

GUIA METODOLÓGICO

para monitoramento do carbono
em plantios mistos de recuperação
da cobertura florestal na Amazônia



REALIZAÇÃO



PARCERIA



PATROCÍNIO



GOVERNO FEDERAL



UNIÃO E RECONSTRUÇÃO



GUIA **METODOLÓGICO**

para monitoramento do carbono em
plantios mistos de recuperação da
cobertura florestal na Amazônia

Thiago Cardoso Silva
Marcelo Lucian Ferronato
Marta Silvana Volpato Scoti
Emmanoella Costa Guaraná Araujo
Emanuel Maia

DISTRIBUIÇÃO GRATUITA

Todos os direitos reservados a Ação Ecológica Guaporé | Ecoporé@.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, seja por meios mecânicos, eletrônicos, seja via cópia xerográfica, sem a autorização prévia.Ecoporé@

EDITOR

Vanessa Vasconcelos

DIAGRAMAÇÃO

Vitor Oliveira

CAPA

Vitor Oliveira

CRÉDITOS

Projeto Viveiro Cidadão @

Departamento de Engenharia Florestal
Universidade Federal de Rondônia - campus
Rolim de Moura

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Guia metodológico para monitoramento do carbono em plantios mistos de recuperação da cobertura florestal na Amazônia [livro eletrônico] / Thiago Cardoso Silva...[et al.]. -- 1. ed. -- Porto Velho, RO : Ecoporé : Universidade Federal de Rondônia, 2023.PDF

Outros autores: Marcelo Lucian Ferronato, Marta Silvana Volpato Scooti, Emmanoella Costa Guaraná Araujo, Emanuel Maia.

Bibliografia.
ISBN 978-85-54231-08-8

1. Agricultura - Aspectos ambientais
2. Amazônia - Aspectos ambientais 3. Carbono
4. Dióxido de carbono - Aspectos ambientais - Brasil 5. Florestas - Amazônia 6. Monitoramento ambiental - Amazônia I. Silva, Thiago Cardoso. II. Ferronato, Marcelo Lucian. III. Scooti, Marta Silvana Volpato. IV. Araujo, Emmanoella Costa Guaraná. V. Maia, Emanuel.

23-184217

CDD-304.209811

Índices para catálogo sistemático:

1. Amazônia : Meio ambiente : Preservação : Ecologia
304.209811

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



The background of the entire page is a repeating pattern of stylized green leaves and small dots. The leaves are drawn with simple black outlines and filled with a light green color. They have various shapes, some elongated and some more rounded, with visible vein patterns. The dots are small, solid green circles scattered throughout the white background.

GUIA **METODOLÓGICO**

para monitoramento do carbono em
plantios mistos de recuperação da
cobertura florestal na Amazônia



Fonte: Acervo Ecoporé

Este guia metodológico é muito mais do que um mero documento: ele é uma homenagem a uma década de profundo aprendizado, superação de desafios e celebração de conquistas notáveis no âmbito da restauração ecológica e do fortalecimento da Agricultura Familiar na região amazônica. Construir esse guia foi possível graças à colaboração e parceria sólida estabelecida com o Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Rondônia, campus de Rolim de Moura, Rondônia, que desempenhou um papel fundamental na concretização deste documento.

O trabalho integra a trajetória inspiradora do projeto Viveiro Cidadão, iniciado em 2013 com o patrocínio da Petrobras, cujos objetivos incluem a recomposição de áreas desmatadas e degradadas em Rondônia. Ao elaborar este guia, revisitamos a história do projeto e observamos como o Viveiro Cidadão contribuiu para a transformação de paisagens e para o desenvolvimento regional e a inovação no meio rural.

O projeto engaja agricultores familiares, comunidades indígenas, ribeirinhos, quilombolas e jovens, fortalecendo um impacto social. Em uma década, o Viveiro Cidadão apoiou mais de 350 propriedades de agricultura familiar na restauração de ecossistemas, fomentou a implantação de mais de 250 quintais produtivos e promoveu a educação ambiental para aproximadamente 20 mil pessoas. Estes esforços coletivos resultaram no plantio de mais de 1,5 milhão de árvores e na recuperação de 470 hectares de floresta amazônica.

Uma das características marcantes do projeto é a sua abordagem holística, que inclui a formação de corredores ecológicos, proteção da biodiversidade e o sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Este guia reflete a essência do Viveiro Cidadão, celebrando seu legado e enfatizando a importância de tais iniciativas para a sustentabilidade e o bem-estar social, com destaque para as parcerias estratégicas, que desempenham um papel vital para esse sucesso.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	PLANTIOS MISTOS PARA RECUPERAÇÃO DA COBERTURA FLORESTAL	12
3.	AVALIAÇÃO DA BIOMASSA ARBÓREA	13
	3.1. Biomassa acima do solo (BAcS)	15
	3.1.1. Determinação da BAcS por métodos destrutivos	15
	3.1.2. Estimativas da BAcS por métodos não destrutivos	19
	3.1.2.1. Uso de equações alométricas	19
	3.1.2.2. Uso de sensoriamento remoto	21
	3.2. Biomassa abaixo do solo (BAbS)	28
	3.2.1. Determinação da BAbS por métodos destrutivos	28
	3.2.2. Estimativas da BAbS por métodos não destrutivos	30
	3.3. Biomassa total	30
4.	AVALIAÇÕES DE CARBONO NA BIOMASSA	32
	4.1. Determinação do teor de carbono por métodos diretos	32
	4.1.1. Determinação do teor de carbono por combustão seca	32
	4.1.2. Determinação do teor de carbono da combustão úmida	33
	4.2. Determinação dos estoques de carbono por métodos diretos	34
	4.3. Estimativa dos estoques de carbono na biomassa por métodos indiretos	34

5. CARBONO NO SOLO	36
5.1. Determinação dos teores de carbono no solo	36
5.1.1. Amostragem de solo para avaliação de teores e estoques de carbono	36
5.1.2. Preparo das amostras de solo para análises laboratoriais	39
5.1.3. Determinação dos teores de carbono no solo	39
5.1.3.1. Combustão úmida	39
5.1.3.2. Combustão seca	40
5.1.4. Determinação dos estoques de carbono no solo	40
6. DINÂMICA ECOLÓGICA DO CARBONO NA BIOMASSA VEGETAL	41
6.1. Avaliação da necromassa fina (serapilheira): acúmulo, aporte e decomposição	41
6.1.1. Determinação dos teores de carbono	44
6.1.2. Determinação dos estoques de carbono	44
6.2 Avaliação da necromassa grossa	45
6.2.1 Determinação dos teores de carbono	46
6.2.2. Determinação dos estoques de carbono	46
07 ESTIMATIVA DOS ESTOQUES DE CO₂ EQUIVALENTES	47
REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios atuais da humanidade é encontrar soluções para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Mesmo com o estabelecimento das inúmeras convenções da Organização das Nações Unidas (ONU) para o Clima, para a redução das emissões de carbono e gases de efeito estufa (GEE), considerados os principais responsáveis por estas alterações climáticas, poucas mudanças efetivas foram observadas.

O Brasil, numa ação voluntária, avançou consideravelmente, estabelecendo a Lei nº 12.187/2009 (Brasil, 2009), instituindo a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Todavia, as principais emissões nacionais, provenientes da conversão de áreas de floresta para outros usos, atingiram valores recordes nos últimos anos.

Com o propósito de recompor a vegetação foram implantados plantios mistos pelo projeto Viveiro Cidadão a partir do patrocínio da Petrobras, entre os anos de 2013 e 2014, para atenuar o déficit de áreas florestais cobertas com vegetação nativa na região central de Rondônia. As áreas recompostas se encontram em uma das regiões que mais sofre com o desmatamento da Amazônia. Atualmente o projeto está em sua terceira etapa, cujas atividades envolvem o monitoramento dos plantios mistos visando identificar o potencial destas áreas para serem recuperadas ambientalmente, culminando em locais com altos estoques de carbono na vegetação, na necromassa e no solo

Sabe-se que a Floresta Amazônica contribui como um dos principais sumidouros de carbono em todo o planeta (Phillips et al., 2017; Hubau et al., 2020), porém sofreu e ainda sofre com altos níveis de desmatamento, emitindo rapidamente altas taxas de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (Gatti et al., 2021). Com a implantação da Lei nº 12.651/2012 (Brasil, 2012), atual Código Florestal, muitos proprietários foram notificados para realizarem a restauração florestal em áreas de preservação permanente (APP), reserva legal (RL) e outras áreas protegidas. Convém destacar que os procedimentos de avaliação de biomassa em áreas de florestas jovens na Amazônia precisam ser padronizados, a fim de permitir a comparação entre os diferentes estudos e documentos técnicos.

Assim, o propósito deste documento é auxiliar nas avaliações biomassa florestal para obtenção da estimativa do carbono por estes plantios em áreas de recomposição, e suas respectivas emissões ou remoções de CO₂ equivalente. O documento baseou-se em artigos, documentos técnicos e na experiência dos pesquisadores envolvidos em sua elaboração. Neste guia são abordados os procedimentos para coleta de dados, além daqueles próprios para a estimativa da biomassa acima e abaixo do solo, serrapilheira e necromassa bem como do carbono nos solos.



Fonte: Acervo Ecoporé

2. PLANTIOS MISTOS PARA RECUPERAÇÃO DA COBERTURA FLORESTAL

Os plantios mistos para a recuperação da cobertura florestal na Amazônia representam uma abordagem vital e multifacetada frente aos desafios ambientais e socioeconômicos enfrentados pela região. A expansão agrícola e pecuária, particularmente em Rondônia desde a década de 1970, levou ao desmatamento significativo e à fragmentação da vegetação natural, afetando negativamente a estabilidade ecológica e a capacidade de prover serviços ecossistêmicos essenciais. Em resposta a essa situação, iniciativas de recomposição da vegetação, as quais em Rondônia, foram iniciadas na região de Rolim de Moura por volta do ano de 2007, apoiaram desde então a restauração de mais de mil hectares de florestas, principalmente junto a agricultura familiar.

A estratégia adotada tem sido a adoção dos plantios mistos, os quais podem ser composição de sistemas agroflorestais ou plantios de recomposição com diversidade de espécies nativas. Eles combinam diferentes espécies de plantas em uma mesma área, trazendo benefícios tanto ecológicos quanto socioeconômicos. Ecológicamente, eles contribuem

para a conservação da biodiversidade, oferecem habitats ricos e variados para a fauna e melhoram a saúde e estrutura do solo. Socioeconomicamente, estes sistemas podem proporcionar uma variedade de produtos ao longo do ano e melhoram a segurança alimentar e a geração de renda para os agricultores.

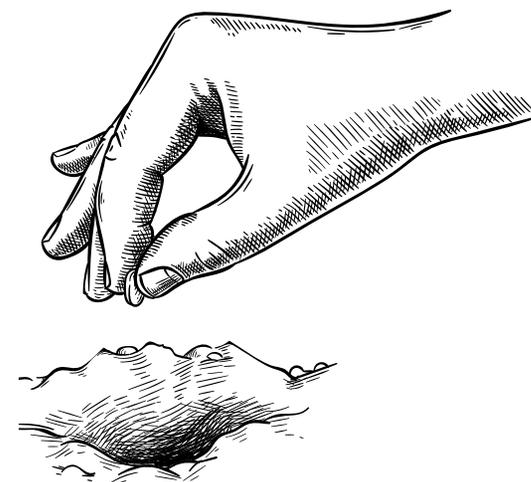
Especificamente para a restauração florestal, os plantios mistos são eficazes no sequestro de carbono, um aspecto crucial no combate às mudanças climáticas.

Deste modo, a restauração ecológica por meio de plantios mistos na Amazônia não se limita apenas à recuperação da cobertura florestal e da biodiversidade. Ela também fortalece as comunidades locais e suas economias, garantindo a sustentabilidade a longo prazo da região. A escolha das espécies para plantios mistos deve considerar as condições locais e utilizar espécies nativas, adaptadas ao ecossistema local.

Esses plantios promovem a diversidade ecológica e a interação entre espécies, contri-

buindo para a recuperação de ecossistemas saudáveis e funcionais. Eles ajudam a restaurar serviços ecossistêmicos vitais, como a regulação do ciclo da água, a proteção do solo contra erosão e a promoção da biodiversidade.

Os plantios mistos na Amazônia são uma estratégia de cultivo ecológica e economicamente sustentável. Eles representam uma abordagem holística e integrada para a agricultura e a gestão de recursos naturais, promovendo um equilíbrio entre as necessidades humanas e a conservação ambiental, essencial para a recuperação da cobertura florestal e a restauração de áreas degradadas.





3. AVALIAÇÃO DA BIOMASSA ARBÓREA

As florestas apresentam alta capacidade de retenção de carbono, pois o processo natural de fotossíntese é responsável pela fixação deste elemento na biomassa vegetal. Portanto, para a realização do monitoramento de carbono em ambientes naturais, como os ecossistemas florestais, deve-se fazer a avaliação da biomassa arbórea. Por definições, podemos considerar que:

- Biomassa é todo material orgânico (vegetal ou animal) originada atividades agrícolas, silvícolas, pesca e suas atividade agroindustriais, que resulte de forma direta ou indireta do processo de fotossíntese (Andrade; Lora, 2013).
- Biomassa florestal é composta por material lenhoso (lenho de fustes, galhos, cascas e raízes), folhas, flores e inflorescências, frutos, serapilheira, extrativos e os resíduos dos setores de base florestal (Brand, 2010).

Para avaliação da biomassa em ambientes de recuperação com plantios mistos, é considerada a avaliação da biomassa

arbórea acima e abaixo do solo, além da possibilidade de observar a dinâmica da ciclagem nestes ambientes. A Figura 1 (pág. 14) mostra os compartimentos e elementos considerados na avaliação da biomassa florestal, para futuros monitoramentos do carbono em plantios mistos de recuperação ambiental.

Para realizar as avaliações de biomassa deve-se realizar a amostragem da área avaliada por meio da abertura de parcelas. Para melhor acompanhamento do desenvolvimento da biomassa e monitoramento do carbono nas áreas implantadas sugere-se a abertura de parcelas permanentes. O formato de tamanho das parcelas depende de vários fatores, como a área amostrada, homogeneidade das árvores em campo e da disponibilização de recursos para realização dos inventários florestais (Sanquetta et al., 2014). Em pequenas áreas recuperadas, pode-se implantar parcelas retangulares nas dimensões 20 m x 10 m, onde serão medidos os diâmetros a altura do peito (DAP) de todas as árvores (Figura 2).

