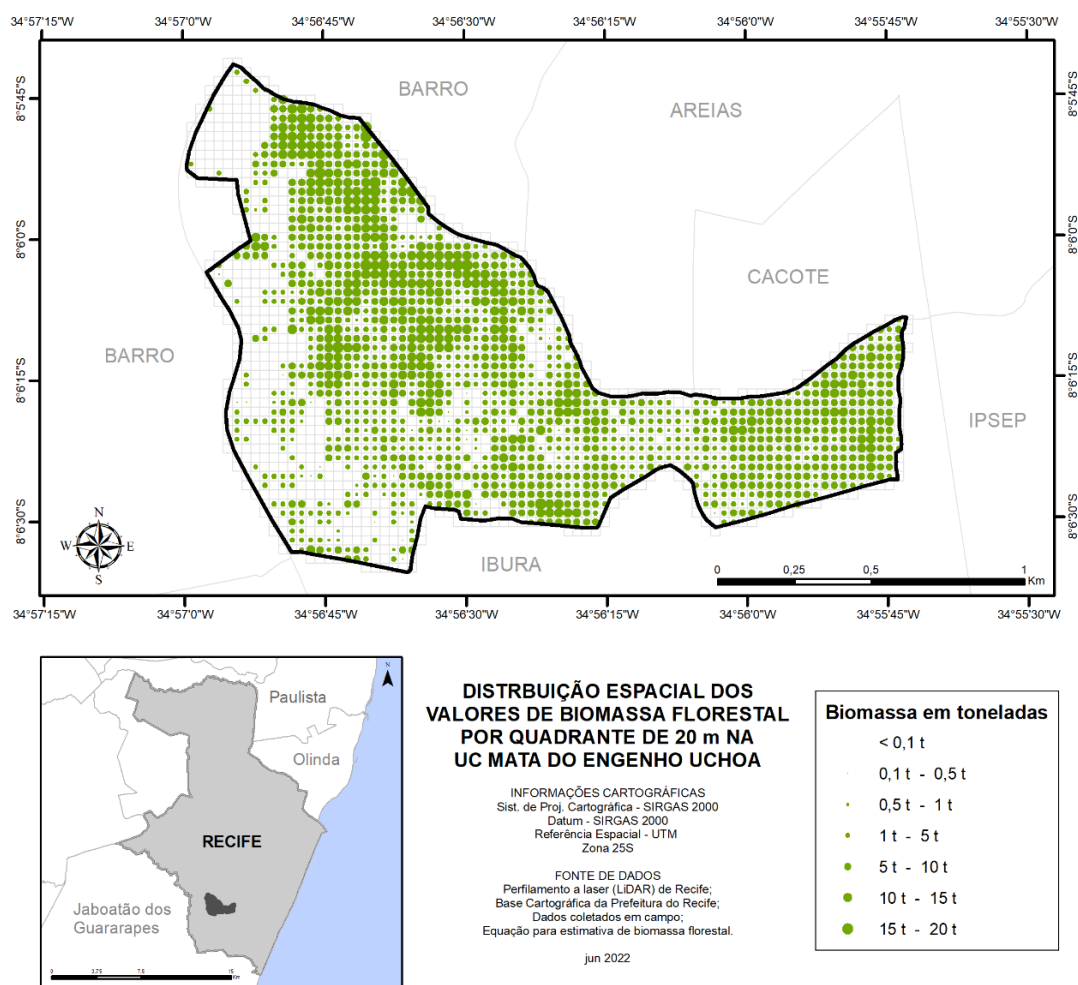


Figura 5. Distribuição espacial dos valores de biomassa florestal por quadrantes de 400 m² ao longo da Mata do Engenho Uchôa, Recife (PE).

A mata do Engenho Uchôa sofreu com intensa degradação ambiental ao longo de anos e, ainda hoje, está submetida aos impactos causados pela pressão urbana. Essas circunstâncias trouxeram como consequência a subtração da biomassa florestal. Um ponto que indica essa situação é a biomassa máxima em um quadrante de 400 m² não ultrapassar as 20 Mg, enquanto no Jardim Botânico existem áreas em que a biomassa ultrapassa as 30 Mg, e em Dois Irmãos, ultrapassa as 40 Mg. Do mesmo modo, é possível notar áreas com baixos ou ausência total de valores de biomassa em pontos

distintos da UCN, principalmente em toda a faixa oeste.

