

LiDAR & CARBONO

INOVAÇÃO NA
QUANTIFICAÇÃO DE
BIOMASSA FLORESTAL



EXPEDIENTE

Realização

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (Imaflora)

Apoio

Instituto Clima e Sociedade

Parceria

Instituto Socioambiental
ForLidar

Diagramação e Designer Editorial

Elias Serejo – Jornalista

Pesquisa

Natali Vilas Boas Silveira

Coordenadora de Projetos do Imaflora

Gabriela Celina de Souza Vieira Paes

Analista de Serviços e Projetos do Imaflora

Humberto Tadeu Menecheli Filho

ForLidar

Revisão

Lara Aranha da Costa (ISA)

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

LiDAR & Carbono: Inovação na Quantificação de Biomassa Florestal. 1ª Ed. Piracicaba, SP: Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola - Imaflora, 2026.

Vários colaboradores.

Bibilografia.

ISBN: 978-65-86902-25-9

Palavras-chave: monitoramento florestal, carbono, restauração, agropecuária.

Produção



Apoio



Parceria



APRESENTAÇÃO

Esta publicação apresenta de forma aplicada como a tecnologia LiDAR pode contribuir para tornar mais preciso, eficiente e verificável o monitoramento florestal voltado à mensuração de carbono. Realizada pelo Imaflora, com apoio do Instituto Clima e Sociedade e parceria do Instituto Socioambiental e da ForLidar, a obra parte de um desafio conhecido por quem atua com floresta e clima: medir a biomassa e converter essa informação em estimativas confiáveis de carbono removido ainda depende, em grande medida, de inventários de campo robustos, porém caros, demorados e logisticamente complexos, sobretudo em áreas extensas e de difícil acesso, como projetos de restauração ecológica.

Ao contextualizar esse cenário, o conteúdo explica por que o sensoriamento remoto vem transformando a forma de observar e quantificar florestas e destaca o LiDAR como uma das tecnologias mais promissoras por permitir a leitura tridimensional da vegetação, revelando estrutura, altura, densidade e volume do dossel a partir de pulsos de laser emitidos por sensores acoplados a aeronaves ou drones. Essa capacidade de “enxergar” a estrutura da floresta muda o jogo para estimativas de volume, biomassa e carbono e abre espaço para inventários híbridos, em que a coleta em campo deixa de ser massiva e passa a ser estratégica, calibrando e validando modelos gerados a partir da nuvem de pontos.

O público a que este material se dirige é, ao mesmo tempo, técnico e transversal. Ele interessa a equipes de restauração e manejo que precisam medir desempenho ecológico e carbono com consistência, a organizações da sociedade civil e projetos territoriais que buscam transparência e credibilidade em suas métricas, a empresas e iniciativas comprometidas com integridade em clima e natureza, e também a auditorias, certificadoras, financiadores e gestores públicos que demandam rastreabilidade e padronização. A publicação foi elaborada para apoiar decisões práticas e o desenho de protocolos de MRV, dialogando com as exigências do mercado e com a necessidade de reduzir incertezas, custos e gargalos operacionais, sem abrir mão de robustez estatística e espacial.

Para sair da teoria e demonstrar o potencial em condições reais, o documento se ancora no caso da restauração na Bacia do Xingu conduzida pelo ISA e na experiência de mensuração e verificação de carbono do Carbon on Track, iniciativa do Imaflora. Ao comparar abordagens, a publicação descreve a adoção de inventário integrado com LiDAR embarcado em drone e estratégia de amostragem dupla estratificada em 741 hectares de plantios de restauração implantados entre 2009 e 2019, em Mato Grosso, destacando o esforço de tornar o monitoramento mais eficiente e rastreável.

Os resultados reforçam a razão de ser deste trabalho no âmbito da parceria com financiadores e instituições: ampliar a capacidade de monitorar em escala, com mais qualidade e menor custo por unidade monitorada, fortalecendo a integridade de iniciativas de carbono associadas à restauração. Conforme sistematizado, o uso do LiDAR se associa a reduções expressivas de esforço em campo, de custo por hectare e de erro percentual, mostrando-se uma alternativa efetiva para áreas extensas.