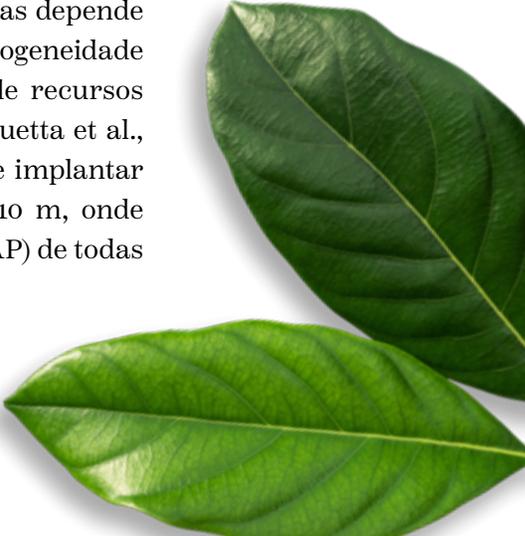
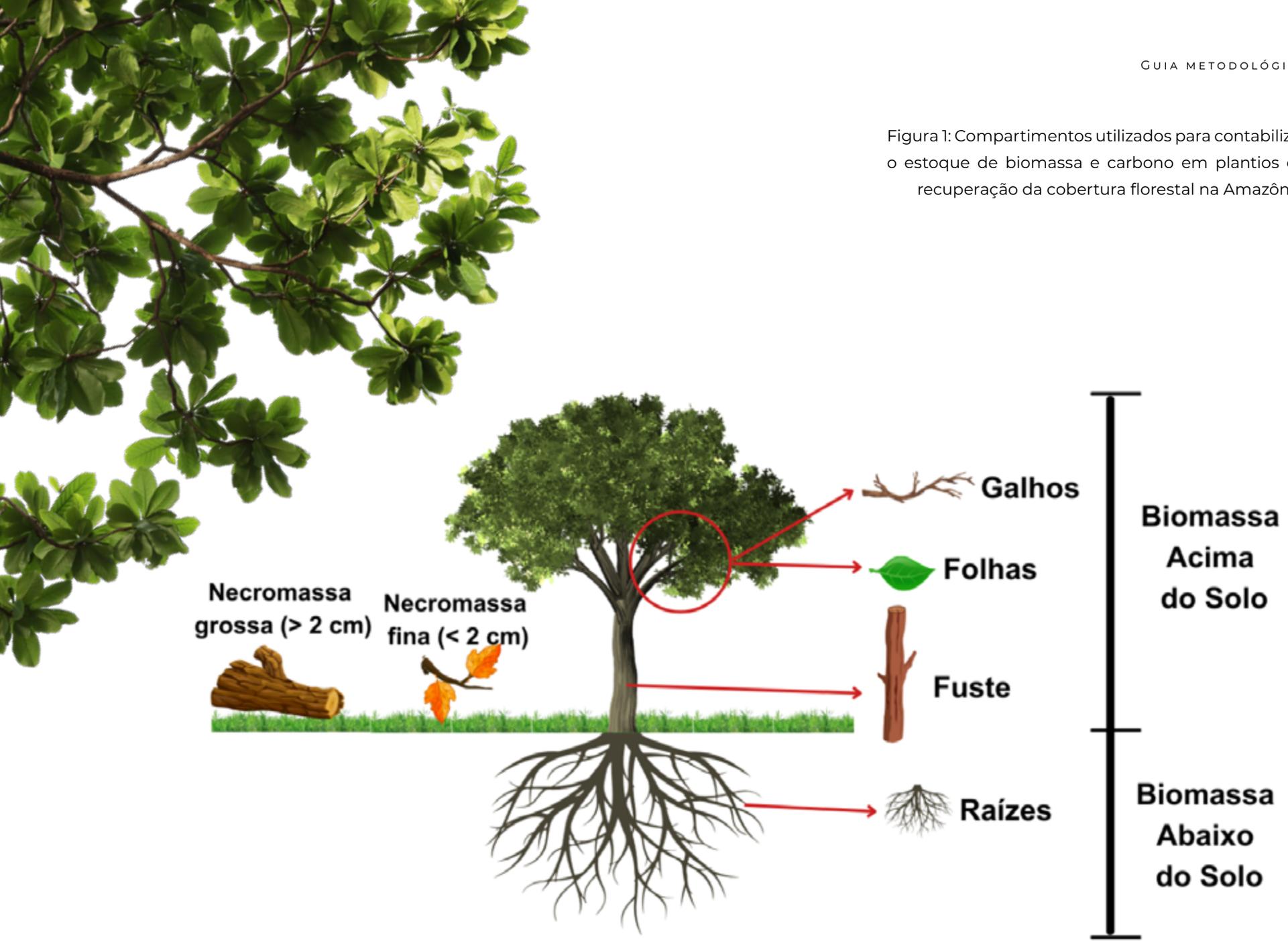


Figura 1: Compartimentos utilizados para contabilizar o estoque de biomassa e carbono em plantios de recuperação da cobertura florestal na Amazônia.



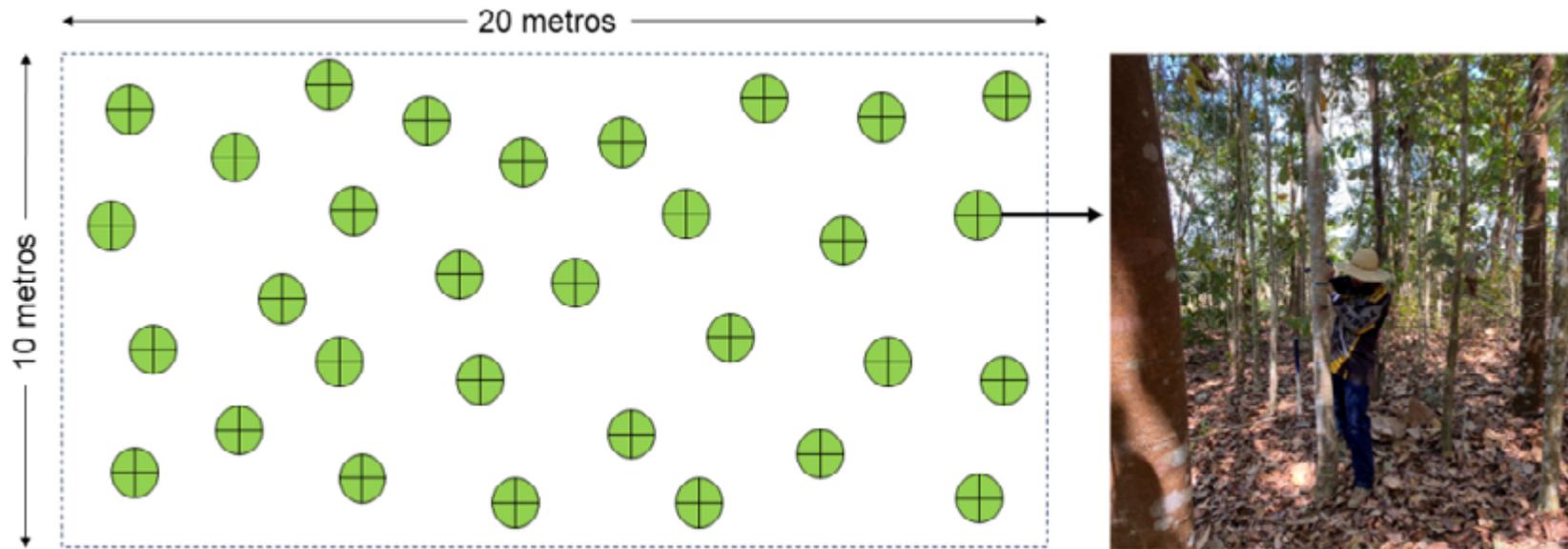


Figura 2: Esquema de dimensionamento das parcelas e medição dos diâmetros das árvores.

Fonte: Autores (2023)

A seguir serão detalhadas as metodologias utilizadas para monitoramento de biomassa e carbono nestes ambientes. Serão consideradas as biomassas acima e abaixo do solo.

3.1. Biomassa acima do solo (BAcS)

A biomassa acima do solo (BAcS) é composta pelas frações da árvore que crescem acima do nível da superfície do solo. Em árvores, esta biomassa é composta pelo tronco/fuste, galhos e folhas, e flores e frutos, quando presentes. Dessa forma, a BAcS da maioria das espécies arbóreas é composta por todas as partes, excluindo apenas as raízes.

A avaliação da BAcS pode ser realizada de duas formas:

- Determinação, quando são aplicadas metodologias para avaliação destrutiva, conhecidos como métodos diretos de determinação da biomassa; e
- Estimativa, quando são aplicadas metodologias não destrutivas, conhecidos como métodos indiretos de estimativa da biomassa.

3.1.1. Determinação da BAcS por métodos destrutivos

Os métodos denominados destrutivos são aqueles em que há a supressão da vegetação para a quantificação da biomassa por determinação a partir da mensuração das árvo-

res ainda em campo e encaminhamento de amostras para análises laboratoriais (Sanquetta et al., 2014). Também são conhecidos como métodos diretos de determinação da BAcS.

Este tipo de avaliação é essencial para reduzir erros de determinação, sendo considerada uma quantificação mais fiel ao real estoque de biomassa. Porém, devido a necessidade de despender mais esforços para avaliação, ao optar por este método há um incremento de custos e de tempo realizar o monitoramento do desenvolvimento da biomassa e do estoque de carbono (Araujo et al., 2023). Por outro lado, este método é precursor para implementação de equações alo-

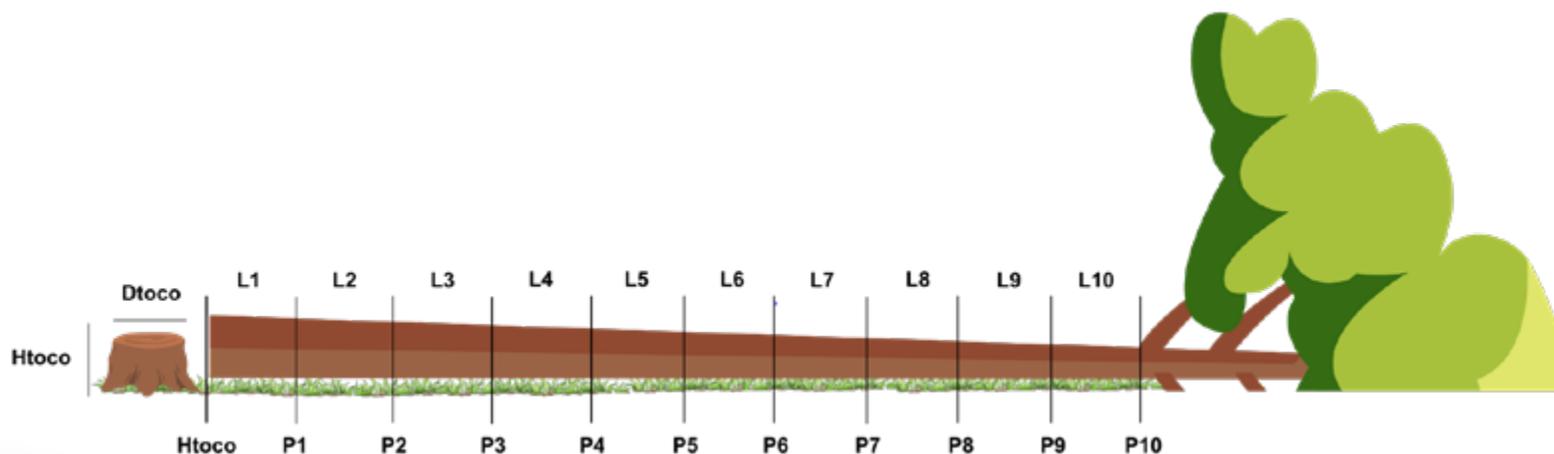
métricas e para calibração destas equações e das métricas utilizadas nas estimativas utilizando ferramentas de sensoriamento remoto.

Os métodos destrutivos devem ser realizados por amostragem, visto que é inviável e impraticável a remoção de todas as árvores em determinada área. Deve-se escolher a quantidade de árvores a serem derrubadas, cubadas rigorosamente e pesadas para determinação da quantidade de biomassa por árvore e futura modelagem para uso da equação local para estimativa da biomassa por área.

A BAcs está dividida em: volume e peso de copa; e volume e peso do fuste. A seguir serão discutidas metodologias para determinação destas variáveis:

I - Volume e peso do fuste: o fuste é composto pelo tronco desde a base até atingir a altura comercial (definida de acordo com as ramificações da copa). A determinação da biomassa de fuste é composta pelas etapas:

- Cubagem das árvores: depois de derrubar as árvores, a determinação dos volumes dos fustes a partir do sectionamento em toras e medições de diferentes diâmetros ao longo do comprimento.
- Pode-se utilizar a cubagem pelo método de cubagem de proposto por Lima et al. (2010), combinando a medição de Hohenadl, sendo medidos os diâmetros em 10 pontos (Figura 3) e método de Smalian (Equação 1).



Fonte: Autores (2023)

Figura 3: Esquema de cubagem de fuste pelo método de Hohenadl

Determinação da densidade da madeira: a metodologia utilizada para determinação da densidade básica pode ser a NBR 11.941 (ABNT, 2003), em que:

- Obtenção de discos do fuste, após cubagem;
- Separação do disco em cunhas, que devem ser saturadas em água;
- Por meio do método de balança hidrostática (1 g = 1 cm³), será obtido o volume saturado das cunhas;
- Em seguida, secar as cunhas em estufa a uma temperatura de 103±2°C até peso constante;
- A densidade básica da madeira pode ser calculada de acordo com a Equação 2.

Determinação da biomassa do fuste: após determinados os volumes do fuste e a densidade da madeira, pode-se determinar a biomassa do fuste (Equação 3).

II - Volume e peso de copa: a copa, na grande maioria dos casos, envolve a produção de órgãos vegetativos e reprodutivos. Portanto, deve-se obter os pesos de folhas, flores, frutos e galhos.

$$V_{cubado} = \left[\frac{\left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{40000} \right) + \left(\frac{\pi \cdot d_2^2}{40000} \right)}{2} \right] * Ls + \dots + \left[\frac{\left(\frac{\pi \cdot d_n^2}{40000} \right) + \left(\frac{\pi \cdot d_{n-1}^2}{40000} \right)}{2} \right] * Ls$$

Equação 1. Em que: d₁ = diâmetro da seção 1 da tora, em cm; d₂ = diâmetro da seção 2 da tora, em cm; d_n = diâmetro da seção n do fuste, em cm; e L_s = comprimento da seção do fuste/tora, em m.

$$DB = \frac{m_{seca}}{V_{saturado}}$$

Equação 2. Em que: DB = densidade básica da madeira, em g.cm⁻³; m_{seca} = massa da cunha seca a 103±2°C, em g; V_{saturado} = volume da cunha saturada em água, em cm³.

$$B_{fuste} = DB * V_{cubado} * 1000$$

Equação 3. Em que: B_{fuste} = biomassa do fuste, em kg; DB = densidade básica da madeira, em g.cm⁻³; V_{cubado} = volume do fuste obtido a partir da cubagem, em m³.