Diferente do Jardim Botânico, em Uchôa não existem construções de grande porte, com exceção da Distribuidora Cadan. Desse modo, fica evidente que a ausência de biomassa florestal é resultado da degradação ambiental fruto da exploração predatória dos recursos naturais, ao longo da história deste remanescente de Mata Atlântica.

Para que se possa perceber melhor diferenças entre os fragmentos florestais, quanto ao porte e distribuição de biomassa, os valores descritivos foram esquematizados na tabela 2:

Tabela 2: Estatística descritiva dos resultados de biomassa das UCNs adotadas para este estudo.

UCN	Área - ha	Biomassa máxima (Mg)	Média (Mg)	Mediana (Mg)	Biomassa florestal total (Gg)	Estoque de carbono total (Gg)	Biomassa florestal (Mg/ha)
Dois Irmãos	368,33	43,6	18,3	18,5	169,93	79,87	442,04
Jd. Botânico	136,4	32,9	8,4	9,1	25,27	11,88	185,24
Engenho Uchôa	173,4	18,4	5,2	4,9	9,86	4,64	56,79

Em termos absolutos e proporcionais, a mata de Dois Irmãos é o remanescente florestal que conta com maior estoque de biomassa florestal, uma situação bastante díspar da mata do Engenho Uchôa.

Com um valor distribuído de 442,04 Mg/ha nota-se, portanto, a grande diferença entre a produção de biomassa florestal por hectare entre a mata de Dois Irmãos e as outras duas matas. Enquanto a mata do Jardim Botânico, com 185,24 Mg/ha não alcança 50 % da biomassa por hectare em relação a Dois Irmãos, a biomassa por hectare da mata do Engenho Uchôa representa apenas 12,8 % daquele parque. Constata-se, a partir de então, que a mata de Dois Irmãos tem maior quantidade de biomassa absoluta, consequentemente biomassa relativa por hectare, além da distribuição mais homogênea da biomassa florestal ao longo de seu território, em relação às outras matas. Esta condição se deve ao maior tempo de conservação em relação às outras UCNs.

Em cenários aproximados, outros estudos que buscaram estimar a biomassa florestal acima do solo em florestas tropicais obtiveram com mais frequência um estoque médio por hectare entre 200 Mg/ha e 300 Mg/ha. Dessa forma, ao testar métodos estatísticos, a partir de indicadores LiDAR para estimar a biomassa florestal acima do solo em uma parcela de floresta amazônica no Estado do Pará, Rex *et al.* (2020) atingiram valores médios de 229,10 Mg/ha em 2012, 258,18 Mg/ha em 2014 e 240,34 Mg/ha em 2017, numa zona de floresta em restauração. Neste caso, os autores delimitaram 85 parcelas de 50 m x 50 m, aferiram as árvores com DAP superior a 35 cm e, utilizaram a equação alométrica proposta por Chave *et al.* (2014) para prever a biomassa acima do solo de cada indivíduo. A partir de então, Rex *et al.* (2020) desenvolveram modelos estatísticos para correlacionar as métricas extraídas dos dados LiDAR com os resultados obtidos em campo, o que resultou nesses valores de biomassa florestal estimada.

Também no bioma da Amazônia, d'Oliveira *et al.* (2020) chegaram a um valor médio de biomassa florestal de 273 Mg/ha, associando dados obtidos por drones e LiDAR. Tal como Rex *et al.* (2020) estes pesquisadores se apoiaram em dados de inventários florestais, além de compararem sensores aéreo e terrestre, valendo-se de métodos de correlação estatística.

Ainda na região amazônica, Debastiani *et al.* (2019) alcançaram uma estimativa de 297 Mg/ha, utilizando produtos de sensores orbitais. Para alcançar estes resultados, os autores processaram dados oriundos de LiDAR e sensores do Sentinel-1. Sobre as cenas do satélite, foram

aplicados índices de vegetação e métricas de textura. A partir de então, recorreram a algoritmos de aprendizado de máquina, quando constataram que o *Random Tree* obteve o melhor desempenho para o mapeamento da biomassa florestal.

Por fim, Andersen *et al.* (2014) monitoraram a biomassa florestal num setor da floresta amazônica localizado no Estado do Acre recorrendo à tecnologia LiDAR, quando constataram uma mudança na biomassa média de 232,1 Mg/ha, em 2010, para 223 Mg/ha, em 2011. Neste caso, os autores recorreram a medições em campo e correlacionaram com métricas de altura extraídas a partir da nuvem de pontos LiDAR, para o ano de 2010. Para a estimativa da biomassa em 2011, Andersen *et al.* (2014) apoiaram-se em modelos de regressão com base nos dados do ano anterior.

No continente africano, Kashongwe *et al.* (2020), associando métricas de campo com dados de LiDAR e de sensores orbitais, obtiveram um valor médio de 204 Mg/ha de biomassa em floresta tropical da República Democrática do Congo. Neste mesmo país, Xu *et al.* (2017) estimaram 231 Mg/ha de biomassa florestal.

No outro lado do planeta, Bazezew *et al.* (2018) estimaram uma biomassa média de 247 Mg/ha em uma floresta tropical ombrófila da Malásia, associando dados de LiDAR terrestre com medidas feitas em campo. Perto dali, em Borneo, Ioki *et al.* (2014) compartimentaram uma floresta pluvial, que está sob um regime de precipitações anuais de 2000 – 3500 mm, em três zonas, de acordo com seu estágio de degradação. Os pesquisadores identificaram os níveis de degradação florestal baseando-se em observações em campo e em entrevistas com os agricultores locais. Com isso, estes pesquisadores classificaram as parcelas florestais delimitadas em três níveis de degradação: muito degradada, moderadamente degradada e baixa degradação. A partir de então, estimaram a biomassa florestal acima do solo em cada uma destas seções utilizando dados de LiDAR associados às métricas registradas em campo. Estes autores estimaram uma biomassa média de 133 Mg/ha na zona classificada como sendo de alto nível de degradação, um valor um pouco inferior ao encontrado neste trabalho para a mata do Jardim Botânico (185,24 Mg/ha). Para a zona classificada como sendo de médio nível de degradação, Ioki *et al.* (2014) alcançaram um valor médio de biomassa florestal de 235,3 Mg/ha, resultado que se aproxima de outros obtidos por estudos consultados relativos a florestas tropicais úmidas. Por fim, na zona definida como sendo de floresta madura (bem conservada), Ioki *et al.* (2014) estimaram uma biomassa média de 382,8 Mg/ha,

valor que mais se aproxima ao que obtivemos na estimativa da biomassa na mata de Dois Irmãos (442,04 Mg/ha).

A figura 6 representa um gráfico que indica, de forma mais clara, a biomassa florestal, em Mg/ha, alcançada neste estudo em comparação com as obtidas pelos pesquisadores mencionados.

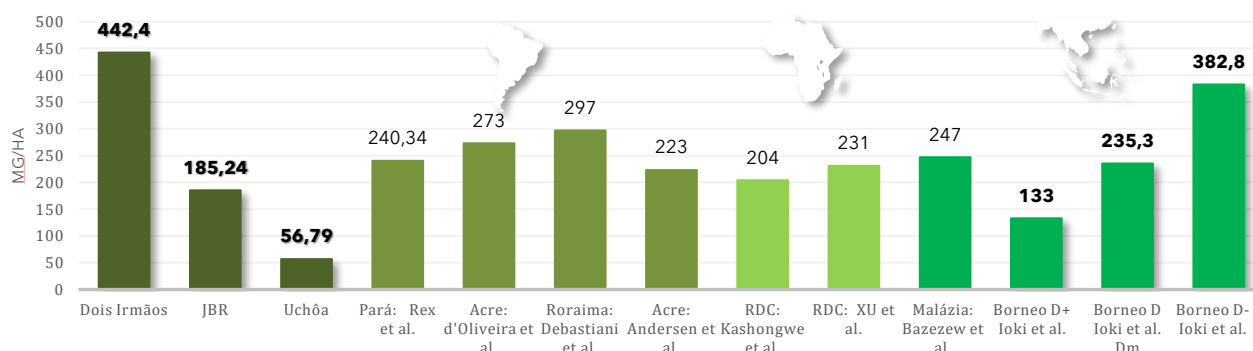


Figura 6. Valores de biomassa em Mg/ha estimados neste e nos estudos realizados em outras florestas tropicais ombrófilas.

Ao verificar os resultados obtidos por esses autores, constata-se que os valores de biomassa média por hectare das matas do Jardim Botânico do Recife (JBR) e do Engenho Uchôa estão abaixo dos valores apresentados por esses estudos, principalmente quando se trata de Uchôa. Sabe-se, entretanto, que existem estruturas instaladas e uma grande área de solo encharcado na mata do JBR (UCN Curado), que limitam o incremento da biomassa florestal. Porém, na mata do Engenho Uchôa, a área com total ausência de biomassa florestal (10,3 %), corresponde, em quase sua totalidade, a espaços descampados com solos expostos, como consequência da exploração

predatória dos recursos naturais. Por essa razão, por meio das ferramentas das geotecnologias, foi estimado o potencial de aporte de biomassa e estoque de carbono, levando em consideração a área sem presença florestal, cerca de 17,84 ha. Neste sentido, a figura 7 expõe, em vermelho, os quadrantes com valores de biomassa abaixo de 1,0 Mg, os quais correspondem às áreas sem ocupação do solo, com exceção da linha férrea e algumas residências que a margeiam (Rua da linha), próximas ao limite entre os bairros do Caçote e Areias.

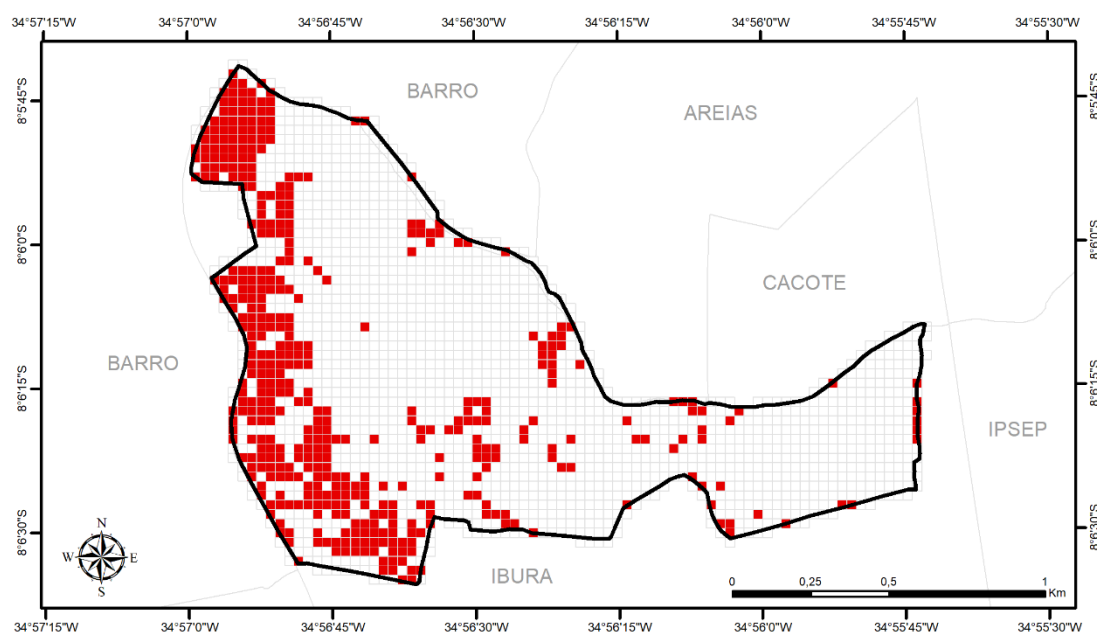


Figura 7. Quadrantes marcados em vermelho que representam a ausência total de biomassa ou estoque inferior a 1 Mg, compreendidos na Mata do Engenho Uchôa, Recife (PE).

Atentando-se à literatura, conclui-se que a biomassa mínima para uma área de floresta tropical úmida não degradada corresponderia ao estoque de 200 Mg/ha. Dessa maneira, a Mata do Engenho tem área disponível para um aporte de 3.568 Mg de biomassa florestal. Com isso, a floresta tem um potencial para retirar da atmosfera 1676,96 Mg de

carbono a mais do que sequestra atualmente. Além disso, com um aporte de biomassa florestal haverá acréscimo dos serviços ecossistêmicos proporcionados por essa floresta, trazendo benefícios à biodiversidade, à comunidade que vive em seu entorno e ao microclima da cidade.

Conclusão

O percurso metodológico adotado neste trabalho é algo recente na literatura. Em linhas gerais, as pesquisas que propõem o uso da tecnologia LiDAR para estimar a biomassa florestal acima do solo se apoiam em inventários florestais, como foi demonstrado neste estudo. Dessa forma, esses inventários trazem mais significância estatística, resultando em maior robustez na estimativa. Entretanto, se por um lado os inventários florestais podem trazer mais acurácia aos modelos, o método proposto aqui mostra um caminho possível para a estimativa da biomassa florestal na ausência de dados inventariados. A falta de dados inventariados disponíveis ao público, assim como outras informações científicas, é uma problemática recorrente na pesquisa brasileira. Por isso, é razoável que se busquem modelos alternativos em estudos que envolvam a aplicação do sensoriamento remoto em análises ambientais. Está claro, portanto, que os métodos apresentados aqui precisam ser mais bem discutidos e aprimorados. Ainda assim, apresentam um caminho mais acessível e prático para a estimativa do estoque de biomassa florestal e carbono.

Outra percepção assimilada ao longo da realização desta investigação científica foi que os estudos consultados relativos ao uso da tecnologia LiDAR para a estimativa da biomassa florestal não trazem uma análise ambiental contextualizada. Focam, portanto, em comprovar a acurácia das técnicas aplicadas, fator extremamente relevante, mas deixando de lado o reconhecimento socioambiental e/ou ecossistêmico. Fatores estes que podem contribuir com elementos que explicariam tal situação, ou que podem ser acometidos pela degradação resultante dos impactos causados pela ação humana.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE); à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e ao Instituto Pelópidas Silveira (Prefeitura do Recife).

Referências

- Andersen, H.-E., Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., d'Oliveira, M. V. N., Keller, Michael. (2014). Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. *Remote Sensing of Environment*, 151, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.049>.
- Anderson, K. E., Glenn, N. F., Spaete, L. P., Shinneman, D. J., Pilliod, D. S., Arkle, R. S., McIlroy, S. K., Derryberry, D. R. (2018). Estimating vegetation biomass and cover across large plots in shrub and grass-dominated drylands using terrestrial lidar and machine learning. *Ecological Indicators*, 84, 793-802. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.034>.
- Arevalo, L. A., Alegre, J. C., & Vilcahuaman, L. J. M. (2002). Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. *Comunicado Técnico (Embrapa Florestas)*.
- Bazezew, M. N., Hussin, Y. A., & Kloosterman, E. H. (2018). Integrating Airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 638-652. DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.026
- Brovkina, O., Novotny, J., Cienciala, E., Zemek, F., & Russ, R. (2017). Mapping forest aboveground biomass using airborne hyperspectral and LiDAR data in the mountainous conditions of Central Europe. *Ecological Engineering*, 100, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.004>.
- Carvalho, R. R., Trautenmüller, J. W., de Carvalho, S. R., Júnior, S. C., da Silva, D. A., & Figueiredo Filho, A. (2021). Determination of the biomass stock in a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm. *Advances in Forestry Science*, 8(2), 1455-1462. <https://doi.org/10.34062/afs.v8i2.10129>.
- Chave, J., Riéra, B., & Dubois, M.-A. (2001). Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability.

- Journal of Tropical Ecology, 17(1), 79-96.
<https://doi.org/10.1017/S0266467401001055>.
- Debastiani, A. B., Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P., Pinto, N. S., & Rex, F. E. (2019). Evaluating SAR-optical sensor fusion for aboveground biomass estimation in a Brazilian tropical forest. *Annals of Forest Research*, 62(2), 109-122. <https://doi.org/10.15287/afr.2018.1267>.
- d'Oliveira, M. V. N., Broadbent, E. N., Oliveira, L. C., Almeida, D. R., Papa, D. A., Ferreira, M. E., Zambrano, A. M. A., Silva, C. A., Avino, F. S., Prata, G. A., Mello, R. A., Figueiredo, E. O., Jorge, L. A. C., Junior, L., Albuquerque, R. A., Brancalion, P. H. S., Wilkinson, B. & Oliveira-da-Costa, M. (2020). Aboveground biomass estimation in Amazonian tropical forests: A comparison of aircraft-and gatereye UAV-borne LIDAR data in the Chico mendes extractive reserve in Acre, Brazil. *Remote Sensing*, 12(11), 1754. <https://doi.org/10.3390/rs12111754>.
- Domingo, D., Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., García-Martín, A., & de la Riva, J. (2018). Estimating Forest Residual Biomass in Mediterranean Pinus Halepensis Forest Using Low Point Density ALS Data. In: *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 7552-7555). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.851777>.
- Estornell, J., Ruiz, L. A., Velázquez-Martí, B., & Hermosilla, T. (2012). Estimation of biomass and volume of shrub vegetation using LiDAR and spectral data in a Mediterranean environment. *Biomass and Bioenergy*, 46, 710-721. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.02>.
- Figueiredo, E. O., d'Oliveira, M. V. N., Braz, E. M., de Almeida Papa, D., & Fearnside, P. M. (2016). LIDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: Comparisons of ground-based and remotely sensed estimates. *Remote Sensing of Environment*, 187, 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.026>.
- Galvêncio, J. D., & Popescu, S. C. (2016). Measuring individual tree height and crown diameter for mangrove trees with airborne LiDAR data. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 2(5), 239456.
- Gorgens, E. B., Silva, A. G. P., & Rodriguez, L. C. E. (2014). LIDAR aplicações florestais. Editora CRV.
- Hernández-Stefanoni, J. L., Johnson, K. D., Cook, B. D., Dupuy, J. M., Birdsey, R., Peduzzi, A., & Tun-Dzul, F. (2015). Estimating species richness and biomass of tropical dry forests using LIDAR during leaf-on and leaf-off canopy conditions. *Applied Vegetation Science*, 18(4), 724-732. <https://doi.org/10.1111/avsc.12190>.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). (2023). Cidades. Panorama das cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>. Acesso em 31 de agosto de 2023.
- Ioki, K., Tsuyuki, S., Hirata, Y., Phua, M. H., Wong, W. V. C., Ling, Z. Y., Saito, H. & Takao, G. (2014). Estimating above-ground biomass of tropical rainforest of different degradation levels in Northern Borneo using airborne LiDAR. *Forest Ecology and Management*, 328, 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.003>.
- Kashongwe, H. B., Roy, D. P., & Bwangoy, J. R. B. (2020). Democratic Republic of the Congo Tropical Forest Canopy Height and Aboveground Biomass Estimation with Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Airborne LiDAR Data: The Effect of Seasonal Landsat Image Selection. *Remote Sensing*, 12(9), 1360. <https://doi.org/10.3390/rs12091360>.
- Knapp, N., Fischer, R., & Huth, A. (2018). Linking lidar and forest modeling to assess biomass estimation across scales and disturbance states. *Remote Sensing of Environment*, 205, 199-209. DOI: 10.1016/j.rse.2017.11.018
- Latifi, H., Fassnacht, F., & Koch, B. (2012). Forest structure modeling with combined airborne hyperspectral and LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 121, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.018>.
- Lima, J. A. S., Villela, D. M., & Manzatto, C. V. (2008). Biomassa arbórea em fragmentos da Mata Atlântica Fluminense. *Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)*.
- Nascimento, R. K. O. (2019). Estimativa de biomassa acima do solo em floresta tropical úmida utilizando dados lidar. Tese de Doutorado, UFPE, Recife.
- Oliveira, C. P., Ferreira, R. L. C., da Silva, J. A. A., Lima, R. B. D., Silva, E. A., Silva, A. F. D., Lucena, J. D. S., Santos, N. A. T., Lopes, I. J. C., Pessoa, M. M. L. & Melo, C. L. S. M. S. D. (2021). Modeling and Spatialization of Biomass and Carbon Stock Using LiDAR Metrics in Tropical Dry Forest, Brazil. *Forests*, 12(4), 473. <https://doi.org/10.3390/f12040473>.
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2013). Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects.

- Recife. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Recife. (2017). Manual de Arborização Urbana: orientações e procedimentos técnicos básicos para implantação e manutenção da arborização da cidade do Recife (2ª ed.).
- Reutebuch, S. E., Andersen, H.-E., & McGaughey, R. J. (2005). Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry*, 103(6), 286-292. <https://doi.org/10.1093/jof/103.6.286>.
- Rex, F. E., Silva, C. A., Dalla Corte, A. P., Klauberg, C., Mohan, M., Cardil, A., Silva, V. S., Almeida, D. R. A., Garcia, M., Broadbent, E. N., Valbuena, R., Stoddart, J., Merrick, T. & Hudak, A. T. (2020). Comparison of statistical modeling approaches for estimating tropical forest aboveground biomass stock and reporting their changes in low-intensity logging areas using multi-temporal LiDAR data. *Remote Sensing*, 12(9), 1498. <https://doi.org/10.3390/rs12091498>.
- Santana, S. H. C. (2016). Análisis de la biomasa de fragmento de bosque por medio de productos LIDAR, en Cataluña-España. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6(5), 235-249.
- Santana, S. H. C., Sastres, L. F. S., Navarro, S. H., Silva, E. R. A. C., Laurentino, M. L. S., & Galvêncio, J. D. (2021). Biomass Analysis Method In A Forest Fragment Of *Pinus Uncinata*. *Mercator (Fortaleza)*, 20, 1-9. <https://doi.org/10.4215/rm2021.e20001>.
- Saha, C., Mahmood, H., Nayan, S. N. S., Siddique, M. R. H., Abdullah, S. R., Islam, S. Z., Iqbal, M. Z. & Akhter, M. (2021). Allometric biomass models for the most abundant fruit tree species of Bangladesh: A Non-destructive approach. *Environmental Challenges*, 3, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100047>.
- Silva, C. A., Klauberg, C., Hentz, A. M. K., Carvalho, S. P. C., & Corte, A. P. D. (2017). Predição da biomassa aérea em plantações de *Pinus taeda* L. por meio de dados LiDAR aerotransportado. *Scientia Forestalis*, 45(115), 527-259.
- Srinivasan, S., Popescu, S. C., Eriksson, M., Sheridan, R. D., & Ku, N. W. (2014). Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. *Forest Ecology and Management*, 318, 304-317. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.038>.
- Torre-Tojal, L., Bastarrika, A., Boyano, A., Lopez-Guede, J. M., & Grana, M. (2022). Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. *Journal of Computational Science*, 58, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101517>.
- Xu, L., Saatchi, S. S., Shapiro, A., Meyer, V., Ferraz, A., Yang, Y., Bastin, J-F., Banks, N., Boeckx, P., Verbeeck, H., Lewis, S. L., Muanza, E. T., Bongwele, E., Kayembe, F., Mbenza, D., Kalau, L., Mukendi, F., Ilunga, F. & Ebuta, D. (2017). Spatial distribution of carbon stored in forests of the Democratic Republic of Congo. *Scientific Reports*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15050-z>.