Por fim, a publicação também se posiciona no debate sobre verificação e padrões internacionais. Ao evidenciar barreiras e inconsistências, aponta que regras concebidas para diferentes realidades florestais nem sempre incorporam as particularidades tropicais e podem impor custos e exigências que dificultam a democratização de projetos, além de criarem entraves à adoção de tecnologias já consolidadas no avanço dos inventários florestais. Nesse contexto, o material funciona como contribuição técnica e política: ao organizar evidências e comparar métodos, indica caminhos para atualizar práticas de mensuração e verificação no Brasil, com metodologias mais aderentes à realidade nacional e às demandas por transparência.



SUMÁRIO

1. O desafio do monitoramento florestal para mensuração de carbono	6
2. LiDAR uma solução?	7
2.1. Desafios e potenciais	8
3. Inventário florestal: convencional x assistido por LiDAR	9
4. Da teoria à prática: Restauração no Xingu (ISA)	11
4.1. Análise comparativa técnica	13
4.2. Análise comparativa de custos	14
4.3. Vantagens do emprego do LiDAR no monitoramento	14
5. Verificação: barreiras a serem ultrapassadas	16

1. O desafio do monitoramento florestal para mensuração de carbono

O monitoramento florestal é, desde os primórdios da engenharia florestal, um dos maiores desafios da profissão. O objetivo central do engenheiro florestal sempre foi o mesmo: quantificar a floresta com precisão e eficiência, escolhendo as ferramentas adequadas de acordo com o objetivo do monitoramento.

Quando falamos de monitoramento para mensuração de carbono, tradicionalmente, essa tarefa é realizada por meio de inventários de campo - métodos robustos que quantificam a altura e diâmetro das árvores resultando na biomassa florestal, mas que exigem alto investimento em deslocamento, mão de obra especializada e tempo. Em áreas extensas ou de difícil acesso, como as de restauração ecológica, o custo e a logística tornam-se obstáculos significativos.

Nos últimos anos, o sensoriamento remoto

vem transformando esse cenário, oferecendo novas possibilidades para monitorar florestas com rapidez e precisão. Entre as tecnologias emergentes, o LiDAR (Light Detection and Ranging) se destaca como uma das mais promissoras. Trata-se de um sensor ativo, acoplado a uma aeronave ou drone, capaz de emitir pulsos de laser e calcular distâncias com alta acurácia, gerando informações tridimensionais sobre a vegetação. Enquanto sensores ópticos fornecem dados sobre a composição química das plantas, o LiDAR penetra a vegetação revelando sua estrutura — altura, densidade e volume do dossel.

Em inventários que buscam estimar volume, biomassa e carbono, o LiDAR literalmente “lança luz” sobre a floresta, tornando-se uma ferramenta poderosa para compreender a estrutura e o desenvolvimento da vegetação.



Monitoramento:

realizado na área de implantação com frequência predeterminada, levando em consideração indicadores ecológicos.



Coleta de dados:

realização de técnicas de inventário florestal em campo.



Cálculo de biomassa:

tratamento dos dados de campo através da aplicação de equações alométricas e coeficiente de biomassa no fuste.



Conversão para carbono:

conversão da biomassa do fuste pelo coeficiente de carbono para determinação do carbono equivalente removido.

2. LiDAR uma solução?

O LiDAR tem contribuído significativamente para aumentar a eficiência dos inventários florestais, permitindo estimativas mais precisas com menor esforço de campo.

A metodologia mais eficiente combina medições em parcelas amostrais com informações obtidas a partir da nuvem de pontos LiDAR.

Em inventários tradicionais, a precisão estatística depende de muitas parcelas distribuídas aleatoriamente, o que implica maior custo e tempo de execução. Com o uso do LiDAR, é possível reduzir consideravelmente a quantidade de parcelas ne-

cessárias, mantendo a confiabilidade das estimativas. No estudo de caso conduzido com esta tecnologia, observou-se **redução de variância de até 73,8% e eficiência amostral 3,8 vezes superior** em comparação ao inventário florestal feito a partir da metodologia convencional.