A determinação da biomassa da copa é composta pelas etapas:

- Massa de folhas: todas as folhas da árvore devem ser recolhidas e pesadas ainda em campo para obtenção da biomassa fresca de folhas. Em seguida, levar as folhas ao laboratório, onde serão secas em estufa a $63 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante, sendo obtida a quantidade de biomassa fresca das folhas (B_{folhas});
- Massa de flores e frutos: assim como para folhas, pesar em campo para obtenção do peso fresco e secar para obter o peso seco (B_{frutos} e B_{flores});
- Volume e massa dos galhos: como os galhos são compostos por material lenhoso, proceder com a seguinte metodologia:
 - ▶ Pesagem em campo para obtenção do peso fresco;
 - ▶ Amostragem do lenho para determinar os teores de umidade e obter o peso seco dos galhos (B_{galhos}).
- A biomassa da copa será composta pelo somatório das biomassas de cada componente (Equação 4).

III - Determinação da BA_{cS}: de acordo com o somatório das biomassas dos diferentes componentes (Equação 5).

$$B_{copa} = B_{folhas} + B_{frutos} + B_{flores} + B_{galhos}$$

Equação 4. Em que: B_{copa} = biomassa da copa, em kg; B_{folhas} = biomassa de folhas, em kg; B_{flores} = biomassa de flores, em kg; B_{frutos} = biomassa de frutos, em kg; B_{galhos} = biomassa de galhos, em kg.

$$BA_{cS} = B_{fuste} + B_{copa}$$

Equação 5. Em que: BA_{cS} = biomassa acima do solo por árvore, em kg; B_{fuste} = biomassa do fuste, em kg; B_{copa} = biomassa da copa, em kg.



3.1.2. Estimativas da BA_CS por métodos não destrutivos

Em casos em que há impedimento do corte de árvores, bem como quando há dificuldades de coleta destas, ou até mesmo para evitar o corte, pode-se optar por estimar a BA_CS por métodos não destrutivos, conhecidos também como métodos indiretos de estimativa de biomassa. Dentre os mais utilizados para estimar a biomassa arbórea acima do solo, estão os métodos: uso de equações alométricas e uso de ferramentas de sensoriamento remoto.

3.1.2.1. Uso de equações alométricas

As equações alométricas são utilizadas para quantificação de BA_CS a partir de dados obtidos pelos inventários florestais. Nestes, são obtidas algumas variáveis

úteis para aplicação nas equações. Este método facilita a obtenção da estimativa de BA_CS, porém está sujeita a imposição de erros durante os estudos de biomassa e carbono devido aos erros implícitos de cada equação que podem ser acumulados aos erros na mensuração (Araujo et al., 2023).

Porém, em muitos casos, o uso de equações é a alternativa mais viável para monitorar o desenvolvimento da biomassa e seu respectivo estoque de carbono. As equações mais utilizadas para estimar BA_CS na floresta amazônica estão descritas na Tabela 1. Porém, destaque-se que não existem em artigos científicos equações que estimam a biomassa em áreas de recomposição da cobertura florestal que estejam com poucos anos de implantação.



EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS DE BIOMASSA ARBÓREA	VARIÁVEIS	R ²	Syx	REFERÊNCIAS
$\text{Exp}(-2,977+\ln(\text{DAP}^2h))$	DAP e h	0,996	0,311	Chave et al. (2005)
$\rho \times \text{Exp}(-1,499 + 2,148\ln(\text{DAP}) + 0,207(\ln(\text{DAP}))-0,0281(\ln(\text{DAP})^3))$	DAP e ρ	0,996	0,356	Chave et al. (2005)
$\text{Exp}(-3,141+0,9719\ln(\text{DAP}^2h))$	DAP e h	0,99	0,06079	Brown, Gillespie e Lugo (1989)
$0,0673 \times (\rho \times \text{DAP}^2h) 0,976$	DAP, h e ρ	-	0,357	Chave et al. (2014)
$\text{Exp}[-1,803-0,976E + 0,976\ln(\rho) + 0,2673\ln(\text{DAP}) - 0,0299[\ln(\text{DAP})^2]]$	DAP e ρ	-	0,413	Chave et al. (2014)
$-370+0,333\ln[\ln(\text{Bd})+ 0,933[\ln(\text{Db})]^2 - 0,122[\ln(\text{Db})]^3]$	Bd	0,973	0,297	Chambers et al. (2001)
$\ln(W) = -1,4702 + 2,4449(\text{DAP}) + 0,9028\ln(\rho)$	DAP e ρ	0,989	0,15	Nelson et al. (1999)
Equações para diâmetros com partimentos	DAP e h	-	-	Uhl, Bushbacher e Serrao (1988)
$\ln(W) = 1,716+2,335\ln(\text{DAP})$	DAP	0,964	0,306	Nogueira et al. (2008)
$0,001\text{DAP}^{1,579}h^{2,621}$	DAP e h	0,94	540 (kg)	Higuchi et al. (1998)

Em que: DAP = diâmetro a altura do peito (1,30 m do solo); h = altura; ρ = densidade básica da madeira; Bd = diâmetro da base da árvore; W = biomassa acima do solo; ln = logaritmo natural; Exp = exponencial; R² = coeficiente de determinação; Syx = erro padrão da estimativa. Fonte: Araujo et al. (2023), adaptado.

Depois de definir qual a equação que será utilizada para estimar a BAcS, é necessário ir a campo para obter as variáveis de entrada. Cabe lembrar que estes valores estão relacionados com cada árvore da parcela. Deve-se estimar a BAcS para a parcela e extrapolar para hectare.

3.1.2.2. Uso de sensoriamento remoto

A utilização de dados oriundos de sensores remotos para a estimativa da biomassa em florestas naturais se tornou uma importante ferramenta na área florestal, pois além da facilidade da aplicação, permitiu a redução do custo e tempo despendidos com levamentos em campo, além de permitir a amostragem em uma escala maior. Com a possibilidade de aquisição de imagens com maior resolução espectral e menores resolução temporal e espacial, juntamente com o desenvolvimento de novas ferramentas para segmentação de imagens, houve uma crescente utilização desses métodos para caracterizar a estrutura das florestas e, conseqüentemente sua biomassa e carbono estocado.

Dentre as técnicas desenvolvidas, há o LiDAR (Ligth Detection and Ranging), que representa uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo de escaneamento a laser que permite a coleta de dados espaciais tridimensionais pela emissão de sua própria luz. Estudos demonstram a eficiência do uso da tecnologia LIDAR para avaliações de alterações estruturais e biomassa da floresta (Silva et al., 2013; Locks et al., 2019; Gomes et al., 2020; Nishiwaki et al., 2023), uma vez que as variáveis medidas diretamente pelo sensor apresentam correlação com os dados de biomassa florestal acima do solo mensuradas em parcelas amostradas no campo (Sato et al., 2015; Badin, 2018).

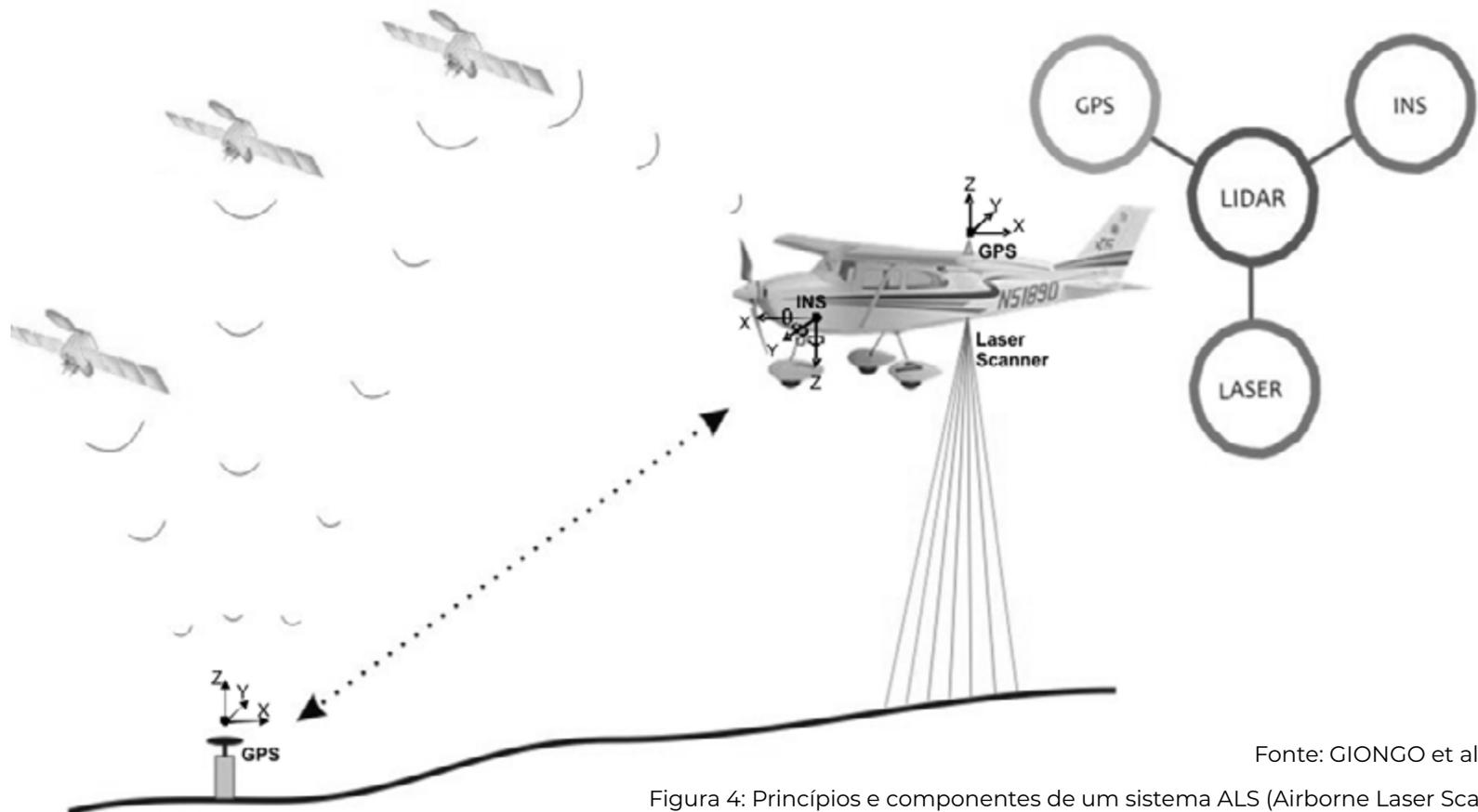




O princípio de funcionamento do sistema de escaneamento consiste na emissão de um pulso laser de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) com uma elevada frequência de repetição. O tempo entre a emissão e o retorno dos pulsos permite calcular e registrar o espaço existente entre o dispositivo e os alvos encontrados na superfície terrestre (Giongo et al., 2010).

No caso do sensor LiDAR aerotransportado (acoplado a uma aeronave), também denominado de ALS (Airborne Laser Scanning

Scanning). O escaneamento permite mapear a estrutura tridimensional de extensas superfícies. Para isso, conta com um conjunto de sistemas compostos por um sensor laser que registra o tempo entre o sinal emitido e recebido de um determinado ponto, um Sistema Inercial de Navegação (INS – Inertial Navigation System) e um receptor GPS em uma plataforma aerotransportada (Giongo et al., 2010). Em terra, é necessária uma rede de GPS que trabalhe de forma conjunta ao GPS instalado na plataforma (Figura 4).



Fonte: GIONGO et al. (2010).

Figura 4: Princípios e componentes de um sistema ALS (Airborne Laser Scanning).

Assim, é realizado o escaneamento da superfície gerando uma nuvem de pontos formada por cada pulso emitido, com diferentes frequências representando os diferentes objetos da superfície. Para processar a nuvem de pontos geradas pelo LiDAR utiliza-se o software FUSION, desenvolvido pelo Serviço Florestal Norte Americano. O FUSION é um software gratuito e disponível para download na página do USDA Forest Service (<https://www.fs.usda.gov/research/pnw/products/dataandtools/tools/fusion/ldv-lidar-processing-and-visualization-software-version-4.40>).

Com os dados obtidos da nuvem de pontos é possível determinar de forma direta a altura do dossel ou de árvores individuais, diâmetro de copa, volume de copa (Giongo et al., 2010). Os estoques de biomassa e carbono são obtidos por meio de modelos de regressão correlacionando as métricas obtidas com o LiDAR com dados de inventários florestais de parcelas (D'Oliveira et al., 2014). A Figura 5 ilustra um resumo dos procedimentos básicos para obtenção de métricas (Tabela 2) para processamento de dados LiDAR e ajuste de modelos de biomassa acima do solo da floresta utilizando dados de parcelas permanentes.

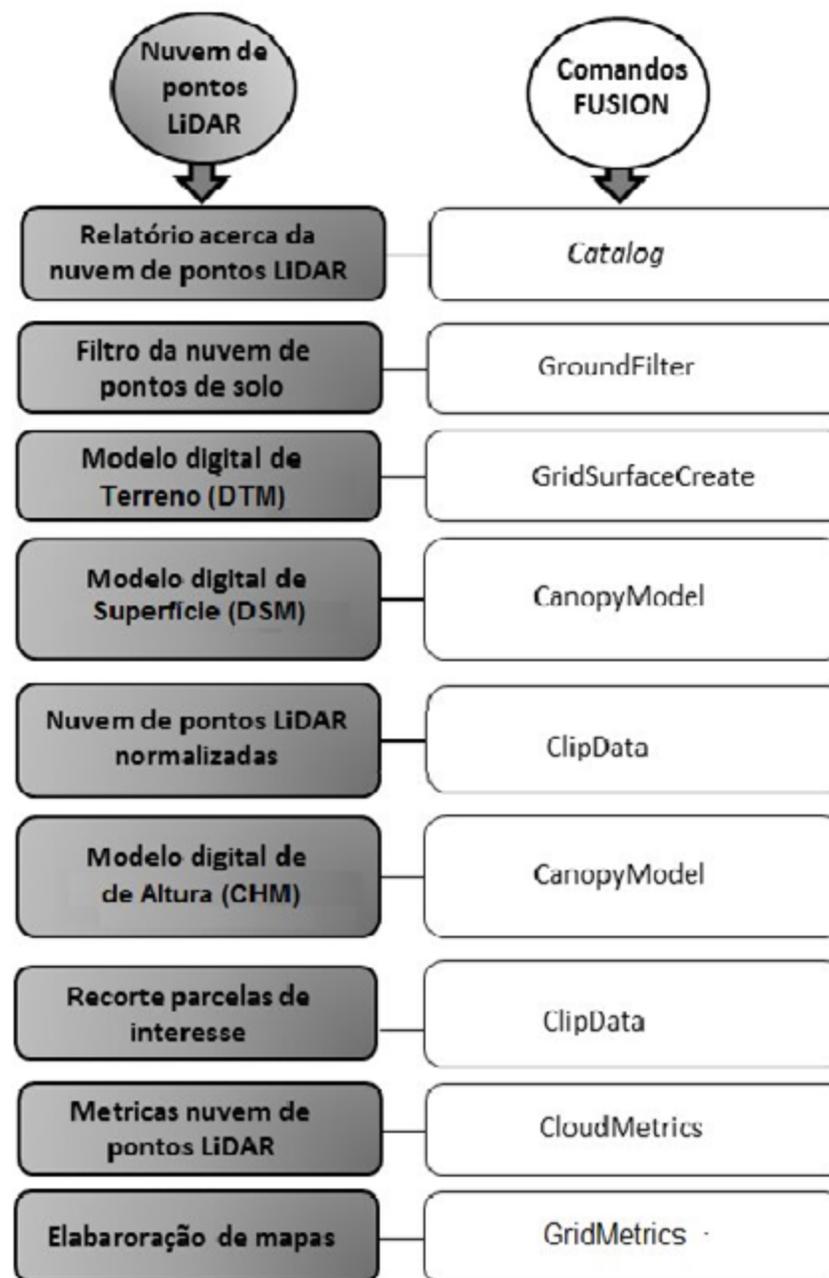


Figura 5: Etapas do processamento de dados LiDAR para estimação da área de biomassa florestal (BAF), DTM, DSM e CHM, com resolução de 1 m x1 m. Fonte: Silva et al. (2013)

CATEGORIA	VARIÁVEIS
Retornos	Descrição do número total de retornos; Número de retorno por classe de retorno;
Elevação	Mínima, Máxima, Média, Mediana, Moda, Desvio Padrão, Variância, Coeficiente de variação, Distância interquartil, Assimetria, Curtose, etc.
Métricas de Altura e Intensidade de pulso laser	Mínima, Máxima, Média, Mediana, Moda, Desvio Padrão, Variância, Coeficiente de variação, Distância interquartil, Assimetria, Curtose, AAD (desvio médio absoluto), etc.
Métricas de Densidade	<p>Porcentagem de primeiro retorno acima da altura 2.5 m</p> <p>Porcentagem de primeiro e/ou todos os retornos acima da altura média;</p> <p>Porcentagem de primeiro e/ou todos os retornos acima da moda de altura;</p> <p>Porcentagem de todos os retornos acima da altura 2.5 m</p> <p>$\text{Número de retornos acima da altura 2.5m} / \text{total de primeiro retorno} * 100;$</p> <p>$\text{Número de retornos acima da média} / \text{total de primeiro retorno} * 100;$</p> <p>$\text{Número de retornos acima da altura} / \text{total de primeiro retorno} * 100.$</p>

Tabela 2: Métricas geradas da nuvem de dados LiDAR e que apresentam correlação com variáveis biomassa da floresta.

As equações para estimar a biomassa arbórea acima do solo por LiDAR, e seus autores, são apresentadas na Tabela 3.

EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS DE BIOMASSA ARBÓREA	VARIÁVEIS	R ²	Syx	REFERÊNCIAS
$BACs = -185.4281 + 6.0379 * Elev.max + 10.8898 * Elev.P40$	Elev.max=Elevação máxima; Elev.P40 = Elevação do percentil 40	0,67	42,75*	Ferreira (2020)
$BACs = (3.119 + 0.564 P25 + 0.062 Var)^2 + 1.74$	P25 = altura do 25º percentil acima do solo VAR = Variação de todas as alturas de retorno lidar acima do solo	0,72	40,2*	D'Oliveira et al. (2012)
$BACs = 288,6(Elev.CV) - 433,9(Elev L3)^2 + (21,96 * (Elev. MAD.mode)^3 + 17,30(Elev.P99)^4$	Elev.CV = Coeficiente de Variação Elevação; Elev L3 = Elevação no momento – L3; Elev. MAD.mode = Média dos desvios absolutos gerais da Elevação; Elev.P99 = Elevação a 99%	0,76	26,99**	Badin (2018)
$BACs = 0,019_{p95}^{2,886} \sigma^2^{-0,175} \gamma_h^{-0,402} 1,019$	h_{p95} = Percentil 95 dos valores de altura (m); σ^2 = Variância da altura acima do solo (m); γ_h = Assimetria da curva distribuição da altura acima do solo;	0,727	47,988*	Melo (2017)
$BACs = -529,761 + (2,536xHMODE) + 23,115.H95TH$	H95TH= Percentis de altura acima do solo 95º	0,79	19,3*	D'Oliveira et al. (2020)

Tabela 3: Equações utilizadas para estimativa de biomassa arbórea acima do solo na Amazônia utilizando a tecnologia LIDAR

Em que: Elev.max = Elevação máxima;
Elev.P40 = Elevação do percentil 40;
*Biomassa seca acima do solo;
*Desvio padrão da estimativa (Mg ha⁻¹);
**Erro padrão da estimativa (%).



3.2. Biomassa abaixo do solo (BAbS)

A biomassa abaixo do solo (BAbS) considera majoritariamente a porção de fuste e raízes que crescem sob o solo. Uma grande porção da biomassa arbórea cresce abaixo do solo, sendo este valor fundamental para a quantificação de carbono e inventários relacionados a emissões de gases do efeito estufa (Sanquetta et al., 2019).

Assim como para a BAaS, a BAbS pode determinada ou estimada. A determinação se dá pelos métodos diretos (destrutivos) e as estimativas por métodos indiretos (não destrutivos).

3.2.1. Determinação da BAbS por métodos destrutivos

Para determinar a quantidade de BAbS por métodos destrutivos, ou métodos diretos de determinação, é necessário remover a maior quantidade possível de material que fica abaixo do solo. Para tanto, pode-se seguir o método de escavação:

I - Escavar o solo até uma profundidade de 0,5 m, abrindo uma trincheira de 0,5 m x 0,5 m tendo a árvore como ponto central (Figura 6);

II - Após cavado, deve-se coletar todas as raízes visíveis que possuam uma dimensão mínima de 2 mm;

III - Realizar a remoção do solo residuais nas raízes (deve-se retirar a maior quantidade possível de solo para que não interfira na quantificação de biomassa e influenciar nos teores de carbono a partir das futuras análises);

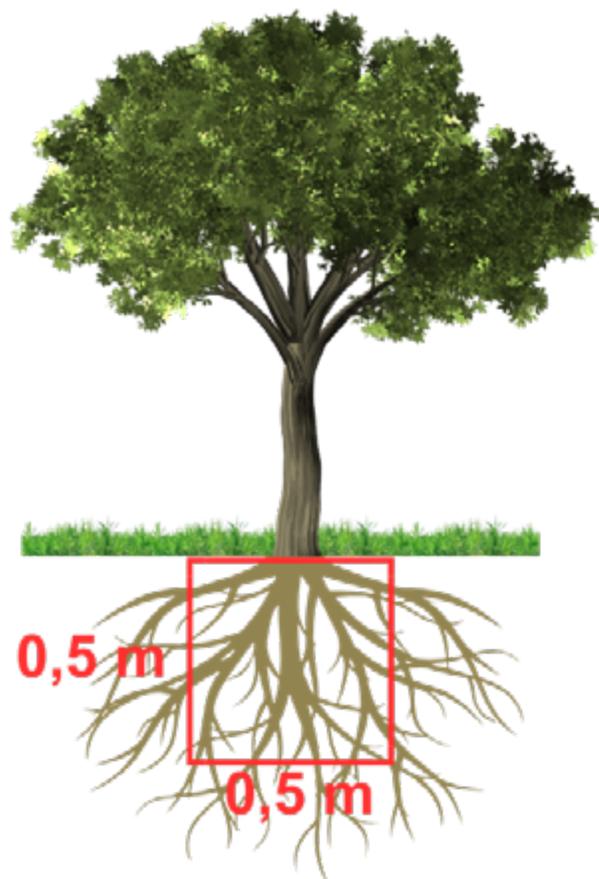
IV - Realizar a pesagem de todas as raízes, sendo registrado o peso fresco;

V - Separar uma amostra das raízes, de aproximadamente 500 g;

VI - Encaminhar as amostras para o laboratório a fim de obter os respectivos teores de umidade, procedendo a determinação da quantidade de biomassa seca de raízes (Equação 6). Secar em uma estufa de circulação forçada de ar a $63 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante.

VII - Os valores obtidos são referentes à quantidade de BAbS por árvore. Deve-se estimar a quantidade de BAbS por área a partir dos valores de área da parcela e futura conversão para hectare.

Figura 6: Esquema de amostragem da biomassa abaixo do solo (BAbS) em árvores.



Fonte: Autores (2023)

$$BAbS_{seca} = BAbS_{fresca} - \left(BAbS_{fresca} - \frac{TU\%}{100} \right)$$

Equação 6. Em que: BAbS_{seca} = biomassa seca abaixo do solo por árvore, em kg; BAbS_{fresca} = biomassa fresca abaixo do solo por árvore, em kg; TU% = teor de umidade da biomassa fresca, em %.



3.2.2. Estimativas da BAbS por métodos não destrutivos

Assim como para a BA_cS, é possível estimar a quantidade de BA_bS sem haver a necessidade de coletar este material em campo. Uma das formas de estimar a quantidade de BA_bS é por meio da relação raiz/parte aérea, também conhecida como razão de raízes. Esta variável descreve a proporção entre a BA_bS em função da quantidade de BA_cS (Equação 7). A partir da BA_cS pode-se estimar a quantidade de raízes (Equação 8)

De posse dos dados da BA_cS, pode-se escolher um dos fatores de razão de raízes determinados para a própria área ou de acordo com valores encontrados na literatura (Tabela 4).

3.3. Biomassa total

A biomassa total corresponde à soma das quantidades de BA_cS e de BA_bS (Equação 9). Este é o valor indicado para a realização dos monitoramentos de biomassa e carbono em plantios mistos de recuperação ambiental.

Os valores obtidos são referentes à quantidade de biomassa total por árvore. Deve-se estimar a quantidade de biomassa total por área a

Razão de raízes	AVALIAÇÃO	REFERÊNCIA
0,20	Floresta Amazônica - Rondônia	Araujo (2020)
0,25	Floresta Amazônica - Rondônia	Sanquetta et al. (2019)
0,37	Florestas Tropicais (generalizado)	IPCC (2006)

Fonte: Autores (2023)

partir dos valores de área da parcela e futura conversão para hectare.

Para futuras medições, pode-se fazer uma relação entre a biomassa aérea do fuste e da copa. Dessa forma, é obtido o fator de expansão da biomassa (Equação 10). De posse deste fator, é possível obter valores estimados de copa e respectivas biomassas aéreas a partir de métodos não destrutivos, utilizando os valores observados no fuste (Equação 11).

$$R = \frac{BA_{bS}}{BA_{cS}} \quad BA_{bS} = BA_{cS} * R$$

Equação 7 e 8. Em que: R = razão de raízes, kg.kg⁻¹; BA_bS = biomassa seca abaixo do solo por árvore, em kg; BA_cS = biomassa seca acima do solo por árvore, em kg.

$$W = BA_{cS} + BA_{bS}$$

Equação 9. Em que: W = biomassa seca total por árvore, em kg; BA_cS = biomassa seca acima do solo por árvore, em kg; BA_bS = biomassa seca abaixo do solo por árvore, em kg.

$$FEB = \frac{P_{copa} + P_{fuste}}{P_{fuste}} = \frac{Pa_{aéreo}}{P_{fuste}}$$

$$Pa_{aéreo} = P_{fuste} * FEB$$

Equação 10 e 11. Em que: FEB = fator de expansão da biomassa, adimensional; BA_cS = biomassa seca acima do solo por árvore, em kg; BA_bS = biomassa seca abaixo do solo por árvore, em kg.



4. AVALIAÇÕES DE CARBONO NA BIOMASSA

Após coleta de informações e das amostras de biomassa vegetal, segue-se para a determinação ou estimativa de teores e estoques de carbono nestes materiais. Pode-se optar por realizar as avaliações do teor de carbono na biomassa vegetal e no solo por duas formas:

- Determinação do teor de carbono por métodos diretos, quando é realizado o inventário e a amostragem da biomassa. Também são conhecidos como métodos destrutivos, pois é necessário realizar medições que darão os valores reais relacionados a estes componentes avaliados;
- Uso de fatores de conversão entre massa de biomassa vegetal ou massa de solo diretamente em carbono, baseando-se em valores previamente obtidos em outras pesquisas;
- Estimativas dos estoques de carbono por métodos indiretos, quando são utilizadas metodologias que fazem a relação entre

outras características da vegetação para estimar quanto de carbono está estocado em seus componentes. Também são conhecidos como métodos não destrutivos de estimativas.

4.1. Determinação do teor de carbono por métodos diretos

O processo de determinação da quantidade de carbono em uma amostra se dá pela transformação da matéria orgânica em CO_2 , e posteriormente em carbono (Sato et al., 2014). Esta conversão pode ser realizada por combustão seca ou úmida.

4.1.1. Determinação do teor de carbono por combustão seca

A combustão seca de amostras vegetais está baseada na avaliação a partir de técnicas automatizadas que não utilizam reagentes para digestão prévia destas amostras, apresentando assim uma redução em gastos com reagentes e eliminação de resíduos químicos (Silva et al., 2021). Além disso,

costuma apresentar processos rápidos de análise, com maior precisão e exatidão dos resultados. Busca-se, desta forma, utilizar metodologias que visem a redução ou eliminação no uso de compostos químicos geradores de resíduos poluentes (Ho; Chen, 2018).



Para a determinação do teor de carbono por combustão seca, as amostras de biomassa vegetal, previamente preparadas para análise, devem ser levadas aos analisadores elementares. A metodologia a seguir é realizada em equipamento LECO, modelo C-144, de acordo com as seguintes observações:

- Deve-se realizar a calibração do equipamento conforme especificações dos fabricantes. Pode-se utilizar o padrão analítico orgânico de farinha de arroz;
- Pesa-se 0,1000g de amostra preparada em cadinho de porcelana próprio do equipamento;
- Este cadinho é inserido no analisador, onde queimará a aproximadamente 1000°C, durante cerca de 1 minuto (Figura 7);
- O analisador enviará as informações para software específico do equipamento para um computador acoplado; e
- O arquivo digital dará, como resultado da análise, o teor de carbono orgânico total na amostra.



Figura 7: Equipamentos utilizado para determinação de carbono por combustão seca com equipamento LECO, modelo C-144 com computador acoplado ao LECO.