Além da eficiência estatística, o LiDAR fornece precisão espacial nas estimativas, uma vez que cada métrica calculada reflete a realidade geográfica da área analisada. A partir de produtos derivados, como o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Altura de Dossel (CHM), é possível delimitar com exatidão as áreas de interesse e acompanhar sua evolução ao longo do tempo.

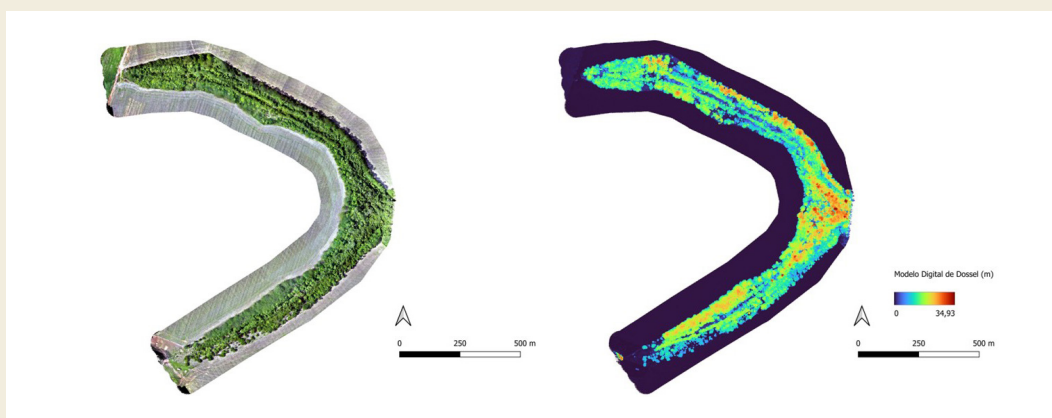


Figura 1: Comparativo entre produtos derivados do LiDAR: à esquerda, ortomosaico da área de restauração; à direita, Modelo Digital de Altura de Dossel (CHM) representando a altura da vegetação. A combinação desses produtos permite delimitar com precisão as áreas de interesse e acompanhar a evolução estrutural da vegetação ao longo do tempo.

Outro benefício relevante é a possibilidade de **estratificação da vegetação**. As métricas LiDAR — como altura média, percentis de altura e densidade de pontos acima de determinado limite (por exemplo, 2 m) — permitem dividir a área em zonas mais homogêneas. Essa estratificação possibilita uma alocação mais eficiente das parcelas de campo: em vez de medi-las de forma aleatória, elas podem

ser distribuídas de modo a representar melhor a variabilidade estrutural da vegetação. Dessa forma, o esforço amostral se torna mais racional.

Menos parcelas precisam ser medidas, mas cada uma delas possui maior representatividade estatística, o que reduz custos e aumenta a precisão das estimativas.

2.1. Desafios e potenciais

O uso do LiDAR ainda envolve um investimento inicial relativamente alto e requer conhecimento técnico especializado para o processamento e a interpretação dos dados. Entretanto, o avanço na acessibilidade dos sensores tem contribuído para reduzir custos e ampliar o uso da tecnologia em contextos operacionais e de monitoramento contínuo.

Em Áreas de Preservação Permanente, constituídas por faixas estreitas de vegetação, os pulsos do laser podem atingir vegetação, solo ou relevo fora da área de interesse. Isto gera ruído na nuvem de pontos, reduzindo assim, a confiabilidade dos resultados específicos a área de interesse. As técnicas de uso de LiDAR dependem de uma área ou volume de dados mínimo para adequação da modelagem e dos algoritmos, se tornando mais eficientes no monitoramento em larga escala de plantios de restauração.

Além disso, **um dos principais diferenciais do LiDAR está em seu uso múltiplo**. Uma única aquisição de dados pode atender a diferentes objetivos de análise — incluindo a estratificação florestal, a quantificação de volume e biomassa, a análise topográfica, o acompanhamento dos processos de regeneração, o mapeamento de degradação e

o suporte ao planejamento de campo. Essa versatilidade amplia substancialmente o retorno sobre o investimento, uma vez que os mesmos dados podem ser reutilizados em diferentes etapas de monitoramento, projetos ou auditorias.