Fonte: <https://all.biz/br-pt/analísadores-de-carbono-enxofre-scl44-g96374>

4.1.2. Determinação do teor de carbono da combustão úmida

A combustão úmida é aquela que envolve a digestão da amostra para análise em laboratório, geralmente volumétrica. Esta metodologia é baseada na oxidação da matéria orgânica que compõe a biomassa, a partir do uso da combinação entre ácido sulfúrico e dicromato de potássio para titulação com sulfato ferroso amoniacal. A metodologia com o passo a passo a seguir foi proposta por Bezerra Neto e Barreto (2011), com ajustes de Araujo et al. (2020), para avaliação dos teores de carbono em amostras vegetais.

I – Em um Erlenmeyer de 500 mL, pesar 100 mg (0,1 g) da amostra de biomassa pré-seca;

II – Acrescentar, utilizando pipeta volumétrica, 20 mL de dicromato de potássio 1 N;

III – Adicionar 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (98%) e homogeneizar bem. Neste momento, caso contenha carbono, a amostra fica numa coloração escura (Figura 8A);

IV – Tampar o Erlenmeyer e aquecer brandamente por cinco minutos;

V – Após este período, agitar por um minuto e deixar em repouso por 30 minutos;

VI – Acrescentar 200 mL de água destilada, 10 mL de ácido fosfórico concentrado e 1 mL de difenilamina (em ácido);

VII – Titular este material com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N, deixando a solução de coloração púrpura para verde (Figuras 8B e 8C);

VIII – Por fim, realiza-se o cálculo para

determinação do teor de carbono orgânico total na amostra, baseando-se na seguinte relação: A partir da redução de 1 mL de dicromato de potássio 1 N, há a oxidação de 0,003 g de carbono. Dessa forma, é possível obter o teor de carbono em relação à amostra pesada, de acordo com a equação 12.

4.2. Determinação dos estoques de carbono por métodos diretos

Depois de determinar os teores de carbono na biomassa vegetal, é necessário fazer uma relação entre esta quantidade de carbono obtida e os estoques de biomassa, para em seguida determinar os estoques de carbono na biomassa vegetal a partir de métodos diretos. Estes estoques podem ser baseados na biomassa total ou por componente. Pode-se utilizar a seguinte relação descrita na Equação 13 para determinar estes estoques.

$$\%C = \frac{\left(60 - \frac{3A}{2}\right) * 100}{B}$$

Equação 12. Em que: %C = teor de carbono na amostra, em %; A = volume de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N gasto na titulação; B = massa de amostra seca, em mg.

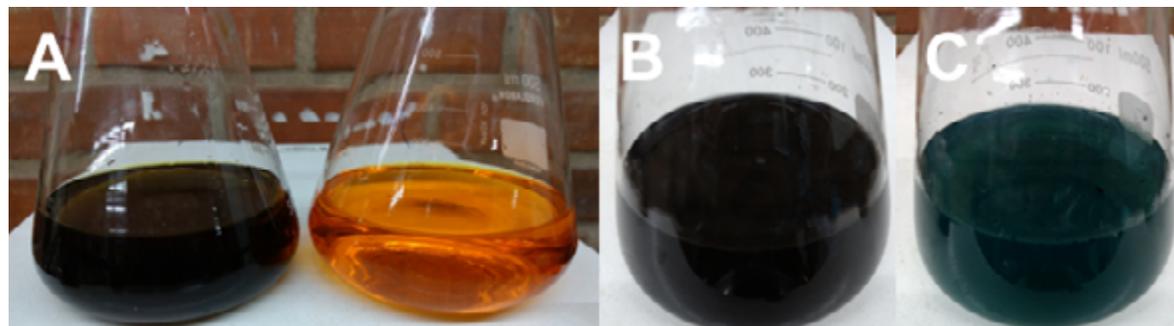


Figura 8: Metodologia para determinação do teor de carbono orgânico total em tecido vegetal, proposta por Bezerra Neto e Barreto (2011). A – Comparação entre material contendo amostra de carbono (coloração escura) e sem amostra vegetal (coloração laranja); B – Erlemeyer contendo solução antes da titulação, na coloração púrpura; C – Erlemeyer contendo solução após da titulação, na coloração esverdeada.

$$EC = W * \frac{\%C}{100}$$

Equação 13. Em que: EC = estoque de carbono, em Mg C.ha⁻¹; W = estoque de biomassa, em Mg.ha⁻¹; %C = teor de carbono na biomassa, em %.

4.3. Estimativa dos estoques de carbono na biomassa por métodos indiretos

Depois de determinar os teores de carbono na biomassa vegetal, é necessário fazer uma relação entre esta quantidade de carbono obtida e os estoques de biomassa, para em seguida determinar os estoques de carbono na biomassa vegetal a partir de métodos

diretos. Estes estoques podem ser baseados na biomassa total ou por componente. Pode-se utilizar a seguinte relação descrita na Equação 13 para determinar estes estoques.

Quando não é possível realizar os inventários de carbono com as avaliações pelos métodos diretos, pode-se optar por estimar os estoques a partir de métodos indiretos. O uso de fatores de conversão da biomassa em carbono para posterior extrapolação destes valores em estoque é uma atividade comum na avaliação de ecossistemas florestais. Na Amazônia, por exemplo, estima-se que cerca de 70% das pesquisas que realizaram avaliações da biomassa florestal e sua conversão em carbono tenham utilizado fatores para estimativas dos estoques de carbono (Araujo et al., 2023).

O uso de fatores de conversão acaba sendo uma alternativa para casos em que não há a disponibilização de recursos suficientes para a realização das análises diretas da biomassa, além de casos que envolvam a dificuldade ou impossibilidade de sua coleta. Porém, cabe destacar que o uso destes fatores pode subestimar ou superestimar os estoques de carbono nos ambientes florestais, sobretudo pelo fato de haver diversos valores disponíveis na literatura (Tabela 5). Recomenda-se, portanto, o uso de valores locais para cada caso de avaliação, escolhendo um dos fatores que represente a maior similaridade com a sua área avaliada.

Após escolha do fator de conversão a ser utilizado, pode-se estimar o respectivo estoque de carbono a partir da equação 14.

$$EC = W * FC$$

Equação 14. Em que: EC = estoque de carbono, em Mg C.ha⁻¹; W = estoque de biomassa, em Mg.ha⁻¹; FC = fator de conversão de biomassa em carbono, adimensional.

Tabela 5 Fatores de conversão utilizados na determinação do carbono em biomassa vegetal na região amazônica

Fonte: Araujo et al. (2023), adaptado.

BIOMASSA ACIMA DO SOLO		BIOMASSA ABAIXO DO SOLO	
FATOR	REFERÊNCIA	FATOR	REFERÊNCIA
0,456	Martin et al. (2018)	0,4591	Araujo (2022)*
0,4591	Araujo (2022)*	0,47	Kauffman e Donato (2012); Thomas e Martin (2012)
0,46	IPCC (2006); IPCC (2014)	0,4735	Martin e Thomas (2011)
0,47	McGroddy, Daufresne e Hedin (2004); IPCC (2006); Kauffman e Donato (2012); Thomas e Martin (2012)	0,474	Martin e Thomas (2011)
0,4735	Martin e Thomas (2011)	0,48	IPCC (2006); Silva (2007); Aguiar et al. (2012); Goodman et al. (2013)
0,474	Martin e Thomas (2011)	0,485	Higuchi et al. (1998); Silva (2007)
0,48	Higuchi e Carvalho Jr. (1994); IPCC (2006); Silva (2007); Martin e Thomas (2011); Aguiar et al. (2012); Goodman et al. (2013)	0,489	Silva (2007)
0,485	Higuchi et al. (1998); Silva (2007); Nogueira et al. (2008)	0,5	Brown e Lugo (1984); Penman et al. (2003); Chave et al. (2005); Silver et al. (2005); Mokany, Raison e Prokushkin (2006); IPCC (2008); MacDicken (2015); Borges et al. (2016)
0,489	Silva (2007); Saatchi et al. (2011)		
0,494	Goodman et al. (2013)		
0,5	Brown e Lugo (1982); Brown e Lugo (1984); Carvalho Jr. et al. (1995); Chambers et al. (2000); Clark et al. (2001); Houghton et al. (2001); Penman et al. (2003); Malhi et al. (2004); Markewitz et al. (2004); Chave et al. (2005); IPCC (2006); IPCC (2008); Saatchi et al. (2011); Baccini et al. (2012); Feldpausch et al. (2012); Berenguer et al. (2014); MacDicken (2015)		

*Valor obtido em plantios de recuperação ambiental em Rondônia

5. CARBONO NO SOLO

A perda de matéria orgânica nos solos culmina na perda de carbono nesses ambientes. Porém este fenômeno pode ser reduzido a partir da recuperação ambiental por meio de implantação de plantios mistos. Solos degradados reduzem a capacidade de estocar carbono, o que favorece o aumento das emissões de CO₂ (Gatti et al., 2021). Além disso, é importante destacar a importância do solo no armazenamento de carbono, pois estes estocam este elemento cerca de 2,5 vezes que a biomassa vegetal, portanto a degradação destes ambientes altera o balanço de carbono local e global (Barros; Fearnside, 2016).

5.1. Determinação dos teores de carbono no solo

Os métodos diretos de determinação dos teores de carbono no solo envolvem a sua prévia coleta, bem como sua posterior

avaliação em laboratório. Para tanto, deve-se proceder com a amostragem, preparo das amostras para análise e rotinas laboratoriais para determinar os teores de carbono nesses solos.

5.1.1. Amostragem de solo para avaliação de teores e estoques de carbono

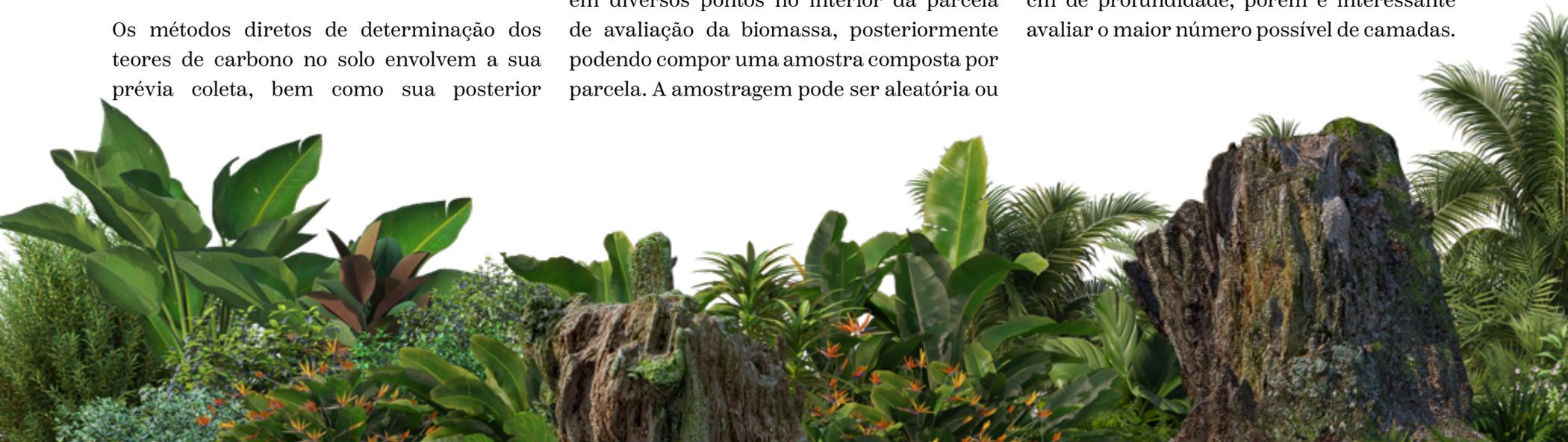
Para avaliação dos teores de carbono no solo, é necessário definir a quantidade de amostras a serem coletadas e a forma de amostragem. A quantidade de solo amostrado varia de acordo com a disponibilidade da realização das análises laboratoriais.

Para determinação dos teores de carbono podem ser coletadas amostras deformadas em diversos pontos no interior da parcela de avaliação da biomassa, posteriormente podendo compor uma amostra composta por parcela. A amostragem pode ser aleatória ou

sistemizada, a depender a dificuldade de coleta em diferentes pontos da parcela.

Depois de definida a quantidade e forma de amostragem, deve-se prosseguir com a coletado do solo. Para estimativa dos estoques de carbono nos solos são necessárias duas informações importantes: a profundidade do solo a ser avaliada e a sua densidade.

As diferentes camadas de solo apresentam teores de carbono diferentes. Comumente, em ambientes florestais sem revolvimento de solo, as camadas mais superficiais costumam apresentar maiores quantidades de matéria orgânica e carbono, com redução à medida que aumenta a profundidade (Figura 9). O IPCC (2006) recomenda avaliações até 30 cm de profundidade, porém é interessante avaliar o maior número possível de camadas.



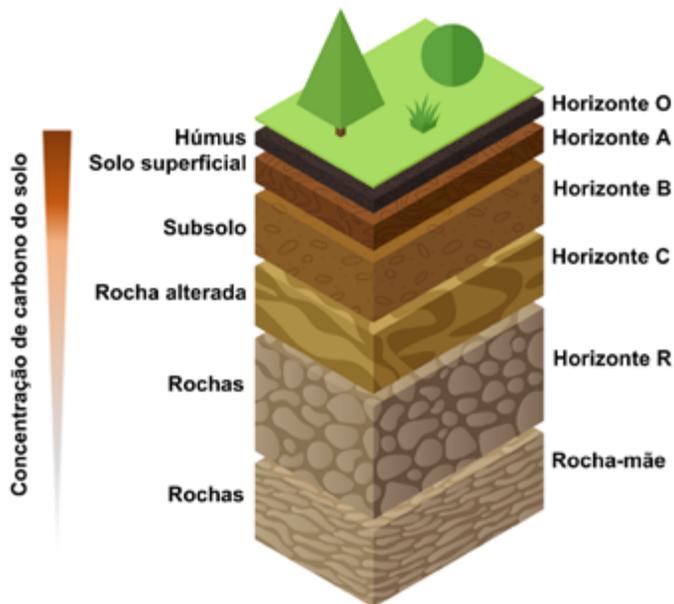


Figura 9: Esquema de ocorrência de carbono nas diferentes camadas do solo.
Fonte: Autores (2023)

A escolha da quantidade de amostras em camadas varia de acordo com diversos fatores, principalmente as dificuldades relacionadas à coleta e a disponibilidade de recursos para análise. Pode-se, portanto, optar por avaliações nas seguintes camadas:

- 0 cm - 5 cm; 5,1 cm - 10,0 cm; e 10,1 cm - 30,0 cm;
- 0 cm - 5 cm; 5,1 cm - 10,0 cm; 10,1 cm - 20,0 cm; 20,1 cm - 30,0 cm; ou
- 0 cm - 10 cm; 10,1 cm - 20 cm; e 20,1 cm - 40,0 cm.

Depois de definidas quais as camadas serão avaliadas, é necessário realizar a coleta do solo para determinação de sua densidade. Em cada trincheira aberta, devem ser coletadas amostras simples, para compor uma amostra composta por camada. Deve-se realizar amostragem indeformada utilizando anel volumétrico para determinação da densidade do solo (EMBRAPA, 2017), conforme a seguinte metodologia (Figura 10):

- Abertura de trincheiras dentro da parcela de avaliação da biomassa. Sugere-se abrir trincheiras nas dimensões 1,0 m x 1,0 m e 30 ou 40 cm de profundidade;
- Coletar corretamente o solo em cada camada utilizando anéis volumétricos de aproximadamente 100 cm³;
- Depois de coletado, o solo, ainda no interior dos anéis volumétricos, deve ser seco em estufa a uma temperatura de 103±2°C até peso constante;
- Pesquisar a quantidade de solo seco e proceder com os cálculos de determinação da densidade do solo (Equação 15).

$$\rho_{solo} = \frac{massa_{seca}}{V}$$

Equação 15. Em que: ρ_{solo} = densidade do solo na camada X, em g.cm⁻³; $massa_{seca}$ = massa do solo seco no interior do anel volumétrico, em g; V = volume do anel volumétrico, em cm³.





Figura 10: Esquema de coleta de solo para determinação da densidade.



Fonte: Autores (2023)

Além das amostras para densidade, deve-se coletar amostras deformadas. Durante a coleta de amostras de solo, todo o solo de cada camada será cuidadosamente peneirado usando uma peneira de malha de 4 mm para separar toda a biomassa abaixo do solo (raízes vivas e mortas, tubérculos, caules subterrâneos e detritos abaixo do solo) e acondicionado em sacos plásticos. O solo livre de impurezas será encaminhado para laboratório a fim de realizar os procedimentos para avaliação do carbono no solo.

5.1.2. Preparo das amostras de solo para análises laboratoriais

Antes de seguir para análise dos teores de carbono, o solo deve ser preparado para as rotinas laboratoriais. Sugere-se o seguinte passo a passo:

I - Abrir os sacos contendo o solo coletado para secagem ao ar;

II - Depois desta primeira secagem, o solo deve ser destorroado, triturado em gral e passado em peneira de 80 mesh;

III - As amostras peneiradas devem ser secas em estufa numa temperatura de $63 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante, seguindo para avaliação dos teores de carbono.

5.1.3. Determinação dos teores de carbono no solo

Assim como para a determinação dos teores de carbono na biomassa (Ver 4), a avaliação direta do carbono no solo pode ser realizada a partir de combustão úmida ou combustão seca. Deve-se optar pelo método que apresente os dados de forma mais rápida, acurada e eficiente.

5.1.3.1. Combustão úmida

A metodologia a seguir é baseada na oxidação da fração de matéria orgânica que compõe o solo, a partir do uso da combinação entre ácido sulfúrico e dicromato de potássio para titulação com sulfato ferroso amoniacal. A metodologia com o passo a passo a seguir foi proposta por Fontana e Campos (2017).

I - Preparo de uma amostra ausente de carbono (em branco):

- Acrescentar em um Erlenmeyer de 250 mL, 10,00 mL de solução de dicromato de potássio $0,0667 \text{ mol.L}^{-1}$;
- Tampar o Erlenmeyer e levar para aquecer em chapa aquecedora em temperatura inferior a 150°C durante cinco minutos. Nesta etapa a solução está numa coloração amarelo-castanha;

- Deixar a solução esfriar (temperatura ambiente) e adicionar 80 mL de água destilada. Homogeneíze bem;
- Adicionar 2,0 mL de ácido ortofosfórico e três gotas de indicador ferroin $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$;
- Titular com sulfato ferroso amoniacal $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ até total mudança de coloração;
- Anotar o volume gasto.

II - Avaliação dos teores de carbono no solo – oxidação da matéria orgânica:

- Acrescentar em um Erlenmeyer de 250 mL, 0,5 g da terra fina seca em estufa (TFSE) e peneirada em 80 mesh;
- Adicionar 10,00 mL de solução de dicromato de potássio $0,0667 \text{ mol.L}^{-1}$;
- Tampar o Erlenmeyer e levar para aquecer em chapa aquecedora em temperatura inferior a 150°C durante cinco minutos. Nesta etapa a solução está numa coloração amarelo-castanha;
- Deixar a solução esfriar (temperatura ambiente) e adicionar 80 mL de água destilada. Homogeneíze bem;

- Adicionar 2,0 mL de ácido ortofosfórico e três gotas de indicador ferrouso 0,025 mol.L⁻¹;
- Titular com sulfato ferroso amoniacal 0,05 mol.L⁻¹ até total mudança de coloração;
- Anotar o volume gasto.

III - Cálculo dos teores de carbono orgânico no solo: De posse dos volumes gastos nas titulações das etapas anteriores, utilizar a Equação 16.

5.1.3.2. Combustão seca

Para a determinação do teor de carbono em solos por combustão seca, as amostras, previamente preparadas para análise, devem ser levadas aos analisadores elementares. A metodologia a seguir é realizada em equipamento LECO, modelo C-144, de acordo com as seguintes observações:

- Deve-se realizar a calibração do equipamento conforme especificações dos fabricantes. Pode-se utilizar o padrão analítico orgânico de farinha de arroz;
- Pesa-se 0,1000g de amostra preparada em cadinho de porcelana próprio do equipamento;
- Este cadinho é inserido no analisador, onde queimará a aproximadamente 1000°C, durante cerca de 1 minuto;

- O analisador enviará as informações para software específico do equipamento para um computador acoplado; e
- O arquivo digital dará, como resultado da análise, o teor de carbono orgânico total na amostra.

5.1.4. Determinação dos estoques de carbono no solo

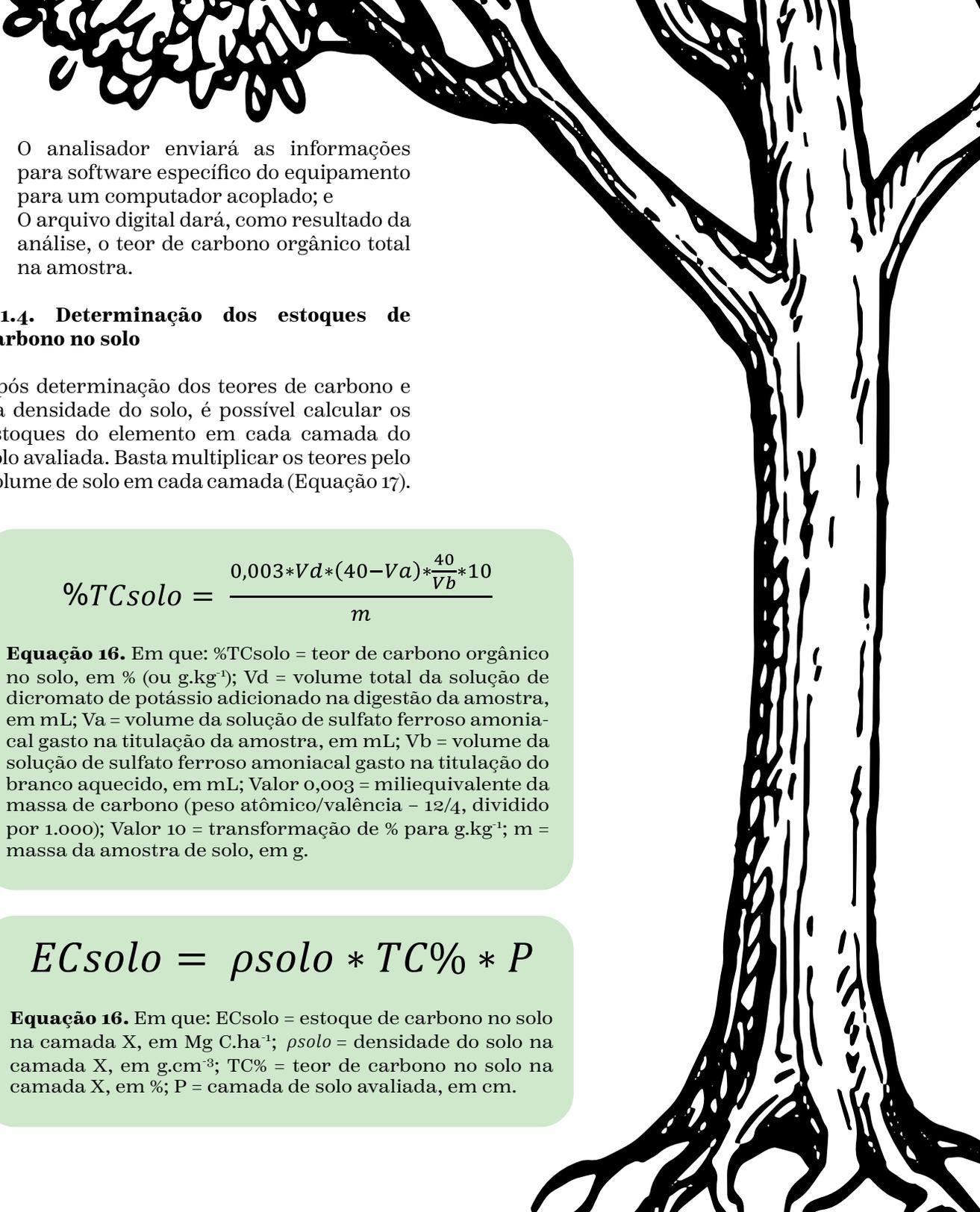
Após determinação dos teores de carbono e da densidade do solo, é possível calcular os estoques do elemento em cada camada do solo avaliada. Basta multiplicar os teores pelo volume de solo em cada camada (Equação 17).

$$\%TC_{solo} = \frac{0,003 * Vd * (40 - Va) * \frac{40}{Vb} * 10}{m}$$

Equação 16. Em que: %TC_{solo} = teor de carbono orgânico no solo, em % (ou g.kg⁻¹); Vd = volume total da solução de dicromato de potássio adicionado na digestão da amostra, em mL; Va = volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra, em mL; Vb = volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco aquecido, em mL; Valor 0,003 = miliequivalente da massa de carbono (peso atômico/valência - 12/4, dividido por 1.000); Valor 10 = transformação de % para g.kg⁻¹; m = massa da amostra de solo, em g.

$$EC_{solo} = \rho_{solo} * TC\% * P$$

Equação 16. Em que: EC_{solo} = estoque de carbono no solo na camada X, em Mg C.ha⁻¹; ρ_{solo} = densidade do solo na camada X, em g.cm⁻³; TC% = teor de carbono no solo na camada X, em %; P = camada de solo avaliada, em cm.



6. DINÂMICA ECOLÓGICA DO CARBONO NA BIOMASSA VEGETAL

A dinâmica ecológica da biomassa e, conseqüentemente, do carbono fixado nesta, pode ser foco de estudo para entendimento da recuperação ambiental proporcionada por plantios mistos visando revegetação de áreas degradadas. A avaliação dos atributos da necromassa (biomassa morta) constitui um dos indicadores da recuperação ambiental ligados à ciclagem de nutrientes em ambientes florestais (Soares; Froufe, 2015). Além disso, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) que a quantificação dos estoques de carbono em ecossistemas florestais deve levar em consideração a quantificação da BAoS, da BABS, da matéria orgânica do solo, da serapilheira e da necromassa grossa (IPCC, 2006).

6.1. Avaliação da necromassa fina (serapilheira): acúmulo, aporte e decomposição

A necromassa fina, também conhecida como serapilheira, corresponde ao material orgânico morto oriundo do processo de ciclagem de nutrientes, possuindo diâmetros inferiores a 2 cm. No ambiente florestal,

a serapilheira inclui folhas, galhos, flores, frutos, cascas e outras partes da planta que são depositadas no piso (RANDAZZO et al., 2006).

A dinâmica desta serapilheira na floresta está baseada em estudar etapas da ciclagem de nutrientes da biomassa vegetal. As etapas que são avaliadas para este estudo envolvem o acúmulo, o aporte e a decomposição:

I - Acúmulo de serapilheira: corresponde à necromassa fina que já está na depositada no piso florestal (Figura 11A). Para avaliar este acúmulo, pode-se seguir os seguintes passos:

- Definir a quantidade de amostras a serem obtidas nas áreas avaliadas que seja representativa. Normalmente a amostragem se faz no interior de parcelas de avaliação e medição das árvores;
- Definir a forma de amostragem (aleatória ou sistematizada);
- Utilizar um gabarito de área conhecida. Normalmente são utilizados gabaritos quadrados (Figura 11B) que podem ter 50 cm x 50 cm (0,25 m²) ou 1,0 m x 1,0 m (1,0 m²);

- Depois de definir os locais de amostragem, o gabarito é lançado sobre a superfície do solo que contém a serapilheira. Toda a necromassa fina deve ser recolhida, até exposição total do solo mineral;

- Ainda no campo, esta necromassa fina deve ser pesada para obtenção da massa úmida. Em seguida, este material deverá ser enviado para laboratório para as rotinas de análises;

- Secar este material em estufa de circulação forçada de ar regulada a uma temperatura de 65^oC±5^oC até peso constante, obtendo-se a massa seca de serapilheira;

- Por fim, segue-se as rotinas laboratoriais para determinação dos teores de carbono na biomassa;

- Os estoques de serapilheira acumulada podem ser determinados a partir da equação 18. É necessário converter a área avaliada pelos gabaritos para hectare.

II - Aporte de serapilheira: corresponde à necromassa fina senescente que já cai sobre o piso florestal. Para avaliar o aporte é necessário que se tenha algum tipo de armadilha que colete a serapilheira aportada,



Figura 11: Avaliação do acúmulo de necromassa fina (serapilheira) em ambientes florestais. A – Necromassa fina acumulada acima do solo; e B – Exemplo de gabarito utilizado para amostragem da necromassa fina.