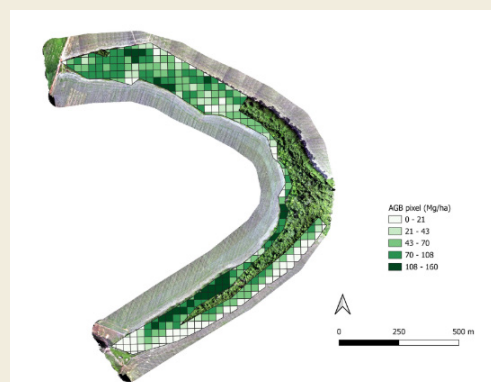


Figura 2: Estimativas de biomassa por pixel a partir da modelagem LiDAR, parte do uso múltiplo do sobrevoo do LiDAR.

Desse modo, o LiDAR não deve ser visto apenas como uma ferramenta de inventário, mas como uma base de dados tridimensional contínua que permite revisitar o território ao longo do tempo, avaliar mudanças estruturais e integrar diferentes camadas de informação ambiental de forma consistente.

3. Inventário florestal: convencional x assistido por LiDAR

O uso de tecnologias de sensoriamento remoto, especialmente o LiDAR aerotransportado (ALS), tem reduzido significativamente a necessidade de inventários florestais convencionais extensivos.

Estudos demonstram que modelos de altura de dossel, volume e biomassa obtidos por LiDAR permitem diminuir em até 40–50% o número de parcelas em campo necessárias para manter a mesma precisão estatística, quando comparado ao inventário tradicional¹.

Essa redução ocorre porque o LiDAR fornece uma representação tridimensional contínua do terreno e da vegetação, eliminando a necessidade de amostragem intensiva para capturar a variabilidade espacial de áreas extensas. Além disso, o levantamento aéreo permite acessar regiões remotas e de difícil deslocamento, o que reduz custos logísticos e riscos operacionais associados ao trabalho de campo.

Outra vantagem é que o LiDAR oferece estimativas robustas de estrutura florestal mesmo em ambientes complexos, como florestas densas ou heterogêneas, onde o inventário tradicional exigiria um número maior de parcelas para captar variações

de densidade, composição e estratificação vertical. Com uma nuvem de pontos de alta densidade, métricas como altura média do dossel, área basal estimada, volume e biomassa podem ser derivadas com alta acurácia, diminuindo o esforço amostral e a dependência de parcelas extensivas para caracterização estrutural. Assim, o inventário assistido por LiDAR permite manter a precisão do inventário convencional com uma quantidade muito menor de medições diretas, trazendo expressiva redução de esforço em campo.

Além disso, inventários de campo apresentam problemas associados a erros humanos, inconsistência entre medidores e dificuldade de mensurar o dossel de forma adequada. A medição de altura de árvores, por exemplo, é uma das variáveis com maior margem de erro em campo, o que impacta diretamente a estimativa de biomassa². Em florestas tropicais densas, a visibilidade do topo das árvores e do tronco é limitada, resultando em subestimativas ou superestimativas que podem comprometer a acurácia dos modelos alométricos. Esses aspectos evidenciam que o método puramente tradicional não é suficiente para atender às demandas modernas de monitoramento florestal em larga escala.

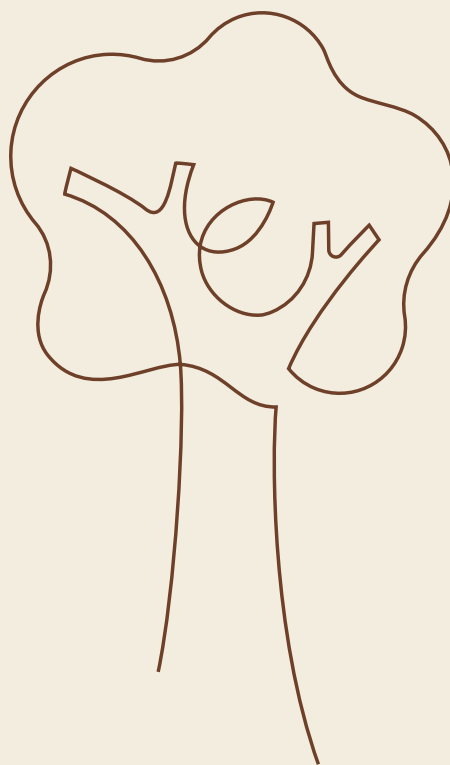
¹ WULDER, M. A. et al. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, v. 121, p. 196–209, 2012.

² CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, v. 20, p. 3177–3190, 2014.



Figura 3: Drone DJI Matrice 350 RTK equipado com sensor LiDAR DJI Zenmuse L2 durante os preparativos para o levantamento de dados LiDAR em áreas de preservação permanente (APPs) pela ForLidar 2025.

Diante dessas limitações, cresce a adoção de abordagens integradas que combinam sobrevoos com LiDAR e amostragem de campo. O LiDAR fornece a estrutura tridimensional completa da floresta, enquanto os dados de campo servem para calibrar e validar os modelos que convertem métricas LiDAR em estimativas quantitativas, como volume, área basal e biomassa. **Essa integração resulta em inventários híbridos altamente precisos, que equilibram custo, representatividade espacial e robustez estatística.** Assim, inventários assistidos por LiDAR não substituem totalmente o campo, mas o transformam em uma etapa mais estratégica, reduzida e focada em coleta de parâmetros essenciais, representando atualmente a abordagem mais eficiente para mensuração e monitoramento florestal em grandes áreas.



4. Da teoria à prática: Restauração no Xingu (ISA)

O Instituto Socioambiental (ISA) é uma organização brasileira sem fins lucrativos dedicada à defesa dos direitos socioambientais, com foco especial na proteção de povos indígenas, comunidades tradicionais e da biodiversidade. É reconhecido nacional e internacionalmente por projetos inovadores na Amazônia e no Cerrado, fortalecendo governança local e estratégias de proteção florestal.

O ISA executou entre 2009 e 2019 milhares de hectares de restauração por meio de semeadura direta em parceria com propriedades privadas na bacia do rio Xingu, destes 741 passaram a integrar a iniciativa Carbon on Track em 2024 a partir do sistema Verra.

Em parceria com a empresa Natura, conduziu parte das restaurações no Xingu a partir do Edital Programa Natura Carbono Neutro 2009-2010, o que resultou no projeto Natura 2. O projeto em questão, consiste na implantação de 181 ha em APPs em 9 propriedades parceiras nos anos de 2009 e 2010 de restauração no corredor do Xingu.

Em 2011, a área foi submetida ao processo de certificação de créditos de carbono a partir do sistema Verra, e em 2022 sofreu a última auditoria no mesmo sistema. Utilizando a metodologia “AR-AMS0007. A/R Small-scale Methodology: Afforestation

and reforestation project activities implemented on lands other than wetlands.” do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM) da UNFCCC e suas ferramentas.

O monitoramento adotado tem seguido o previsto na AR-TOOL14 “Estimation of Carbon Stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM Project activities” com parcelas permanentes inventariadas. Foram delimitadas 16 parcelas de 1.000m², distribuídas aleatoriamente. Em paralelo às exigências da metodologia, em 2022 foram coletadas imagens de drone de 11 parcelas para modelagem de terreno por meio da estereoscopia, durante o inventário em campo.

A mesma área foi inventariada em 2024 utilizando o inventário integrado seguindo o protocolo de monitoramento do Carbon on Track, iniciativa de mensuração e verificação de carbono desenvolvida pelo Imaflora. Na oportunidade, foi realizado o inventário de 741 hectares de plantios de restauração realizados pelo ISA, implantados entre 2009 e 2019 no Corredor do Rio Xingu, em Mato Grosso, utilizando a combinação de dados de campo com o uso de sensoriamento remoto via tecnologia LiDAR embarcada em drone, aplicando a estratégia de amostragem dupla estratificada.

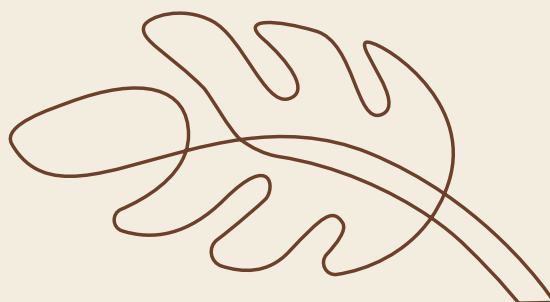
Saiba mais sobre o Carbon on Track

Protocolo de MRV (Monitoramento, Relatório e Verificação) de quantificação de carbono desenvolvido pelo Imaflora, disponível para restauração e agropecuária. O CoT Restauração atua com diferentes modelos de restauração ecológica ou

produtiva (ex: Sistemas Agroflorestais). Os resultados dos estudos de quantificação de carbono são consolidados e disponibilizados na plataforma Carbon on Track (COT), garantindo transparência, rastreabilidade e acesso às informações.



Figura 5: Imagem gerada a partir da nuvem de pontos coletada pela ForLiDAR em 2025.



4.1. Análise comparativa técnica

	VCS	Carbon on Track
Área (ha)	180,7	741
Linha de base	Remoções líquidas de GEE na linha de base por sumidouros no ano $t = 0$ t CO ₂ -e	Remoções líquidas de GEE na linha de base por sumidouros no ano $t = 0$ t CO ₂ -e
Vazamento	LKG agric., t pastagem = 0 t CO ₂ -e	LKG agric., t pastagem = 0 t CO ₂ -e
Parcelas	16	42
Tempo em campo (dias)	185	163
Tamanho da parcela (m)	20x50	30x30
Sub parcela (m)	20x5	4x25
Estratificação	3 estratos florestais para mensuração de parcelas conforme a heterogeneidade da distribuição de biomassa florestal	3 estratos florestais seguindo as classes NDVI, sugestão de estratificar de acordo com o projeto
Biomassa para carbono no fuste	0,47	0,47
Conversão COeq	3,6667	3,6667
Coleta de dados em campo	Amostragem casual estratificada (ACE)	Combinação de dados de campo com o uso de sensoriamento remoto via tecnologia LiDAR embarcada em drone, aliado à aplicação de uma estratégia de amostragem dupla estratificada (ADE)
Erro percentual	39,50%	12,90%
Ferramenta de mensuração	A/R-TOOL 14 "Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM project activities" / A/R-03 "Calculation of the number of sample plots for measurements within A/R CDM project activities"	VT005 Tool for Measuring Aboveground Live Forest Biomass Using Remote Sensing

4.2 Análise comparativa de custos

A análise de custo visa comparar os valores investidos no processo de certificação do projeto Nascentes do Xingu pelo sistema Verra, iniciado pelo ISA em 2022 e concluído em 2023, aos valores investidos nas 5 áreas restauração verificadas pelo CoT entre 2024 e 2025. Os dados utilizados para comparação foram publicados pelo ISA³.

Entre 2022 e 2023, foram investidos R\$303.000 em todo o processo de certifi-

cação, o que representaria R\$ 326.178,90⁴. Para certificar 24.285 VCUs, gerados a partir dos 180,7 hectares, esse processo durou 739 dias, distribuídos em 185 dias de monitoramento (fase 1), 355 dias com a auditoria externa (fase 2), e 199 dias na fase de verificação e validação da empresa certificadora (fase 3). Durante análise, serão comparadas apenas os custos relativos as fases 1 e 2, etapas otimizadas pelo CoT.

	VCS	CoT
Área (ha)	180,7	741
Tempo (dias corridos)	540	385
Toneladas de CO2 equivalente verificadas	24.285	36.562
Valor	R\$260.211*	R\$ 249.300
Valor/ha	R\$ 1.440,02	R\$ 336,44
Valor/ton	R\$ 10,71	R\$ 6,82

*Valor contempla os custos das etapas de monitoramento e auditoria externa.

4.3. Vantagens do emprego do LiDAR no monitoramento

Conforme apresentado, o uso do LiDAR permite uma redução significativa dos esforços em campo (81%), nos custos por hectare (76%) e no erro percentual (67%). Se mostrando uma alternativa efetiva para monitoramento de áreas extensas.

Além disso, gera um aumento da precisão estatística por área e da precisão espacial da delimitação das áreas. As métricas auxiliares da área total, permite delimitação espacial precisa via rasters derivados (CHM, MDT), assegurando

³ Carbono socioambiental das Nascentes do Xingu: resultados e relatos do primeiro e segundo quinquênio. Brasília, DF. ISA – Instituto Socioambiental, 2024.

⁴ Considerando a inflação acumulada, no período de março de 2024 a dezembro de 2025, em 7,63% sem considerar a variação cambial da moeda em que foram realizadas as transações em 2018.

que as estimativas por área reflitam fielmente a realidade monitorada. O LiDAR não serve apenas para gerar métricas de altura ou biomassa, mas também pode auxiliar na estratificação da área, dividindo o território em zonas mais homogêneas a partir das métricas LiDAR. Essa estratificação torna possível uma alocação mais eficiente das parcelas de campo: em vez de distribuir parcelas de forma aleatória ou apenas por imagens de satélite, é possível direcioná-las para representar melhor a variabilidade estrutural da vegetação. Com isso, o esforço de campo se torna mais inteligente: menos parcelas precisam ser medidas, mas cada uma tem maior representatividade estatística, o que reduz custo e aumenta a precisão.

A metodologia de monitoramento através da tecnologia LiDAR permitiu a verificação 3,8 vezes mais eficiente, possibilitando assim uma estimativa substancialmente mais precisa com menor esforço. Esses resultados mostram que é fundamental adotar estratégias de amostragem integradas que considerem a organização espacial das áreas. Essa abordagem aumenta a precisão das estimativas em inventários de carbono e no monitoramento florestal, especialmente em ambientes de restauração ecológica.



5. Verificação: barreiras a serem ultrapassadas

A complexidade e inflexibilidade dos padrões Verra, desenvolvidos para florestas do mundo inteiro, não consideram as particularidades das florestas tropicais, em especial no Brasil. Trazendo custos dolarizados de auditoria e exigência de verificações extensas em um país de dimensões continentais, impossibilitando a democratização das verificações de projetos de carbono.

Ativa desde maio de 2025, a metodologia para projetos de restauração da Verra (VM0047 1.1) inviabiliza o uso de tecnologias de sensoriamento remoto para monitoramento de plantios. A medida ocorre na contramão dos avanços do uso destas tecnologias em inventários florestais e das exigências de mercado de maior transparência, rastreabilidade e uso de ferramentas robustas para quantificação das remoções.

O uso de tecnologias como o LiDAR tem

potencial para baratear significativamente o monitoramento florestal ao reduzir o esforço de campo, aumentar a precisão estatística e espacial das estimativas e permitir análises mais rápidas e abrangentes da vegetação. Os processos de verificação internacionais ainda precisam ser atualizados para incorporar plenamente o potencial do LiDAR, garantindo que metodologias inovadoras sejam reconhecidas, padronizadas e adotadas em larga escala. A experiência do Instituto Socioambiental (ISA) no projeto Carbono Nascentes do Xingu com o Carbon on Track evidencia esses ganhos: a combinação de sensoriamento remoto e amostragem em campo diminuiu custos operacionais, ampliou a eficiência na coleta de dados e fortaleceu a robustez técnica dos inventários florestais. Indicando um caminho para a mensuração florestal de projetos de carbono no Brasil, através de uma metodologia adaptada a realidade nacional.



imaflora.org/noticias



[Instagram.com/imaflorabrasil](https://www.instagram.com/imaflorabrasil)



[youtube.com/imaflora](https://www.youtube.com/imaflora)



[linkedin.com/in/imaflora](https://www.linkedin.com/in/imaflora)