Fonte: A - Autores (2023);
B – Higa et al. (2014)

por isso sugere-se seguir os seguintes passos:

- Definir a quantidade de armadilhas do tipo coletor (Figura12) que serão instaladas na parcela avaliada. Comumente se adiciona um coletor quadrado de 1,0 m², com altura de 0,5 m ou 1,0 m, no centro da parcela utilizada para avaliação da biomassa arbórea;
- Periodicamente as parcelas devem ser visitadas para recolhimento da serapilheira aportada. Comumente faz-se a coleta durante um período mínimo de um ano, sendo coletado mensalmente, pois diversos fatores interferem no aporte, como situações edafoclimáticas e fenologia das espécies;
- Em campo, esta serapilheira deve ser pesada para determinação da massa de serapilheira fresca;

- Este material deve ser encaminhado para o laboratório, onde deverá secar em estufa regulada a 63±2°C até peso constante;
- Depois de seca, deve-se pesar o material para determinação do peso seco;
- Em seguida, costuma-se separar a serapilheira aportada em algumas frações, como: folhas, galhos, flores, frutos, sementes e miscelânea (material orgânico não identificável);
- Por fim, determina-se a porcentagem de cada fração para identificar a contribuição de cada uma delas na composição da serapilheira da área.
- Os estoques de serapilheira aportada podem ser determinados a partir da Equação 18.

$$ES_{acúmulo} = \frac{m}{A} * 10$$

Equação 18. Em que: $ES_{acúmulo}$ = estoque de serapilheira acumulada sobre o solo, em Mg.ha⁻¹; m = massa seca de serapilheira acumulada, em kg; A = área avaliada pelos gabaritos, em m².

$$ES_{aporte} = \frac{m}{A} * 10$$

Equação 18. Em que: ES_{aporte} = estoque de serapilheira aportada sobre o solo, em Mg.ha⁻¹; m = massa seca de serapilheira aportada, em kg; A = área avaliada pelos gabaritos, em m².



Figura 12: Avaliação do aporte de necromassa fina (serapilheira) em ambientes florestais utilizando coletor.

Fonte: Autores (2023)

III - Decomposição de serapilheira: corresponde ao processo natural de retorno do carbono durante a ciclagem. A avaliação da decomposição leva em consideração a decomposição foliar, pois esta fração corresponde à maior contribuição na serapilheira. A avaliação da decomposição foliar pode ser realizada por meio do método de bolsas de decomposição:

- A decomposição foliar é avaliada sob algumas condições, sendo necessária a confecção de bolsas de náilon (Figura 13);
- As bolsas devem apresentar as seguintes características: dimensões de 20 cm x 20 cm e malha inferior de 1,0 mm² e malha superior de 5 mm², para facilitar a entrada da macrofauna de solo;
- No interior das parcelas de avaliação da biomassa, deve-se coletar folhas sadias do terço médio das árvores do interior. Estas folhas devem ser secas em laboratório, numa temperatura de 63±2°C até peso constante;
- Em seguida, as bolsas devem ser preenchidas com 10 g das folhas secas e devidamente lacradas, inclusive com identificação;
- Estas bolsas devem ser levadas para o interior das parcelas, onde ficaram expostas ao tempo durante no mínimo 13 meses;
- A cada período de tempo (geralmente mensal), uma bolsa de cada parcela é coletada, levada para laboratório, onde é devida-

mente limpa e seca a 63±2°C até peso constante;

- Anotar o peso final para se estimar a perda de massa em cada período de tempo (Equação 19) e massa remanescente (Equação 20);
- O tempo necessário para decomposição de 50% do material, conhecido como o tempo de meia-vida, será calculado por meio da constante de decomposição (SHANKS; OLSON, 1961) (Equação 22).

6.1.1. Determinação dos teores de carbono

A determinação dos teores de carbono na serapilheira segue as metodologias empregadas na avaliação dos teores deste elemento na biomassa. Da mesma forma, pode-se optar por avaliações por combustão seca ou por combustão úmida (ver 4.1).

6.1.1. Determinação dos teores de carbono

A determinação dos teores de carbono na serapilheira segue as metodologias empregadas na avaliação dos teores deste elemento na biomassa. Da mesma forma, pode-se optar por avaliações por combustão seca ou por combustão úmida (ver 4.1).

$$PM = \left(\frac{Mo - Mf}{Mo} \right) * 100$$

$$MR = \frac{Mf}{Mo} * 100$$

Equação 19 e 20. Em que: PM = perda de massa, em %; Mo = massa inicial das folhas secas, em g; Mf = massa final de folhas após o período em campo, em g; MR = massa remanescente de folhas, em %.

$$MR = Mo * e^{-kt}$$

Equação 21. Em que: MR = massa remanescente de folhas, em %; Mo = massa inicial das folhas secas, em g; t = tempo da coleta, em dias; k = constante de decomposição, adimensional.

$$t_{0,5} = \frac{0,6931}{k}$$

Equação 22. Em que: t_{0,5} = tempo de meia-vida, em %; k = constante de decomposição, adimensional.

$$EC_{nf} = E_{nf} * \frac{\%C}{100}$$

Equação 23. Em que: EC_{nf} = estoque de carbono na serapilheira seca, em Mg C.ha⁻¹; E_{nf} = estoque de serapilheira seca, em Mg.ha⁻¹; %C = teor de carbono na serapilheira, em %.

Figura 13: Bolsas de náilon utilizadas na avaliação da decomposição da serapilheira florestal.



Fonte: Autores (2023)

6.2. Avaliação da necromassa grossa

A necromassa grossa corresponde ao material orgânico morto oriundo do processo de ciclagem de nutrientes que possui diâmetros superiores a 2 cm. Nesse componente são considerados materiais lenhosos, como ramos, galhos, troncos e raízes. Para quantificar a necromassa grossa caída pode ser considerado o método de linha interceptadora (SANQUETTA et al., 2014), seguindo o procedimento:

- I** - Definir uma unidade amostral que deve ser representada por uma linha que apresenta um determinado comprimento (Figura 14);
- II** - Deve-se passar a linha interceptadora no interior da parcela na qual está sendo avaliada a biomassa;
- III** - Todos os materiais interceptados

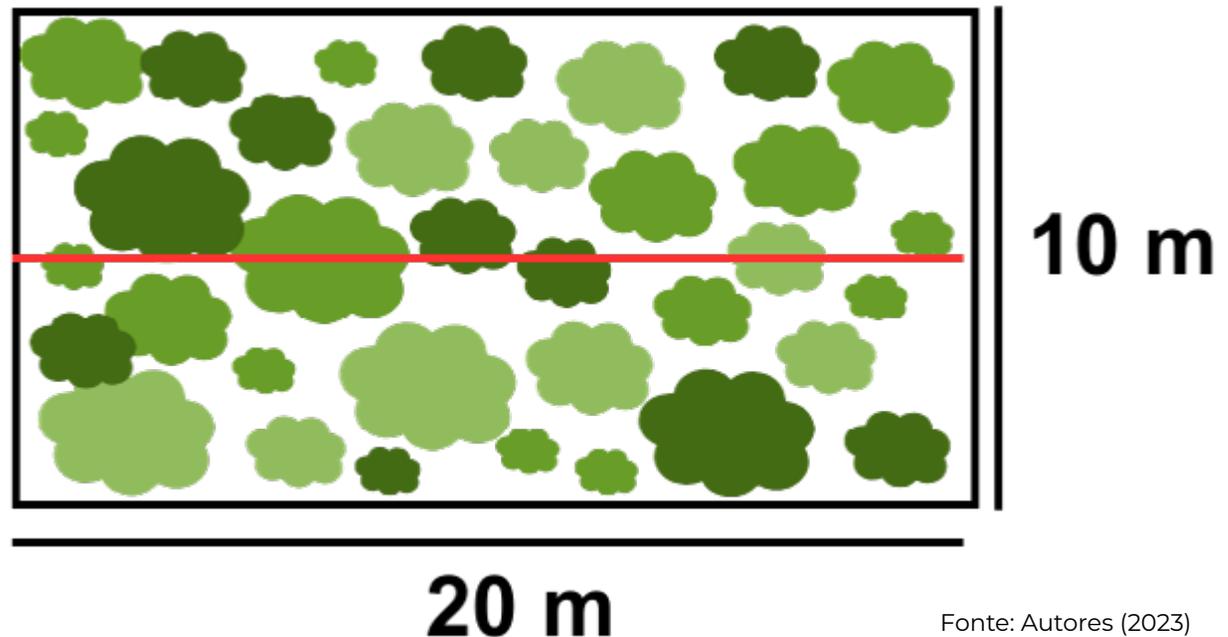
(tocados) pela linha devem ter os seus diâmetros medidos. É necessário definir quantos diâmetros serão mensurados para que seja utilizado um valor de diâmetro médio (Equação 24)

IV - Para árvores grandes caídas, Souza, Azevedo e Freitas (2017) indicam a realização de uma cubagem rigorosa a partir da uma equação que combina os métodos de cubagem de Smalian e de Hohenadl (Equação 25), sendo medidos os diâmetros em 10 pontos;

$$E_{ng} = \frac{\pi D^2}{40000} * L$$

Equação 24. Em que: E_{ng} = estoque de necromassa grossa caída, em $Mg.ha^{-1}$; D = diâmetro médio da necromassa, em cm; L = comprimento da necromassa, em m.

Figura 14: Esquema de amostragem de necromassa grossa utilizando a linha interceptadora.



Fonte: Autores (2023)

$$E_{ng} = \frac{\pi}{40000} * \left[\left(\frac{D_0^2 + D_{10}^2}{2} \right) + D_1^2 + \dots + D_9^2 \right] * \frac{L}{10}$$

Equação 25. Em que: Eng = estoque de necromassa de árvores grandes caídas, em Mg.ha⁻¹; D₀ = diâmetro na base do fuste, em cm; D₁₀ = diâmetro na base do fuste, em cm; D₁, ..., 9 = diâmetro na base do fuste, em cm; L = comprimento da necromassa, em m.

$$EC_{ng} = E_{ng} * \frac{\%C}{100}$$

Equação 26. Em que: EC_{ng} = estoque de carbono na necromassa grossa caída, em Mg C.ha⁻¹; Eng = estoque de necromassa grossa caída, em Mg.ha⁻¹; %C = teor de carbono na necromassa grossa, em %.

V - Caso seja avaliado um tronco caído, deve-se observar se a árvore pertencia à área da parcela, ou se apenas caiu no seu interior. Considerar apenas as árvores que cresceram no interior das parcelas;

VI - Deve-se classificar os estágios de decomposição (Figura 15) da necromassa grossa em: 1 - Deterioração pouco perceptível; 2 - Leves sinais de ataque de xilófagos; e 3 - Estágio avançado de decomposição (SOUZA; AZEVEDO; FREITAS, 2017);

VIII - Uma fração de cada estágio de decomposição será coletada e encaminhada para laboratório, para determinação da densidade de acordo com a NBR 11.941 (ABNT, 2003) e posterior avaliação dos teores de carbono.

6.2.1. Determinação dos teores de carbono

A determinação dos teores de carbono na necromassa grossa segue as metodologias empregadas na avaliação dos teores deste

elemento na biomassa. Da mesma forma, pode-se optar por avaliações por combustão seca ou por combustão úmida (ver 4.1).

6.2.2. Determinação dos estoques de carbono

Os estoques de carbono na necromassa grossa podem ser obtidos pela multiplicação

dos teores de carbono observados na amostra em cada um dos graus de decomposição observados pelos respectivos estoques (Equação 26).

Fonte: Souza, Azevedo e Freitas (2017)

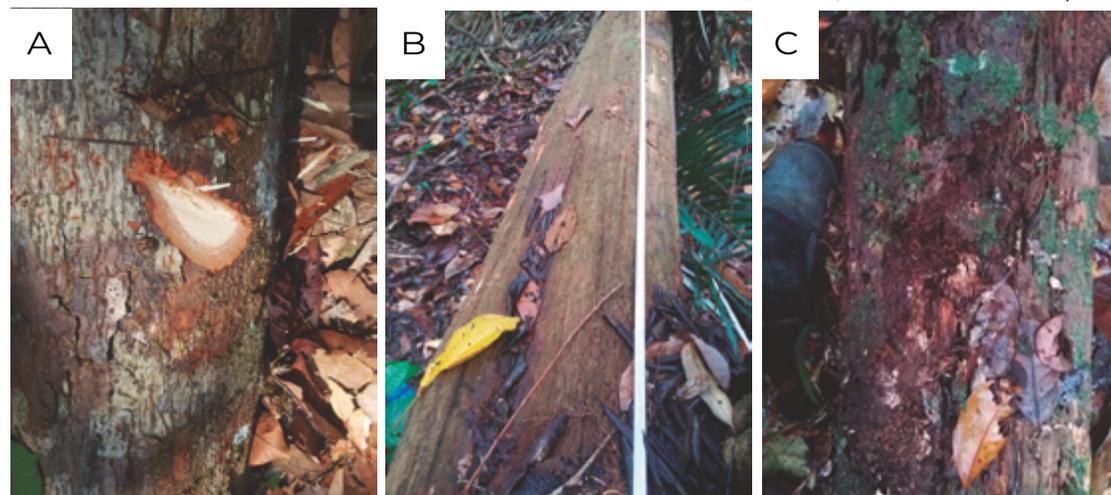


Figura 15: Classificação visual do grau de decomposição da necromassa grossa. A - Classe 1: deterioração não perceptível, peças recém-caídas ou com resistência ao ataque de xilófagos; B - Classe 2: apresenta leves sinais de ataque de xilófagos, deterioração na fase inicial; e C - Classe 3: peças em estágio avançado de decomposição, quebrando e despedaçando ao toque.

7. ESTIMATIVA DOS ESTOQUES DE CO₂ EQUIVALENTES

De posse dos dados dos estoques de carbono na biomassa, serapilheira e necromassa grossa, pode-se estimar os respectivos estoques de CO₂ equivalentes (CO_{2eq}). Os valores de CO_{2eq} são utilizados como referências para comparar o potencial poluidor entre os diferentes gases do efeito estufa, padronizando a comparação com o dióxido de carbono.

Para determinação destes valores, faz-se uma razão estequiométrica baseada na conversão total do carbono estocado em CO₂, em que há a multiplicação dos estoques de carbono totais (acima e abaixo do solo) por um fator referente a 44/12 (Equação 27). Este fator está relacionado estequiometricamente com as massas moleculares do CO₂ (44 g.mol⁻¹) e do carbono (12 g.mol⁻¹).

$$CO_{2eq} = EC * \frac{44}{12}$$

Equação 27. Em que: CO_{2eq} = estoque de CO₂ equivalente, em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹; EC = estoque de carbono, em Mg C.ha⁻¹.





REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. P. D.; OMETTO, J. P.; NOBRE, C.; LAPOLA, D. M.; ALMEIDA, C.; VIEIRA, I. C.; SOARES, J. V.; ALVALA, R.; SAATCHI, S.; VALERIANO, D.; CASTILLA-RUBIO, J. C. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: The INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, v. 18, n. 11, p. 3346-3366, 2012.
- ARAUJO, E. C. G. Panorama do estoque de carbono florestal e matriz de emissões e remoções por diferentes usos do solo na Amazônia. 95f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
- ARAUJO, E. C. G.; SILVA, T. C.; COELHO, J. B. M.; BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Determinação do teor de carbono orgânico total em amostra vegetal pelo método volumétrico com diferentes volumes de ácido sulfúrico. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 5, n. 1, p. 50-53, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6p.
- BACCINI, A.; OETZ, S. J.; WALKER, W. S.; LAPORTE, N. T.; SUN, M.; SULLA-MENASHE, D.; HACKLER, J.; BECK, P. S. A.; DUBAYAH, R.; FRIEDL, M. A.; SAMANTA, S.; HOUGHTON, R. A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, v. 2, n. 3, p. 182-185, 2012.
- BADIN, T. L. Estimativa de biomassa utilizando dados LiDAR em floresta tropical. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- BARROS, H. S.; FEARNSIDE, P. M. Soil carbon stock changes due to edge effects in central amazon forest fragments. *Forest Ecology and Management*, v. 379, p. 30-36, 2016.
- BERENGUER, E.; LENNOX, G. D.; FERREIRA, J.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; BARRETO, J. R.; ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; FIGUEIREDO, A. E. S.; FRANÇA, F.; GARDNER, T. A.; JOLY, C. A.; PALMEIRA, A. F.; QUESADA, C. A.; ROSSI, L. C.; SEIXAS, M. M. M.; SMITH, C. C.; WITHEY, K.; BARLOW, J. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Global Change Biology*, v. 20, n. 12, p. 3713-3726, 2014.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Análises químicas e bioquímicas em plantas. Recife: Editora Universitária da UFRPE, 2011. 261p.
- BORGES, C. H. A.; SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; COSTA, R. M. C.; NOVAIS, D. B.; BARROSO, R. F. Artrópodes edáficos em fragmentos de floresta ombrófila aberta na Paraíba, Brasil. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, n. 2, p. 26-32, 2016.
- BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

- BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a medida provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.
- BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. The storage and production of organic matter in Tropical Forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, v. 14, n. 3, p. 161-187, 1982.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of Tropical Forests: A new estimate based on forest volumes. *Science*, v. 223, n. 4642, p. 1290-1293, 1984.
- CARVALHO JR., J. A.; SANTOS, J. M.; SANTOS, J. C.; LEITÃO, M. M.; HIGUCHI, N. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region. *Atmospheric Environment*, v. 29, n. 17, p. 2301-2309, 1995.
- CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; SCHIMEL, J. P.; FERREIRA, L. V.; MELACK, J.M. Decomposition and carbon cycling of dead trees in Tropical Forests of the Central Amazon. *Oecologia*, v. 122, n. 3, p. 380-388, 2000.
- CHAMBERS, J. Q.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; HIGUCHI, N. Tree damage, allometric relationships, and aboveground net primary production in a tropical forest. *Forest Ecology and Management*, v. 152, p. 73-84, 2001.
- CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.-P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005.
- CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M.S.; DELITTI, W. B. C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P. M.; GOODMAN, R. C.; HENRIQUE, M.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W. A.; MULLER-LANDAU, H. C.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B. W.; NGOMANDA, A.; NOGUEIRA, E. M.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLOTON, P.; RYAN, C. M.; SALDARRIAGA, J. G.; VIEILLIDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Changes Biology*, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.
- CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THOMLINSON, J. R.; NI, J. Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications*, v. 11, n. 2, p. 356-370, 2001.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, L. C.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. A.; FERREIRA, M. E.; ZAMBRANO, A. M. A.; [et al.] Aboveground biomass estimation in amazonian tropical forests: a comparison of Aircraft- and GatorEye UAV-borne LiDAR Data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil. *Remote Sensing*, v. 12, p. 1754, 2020.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. A. Uso do LiDAR

como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais. Brasília: Embrapa Acre, 2014. 132 p.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; REUTEBUCH, S. E.; McGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H. E. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, v. 124, p. 479-491, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574p.

FELDPAUSCH, T. R.; LLOYD, J.; LEWIS, S. L.; BRIENEN, R. J. W.; GLOOR, M.; MENDOZA, A. M.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; BANIN, L.; SALIM, K. A.; AFFUM-BAFFOE, K.; ALEXIADES, M.; ALMEIDA, S.; AMARAL, I.; ANDRADE, A.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MURAKAMI, A. A.; ARETS, E. J. M. M.; ARROYO, L.; AYMARD, G. A.; BAKER, T. R.; BÁNKI, O. S.; BERRY, N. J.; CARDOZO, N.; CHAVE, J.; COMISKEY, J. A.; ALVAREZ, E.; OLIVEIRA, A.; DI FIORE, A.; DJAGBLETEY, G.; DOMINGUES, T. F.; ERWIN, T. L.; FEARNside, P. M.; FRANÇA, M. B.; FREITAS, M. A.; HIGUCHI, N.; HONORIO, E.; IIDA, Y.; JIMÉNEZ, E.; KASSIM, A. R.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, W. F.; LOVETT, J. C.; MALHI, Y.; MARIMON, B. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; LENZA, E.; MARSHALL, A. R.; MENDOZA, C.; METCALFE, D. J.; MITCHARD, E. T. A.; NEILL, D. A.; NELSON, B. W.; NILUS, R.; NOGUEIRA, E. M.; PARADA, A.; PEH, K. S. -H.; CRUZ, A. P.; PEÑUELA, M. C.; PITMAN, N. C. A.; PRIETO, A.; QUESADA, C. A.; RAMÍREZ, F.; RAMÍREZ-ANGULO, H.; REITSMA, J. M.; RUDAS, A.; SAIZ, G.; SALOMÃO, R. P.; SCHWARZ, M.; SILVA, N.; SILVA-ESPEJO, J. E.; SILVEIRA, M.; SONKÉ, B.; STROPP, J.; TAEDOUNG, H. E.; TAN, S.; STEEGE, H.; TERBORGH, J.; TORELLO-RAVENTOS, M.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; VÁSQUEZ, R.; VILANOVA, E.; VOS, V. A.; WHITE,

L.; WILLCOCK, S.; WOELL, H.; PHILLIPS, O. L. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, v. 9, n. 8, p. 3381-3403, 2012.

FERREIRA, A. B. F. Modelagem da biomassa e dinâmica do carbono em áreas de concessão florestal no Sudeste da Amazônia brasileira. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds) Manual de métodos de análise de solo. 3ª ed. revisada e ampliada. Brasília: Embrapa, 2017. p. 360-367.

GATTI, L. V.; BASSO, L. S.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; DOMINGUES, L. G.; CASSOL, H. L. G.; TEJADA, G.; ARAGÃO, L. E. O. C.; NOBRE, C.; PETERS, W.; MARANI, L.; ARAI, E.; SANCHES, A. H.; CORRÊA, S. M.; ANDERSON, L.; VON RANDOW, C.; CORREIA, C. S. C.; CRISPIM, S. P.; NEVES, R. A. L. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, n. 63, p. 231-231, 2010.

GOMES, L. F. BRITES, R. S.; LOCKS, C. J.; ANJOS, R. R. Estimativas das Alterações na Biomassa Florestal Utilizando LiDAR em Área de Manejo Florestal Sustentável na Amazônia Sul-Occidental. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 3, 2020.

GOODMAN, R. C.; PHILLIS, O. L.; TORRES, D. C.; FREITAS, L.; CORTESE,

- S. T.; MONTEAGUDO, A.; BAKER, T. R. Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, v. 310, p. 994-1004, 2013.
- HIGA, RCV.; CARDOSO, D. J.; ANDRADE, G. C.; ZANATTA, J.A.; ROSSI, L.M.B.; PULROLNIK, K.; NICODEMO, M.L.F.; GARRASTAZU, M. C.; VASCONCELOS, S. S.; SALIS, V. V. Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. *Dados eletrônicos - Colombo: Embrapa Florestas*, 2014. 90p.
- HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTEY, L.; BIOT, V. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. *Acta Amazonica*, v. 28, n. 2, p. 153-166, 1998.
- HIGUCHI, N.; CARVALHO JR., J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: *Seminário Emissão x Sequestro de CO2 - Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. Anais...* 1994.
- HO, C. C.; CHEN, M. S. Risk assessment and quality improvement of liquid waste management in Taiwan University chemical laboratories. *Waste Management*, v. 71, p. 578-588, 2018.
- HOUGHTON, R. A.; LAWRENCE, K. T.; HACKLER, J. L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: A comparison of estimates. *Global Change Biology*, v. 7, n. 7, p. 731-746, 2001.
- HUBAU, W.; LEWIS, S.; PHILLIPS, O. L.; AFFUM-BAFFOE, K.; BEECKMAN, H.; CUNÍ-SANCHEZ, A.; DANIELS, A. K.; et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, v. 579, n. 7797, p. 80–87, 2020.
- IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Disponível em: < <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>; Acesso em 23 out. 2023.
- IPCC. AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report. 2008.
- IPCC. AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. 2014.
- KAUFFMAN, J. B.; DONATO, D. C. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. *Bogor: CIFOR*, 2012. 40p.
- LIMA, A. J. N. Avaliação de um sistema de inventário florestal contínuo em áreas manejadas e não manejadas do estado do Amazonas (AM). 2010. 165 f. Tese (Doutorado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.
- LOCKS, C. J.; MATRICARDI, E. A. T. Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LIDAR. *Ciência Florestal*, v. 29, p. 481-495, 2019.
- MACDICKEN, K. G. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. *Arlington: Winrock International Institute for Agricultural Development*, 2015. 87p.
- MALHI, Y.; BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; ALMEIDA, S.; ALVAREZ, E.; ARROYO, L.; CHAVE, J.; CZIMCZIK, C. I.; DI FIORE, A.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; MONTOYA, L. M. M.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; VARGAS, P. V.;

- PATIÑO, S.; PITMAN, N. C. A.; QUESADA, C. A.; SALOMÃO, R.; SILVA, J. N. M.; LEZAMA, A. T.; MARTÍNEZ, R. V.; TERBORGH, J.; VICENTE, B.; LLOYD, J. The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, v. 10, n. 5, p. 563-591, 2004.
- MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D. Nutrient loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in Amazonia. *Ecological Applications*, v. 14, n. 4, p. 177-199, 2004.
- MARTIN, A. R.; DORAISAMI, M.; THOMAS, S. C. Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *Nature Geoscience*, v. 11, n. 12, p. 915-920, 2018.
- MARTIN, A. R.; THOMAS, S. C. A reassessment of carbon content in tropical trees. *PLoS ONE*, v. 6, n. 8, p. 1-9, 2011.
- MCGRODDY, M. E.; DANFRESNE, T.; HEDIN, L. O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial redfield-type ratio. *Ecology*, v. 85, n. 9, p. 2390-2401, 2004.
- MELO, A. W. F. Alometria de Árvores e Biomassa Florestal na Amazônia Sul-Ocidental. 154f. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017.
- MOKANY, K.; RAISON, R. J.; PROKUSHKIN, A. S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, v. 12, n. 1, p. 84-96, 2006.
- NELSON, B. W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J. L. G.; SOUZA, S. G. A.; BATISTA, G. T.; COUTO, L. B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 117, p. 149-167, 1999.
- NISHIWAKI, A. A. M.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, C. P.; SILVA, E. A.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; MENEZES, R. S. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DOMINGUES, T. F. Uso do LiDAR na estimativa de atributos florestais: uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 01, p. 505-527, 2023.
- NOGUEIRA, E. M.; FEARNside, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, v. 256, n. 11, p. 1853-1867, 2008.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199p.
- OLSON, J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, v. 44, n. 2, p. 322-331, 1963.
- PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K.; WAGNER, F. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Kanagawa, 2003.
- PHILLIPS, O. L.; BRIENEN, R. J. W.; Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance and Management*, v. 12, n. 1, p. 1-9, 2017.

- RANDAZZO, S. G.; MAURENZA, D.; MARTINS, M. I. S. L.; MECCA, M. P. Produção de serapilheira e retorno de nutrientes ao solo em arboreto de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) em Mogi-Guaçu, São Paulo, Brasil. *Hoehnea*, v. 33, p. 339-347, 2006.
- SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E. T. A.; SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 24, p. 9899-9904, 2011.
- SANQUETTA, C. R.; BASTOS, A. S.; FERRONATO, M. L.; SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D. Fatores de expansão e de conversão de biomassa e razão de raízes em povoamentos de restauração florestal em Rondônia. *Enciclopédia Biosfera*, v. 16, n. 29, p. 871-881, 2019.
- SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; PELISSARI, A. L.; MAAS, G. C. B.; SANQUETTA, M. N. I. Dinâmica em superfície, volume, biomassa e carbono nas florestas plantadas brasileiras: 1990-2016. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 3, n. 1, p. 152-160, 2018.
- SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; WATZLAWICK, L. F. Inventários florestais: planejamento e execução. 3ª ed. - revisada e ampliada. Curitiba: Multi-graphic, 2014. 409p.
- SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHÃO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. *Scientia Agricola*, v. 71, n. 4, p. 302-308, 2014.
- SATO, L. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; KELLER, M. SANTOS, M. N.; ARAGÃO, L. E. O. C. Análise da relação entre dados de LiDAR e de biomassa florestal no sudoeste da Amazônia. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE
- SHANKS, R. E.; OLSON, J. S. First-year breakdown of leaf litter in Southern Appalachian Forests. *Science*, v. 134, n. 3473, p. 194-195, 1961.
- SILVA, C. A.; KALUBERG, C.; HUDAK, A.; LIEBERMANN, R.; CARVALHO, S. P. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Utilização da tecnologia LiDAR para estimativa da biomassa florestal em povoamentos de *Eucalyptus* sp. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.
- SILVA, R. P. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus - AM. 152f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical e Recursos Naturais) - Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus, 2007.
- SILVA, T. C.; ARAUJO, E. C. G.; SANQUETTA, C. R.; COELHO, J. B. M.; BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Comparison of methodologies for determining the carbon content in wood. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, supl. 2, e8400, 2021.
- SILVER, W. L.; THOMPSON, A. W.; MCGRODDY, M. E.; VARNER, R. K.; DIAS, J. D.; SILVA, H.; CRILL, P. M.; KELLER, M. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils. *Global Change Biology*, v. 11, n. 2, p. 290-306, 2005.
- SOARES, M. T. S.; FROUFE, L. C. M. Estimativa de ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais por meio da produção e decomposição de serapilheira. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.;

OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília: Embrapa, 2015. p. 155-170.

SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; FREITAS, F. C. Metodologia para avaliação necromassa em florestas tropicais. Comunicado Técnico 130. Manaus: Embrapa, 2017. 6p.

THOMAS, S. C.; MARTIN, A. R. Carbon content of tree tissues: A synthesis. *Forests*, v. 3, n. 2, p. 332-352, 2012.

UHL, C.; BUSHBACHER, R.; SERRAO, E. A. S. Abandoned pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of plant succession. *Journal of Ecology*, v. 76, n. 3, p. 663-681, 1988.

Parceira:



A **Ecoporé** faz parte da:



