

FOREST
CARBON
PARTNERSHIP
FACILITY

评估加速技术的手段 监控与报告的过程 验证排放减少 项目

报告关于下一代土地利用排放减少项目的监测、报告和验证方案报告，ASA (P178735)



WORLD BANK GROUP

©2025 国际重建与发展银行 / 世界银行

1818 H Street NW

华盛顿特区 20433

电话：202-473-1000

互联网：www.worldbank.org

这项工作是世界银行工作人员以及外部贡献者的成果。本工作中表达的研究发现、解释和结论并不一定反映世界银行、其执行董事会或他们所代表的政府的观点。

世界银行不对本工作中包含的数据的准确性、完整性或时效性做出保证，也不对信息中的任何错误、遗漏或差异承担责任，或対使用或未能使用信息、方法、过程或结论承担任何责任。本工作中所示边界、颜色、名称、链接/脚注和其他信息并不表明世界银行对任何领土的法律地位做出任何判断，也不表示对这种边界的认可或接受。引用他人著作并不表示世界银行认可那些作者所表达的观点或其作品的内容。

本文件内任何内容均不构成、不应被解释或视为对世界银行特权与豁免权的限制或放弃，所有这些特权与豁免权均特别保留。

权利与许可

本作品中的内容受版权保护。鉴于世界银行鼓励其知识的传播，只要在复制品中给出对本次作品的充分归属，本作品可以全部或部分用于非商业目的。

关于版权和许可事宜，包括子版权，应联系世界银行出版物，世界银行集团，美国华盛顿特区西北H街1818号，邮编20433；传真：202-522-2625；电子邮件：pubrights@worldbank.org。

封面照片：© Lisha Riabinina/Unsplash

评估加速监测、报告和验证减排计划的技术

报告关于下一代土地利用减排项目监测、报告和核查的下一代方案AS
A (P178735)

Naikoa Aguilar-Amuchastegui¹卢卡斯·格雷戈里·贝伦基安德鲁·巴特²，²卡塔丽娜·贝塞拉·利阿雷斯塔沃·加拉尔多
玛丽亚·费尔南达·哈拉米略·博特罗诺曼·基斯利奇，⁵瑞安·马特森，⁶胡塞·马里亚·米格尔·富恩特蒂斯莉
Peneva-Reed贝西特卢兹普玛维尔卡娜塔莉·桑切斯，⁶Muri Soares⁷赫西略·奥多里科尼古拉斯·奥斯特布尔，
马丁·佩雷斯·拉拉⁴胡安·图里加奥³安德烈斯·B·埃斯佩霍

1 [世界银行气候变化组气候变化资金动员单位 \(SCCFM\)](#) 2 [西尔维拉](#)
3 [水文气象与环境研究所 \(IDEAM\)](#) 4 [世界自然基金会](#)
5 [GeoVille](#)
6 [加州州立理工大学](#)
7 [莫桑比克农业和农村发展部 \(FNDS\)](#) 8 [亚马逊云服务](#)

致谢

本报告由森林碳合作伙伴设施（Forest Carbon Partnership Facility，简称FCPF）资助。FCPF是一个由政府、企业、民间社会和原住民组成的全球伙伴关系，专注于减少森林砍伐和森林退化导致的排放，森林碳储备的保护，森林的可持续管理以及发展中国家森林碳储备的提高，这些活动通常被称为 REDD+。

本报告利用世界银行与以下机构的持续合作：(1) 欧洲空间局（ESA）的全球发展援助计划（原名EO4 SD），(2) 加州理工大学数字转型中心，以及(3) Sylvera持续收集高质量体积数据的计划。

作者感谢以下审稿人提供的宝贵反馈：Fabio Cian，世界银行灾害和气候风险管理全球单位（IDURM）运营官员；Nagaraja Rao Harshadeep，世界银行环境专家团队（SENCR）首席专家；Tuukka Castren，世界银行森林专家团队（SENGL）高级专家；Tomas Harvey，全球森林观测倡议经理；以及Ann Howard，美国国家标准协会国家认证委员会验证和验证高级总监。



目录

清单：框图、图表、表格、地图和照片 vi
缩略语和缩写列表 ix
报告要点 x

I. 背景.....	
背景.....	
.....11 目标.....	
.....13 变化理论.....	
.....14	
II. 实施.....	
高质量原位数据.....	
.....17 生物量云计算.....	
.....18 数字数据架构.....	
.....19	
III. 数字架构解决方案.....	22
简单存储服务.....	
.....23 模型测试.....	
.....25 建议数据架构分析.....	
.....26 验证阶段数据处理解决方案的挑战.....	
.....27 基于通信方法的不效率.....	28 建议的
报表中心.....	
.....29	
第四章 结论.....	
L 学习到的经验.....	
.....31 建议.....	
.....33	
附录A. 高质量野外数据收集练习.....	35 附录
B. 高质量野外数据收集练习的分析与讨论.....	56
参考文献.....	63

清单：框图、图表、表格、地图和照片

箱子

1. 关于现有减排项目MRV流程的报道挑战.....	12
2. 加速现有监控、报告和核实流程的技术.....	13
3. 数字数据架构.....	19
4. 提出的在线报告中心.....	30

数据

现有的监测、报告和核查周期.....	15
1. 测试技术示意图.....	16
2. 数据湖的核心特性。.....	22
3. 简单存储服务网页界面的示例.....	23
4. 亚马逊网络服务清洁室界面的示例.....	24
5. 数字接口实现安全的计算能力（uTile）的实例.....	25
6. 展示已识别解决方案的模型接口.....	26
7. 图形茎图示例.....	36
A1. 陆地激光扫描点云的示例。.....	38
A2. 构建每棵树外部3D表示的步骤。.....	38
A3. 对1226棵活树地上生物量进行TLS-和异速生长法估计的比较.....	
A4. 横跨 GIL01-01 至 GIL06-01.....	40
地面激光扫描和机载激光扫描产生的点云.....	42
A5. 预测地上生物量与参考地面激光扫描的空间交叉验证.....	
A6. 估算.....	45
从地面激光扫描到无人机的地上生物质估计扩大规模.....	
A7. 激光扫描至航空激光扫描.....	47
由航空激光扫描得出的地上生物量预测的空间交叉验证.....	
A8. 与从无人机激光扫描得到的参照估计相比.....	48
展示实际与预测地面生物量值的散点图.....	54
A9. 将U-net模型的估算结果与莫桑比克国家森林清查估算结果进行对比.....	
B1. 减少项目领域.....	62

表格

地表生物量估计，通过地面激光扫描得出，包括密度和.....	
A1. 不确定性水平.....	39
用于评估地上生物量估计准确性的异速生长方程.....	40
A2. 无人机和空中激光指标描述森林结构.....	42
A3. 最终调整模型的数据统计.....	45
A4.	

A5. 利用无人机激光扫描获取的地面以上生物量估计，包括密度和不确定性.....46

A6. 最终调优模型的统计数据.....47

A7. 对感兴趣区域的地面以上生物量进行航空激光扫描，包括密度和不确定性.....49

A8. 为统计分析和模型开发获取的数据来源摘要.....51

A9. 从空中激光扫描映射感兴趣区域的像素中提取的建模输出的描述性统计.....54

A10. 与其他全球生物量模型相比，ASA模型在将生物量估计向上扩展到减排项目区域中的性能.....55

B1. CALM评估技术部署准备情况的评分标准.....59

地图

卫星图像显示该区域内感兴趣区域的1公顷和300公顷部分。

1. 赞比西省，莫桑比克.....18 高质量实地数据收集活动的地点.....35

A1. 地表生物量图叠加在卫星图像上.....39

A2. 从无人航空器激光扫描数据中提取的一组指标

A3. GIL0243 估计区域内感兴趣区域的地上生物量

A4. 吉莱国家公园，赞比西省，莫桑比克.....49 在感兴趣区域对地上生物量估计的不确定性

A5. 吉列国家保护区，赞比西省，莫桑比克.....50 东赞比亚排放减少项目区域地上生物量估算

A6. 莫桑比克.....52 东部减排项目区域地上生物量估计的不确定性

A7. 赞比亚，莫桑比克.....53

照片

陆地激光扫描数据收集在GIL01-01.....36

A1. TLS数据收集.....56

B1. 测量树木胸高处的直径。57

B2. 机载激光雷达.....60

B3. 混合型无人机用作无人驾驶飞行器进行数据采集。61

B4.

缩略语和缩写列表

ASA	咨询服务业与分析（世界银行）
平静	评估成熟度水平的标准（全球森林观测倡议）
CUA	正在评估的概念
企业资源计划（Enterprise Resource Planning）	ERP计划
欧洲航天局（European Space Agency）	欧空局
FCPF	森林碳伙伴关系设施（世界银行）
FNDS	Mozambique 农业和农村发展部
GDA	全球发展援助
ha	公顷（s）
IDEAM	水文气象和环境研究学院（哥伦比亚）
ISFL	生物碳基金可持续森林景观倡议
激光雷达（LiDAR）	光探测与测距（遥感技术）
m	米
MRV	计量、报告和核查
MT	公吨
NDVI	归一化植被指数
质量统计过程（Quality Statistical Process）	质量统计模型
REDD+	减少森林砍伐和森林退化带来的排放
均方根误差（Root Mean Square Error）	均方根误差
S3	简单存储服务
SAR	合成孔径雷达（遥感技术）
规模	通过降低排放量实现气候行动的规模化（世界银行）

报告要点

问题

在司法管辖范围内实施的REDD+项目中，例如世界银行的森林碳伙伴关系设施（FCPF）和生物碳基金可持续森林景观倡议（ISFL）下的项目，建立基线、收集和处理数据估计（测量）、报告碳减排情况（报告）以及验证和认证报告结果（验证）的过程过于漫长。

关键问题

本咨询服务分析（ASA）报告评估了加速地区性 REDD+ 计划测量、报告和核查（MRV）流程的潜在技术，重点关注提高效率、准确性、可扩展性和最终时间性的创新工具。

挑战性的MRV过程。 在REDD+计划下，当前的监测、报告和核查（MRV）流程冗长且复杂，导致减排验证和获取气候资金的延迟以及额外的不确定性。

突出挑战。 主要挑战包括各国方法的不一致性、高昂的成本和漫长的时间框架，以及对光学影像（通过卫星）的过度依赖。

测量排放系数。 在测量排放系数时面临的挑战包括收集现场数据的物流和成本问题、空间覆盖范围有限以及数据质量的不确定性。

活动数据收集问题。 卫星光学数据存在局限性，例如云层覆盖、对日光的依赖以及季节性变化，导致活动数据生产的延迟。

数据集成复杂性。 整合活动数据与排放系数复杂，涉及数据收集、存储、处理以及在遵守报告标准方面的挑战。

报告和验证延迟。 传统的收集和报告数据方法耗时费力，呈现监测报告和颁发减排信用额度存在显著延迟。

建议解决方案

技术解决方案。 建议的解决方案包括用于减少监测、报告和核查时间周期的数据管理工具，以及诸如激光雷达（LiDAR）、合成孔径雷达（SAR）和高分辨率卫星图像等技术，以改善一致性、准确性和精度。

创新的数据收集方法。 新型方法包括地面激光扫描、无人激光扫描和航空激光扫描，用以收集高质量的原位数据并提高生物量估算。

数字数据架构。 一个集中式的云服务和去中心化的“数据湖”平台有潜力解决与集成数据相关的挑战。

建议

在 REDD+ 计划中，加速监测、报告和核查过程的最简单机会是采用技术以加速报告、验证和核查流程。现成的数字技术也易于获取，以增强测量程序；然而，这些技术的实施需要仔细考虑现有系统、透明度和与特定国家需求的协调，以确保可持续性和效率。

建议有意采用新的MRV（监测、报告和核查）方法的实体（例如，标准制定机构和政府机构）制定一项政策，该政策应依据全球森林观测倡议的《持续评估成熟度标准》（CALM）框架制定，用于评估和纳入技术，并使其得以有效且具有影响力地使用。这可能包括启用探索练习，例如结合陆地激光扫描数据采集和树木及地块级生物量估计的练习，以及阐述将新技术有效整合到MRV过程中的路径。

一、背景

背景

世界银行（2021b）政策简报 *政策路径向第二代测量、报告和核查（MRV 2.0）* 揭示了森林碳伙伴关系设施（FCPF）和生物碳基金可持续森林景观倡议（ISFL）下的测量、报告和核查（MRV）周期过于漫长。根据世界银行（2021a）报告的发现，该过程延长，在许多情况下，即使在技术能力较强的国家，也需要数年才能投入使用。一旦运行，该过程依赖于一个复杂的测量系统，该系统在如何使用以及如何验证结果方面都产生了不确定性。此外，还需要长时间的复杂程序来整合遥感数据与现场测量数据，这阻碍了利益相关者有效应对温室气体排放驱动因素的能力，并导致潜在受益者申请和获取气候融资的能力延迟。

一些在简短文件中指出的主要挑战包括：（1）各国在方法论上的一致性和可比性不足；（2）高昂的费用和过长的耗时，这些问题因准确的低水平而恶化；（3）对光学卫星图像的过度依赖。针对这些挑战，研究表明引进数据管理工具能提高效率并可伸缩性，从而使实施MRV周期的耗时从数年降至数月。另外，研究还建议使用能够提高一致度、准确性和精密度的技术来辅助监督，具体包括LiDAR（即基于脉冲激光远程检测并用以测算距地球不同距离以生成三维图像的方法）；合成孔径雷达（SAR），用于绘制二维或三维地表物体图像，比如景观；以及高清卫星图像（见框1）。

这些MRV问题可能对希望获得基于成果付款的国家产生严重影响。减排产生与发行和支付之间的延迟将会很大，这会削弱国家和社区采取行动的积极性，因为他们的努力不会立即得到回报。此外，这样的时间滞后可能导致买家认为减排“过时”，从而使付款大幅折扣，国家获得的碳金融水平降低。

箱 1. 现有减排项目MRV流程报告的挑战

测量挑战

排放系数

排放系数是对特定活动向大气中释放温室气体速率的估计。它们传统上使用在实地收集的清单数据产生，这在偏远或难以进入的地区会带来物流和成本挑战——除了对估计质量及其代表性的担忧，这些都可能导致减排信用额的发放。这些挑战会对项目产生负面影响，因为它们在准备初步监测报告、努力改进以及降低估计准确性不确定性方面工作。地面测量方法限制了空间覆盖范围，可能无法提供大景观范围内森林碳储量的全面图景。这种限制可能导致数据覆盖范围出现空白，并减少准确的估计。此外，通过传统方法收集的数据的质量和一致性可能因现场人员的技术和经验而异。这种可变性可能影响碳储量估计的可靠性。

活动数据

光学卫星数据受云层覆盖、缺乏日照和季节性天气变化所限，同时其时间分辨率也有限（即重访和获取同一位置数据的所需时间量），所有这些都导致活动数据生产中出现时间滞后。平均而言，最佳情况表明，一个项目从报告期结束到收集、准备、分析和报告活动数据，至少需要六个月的时间。

数据集成

为了产生排放估计，活动数据需要与排放因子相连接。这种整合在数据收集、存储和处理方面以及在与审计过程相关的估计开发和符合报告标准方面都带来了复杂性。

报告与验证

使用传统方法收集数据、报告结果和验证减排需要花费大量时间——对于需要提交首份监测报告的项目来说，中位数为24个月，而验证、核实并最终颁发减排信用额度还需要额外12个月。所有这些都会对基于成果的气候融资获取产生负面影响。即使测量估计已经详细阐述，为了符合不同的报告框架，记录整个流程也需要大量的额外处理和格式化，这导致了低效率。此外，报告框架需要定期更新，这些更新难以传播，可能导致监测报告准备延迟，而这些报告通常缺乏支持性文件和证据，以证明用于报告减排的价值、方程和假设。

源：世界银行（2021）。

备注：为保证会计中的气候完整性，MRV标准（如FCPF和ISFL所使用的标准）根据“不确定性估计”对报告的排放量应用折扣因子，这是一种保守的方法，确保减排或清除量不会被高估。

目标

本咨询服务和分析（ASA）研究的目标是确定并介绍近期技术作为解决前述章节中概述的现有测量、报告和核查（MRV）流程挑战的方案，并评估这些创新技术满足该目标的容量和“准备”程度。最终目标是为一代MRV流程（MRV 2.0）提供概念验证，并确保得出的结论可以概括并适用于不同的国家环境（框2）。

盒 2. 加速现有监测、报告和核查流程的技术

测量技术

直接通过遥感技术估算生物量可以加速现有的测量程序。这项ASA研究解决了直接估算生物量时遇到的一些主要障碍。世界银行（2021a）指出，在森林测量中存在的主要差距之一是缺乏足够的高质量现场数据，无论是数字形式还是其他形式。这一点至关重要，因为此类数据是MRV过程中所有生物量估算的基础。理想情况下，应定期收集现场数据，作为国家森林调查的一部分，使用无偏统计方法提供无偏的生物量估算。目前，国家森林调查数据用于估算生物量，使用与生物量相关的现场参数，这些参数是通过破坏性采样（即改变或破坏标本的侵入性方法）开发的异速生长方程。异速生长方程已被确定为生物量估算中不确定性的主要来源之一。通过人工智能（支持向量机、卷积神经网络）和地统计学（克里金，一种插值方法）将生物量与基于卫星的遥感技术（合成孔径雷达 [SAR] 和光探测与测距 [LiDAR]）的数据相关联，被建议为有希望的技术，有助于克服生物量信息不足的不足。

报告与验证技术

确定了一种解决与数据集成相关挑战的潜在方案，即集中式云服务与去中心化、多功能的“数据湖”相结合，其中“数据湖”是一个集中式存储库，用于存储大量原始数据，直至需要使用（参见第3节，数字架构解决方案，包括图3）。

来源：作者根据世界银行（2021b）数据。

一个 所有ometric方程允许通过测量国家森林清查中变量之间的相关性（如树干胸高直径或高度与生物量之比）来估计树木水平上的生物量。所有ometric方程是通过进行破坏性采样来确定其测量值和干生物量的估计值来建立的。开发这样的方程非常困难，而且它们的代表性有限，特别是对于大树木，因为尽管它们在成熟森林中代表很高的生物量份额，但人们通常不愿意将它们包括在样本中。

变化理论

以下假设和假设支撑了创建第二代MRV流程的计划。

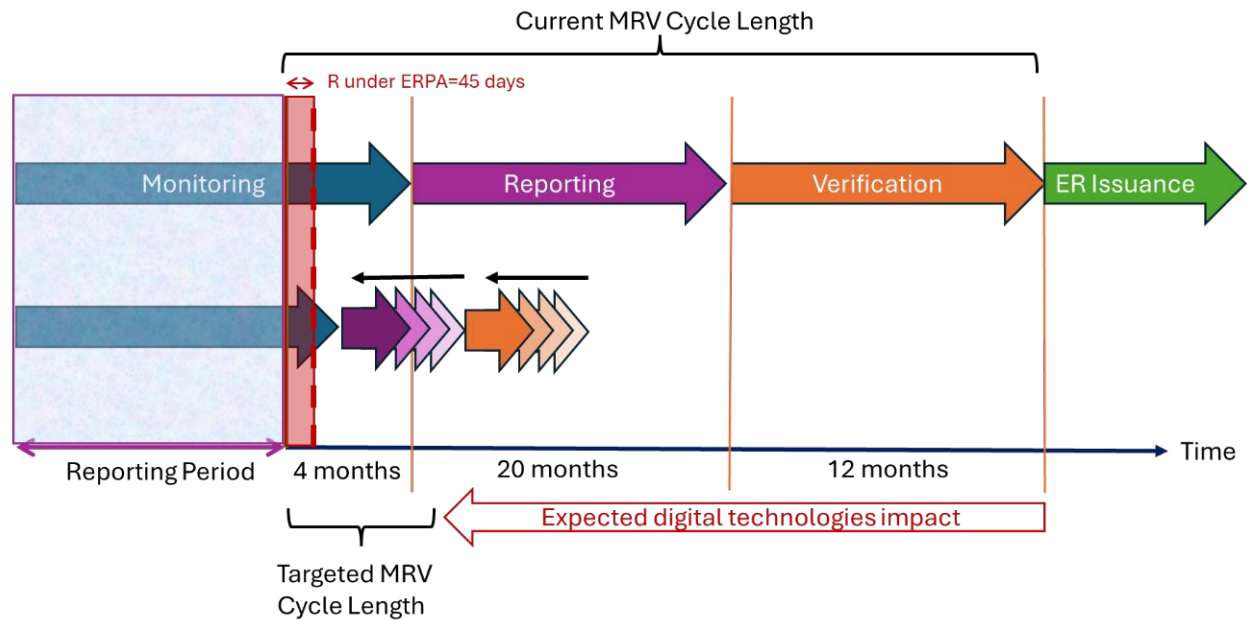
假设

1. 技术的新进展可以提高对碳储量和变化的及时估计能力——更重要的是，提高了准确性。2. 指的技术发展包括直接估计生物量的新可能性，生物量是一个重要的气候变量，它不仅为碳储量变化的直接估计提供信息，还影响其他重要的气候变量，如土地覆盖。3. 新卫星和空中数据的成本降低将促进前所未有的数据可用性，从而增强对生物量的直接估计。4. 创新方法的结合和数据的增加预期将通过以下方式克服估计碳储量的一些主要挑战：– 使碳储量能够以更高的频率（少于一年）进行测量 – 标准化碳储量的估计，使来自各种来源的数据兼容并易于整合，同时允许量化不确定性 – 减少生成、报告和验证估计所需的时间，因为MRV系统在几个月内而不是几年内即可投入运行，显著减少监测期结束后数据可用的时间滞后

假设

通过结合各种可用技术——包括新的遥感数据、地统计学和云计算——将加快FCPF和ISFL的监测和报告（MRV）周期，从而解锁碳金融市场方和各国所需用以实现气候变化缓解目标的碳信用额（图1）。

图1. 现有的监测、报告和核查周期



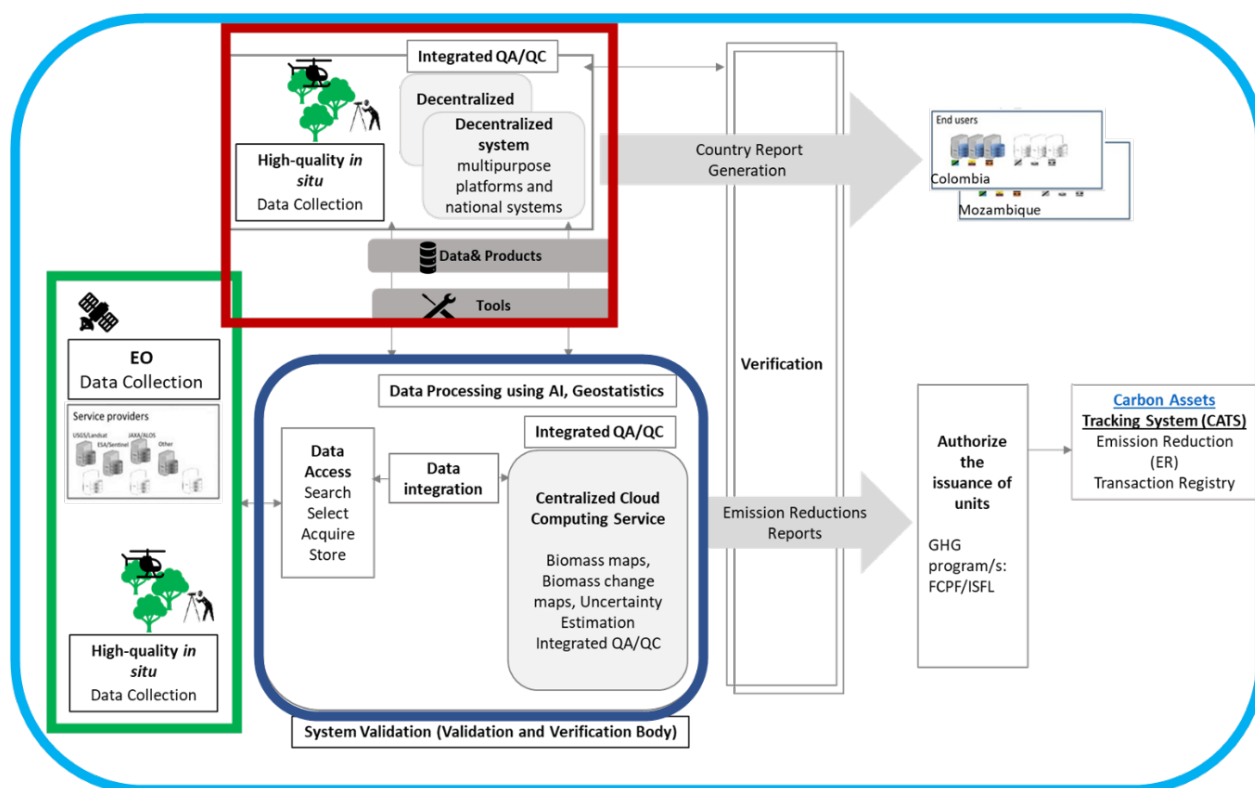
来源：由作者设计。

备注：当前监测、报告和核查（MRV）周期，预计在监测期结束后45天内报告，实际上所需时间更长。目前的中位数时间为24个月。这项研究旨在探索下一代土地利用ERP的MRV中，大幅缩短这一时间框架的替代方案。

II. 实施

为了在扩大规模之前评估其可行性和吸引力，选择了适用于MRV周期每个阶段的技术（图2）。为了实施每一项技术，亚洲开发银行（ADB）利用了世界银行与以下机构的持续合作：（1）欧洲航天局（ESA）在全球发展援助计划上的合作⁹（原名EO4SD）¹⁰，（2）加州州立大学数字转型中心，¹¹并且（3）Sylvera持续收集高质量体积数据的计划。¹²这种方法显著减轻了实施概念验证的成本。以下概述了每个目标和其相关的技术解决方案。

图2. 测试技术的示意图



备注： 红色方框展示了使用地面激光扫描（TLS）收集高质量野外数据时测量方案的示意图。绿色方框展示了测量生物量云计算时测量方案的示意图，通过机载激光雷达（遥感）、卫星数据及最先进的模型进行了扩展。深蓝色方框展示了测量和报告数字化数据架构的示意图。浅蓝色方框展示了完整的监控、报告和核查循环的示意图。EO = 地球观测；ER = 排放减少；FCPF = 森林碳合作伙伴计划设施；GHG = 温室气体；ISFL = 持续森林景观生物碳基金倡议；QA/QC = 质量保证/质量控制。

9 <https://gda.esa.int/>

10 <https://eo4sd.esa.int/>

11 <https://dxhub.calpoly.edu/>

12 <https://www.sylvera.com/>

高质量的现场数据

缺乏高质量的原位数据用于校准估计，在阐述基于遥感的估计时是一个主要问题。国家森林清查——通常是此类数据的来源——成本高昂且难以实施。这导致从业者寻求与森林的结构参数（例如，冠层高度）相关并且因此也与生物量相关的公开可用的遥感数据。然而，国家森林清查样地并不是为了获得遥感数据而设计的。结果，即使在样地样本被最优设计并实施的情况下，国家森林清查的测量周期也与MRV报告周期不一致。此外，在将样地级别的估计外推到“墙到墙”地图（其中每个像素代表一个单独的估计）时也会出现问题，这些挑战包括缺乏对森林多样性的表征、生物量与遥感参数之间相关性差、由于遥感数据中的空间自相关引起的估计偏差、模型偏差，以及缺乏如何量化与结果相关的不确定性的共识。这些问题在审计阶段进一步加剧。

本研究探讨了使用一套最先进的高质量原位数据集，遵循最佳实践。¹³ 为了通过遥感技术得出的生物量估计值，本意是为了规避（1）从样地级到卫星级（例如，整个ERP区域）外推数据覆盖的挑战，以及（2）使用异速生长方程从国家森林清查中估计生物量的局限性。美国土壤学会（ASA）还探索了一种在50,000公顷（ha）感兴趣区域创建数据协同的新方法。预计这些过程将提高估计值的准确性和偏差，以便在Sylvera同事的支持下，可以将其外推到更大的ERP区域。

新技术方法包括以下内容：

1. 一种结合地面激光扫描（TLS）与传统方法对六个一公顷样地进行的陆地存货，以克服所有ometric方程的偏差和代表性不足（图2，红色框）

使用无人机激光扫描（UAV-LS）在六个300公顷的区域收集数据，每个区域包含第1点所述的1公顷样地。

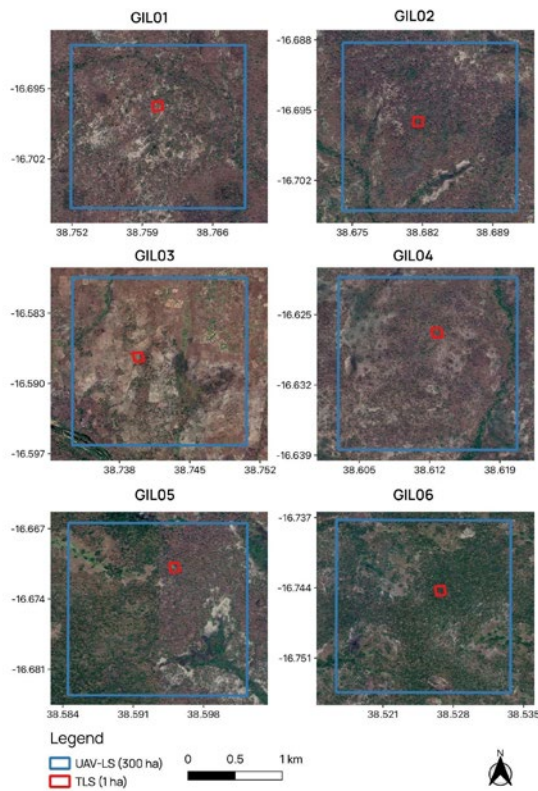
通过机载激光扫描（ALS）在50,000公顷森林中收集的数据，涵盖了点1中描述的1公顷小区域以及点2中描述的30公顷区域（图2，绿色方块）。

本方法的目标是通过使用多种手段对同一和扩展区域进行多次测量，以交叉参照、利用协同效应并提高数据的准确性。¹⁴ 简而言之，数据从六个一公顷的小地块缩放到了六个三十公顷的区域，最终扩展到有利的五万公顷地区。附录A中提供了在莫桑比克赞比亚地区的ERP区域进行的高质量田间数据收集活动的更完整、分步骤的描述；附录B中提供了对该活动的详细分析和讨论。

¹³ <https://forestplots.net/>

¹⁴ \u0007这一代数据收集是在与Sylvera和莫桑比克政府的合作下实施的。森林生物量参考系统为树木清点数据提供了支持，以确保该方法与验证协议相一致，并且数据可以集成到forestplots.net网络中，并支持数据共享安排的发展。

图1. 卫星图像显示了在莫桑比克赞比亚地区感兴趣区域中的一公顷和30公顷区域。



卫星图像来源：Maxar Technologies (2018)。

备注： 地图用蓝色描绘了六个300公顷的区域 (GIL01至GIL06)，用红色描绘了六个1公顷的小块 (GIL01-01至GIL06-06)，这些区域叠加在卫星图像上。

生物质云计算

作为提高数据质量 (在此案例中，为莫桑比克赞比亚的ERP系统) 的第二步，目前由FCPF实施——该研究探讨了如何将50,000公顷感兴趣区域收集的高质量数据与通过光学和主动传感器 (在一年内收集) 收集的全球数据集进行整合，例如合成孔径雷达 (SAR) 和激光雷达 (使用GEDI数据)。 ¹⁵ 这些模型可能被用来加速对生物质变化的监测。所测试的模型包括来自不同领域 (如人工智能和地统计学) 的综合预测和不确定性技术 (通过与ESA及其合作伙伴GeoVille的合作实施)。 ¹⁶ 并与莫桑比克政府。

15 <https://gedi.umd.edu/>
16 <https://www.geoville.com/>

数字数据架构

第三步旨在建立一个云基础设施，通过该平台可以进行数据存储、访问和处理，用于生成、修改和验证估算（框3）。重点是探索基于客户-服务器模式的云计算基础设施的开发可选方案。这种方法强调数据托管、与数据处理之间的链接、模型的文档化，以及排放、减排及其相关不确定性的估计。

一旦三种技术方法的实施完成，就与世界自然基金会合作，举办了为期三天的研讨会，所有团队成员都参与了此次研讨会，旨在确定所学到的经验和由此产生的建议。所采用的方法从构思到结果交付，重建了ASA研究的实施过程，强调（1）识别成功和失败以及（2）分析失败，这些分析既基于ASA的结果，也基于团队成员作为MRV专家的丰富经验。研讨会讨论的结果，以及与关键合作伙伴、利益相关者和森林相关MRV领域的领导者进行的讨论，为报告中提出的经验和建议提供了信息。

箱3. 数字数据架构

ASA 研究会将监测、报告和验证周期中的关键利益相关者聚集在一起，以确定具体问题领域，目标是为 MRV 数据访问、存储、处理和验证找到有针对性的解决方案。这些建议来源于易于获取的工具和技术，侧重于高级概念设计。主要目标是“降低风险”技术（那些不太可能受到可能反过来影响其部署或性能交付的变量的影响）以及开发在野外环境下加速部署的资产。评估构建一个可以加快数据操作以生成估计和报告的存储库的替代方案，涉及与加州理工学院数字转型中心的合作，作为其与亚马逊网络服务的合作的一部分。

一个成功场景被详细阐述，然后基于“客户痛点”分解为关键组成部分。
模块化解决方案根据以下需求针对每个痛点进行定制：

1. **方法上的灵活性。** 单一的方法无法解决不同国家环境之间的差异，因为所使用的方法和森林本身一样多样化。
2. **支持开源数据输入。** 各国需要能够利用现有的数据集，因此，最新收集和测试的数据不应该是默认的。模型分类器（用于识别森林特征）因生态系统而异，而最佳输入数据来源也因地区而异。
3. **模型参数。** 森林、森林砍伐和退化的定义必须作为模型参数加以考虑。

注意： 数字化转型中心与各国政府、教育机构和非政府组织合作，让数百名学生、教师和员工参与应对未来挑战；同时，它还建立了首个由亚马逊网络服务支持的创新云中心。

在审查了优先需求并讨论了潜在解决方案后，下一步涉及定义进一步技术探索的领域，具体内容如下。

数据生命周期与处理

在大多数“痛点”中的核心主题是缺乏一个中央存储库来存放并允许在整个MRV过程中处理数据，以及缺乏一个有效的流程来管理在整个MRV周期中处理的数据。为原型识别出的所需特征/能力包括以下内容：

- 展示如何将不同类型的数据流入受安全框架管理的中央存储库

- 该系统允许实现细粒度的访问。

- 展示如何建立流程以将原始数据“净化”为可用格式

- 展示如何通过运行自定义分类器的数据爬虫自动生成元数据。

- 在定义用于推断数据格式和模式的数据库集上

- 展示如何将替代数据源引入存储库，并将其与现有元素

- 展示如何使用单一的“事实来源”（即，一个单一的入口点，允许访问所有）

- 所需的证据以验证和核实估计值可能有助于下游流程和可审计性，从而简化当前流程的许多方面。

- 展示一个标准化计算机容器如何扩展以执行数据处理转换

- （即，超越当前本地化计算机硬件限制的梯度提升机器学习模型）

- 提供大量数据如何以有限的方式传输到云端的示例。

- 连接性、在合理的时间内，并且符合业务需求的成本。

- 展示目前用于MRV流程中的熟悉工具如何继续访问数据。

- 云拥有正确的访问权限

建模

一旦数据集被收集、来源确定并转换成可用的格式，它们就会被建模并用于估计和量化生物量的变化。生物量建模是一门不断发展的科学，需要合适的工具来运行模型、计算不确定性水平以及减轻协作负担。这项技术必须易于使用，并且拥有低门槛的建立标准，同时展示（1）如何使用一套通用工具轻松生成云基础设施，便于采用和启动，以及（2）如何访问开源地球观测数据，用于其他应用（如Jupyter笔记本环境中），包括访问开源模型框架以估计生物碳变化。

基于角色的访问控制和数据混淆

虽然将数据集中存储在一个位置解决了许多问题，但在提供不同级别的基于角色的访问权限以及模糊化原始数据的方法上却产生了潜在的问题。例如，那些得出某些结论的人需要了解数据是如何使用的，但不能访问底层数据源。其他需求包括（1）与他人合作分析集中式数据集并获得新的见解，同时不向彼此透露底层数据，以及（2）在云端应用基于角色的精细粒度访问权限。

验证与验证

验证和验证机构——用于审查方法论方法——传统上与源数据和计算分离/分割。采用一种将数据、计算与这些机构重新结合的现代方法，将能够使对过程、数据、模型以及用于估计生物量和计算减排所使用的方法论进行更透明的审查。需求包括：（1）证明能够在建模阶段重新运行分析，并伴随解释性单元格以配合与原始源数据相连的可执行代码部分；（2）如何对所有代码和数据打上标签以验证不可变性，并允许可复制的透明验证。

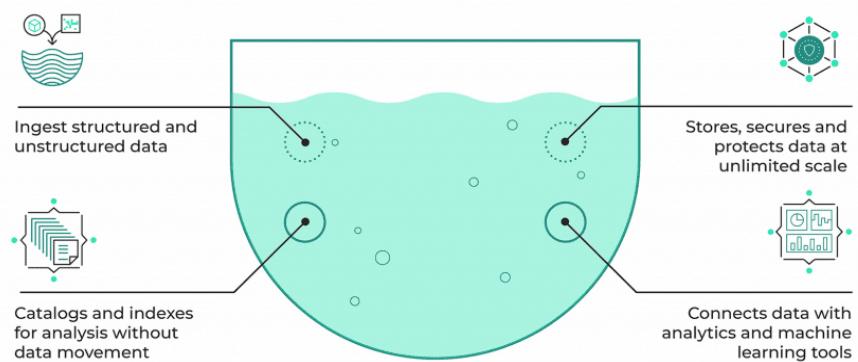
三. 数字架构解决方案

需求评估确定了终端用户对集中式数据仓库、数据共享和隐私的需求。¹⁷ 这些包括与以下相关元素：

1. 数据保留（即，避免潜在的删除）
2. 报告完整性（跟踪和保留所有变更和版本）
3. 保密性和访问权限（根据清查级别管理不同级别的访问，例如，审计员与公众）
4. 数据目录（元数据、源跟踪、自动标记、来源和关系）
5. 可扩展性（灵活且能够处理的存储容量和功能，以便随着数据量和类型的增加摄入新数据）

所有数据管理解决方案都需要能够以成本效益的方式与现有系统协同工作，并能够处理大量数据，这些数据使用不断变化的算法，并使用最先进的工具——在某些情况下，在连接性较差的环境中。基于这些要求，所识别的解决方案是数据湖，这是一个集中式存储库，旨在以原始格式存储大量数据，直到需要使用（图3）。

图3. 数据湖的核心特征



来源：Singman (2024).

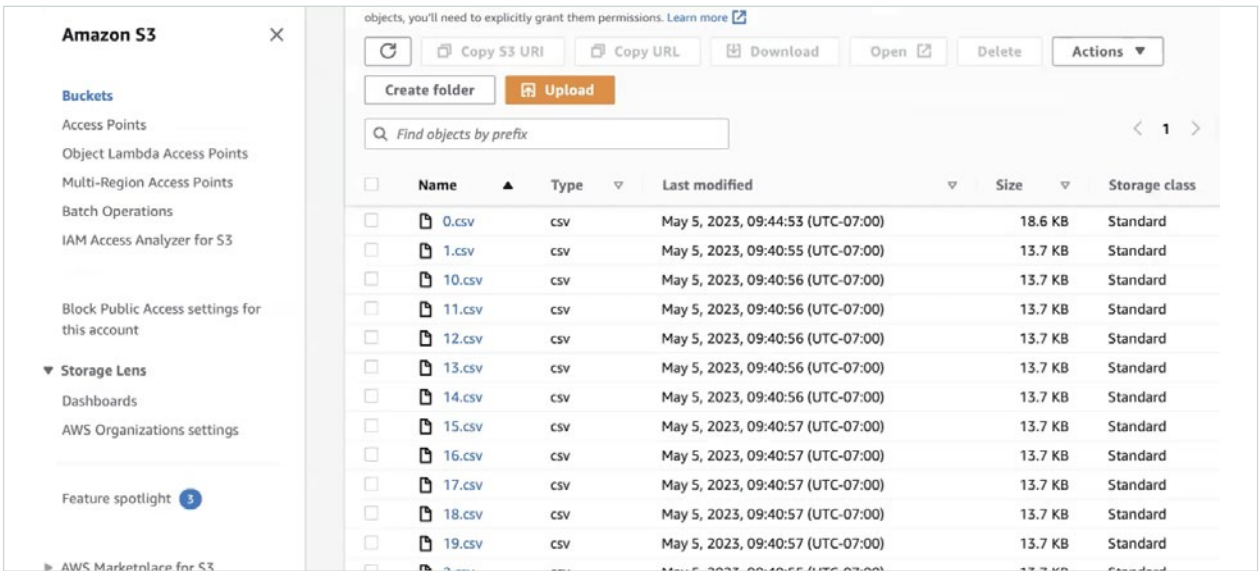
¹⁷ 因此，本研究关于数字解决方案的部分涉及到与亚马逊网络服务（Amazon Web Services）的合作，因此所测试的解决方案是该产品系列的一部分。然而，这绝不仅仅意味着这些产品是唯一可用的选择；实际上，**功能特性**是重点，而非**供应商**。

数据湖能够接受并转换到达的数据。¹⁸ 该系统具备一个摄取框架，必要时可标准化数据至通用存储库，允许输入数据转换为分析框架或模型所需格式，并实现数据整理以及提取特征以用于模型训练。原始数据的链接得以保留，以便在需要时进行更正和修改。数据湖可以包含使用其自动元数据生成能力构建的数据治理结构。这允许数据在仪表板、应用程序和人工智能模型中使用，以及在收集、组织、分析和融合数据的迭代过程中实现自动化——通常被称为“人工智能阶梯”。

简单存储服务

数据湖的确定基础是亚马逊网络服务提出的“简单存储服务”（S3）。各国对此选项表示了兴趣，因为它消除了他们提供硬件和现场技术支持的需求。典型地，S3是一个易于使用且经过验证的解决方案，已在广泛使用中，提供所需的存储量，已被证明是耐用的（具有自动备份），成本优化，并包括标准化的访问方法和细粒度安全策略及访问历史。数据存储在放置区域，但可以在跨区域访问（图4）。

图4. 简单存储服务网页界面的示例



来源：亚马逊网络服务。

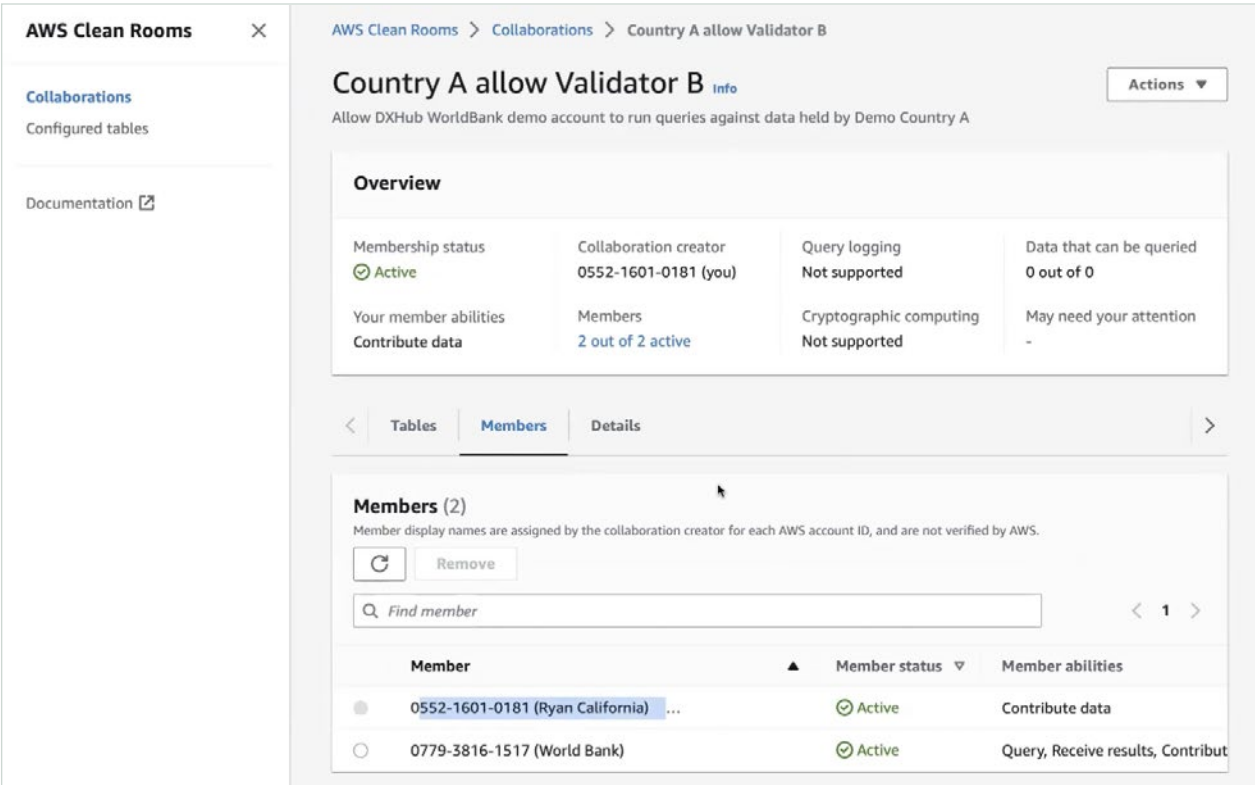
数据互连是通过无服务器数据集成服务（Amazon Web Service Glue）进行探索的。¹⁹ 这允许从多个来源轻松发现、移动和整合数据，并且与亚马逊的简单存储服务数据湖集成。对于协作数据分析，亚马逊网络服务（Amazon Web Service）的Clean

¹⁸ 例如，关于数据湖的示例，请参阅 <https://aws.amazon.com/solutions/implementations/data-lake-solution/>

¹⁹ <https://docs.aws.amazon.com/glue/latest/dg/what-is-glue.html>

房间²⁰ 探讨了因为它允许在集体数据集上安全地进行分析和协作，而无需协作者共享或复制彼此的底层数据（图5）。这对于验证和验证过程是相关的。

图5. 亚马逊网络服务清洁室界面的示例

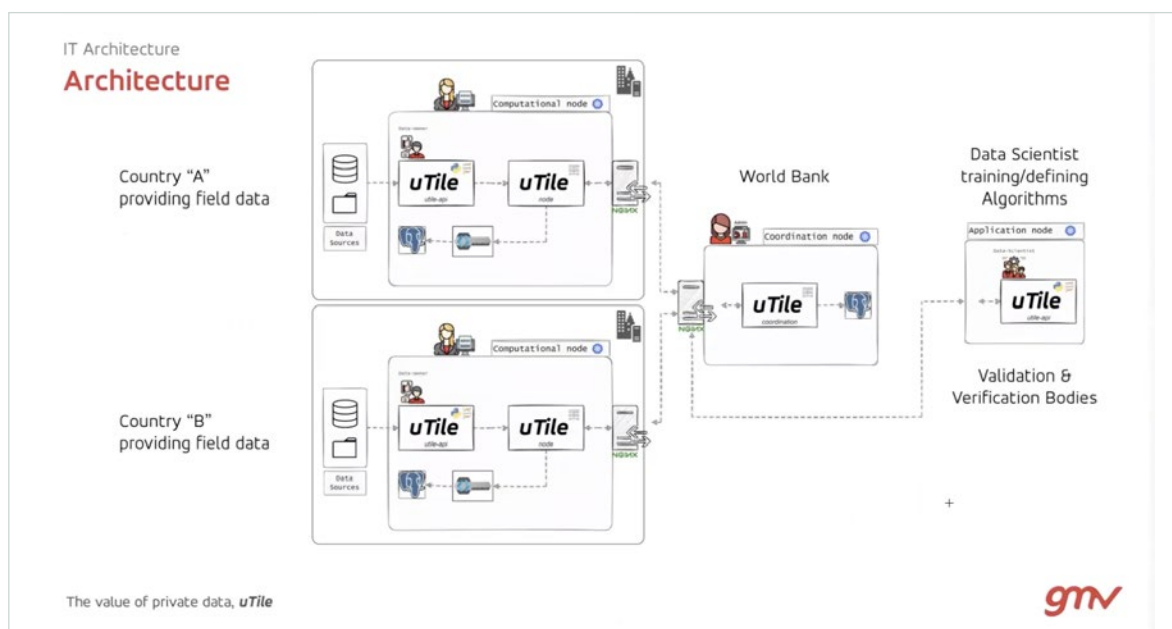


来源：<https://aws.amazon.com/clean-rooms/>

对于建模，使用Amazon Sagemaker²¹ 与S3数据连接，以便在自适应环境中根据特定的计算能力要求运行代码。例如，Sagemaker可以连接到存储在Jupyter笔记本中的代码。²² 另一个探索的建模选项是GMV的uTile。²³ 通过这种方式，分布式数据可以在不被暴露或移动的情况下安全且私密地被处理（图6）。

20 <https://aws.amazon.com/clean-rooms/>
21 <https://aws.amazon.com/pm/sagemaker/>
22 <https://jupyter.org/>
23 <https://www.gmv.com/en-es/products/cybersecurity/ut-ile>

图6. 允许安全计算能力 (uTile) 的数字界面示例



来源：<https://www.gmv.com/en-es/products/cybersecurity/utile>

建模测试

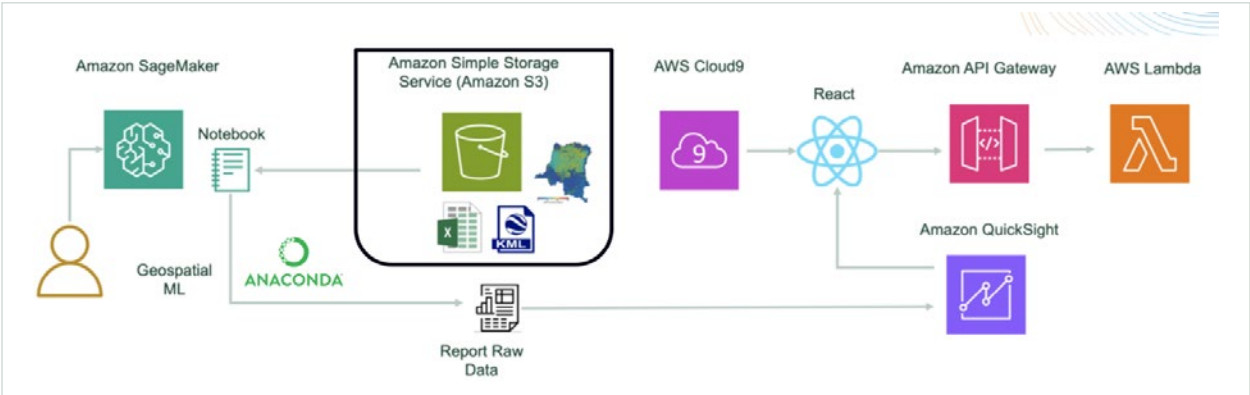
总之，在确定所有模型选项之后，通过一个特定的报告框架（图7）组合了一个测试模型，以基于现有的数据集和易于利用的建模方法来详细阐述并提供估计。在测试中，该模型被用于运行一个样本估计，以评估来自刚果民主共和国记录的数据在土地利用变化后的排放情况。以下要素被纳入其中：

1. 亚马逊Sagemaker通过在现有的Jupyter笔记本中运行代码，定义了数据处理所需的计算设置。这包括所有必要的软件和库，并设置在能够优化计算性能的亚马逊云服务Anaconda平台上。计算机平台的大小可以根据任务的大小进行修改；例如，在最终蒙特卡洛不确定性模拟估计排放减少的情况下，需要最大化计算能力。
2. 使用Sagemaker Geospatial简化了对开放访问卫星的访问，通过应用程序处理接口实现；绕过了数据特定连接设置的需求。
3. 数据使用（之前存储在S3存储桶中）包括生物质数据、土地覆盖分类数据和与Jupyter笔记本相关的样本分布数据。
4. 代码已运行，生成了用于输入到报告框架中的原始数据结果。

5. 亚马逊云服务Cloud 9被用作一个易于访问的环境来开发一个简单的报告应用程序，该应用程序使用REACT作为报告网站的基础，并由亚马逊云服务Lambda支持以在后台运行代码，以及亚马逊云服务应用程序编程接口网关来管理用户请求。

6. 最后，使用了亚马逊网络服务QuickSight来构建报告。

图 7. 展示所识别解决方案的模型界面



备注：ML = 机器学习。

生物质估计数据来源于生物质地图。土地覆盖类型及其转换数据来源于样本实地数据。该模型成功地在非常简单的报告界面中提供了排放系数估计（包括不确定性估计）以及每期报告的估计排放量。所有数据、存储库、代码和报告连接性均包含在内。

数据分析：拟议中的数据架构

所有评估的数据挑战解决方案都 readily available，包括数据存储、标记、保存、数据流动、模型输入和输出、差异化访问、估计和展示，ASA 研究表明，一个完全集成的测量系统是可能的。然而，需要注意的是，ASA 模型是在理想条件下构建的。相比之下，参与 FCPF 和 ISFL 的国家已经有了既有的系统，这些系统不仅通报了 MRV 流程，还涉及森林治理的问题。当前的系统也反映了现有的技术能力，以及诸如制度和法律安排等因素。

因此，国家们可以选择采用此ASA研究识别出的相关要素，以补充而非取代MRV团队熟悉的现有功能系统，从而实现定制化的模块化方法。存储系统被突出为最理想的要素，因为克服FCPF和ISFL的MRV周期现有挑战需要平衡技术进步与透明度和满足特定国家需求之间的需要。最高优先级的目标是确保MRV系统有效发展，遵循环境监测目标，适应地方能力，并且在整个项目生命周期内具有可持续性。

数据验证阶段数据处理解决方案的挑战

MRV流程需要遵守报告标准，同时也要保持透明度和可审计性。因此，将MRV系统与FCPF的或类似的方法论框架和验证标准相一致，不仅仅是一个程序需求，而是一项战略 imperative。这种一致性保证了验证过程的完整性，确保报告的排放减少既可信又准确反映。这个过程涉及国家机构实施MRV系统，将全球标准适应于当地环境，同时保持技术质量和可靠性。

与验证和审核机构进行的讨论表明，一个数字平台既能促进也能扰乱验证过程。验证者需要一种透明的方式来评估报告的估计值，以及一种简单的方式来获取证据和请求澄清。能够直接访问源头并使用足够访问的汇总数据重建估计，包括内置版本控制，将改善该过程，同时同时为验证机构建立信任。具体要求包括以下方面：

1. 一个用于输入数据的单一系统，其中所有相关信息都可以被记录、存储或链接（这意味着一个单一的数据存储库或多个具有互连性的数据存储库，允许对版本进行控制）。
2. 展示特定报告是如何以及使用哪些数据生成的能力。
3. 内置版本控制，以便可以追踪任何数据修改。
4. 审核报告版本的能力。
5. 系统记录数据准确性及不可更改性的核对能力，以最少的人力物力。
人类错误、操纵或变化的机会。
6. 允许验证者/验证者获得第三方系统访问权限的能力，包括验证者对系统中的问题进行标记/评论的能力，以促进更易于跟踪。

整合复杂的数据处理方法，如人工智能，在保持透明度、准确性、完整性和一致性方面带来挑战，这些都是MRV流程必不可少的，尤其是在验证阶段。这些系统的复杂性往往使审计和了解决策过程、假设及潜在的偏差来源变得困难。这些挑战导致：更多而非较少审计人员的发现，这使得核查（MRV）团队在提供使用系统未偏倚的合理保证水平方面需要做更多工作。

此外，除了FCPF和ISFL的要求之外，数字系统还涉及额外的合规标准，例如ISO 27001第4.3款关于标准安全技术的条款，这将反过来为MRV团队和审计师增加能力要求。请注意，这项ASA研究中并未评估对数字标准的遵守。

通用现成解决方案可以根据全球森林观测倡议的持续评估成熟度水平（CALM）标准被认为是完全可操作的。²⁴ 这些数据被用于收集和處理FCPF和ISFL的测量和报告组件。在验证阶段的使用已被证明是可行的，但随着系统转向标准领域，合规性可能需要额外的要求。

基于沟通方法的不效率

ASA研究指出，在FCPF和ISFL的框架下，现有的报告和核查流程基于使用的通信方法效率低下。具体而言，使用基于文字处理的报告模板（使用Microsoft Word）来编写监控报告和核查发现，在提交之前无法确保完整性的任何保障，也无法保证与报告估计的证据来源的联系，也不能促进国家团队和验证核查机构之间的交流。此外，FCPF和ISFL都是试点项目，因此模板可能需要更新，这要求报告各方保持对版本和修改的同步。这导致了重大的交易成本，不用说，所有参与MRV循环的各方都感到沮丧。在第一份监控报告下的报告和核查的平均时间是18个月——这明显表明需要改进。

另一个识别出的低效点是（持续变化的）现有的MRV报告模板。各国需要将测量结果输入到该模板中，而该模板又遵循标准。验证工作基于与该模板关联的监控报告进行。ASA研究得出结论，这些耗时的人工处理过程可以通过使用数字报告模板来改进，这种模板可以减少数据冗余并允许数据更加动态和一致地获得和审核。根据源数据，可以按需生成动态报告，并且这些报告验证起来将会更加容易。

识别出的需求包括以下内容：

1. 展示报告作为动态网络应用程序的外观和功能，该程序可以生成图表、表格等。

展示技术框架，这些框架允许将输出编译成模板和格式，该模板和格式源自中央模型结果存储库。

3. 展示动态报告，这些报告直接反映来自模型输出的数据，而不是通过“复制粘贴”，因为这种方式容易迅速过时。

促进不同报告间相关数据的转移和互联性——例如，非变量参数、方法描述应自动纳入后续报告中。

3. 文档格式变更，需要重新措辞以符合修订后的输出标准。应根据报告要求自动生成标准化输入，以消除重复编辑、文字处理和格式变更的负担。

²⁴ 全球森林观测倡议是森林MRV（监测、报告和核查）研究、能力建设、数据和方法指导的领先组织。CALM借鉴了NASA的应用就绪等级概念，来开发与REDD+ MRV相关的“评估中的概念”（CUA）。

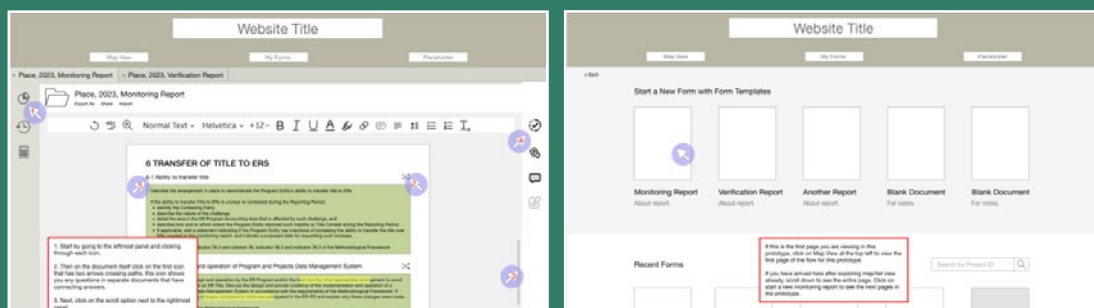
拟建报告中心

ASA 探讨了开发一个报告中心的可能性，该中心将满足 FCPF 下的报告和核查要求，同时解决数据生成、处理和存储相关的问题。这导致了测试网站（实际上是当前模板的数字版本）的开发，该网站整合了报告和核查过程中所需的互联性和功能水平——这构成了对 MRV 过程需求处理方法的一种范式转变，而传统上 MRV 过程的需求处理通常从监测组件开始。ASA 探讨了报告和核查过程中所需的互联性和功能水平如何可能促进整个监测和报告周期的修订，同时提供提供反馈、收集回应和跟踪报告文档更改的手段。

作为 ASA 的一部分，基于 FCPF 的报表模板设计了一种新的报表模板。这被证明是测试过的解决方案中最有希望的部分，因为它为团队提供了必要的格式和互联网连接，以便使用代码、算法和电子表格输入、操作、更新和纠正数据，同时使审计师能够沟通以提交发现结果（框4）。与一个完全集成的系统相比，实施成本将微乎其微，可以在短期内实施，并立即对 FCPF 和 ISFL 的项目产生积极影响。这可能是一个特别及时的资源，因为银行的 MRV 团队目前面临着 24 份 FCPF 和 12 份 ISFL 的报告，以及随着项目进入 SCALE（通过降低排放扩大气候行动）管道而出现的新报告。

第4节 建议的在线报告中心

提议的报表中心作为一个集中的系统和管理库运行，其中可以启动、保存和修订相关报表，然后进入验证阶段，在此阶段报表可以进一步修改、验证、跟踪，最后发布。在启动新的报表阶段时，可以从先前报表中整合信息，降低目前使用基于文字处理的方法的交易成本。下面的界面可在 <https://xd.adobe.com/view/af9dcb8e-1d9a-475e-916e-1ff83e1fd862-face/> 访问和探索。



报告和验证流程的基本方面是透明度。通过将报告中的公式与其关联的源数据和代码连接起来，该界面允许第三方审计员完全重建估算的计算。这种连续性一直延伸到在实地收集的输入数据或通过遥感评估的数据，包括访问处理代码和数据存储库。

在MRV流程中，最大的障碍之一是报告和标准管理团队与报告、验证和核查团队之间相互作用的迭代性质。这些沟通通常通过（清洁并跟踪的）文字处理文档以电子邮件的形式进行传输，并附上相应的答案进行记录。这一繁琐的过程产生了大量的电子邮件信息和报告版本，同时带来了大量的混淆和潜在的错误。

相比之下，所提出的在线报告中心提供了一个实用、安全、易于使用的解决方案，该方案将加快流程，同时保留报告的追踪版本、对查询的回应以及发现的开闭记录。

来源：由作者设计。

IV. 结论

经验总结

结合创新技术——包括遥感、地理统计学、人工智能和云计算——构建下一代监测、报告和核查（MRV）系统，无疑将加速获取气候资金的过程，并使政府和利益相关方更容易监测其森林以及相关环境政策的实施。然而，实现这一目标需要时间，并且存在许多限制，如下文所述。

利用地面激光扫描。 通过地面激光扫描收集数字体积数据将提高树木和地块水平的生物量估计精度。然而，数据收集和数据库仍在建设中，分析方法尚未成熟。将地面激光扫描作为现场方法或用于增强异速生长方程是一个中期至长期的工作，因此数据收集的速度不一定比传统国家森林资源调查方法更快。因此，无法使用这种方法来指导FCPF和ISFL下的当前银行项目工作。

直接利用地图估算生物质。 目前尚无法将生物量直接估算纳入FCPF（森林碳封存与减排机制）和ISFL（国际森林资源评估）的MRV（监测、报告、核实）流程中。用于从地面数据外推到更大面积的数据集会在模型中引入偏差，且目前可用的光学和SAR（合成孔径雷达）数据集在高生物量区域信号饱和。预计即将有新的卫星帮助解决这一问题，包括携带P波段SAR的卫星，这种SAR在穿透树冠方面更为成功。ESA（欧洲空间局）生物量和NASA-ISRO（NISAR）任务²⁵预期这些限制将通过商业替代方案如TandemX得到帮助。²⁶ 世界银行与马里兰大学和NASA合作正在探索。

使用机载激光雷达数据。 尽管用于将基于现场样地数据升级为卫星数据的机载激光雷达数据大大减少了由外推引起的不确定性，然而，根据最近关于国家森林清查样地数据与易于获取的全球树木高度和生物量产品之间互补性的发现，它尚未被证明对于MRV系统是必要的。

生产区域生物质估计。 如何产生区域生物质估计，包括不确定性估计，仍不明确，这可能会影响审计过程。GFOI正在努力制定基于近期出版物的良好实践指南。然而，建议使用CALM来部署MRV技术。

使用数字数据接口。 数字数据接口可以构建以满足测量需求，但必须遵守相关附加标准。

使用数字报告界面。 数字化报告接口有可能缓解并加快报告和审计流程，不受天气、人力资源和机构能力、透明度需求以及现有国家体系兼容性等变量影响。

²⁵ https://www.esa.int/applications/observing_the_earth/futureeo/biomass

²⁶ <https://tandemx-science.dlr.de/>

空中数据成本下降。 该假设认为，新卫星的引入和空中数据（尤其是无人机数据）成本的下降将导致前所未有的数据可用性，以支持生物量估算，这一假设尚未得到证实。然而，如Málaga Durán (2024) 报道，基于国家森林调查样地数据的地区估算校准的全球数据集易于获取，并应予以探索。

数据可用性提升。 尽管用于将生物质估计量提升至区域级别的数据集的可用性使得生物质模式能够更频繁地得到监测，各国已经开始生成与通过其他手段（例如，用于分层方法的地图）产生的生物质估计量相关的森林砍伐和森林退化层。然而，检测生物质模式与实际测量和量化水平有显著差异，尤其是在报告标准下。在很大程度上，当前的报告框架最多要求每半年报告一次，这消除了进一步增加频率的需要。相比之下，鉴于每日遥感数据的更高可用性，使用遥感方法进行早期预警系统，以提供设计和政策实施的信息，在大多数森林国家已成为标准。

标准化碳储量的估计。 标准化碳储量估算的目标，以使来自不同来源的数据兼容并易于整合，以及更准确地量化尚未确定的误差，仍然难以实现。ASA 研究证明，即使在使用类似输入数据集的情况下，也有许多方法可以估算生物量。最终，为了促进数据的可比性和互操作性，所需的是透明度，包括其特性和获取方式。标准化估算的想法基于理想参考估算，但新方法的发展使得参考标准估算的存在更像是一个乌托邦式的理想而非现实。与其标准化估算，不如标准化估算的使用，这应该基于它们相关的特征。所使用的标准应既定量又具体。例如，对于所有树木年龄相同的单种植物群落，其平均生物量估算将比每公顷有400多种物种的热带雨林更准确。从定量角度来说，两种估算类型中，种植估算将更优越，因为它将更准确；然而，从定性角度来说，雨林估算两种类型中更受欢迎。在这种情况下，这种背景可以告知估算与MRV框架之间的关系，以及如何解释不确定性。鉴于国家和森林的多样性，标准化既不可能也不必要。

缩短生成估算所需的时间。 良好的数据基础设施与报告框架相结合可以使MRV过程中的报告和核查阶段大大加快和更有效率，因为MRV系统可以在几个月内而不是几年内投入运行，并且监测期结束与数据可用之间的时间滞后要短得多。这一前提得到了ASA研究收集的证据支持。

总之，ASA 研究强调了仔细考虑新技术的使用的重要性。研究强调了需要方法及设备既新颖又成熟，作为尽可能减少意外情况之手段。在整个 MRV 过程中利用最新技术会增加失败风险，而且并不能解决现有挑战，反而增加了产生新挑战的可能性。

建议

最简单加速REDD+项目中MRV流程的机会是在报告中融入技术以加速报告、验证和核实。国家团队、支持机构、标准管理人员以及验证和核实机构都同意这一点。现成的数字技术可以轻松用于增强测量程序。其实施需要具有国家特色并确保与现有系统的互补性。所提方法的长期可持续性和其与国家系统的整合至关重要。与现有国家森林监测系统的协调性是另一个必要组成部分，因为新系统不能破坏或取代制度、政治、法律和技术安排。国家测量系统是多功能的，并提供了多个与森林相关的方面信息，包括其管理和衍生资产及收益。

使用新型技术可以加速测量过程，但同时也需要满足在估计和系统中实现合理水平无偏见的保证要求。可能需要将额外的标准应用于系统本身。在官方MRV流程中开发的方法的使用应逐步淘汰或推迟，直到对其发展和使用完成评估。对于新方法融入的深思熟虑的过程需求明确，包括为估计的生产者、使用者以及评估者建立能力。了解方法的局限性也很相关，尤其是在透明度、一致性（尤其是考虑参考期时）、可重复性和总体上无偏见等方面——所有这些都需要能够被评估。建议使用CALM作为指导工具。

生物质资源制图已摆上桌面十多年。其预期用途涵盖从增强对生物质分布的理解到为估算排放因子提供信息，再到直接估计变化。然而，关于如何估算和将不确定性纳入排放估计中，仍缺乏共识。迄今为止，尚无关于如何利用地图进行碳核算的指导。这种情况因大量使用不同数据输入和方法的地图而加剧，这需要在地图选择上具有明确的指导。基于此，全球森林观测倡议正在开发一个过程，用于提供关于如何正确使用地图的指导。

随着碳信用额需求的增加，提供高完整性减排方案的相关性日益凸显；然而，近期事件展示了实现此类减排的挑战性。REDD+项目，如FCPF和ISFL下的项目，已经为提供其核实的减排量做出了重大努力，但这一过程耗时较长。这项ASA研究发现了世界银行在加速MRV（监测、报告和核实）过程方面可以探索的替代路径。这些路径与普遍认为通过由人工智能支持的自动化监测和测量系统可以实现效率和及时性的观点相悖。

通过数字架构促进REDD+项目的验证和核实过程。范围的改变展示了数据流和管理方面的互操作性，始于用于向审计员提交报告的模板及其与之的互动。这种方法得到了报告制作者、审计员以及团队成员的广泛好评。本报告中所描述的此类通信中心将显著降低报告和核实流程的时间和成本负担，同时提高效率和透明度。ASA参与者建议开展一项试点研究。

对于世界银行，建议制定一个基于CALM框架的政策，用于评估和整合技术，并促进其有意义的和有影响的使用。这可能涉及双管齐下的方法：

1. 启用探索性练习，例如结合陆地激光扫描数据和树以及地块层面的生物质估计
2. 详细阐述将新技术有效整合到监测、报告和核查（MRV）流程中的路径

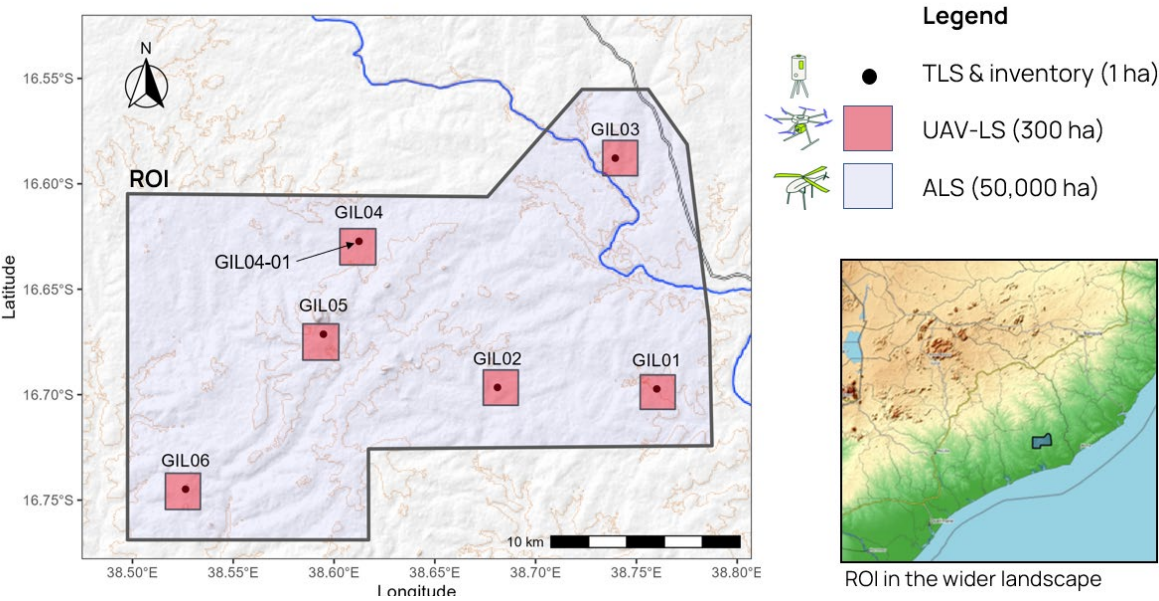
这些方法应优化资源使用，同时保护各国免受勘探阶段可能出现的失败的影响，并避免导致不切实际的期望（如狂热周期所示）。²⁷ 因此，建议支持客户采用现成的新数字数据技术、工具或组件，这些可以补充现有系统中正在使用的部分。

²⁷ <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>

附录A. 高质量现场数据收集练习

在莫桑比克ERP的吉尔埃国家保护区和缓冲区内的5万公顷感兴趣区域内，进行了一次高质量的实地数据收集活动。该活动属于FCPF（森林碳 Partnership for the Americas）基于结果的支付组合（图A1）。

图 A1. 高质量实地数据收集活动的地点



备注：区域范围内获取了航空激光扫描（ALS）数据；使用低速飞行的无人机激光扫描（无人机激光扫描）数据在六个300公顷的区域（GIL01至GIL06）中采集；并且进行了地面激光扫描（TLS）。数据在这些区域内的六个一公顷地块（GIL01-01至GIL06-01）上收集。

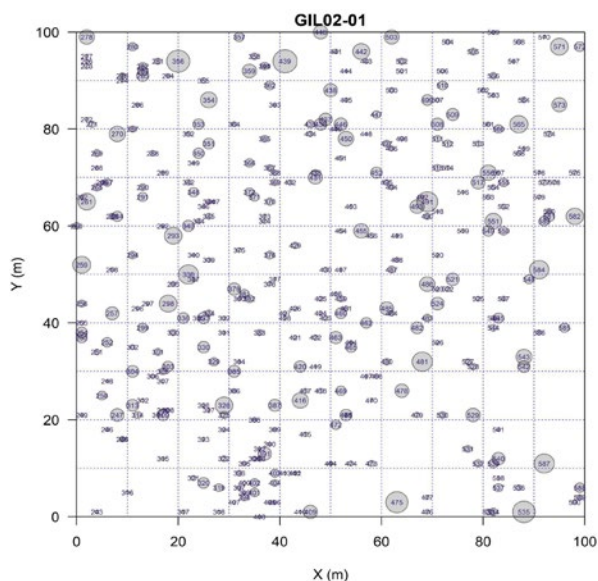
陆地激光扫描数据的获取与处理

TLS数据是从六个已建立的1公顷森林样地中收集的，这些样地特别选定，以代表该地区的森林，使用RIEGL VZ-400i扫描仪进行收集²⁸（图A1）。这六个图使用RAINFOR定义的协议建立，符合地球观测卫星委员会地上木质生物量产品验证良好实践协议（Duncanson等人，2021年）。对于每个一公顷（平面）图，主轴分别沿x轴和y轴向北和向东对齐，并用镀锌杆标记。

图A1. GIL01-01地区的地面激光扫描数据采集



图A1. 图例：一种绘图茎图



备注：这个例子是针对 GIL02-01 的。每棵树的树干是代表以树干直径缩放的圆形胸高处，覆盖着每个独特的树木标识或树木标签。

²⁸ <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/48/>

对于这些图中的每棵树，如果树干直径大于或等于10厘米，则收集了以下数据：

1. 通过周长/直径卷尺测量茎直径
2. 枝干直径的测量点——地面以上1.3米 (m) 或支撑以上0.5米
3. 分类学身份，由植物学家确定
4. 在子图 (即上面描述的x-y) 中进行坐标配对
5. 相关的RAINFOR定义的田野工作数据库代码及注释

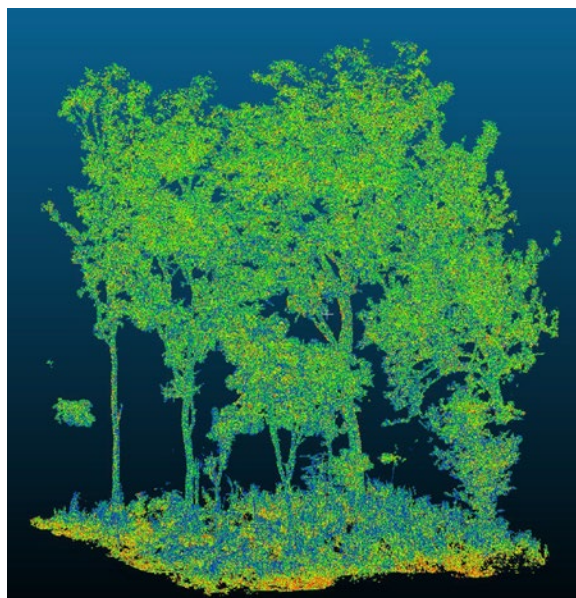
对每棵树通过分类学身份和全球木材密度数据库 (Zanne等人，2009年) 中可用的条目平均值分配了基本木材密度估计值。优先级顺序为物种、属或样地级别 (分别对应于1,406棵树木的84.4%、14.2%和1.4%)。最后，使用分类学名称解析服务对分类学身份进行了交叉核对。²⁹ 对印刷错误进行了纠正。

地面激光扫描结果

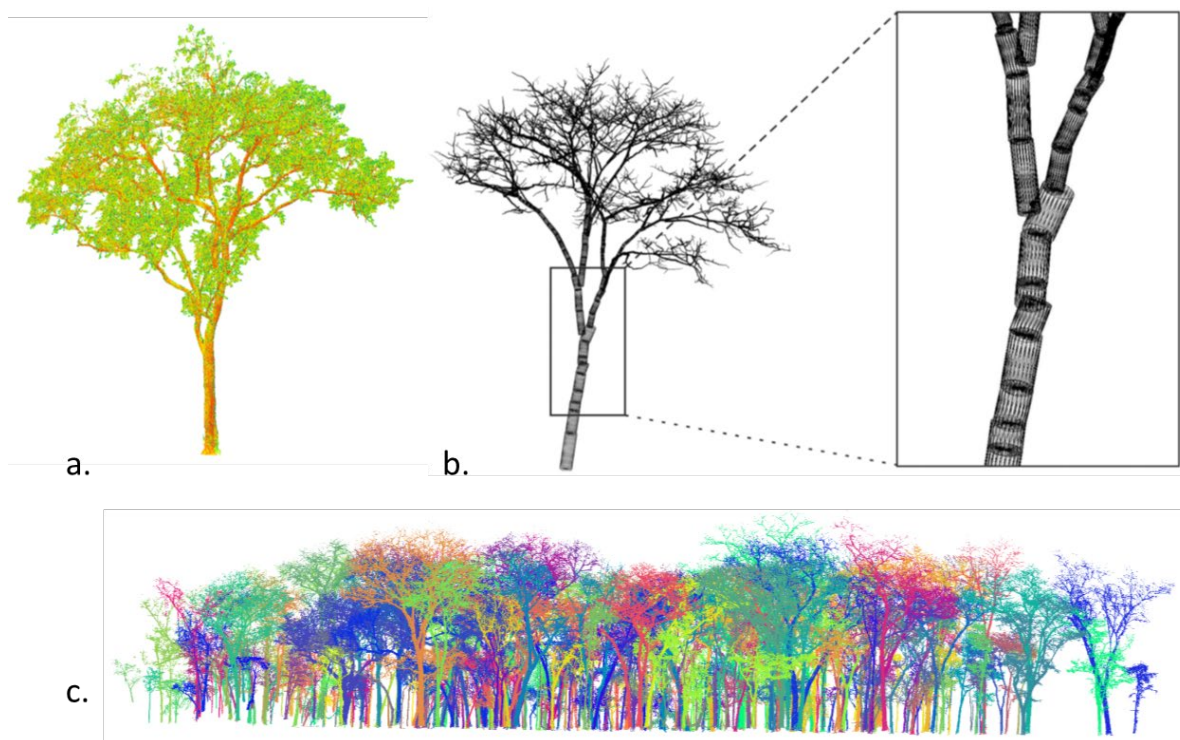
TLS点云收集提供了六个一公顷样地内每棵树的完整外部3D结构表示 (图A2)。每个激光点被标记为木材、叶子、粗木质残留物或地形，使用基于Krisanski等人 (2021) 描述的方法开发的Sylvera PointNet++模型进行标记。这个深度学习模型 (Qi等人，2017) 根据给定点云内的各种特征为每个点分配类别概率 (图A3，面板a)。接下来，使用Sylvera开发的基于图的方法对木质点进行聚类，将它们聚类并分配给特定的树 (图A3，面板b)。存货数据被用于评估点云分割的质量 (注意，必须在两个数据集中记录相同数量的树木及其位置)。任何差异——例如使用国家森林资源调查方法和从地面激光扫描数据中估算的树木数量之间的差异——都被重新评估和解决，突出了在数据处理后需要进行整理工作的必要性。然后为每棵树构建了一个定量结构模型 (QSM)，包括体积估算和存货数据的组合 (图A3，面板c)。这确定了树种并分配了木材密度，有助于在单棵树级别上估算生物量。

²⁹ <https://tnrs.biendata.org/>

图A2. 陆地激光扫描点云示例



图A3. 构建每棵树外部3D表示的步骤

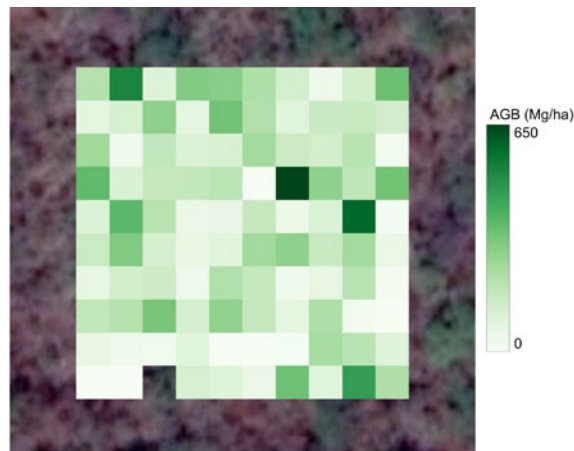


面板a. 3D表示树木的叶子和木质部分

图面板 b. 个体树木木质成分的体积模型

面板c. 样本横断面位于调查的六个一公顷样地之一的树木

A2. 地表生物量图覆盖在卫星影像之上



QSM圆柱体被用于创建每个单元格内每棵树的地上生物量图，该图基于TLS数据，分辨率为10米（图A2）。为了将QSM导出的木质体积图转换为地上生物量，根据所涉及树木的分类学身份，将圆柱体分配了一个基本的木质组织密度（干质量除以绿色体积）。位于地块外但树枝侵入地块的未识别树木圆柱体被分配了一个地块水平的底面积加权平均木材密度。在库存数据中被识别为死亡的树木被排除在估计之外（表A1）。

注意：这个示例是为GIL02-01。

地表生物量在六个一公顷样地（GIL01-01至GIL06-01）中，以568像素（10米分辨率）的面积计算——相当于5.68公顷——达到了458.6吨，平均密度为80.7吨/公顷。密度范围从GIL03-01的低至1.01吨/公顷，到GIL02-01的高至165.3吨/公顷。地表生物量密度在样地水平上的相对不确定性（在90%置信区间内）小于估计值的15%。唯一的例外是GIL03-01，因为密度异常低（1.01吨/公顷），估计值的相对不确定性达到了172.5%。所有六个样地总密度的不确定性为6.1%（4.9吨/公顷）。

表A1. 通过地面激光扫描得出的地上生物量估计，包括密度和不确定性水平

图	通过地面生物量获得的地面激光扫描			像素数量 (10米像素分辨率)	
	总 (MT)	密度 (单位：吨/公顷)	不确定性 (每公顷/公顷)	总计	非零
GIL01-01	47.7	56.1	7.9 (14.0%)	85	85
GIL02-01	163.6	165.3	17.6 (10.6%)	99	99
GIL03-01	1.19	1.01	1.8 (172.5%)	118	17
GIL04-01	57.6	56.5	9.7 (17.1%)	102	90
GIL05-01	80.2	94.4	13.3 (14.0%)	85	84
GIL06-01	108.3	137.1	18.4 (13.4%)	79	79
总计 (汇总总数)	458.6	80.7	4.9 (6.1%)	568	454

注：估计值反映了90%的置信区间。零像素表示在该像素内没有观察到地上生物量。MT = 公吨；ha = 公顷；m = 米。

比较使用激光雷达和生物量方法对地上树木尺度的估计

为了评估估计水平提高的程度，使用了对称方程对六个样地中清点的1,226棵存活树木的地上树冠层生物量进行了估算。本分析考虑了两种常用的对称方程（表A2）：（1）广泛使用的全球热带对称方程，由Chave等人（2014年）描述；（2）Mugasha等人（2013年）描述的对称模型，该模型针对莫桑比克政府使用的米奥姆博林地，用于其国家森林清查，并在赞比亚综合景观管理计划背景下与吉尔国家保护区相关。

表A2. 用于评估地上生物量估计准确度的异速生长方程

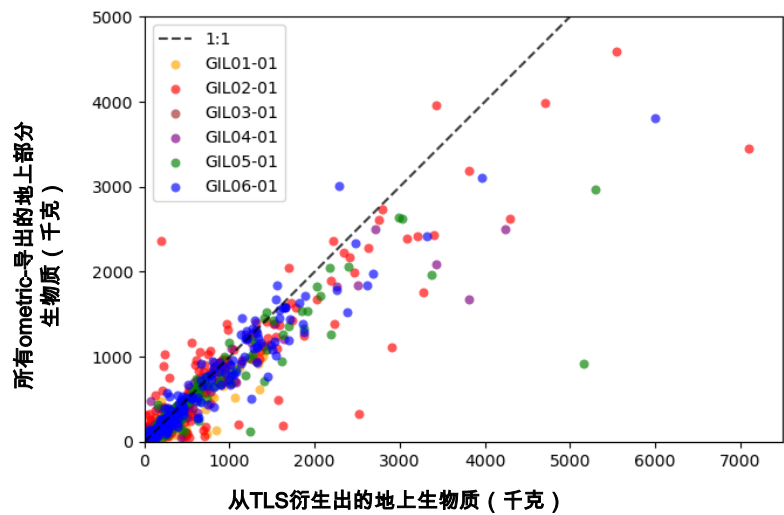
方程式 1	方程式 2
Chave等人（2014年）	Mugasha 等人（2013 年）
$AGB=0.0673(D^2 \rho)^{0.976}$	$AGB=0.0763(D^{2.2046}H)^{0.4918}$

笔记：AGB=地面上生物质；D=胸径；H=树高。

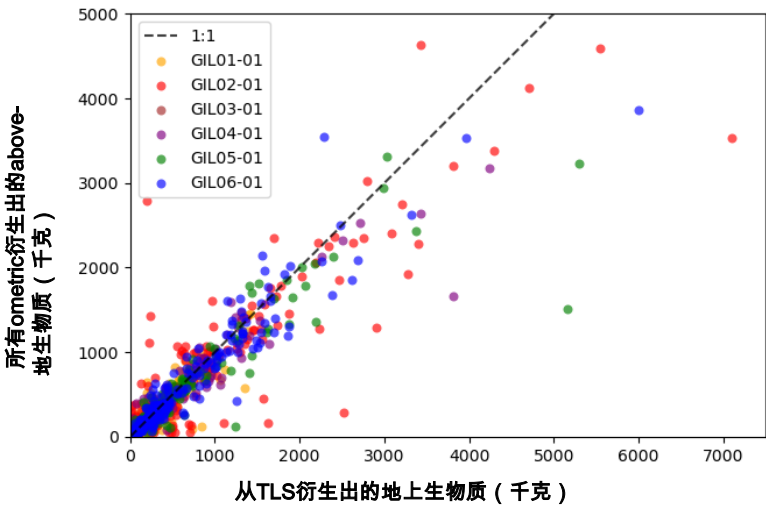
与从TLS获取的地面以上生物量相比，来自1226棵活树的总量为538.8 MT，利用Chave et al. (2014)方程式所得的全局系数估算总量为452.4 MT，而利用Mugasha et al. (2013)方程式估算的总量为496.0 MT（图A4）。这分别表示两种方法之间的差异为17.4%和8.3%，表明全局系数估算值系统地低于相应的TLS估算值。请注意，这些结果在Demol et al. (2024)一文中得到了进一步阐述和同行评审。

图A4. GIL01-01至GIL06-01之间1226棵活树地上生物量TLS和异速生长法估计值比较

面板a. 使用全球热带异速生长模型（Chave等人，2014年）得出的结果



图面板 b 通过使用针对Miombo林地特定的异速生长模型 (Mugasha等，2013年) 得出的结果



注： 对于大型树木——它们为每个地块贡献了最多的生物量（一些高达7,000公斤）——所有ometric估计系统地低估生物量。因此，通过地面激光扫描得出的估计规模的尺度存在偏差。
(x轴) 大于所有ometric估计 (y轴) 的刻度。

机载激光扫描

ALSM (包括无人机) 提供互补数据，以建立从中外推地面层以上生物量估算的相关性 (图A5)。ALS和无人机激光测距数据集用于通过Sylvera开发的软件推导出一系列指标，描述森林结构，该软件能处理大范围的密集点云数据 (表A3)。以下是其中一个300公顷区域 (地图A1，GIL02) 的相关变量的例子，对于整个感兴趣的区域的无人机激光测距数据都已被收集 (地图A3)。

图A5. 地面激光扫描和机载激光扫描的点云



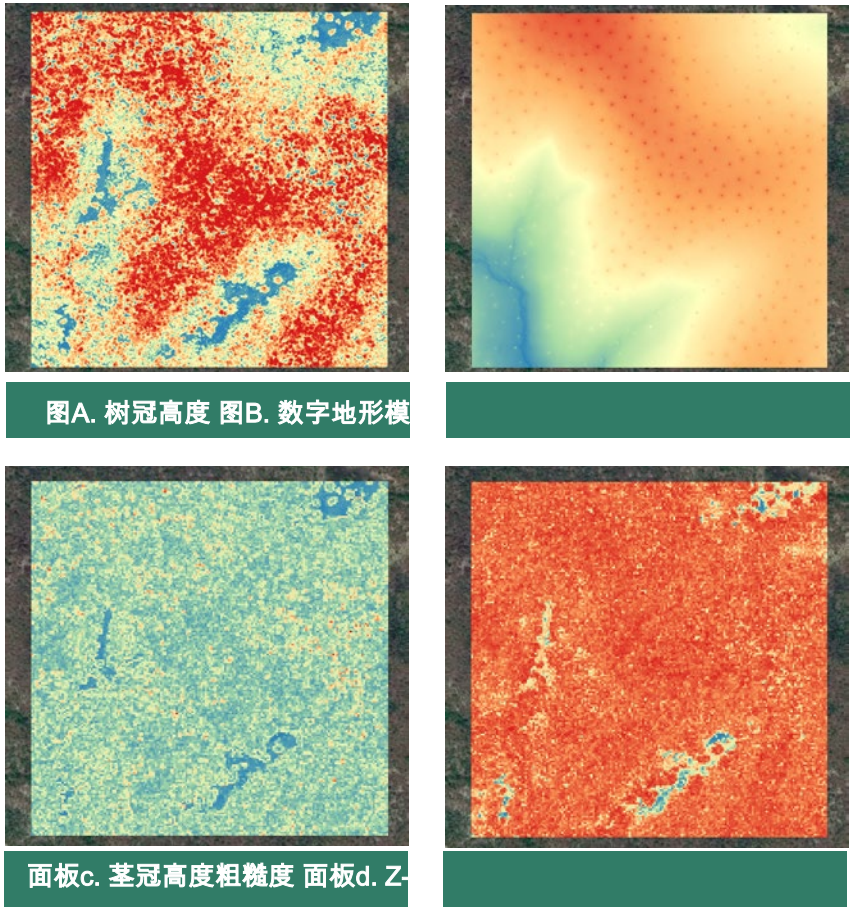
注释： 图展示了在一个一公顷区域 (GIL01-01) 内，10平方米森林部分的多尺度激光雷达点云。

表A3. 描述森林结构的无人机和空中激光指标

指标	分辨率 (米)
冠层高度图	1
数字地形模型	1
相对高度	10
树木碎片覆盖	10
冠层高度粗糙度	10
固定间隙分数	10
可变间隙分数	10
冠层闭合	10
冠层比	10
Z-熵	10

注意 粗糙度是指表面存在粗糙、脊状或皱纹的现象。

图A3. 从GIL02区域采集的无人机激光扫描数据中得出的指标选择



注： 结果从低（蓝色）到高（红色）进行缩放。粗糙度表示粗糙、脊状或皱褶的表面。注意，在面板b中，白蚁堆的规律性出现。

生物质云计算

生物质云计算在本地规模上通过三个主要合作伙伴的专长得到实施。Sylvera 在现场收集数据，并据此规模完善生物质测绘算法，而欧洲航天局（ESA）的全球发展援助（GDA）计划——旨在将地球观测技术纳入开发运营的常规使用——针对重点行业应用敏捷地球观测信息开发。通过其GDA计划，ESA促成了卫星信息解决方案公司GeoVille的参与，GeoVille为主要市场部门提供端到端插件卫星信息服务。GeoVille帮助开发了用于推算莫桑比克ERP区域本地生物质估计的算法。地上生物质建模涉及两个阶段的过程。第一阶段涉及使用获取的ALS数据来模拟感兴趣区域内50000公顷地区的生物质估计。第二阶段使用这些结果，并添加易于获得的遥感数据，作为输入参数来模拟整个赞比亚ERP区域的生物质。

第一阶段涉及将感兴趣区域50,000公顷中的每个300公顷区域进行绘制。生物量估计是通过使用无人机激光雷达（UAV-LS）和光束扫描（ALS）数据生成的机器学习模型，这些模型通过空间交叉验证进行了优化。模型被编程为将地上生物量作为因变量，森林结构（如表A3所示）的指标作为输入参数。为此，采用了Sylvera开发的软件实现的梯度提升方法。³⁰ 空间自相关导致的问题得到了控制，这是在使用生物质地图作为估算平均区域生物质基础时的一个关键问题。

提升生物质估算

将生物质估算提升至章节级别

为了将生物质估计量提升至更高精度，TLS数据（图A6）和相应的UAV-LS指标（表A3）产生的估计值被重新计算，以匹配1米的空间分辨率。然后，评估了地上生物质值与相应的UAV-LS指标之间的相关性，以确保训练数据和验证数据之间的空间独立性，从而降低产生过于乐观的验证统计数据的风险。为每个300公顷的UAV-LS区域生成了模型估计值，并提供了不确定性估计。

无人机-激光测距仪（UAV-LS）在地块层面的生物量建模导致以下性能统计数据，由验证折叠的平均均方根误差（RMSE）、中值对称准确度和符号对称百分比偏差的平均值得出，分别为59.6 MT/ha、48.9%和4.6%（见表A4）。与TLS导出的地上生物量相关联的无人机-LS导出的植被冠层高度之间的皮尔逊相关系数（ r ）为0.59，这是变量权重的最重要预测因子。TLS到无人机模型显示出显著的方差但低偏差（图A6）。

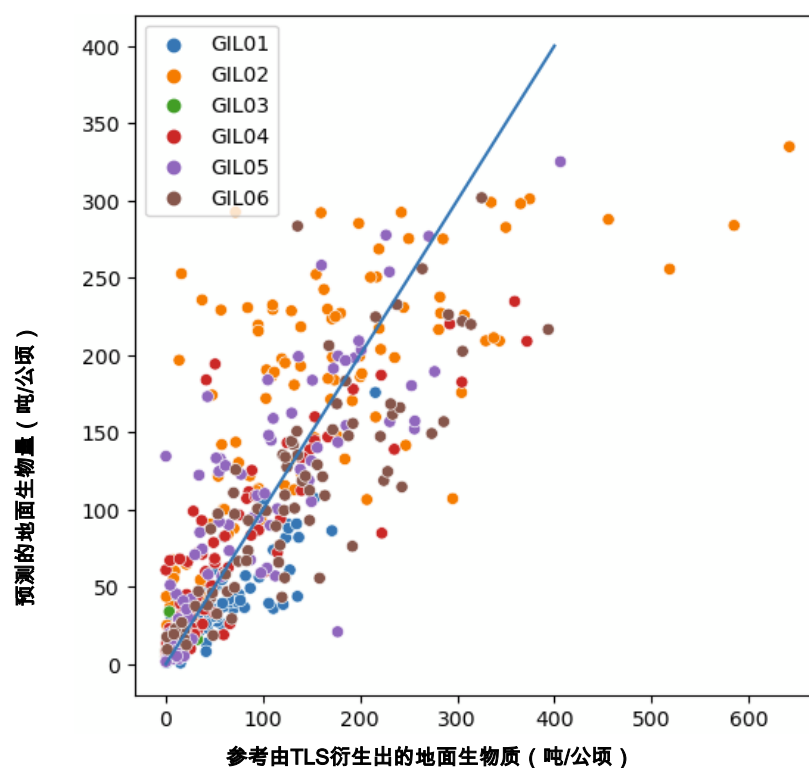
30 梯度提升已被证明在避免高估和低估（Li等，2020年）以及过度拟合和欠拟合（Pham等，2020年）方面既快速又稳健。

表A4. 最终调优模型统计信息

交叉验证指标	结果 (平均值)
特征数量	44
均方根误差 (MT/公顷)	59.6
解释方差 (%)	64.0
中值对称准确性 (%)	48.9
对称符号百分比偏差 (%)	4.6
总体偏差 (%)	-2.2

注： 结果显示的是模型在图A1中所有六个图块的空间交叉验证的平均值。MT = 吨；ha = 公顷。

图A6. 预测的地上生物量与参考地面激光扫描估计值的空间交叉验证



注释：蓝色线条代表“等比例线”（1:1比例）。MT = 公吨；ha = 公顷。

UAV-LS衍生的产品覆盖了209,050像素（10米分辨率），分布在六个部分（GIL01至GIL06），相当于2,090.5公顷。这些部分的地上生物量估计从GIL03的6,500吨到GIL02的38,989吨不等，总计为146,443吨（表A5）。相应的地上

生物质密度范围从19.3吨/公顷到113.9吨/公顷，平均为70.1吨/公顷。对于地上生物量密度的综合不确定性，在90%置信区间内为3.2吨/公顷（4.6%）。按区域级别的不确定性范围为GIL05的7.0吨/公顷（8.2%）到GIL03的4.5吨/公顷（23.3%）。像素级别的不确定性更高，平均为133.7%，且通常对于生物量估计较低的像素更高。

表A5. 来自无人机激光扫描的地上生物量估计，包括密度和不确定性

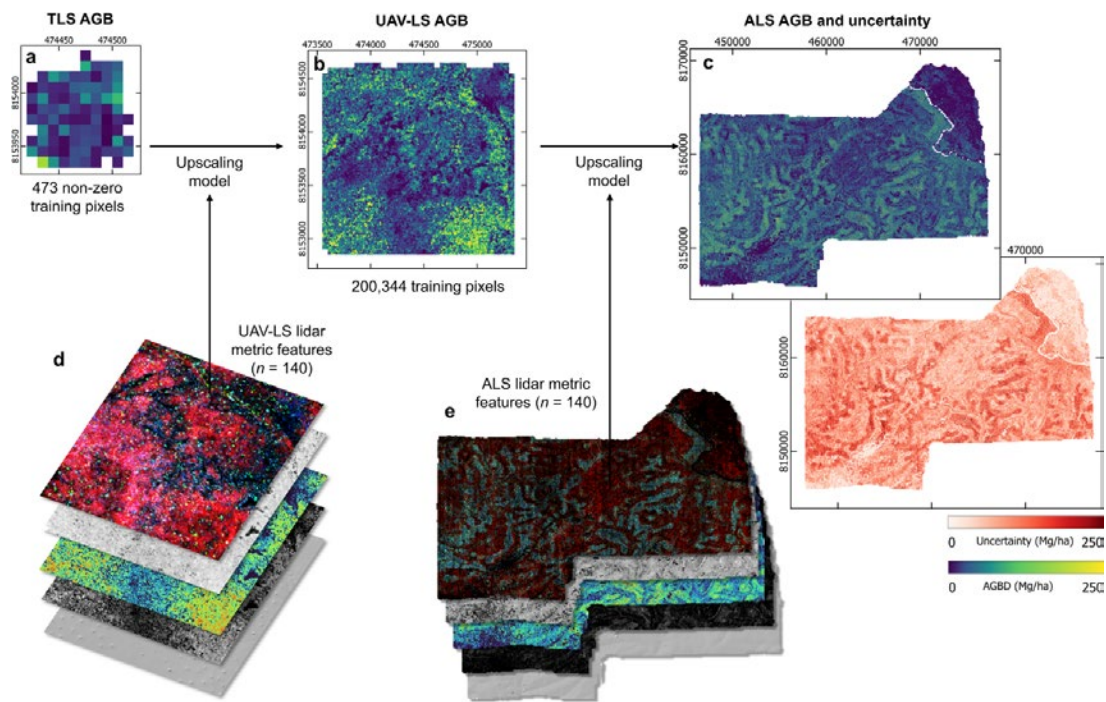
300公顷 章节	地上生物量估算来自 无人机激光扫描			像素数量（10百万）	
	总和 (MT)	密度 (单位：吨/公顷)	不确定性 (单位：吨/公顷)	总计	非零
GIL01	27,690.4	83.2	10.1 (12.1%)	33,300	33,300
GIL02	38,989.2	113.9	11.2 (9.9%)	34,225	34,223
GIL03	6,587.2	19.3	4.5 (23.3%)	34,175	33,923
GIL04	18,976.9	52.6	6.4 (12.2%)	36,100	36,095
GIL05	30,559.7	84.7	7.0 (8.2%)	36,100	36,096
GIL06	23,639.9	67.3	6.7 (9.9%)	35,150	35,098
总计（汇总总数）	146,443.3	70.1	3.2 (4.6%)	209,050	208,735

备注：估计值为90%置信区间。MT = 公吨；ha = 公顷。

将生物质估计量提升至感兴趣区域和减排项目区域

使用与无人机激光雷达（UAV-LS）生物量估计相同的处理过程，根据地面激光雷达（ALS）数据估计了感兴趣区域的地上生物量。在这种情况下，将UVA-LS导出的估计值用作ALS导出的指标校准参数，以扩展对50,000公顷感兴趣区域的估计。从无人机激光雷达到地面激光雷达的进一步升级遵循了相同的过程，其中无人机激光雷达导出的地上生物量是因变量，而地面激光雷达导出的森林结构指标是特征（图A7）。

图A7. 从地面激光扫描到无人机激光的地上生物量估算提升
扫描到航空激光扫描



来源：德·莫尔等（2024）。

注：在地表激光扫描（TLS）数据（见面板a）的基础上生成了地块级地上生物量估计值，随后这些估计值被用作基于无人机激光扫描（UAV-LS）参数建模地上生物量的校准参数，具体内容见表A1（见面板b）。最后，基于从航空激光扫描（ALS）中得到的指标，使用UAV-LS导出的估计值作为校准参数，用于对50,000公顷感兴趣区域的地上生物量进行建模（见面板c）。

最终调整后的模型，从UAV-LS数据升级到ALS数据，生成了从验证折叠均值的RMSE、中值对称精度和符号对称百分比偏差的性能统计，分别为26.6 MT/ha、28.0%和4.8%（见表A6）。

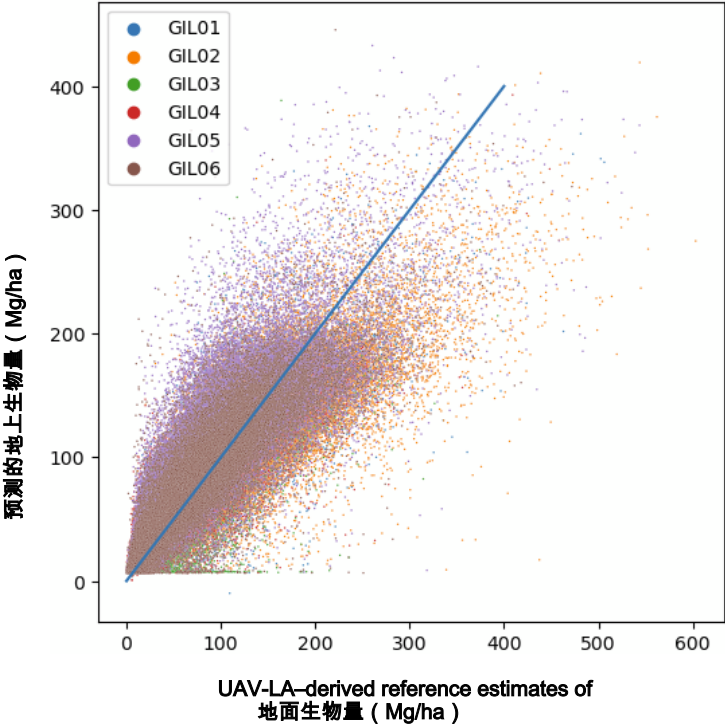
表A6. 最终调整模型的统计数据

交叉验证指标	结果
特征数量	44
瞬时均方误差 (MT/ha)	59.6
解释方差	64.0
中位数对称	48.9
对称签名	4.6
总体偏差 (%)	-2.2

注释：MT = 吨；ha = 公顷。

交叉验证指标报告显示，从无人机激光雷达（UAV-LS）向高级激光雷达（ALS）模型 upscale 的性能相较于从 TLS 向 UAV-LS 模型 upscale 的结果有所提升。向 ALS 模型 upscale 的结果显示均方根误差（RMSE）为 26.0 MT/ha，而 TLS 向 UAV-LS 模型的 RMSE 为 59.6 MT/ha，同时解释方差（图 A8）从 64.0% 增加到 84.6%。这可能是由于在这个步骤中所需的 spatial upscale 因子相对较小，大约为 28x（约 1,800 至 50,000 公顷），而 TLS 向 UAV-LS 模型的 upscale 因子约为 300x（约 6 至 1,800 公顷）。中值对称精度和总偏差也得到改善（分别从 48.9% 和 -2.2% 提高到 28.0% 和 -0.64%，值得注意的是，这两个指标中较小的值更好）。

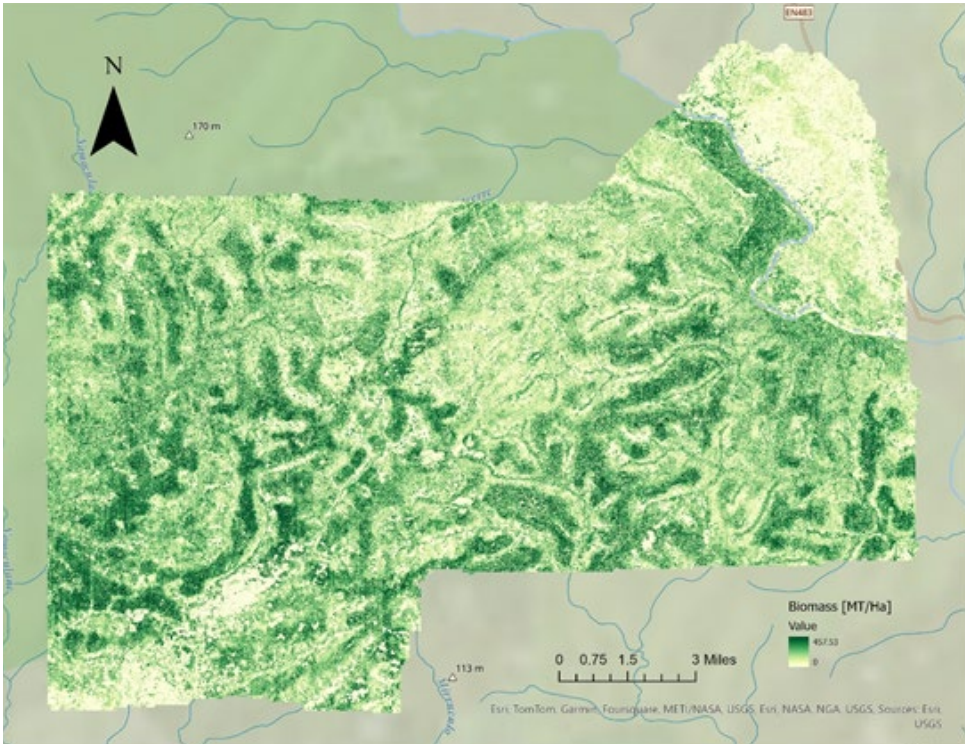
图A8. 从航空激光扫描数据得到的地上生物量预测的空间交叉验证比较
根据无人机激光扫描得出的参考估计



注释：蓝色线代表身份线（1:1比例）；MT = 吨；ha = 公顷。

ALS衍生的产品覆盖了5,007,457个像素（10米分辨率），相当于50,075公顷（图A4）。地上生物总量为3,864,953吨，平均密度为77.18吨/公顷。在90%置信区间内，综合密度的不确定性为3.2吨/公顷（4.6%）（表A7，图A5）。

地图A4. 吉利国家公园内感兴趣区域估算的地上生物量，赞比西省，莫桑比克



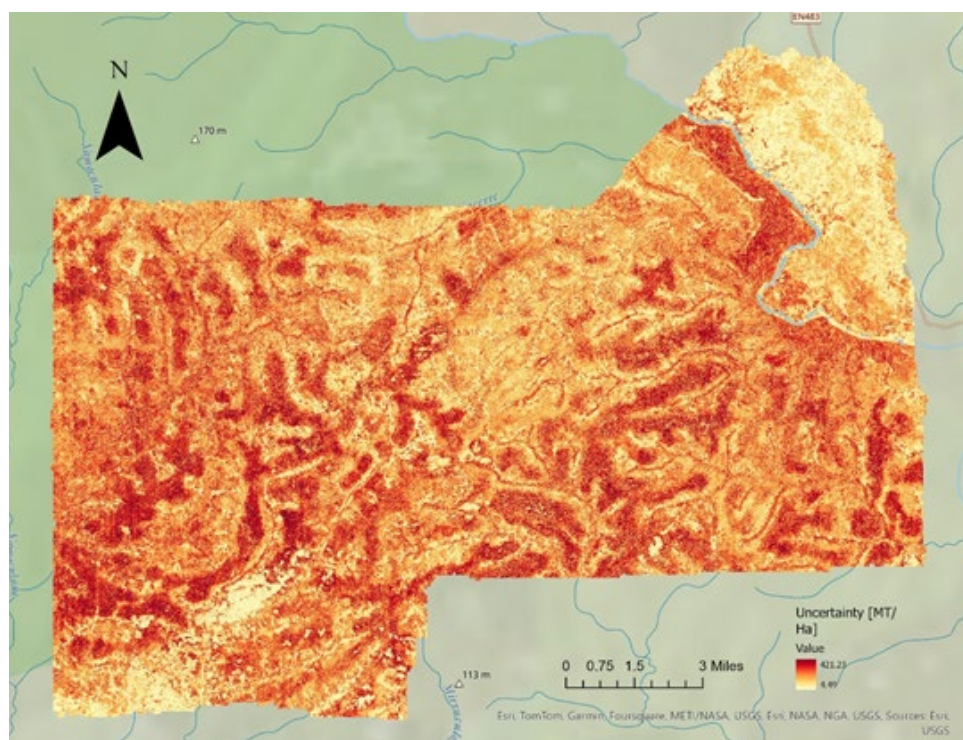
来源：Sylvera.
注意：估计值是使用Sylvera的多尺度激光雷达方法确定的。

表A7. 对感兴趣区域进行航空激光扫描得到的地面以上生物量，包括密度和不确定性

区域/地点	地上生物量 从航空激光扫描			像素数量 (10m)
	预计总计 (MT)	密度 (单位：吨/公顷)	不确定性 (单位：吨/公顷)	总计
50,000-ha 感兴趣区域	3,864,953	77.18	3.2 (4.6%)	5,007,457

备注：估计值为90%置信区间。MT = 公吨；ha = 公顷。

地图A5：吉萊国家公园内感兴趣区域内地上生物量估计的不确定性，赞比西省，莫桑比克



来源： Sylvera.

注意：估计值是使用Sylvera的多尺度激光雷达方法确定的。

该ASA研究评估了使用最先进的方法将ALO (airborne laser scanning) 衍生的估算值放大至莫桑比克赞比西地区的ERP (Environmental Protection Region) 区域。目标是测试一种结合地球观测/实地测量方法，该方法利用足够的、高精度的地面观测 (ALO数据) 上方生物质估算来训练基于人工智能的地球观测图像解释算法，以便在ERP区域的整个区域外推已知的上方生物质值。所用的模型输入数据分为两大类：一是现场上方生物质数据，包括国家森林调查数据；(2) 基于遥感的数据集，例如光学和雷达影像 (见表A8)。

表A8. 用于统计分析与模型开发的获取数据来源汇总

传感器/源	决议	时间范围	指标/统计数据
哨兵2号	10米和20米带子	2018年1月26日，至2018年12月31日； 2022年1月26日，至2022年12月31日	个人波段 (20th) 百分位数 (percentile) NDVI (90th percentile)
Alos-2 Palsar-2 L-Band [↑]	25 米	2018年1月1日，至2018年12月31日； 2022年11月1日，至2022年12月31日	均值后向散射 (VV, VH,) HH-VH)
Landsat 树冠覆盖率 (%) [↓]	30米	2010-2015	冠层覆盖率 (%)
全国森林资源清查报告 地生物量估算	20 x 50米子情节	2017-2018	地上生物量 (单位：吨/公顷)

注释：MT = 吨；ha = 公顷；NDVI = 归一化植被指数。

[↑] 滨本，增本 (2011年)。

[↓] Sexton等人 (2013年)。

高分辨率 (10-20米) 的Sentinel-2光学数据允许获取与地面以上生物量光谱特性相关的信息，包括所有12个光谱波段——即B02/蓝、B03/绿、B04/红、B05/植被红边1、B06/植被红边2、B07/植被红边3、B08/近红外、B8A/窄近红外、B11/短波红外1、B12/短波红外2——以及归一化植被指数 (NDVI)。基于时间序列数据，计算了光谱波段 (20%分位数) 和NDVI (90%分位数) 的百分位数。

数据来自ALOS PALSAR-2提供的L波段后向散射，用于结构参数。与C波段雷达 (即Sentinel-1) 相比，L波段合成孔径雷达 (SAR) 信号具有更长的波长，使其能够更深入地穿透冠层，并提供了关于植被冠层结构几何特性的额外信息。为覆盖整个感兴趣区域，从2022年1月至12月期间获取了单个Level 2.2 Scan SAR 25米分辨率场景，共产生66个独立场景。

The Landsat Tree Canopy Cover layer, derived from Landsat data, consists of estimates of the percentage of horizontal ground in each 30m pixel covered by woody vegetation greater than 5 meters in height (Sexton et al. 2013).

土地利用/土地覆盖变化 (LUCC) 对全球气候系统有显著影响，因此监测LUCC的时空变化对于理解和预测国家森林清查的表现重要。在LUCC的监测和评估中，通常依赖于遥感技术。群集是基础卫星影像的遥感技术数据。包括群集和群集由1990年代以来采集。国家森林清查和评估的数据库来源地表和地下生物量测量。使用莫桑比克国家森林清查报告产生的地图策略信息和所获取的国家森林清查数据的坐标度坐标植被覆盖数据表面进行空间重建。全球森林清查数据在群集聚合层的监测和评估方法。为使用国家森林清查数据使用地图解释森林变化的生态系统的变化和Camia 2020年)。对于这种方法，创建了一个代表群集的1公顷多边形。

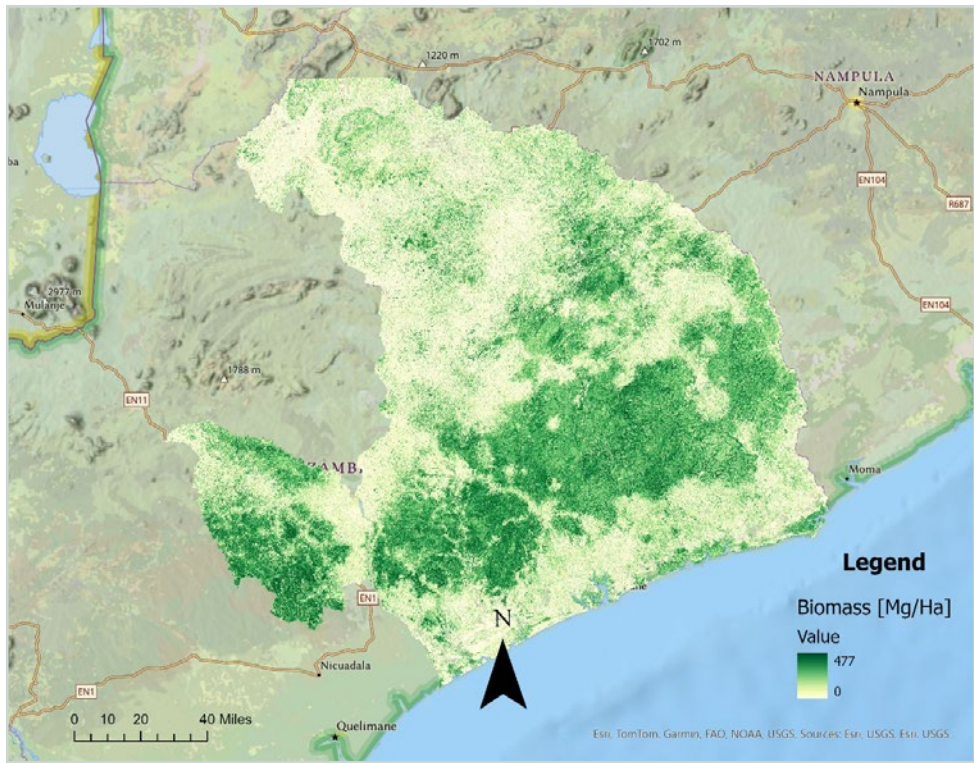
使用单个图点，上述地面生物量估计值为其相关图块的均值。对所有变量进行了相关性测试，并使用蒙特卡洛模拟方法（Penman等人，2003年；Duncanson等人，2021年推荐）对输入（地球观测）数据和目标变量（生物量值）中的误差和不确定性的整合与传播进行了应用。在验证和预测中，使用半方差图评估空间自相关性，以确定最小距离。

两种建模方法被测试：随机森林和U-net图像分析回归器。由于U-net表现更佳，最终产品采用了U-net的结果。U-net由Ronneberger、Fischer和Brox（2015年）开发，旨在解决高分辨率生物医学图像准确分割的问题。通过将数据集分为训练集和测试集，并在未见过的“真实”数据上验证，对建模输出进行了验证。还与现有的全球产品进行了比较。

建模结果升级至减排项目区域

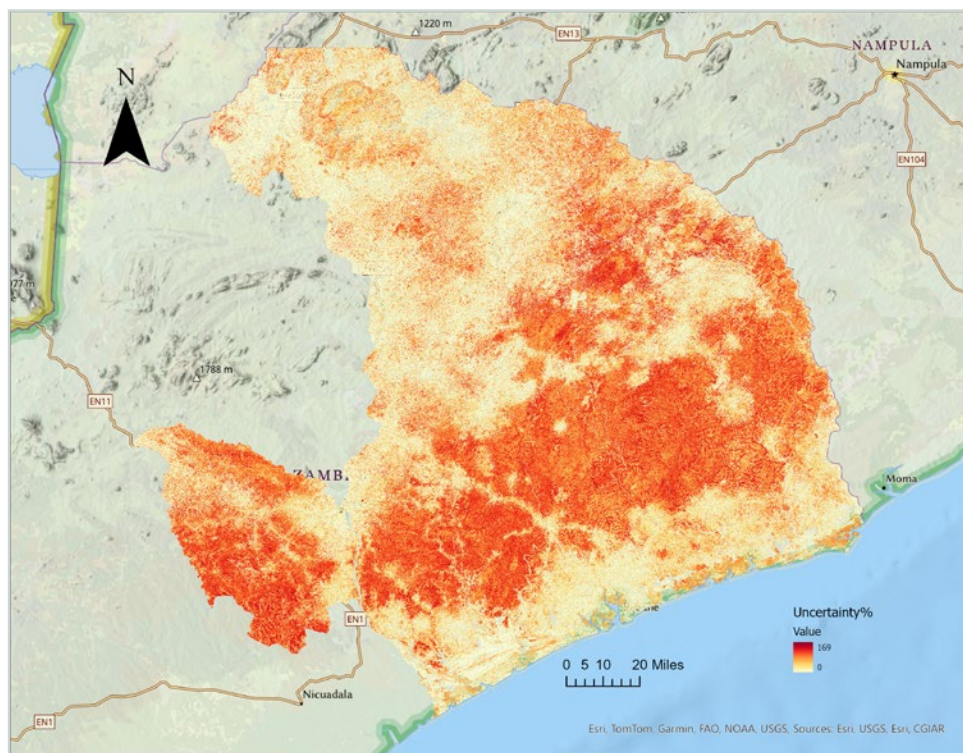
建模结果显示，地上生物量的平均值在95%置信区间内估计为 43.37 ± 18.38 MT/ha，范围从0到413 MT/ha（图A6为生物量估计；图A7为不确定性估计）。ERP区域的地上生物量总估计量为2.311亿吨。验证结果显示，U-net建模方法，使用所有预测输入来估计整个ERP区域平均地上生物量密度，解释了76%的变异性（ $r^2 = 0.76$ ）与均方根误差（RMSE）为28.98 (MT/ha) 和偏差为-5.26 (MT/ha) 相关。

图A6. 莫桑比克东赞比亚排放减少项目区域的估算地上生物量



来源：Sylvera.

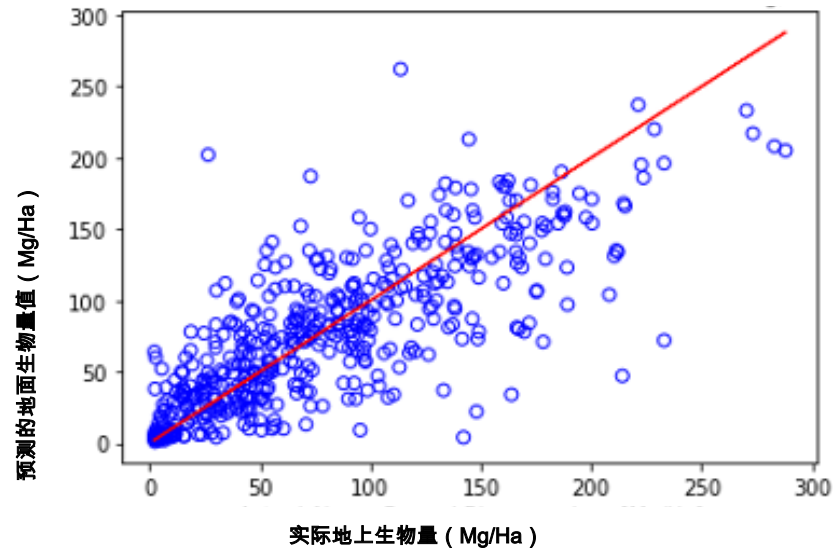
图A7. 在减排项目区域地上生物量估计的不确定性
东部赞比亚，莫桑比克



来源：Sylvera.

对感兴趣区域的50,000公顷范围内两种建模输出（ALS和U-net）的统计分析展示在图A9和表A9中。与易于获取的全局生物质数据相比的ASA模型性能比较提供在表A10中。请注意，ASA模型的均方根误差（RMSE）结果小于全局模型的成果。

图A9. 显示实际与预测地上生物量值一致性的散点图



注： MT = 吨；ha = 公顷。

表A9. 从感兴趣的航空激光扫描区域内的像素中得到的建模输出的描述性统计

描述性统计	机载激光扫描	提升至ERP领域	提升效果的表现至ERP领域
最大值	457.53	443.00	N/A
最低	0.00	1.00	N/A
平均值	77.22	72.22	N/A
范围	457.53	442.00	N/A
标准差	60.13	54.15	N/A
总计	385,644,885	359,622,444	93.3%

注意：ERP = 减排项目。N/A = 不适用。

表A10. 将生物质估算提升至减排项目区域中ASA模型的性能比较
与全球其他生物质模型

模型	平均值 (单位：吨/公顷)	最低 (单位：吨/公顷)	最大值 (单位：吨/公顷)	总和 (单位：万吨)	均方根误差 NFI数据 (单位：吨)
阿维塔碧尔 2016 年	61.34	0	410	271.4	107.6
全球生物质 ^b	51.17	0	131	280.4	119.5
欧洲航天局 (ESA) 气候变化倡议 (CCI) 生物质	52.88	0	143	271.5	110.5
ASA模型向上扩展至emis- 计划削减项目区域	38.89	0	389	206.8	101.2

注释：MT = 吨；ha = 公顷；RMSE = 均方根误差；NFI = 国家森林资源清查。

a. <http://lucid.wur.nl/datasets/high-carbonecosystems>.

b. <https://climate.esa.int/en/projects/biomass/>.

c. https://globbiomass.org/wpcontent/uploads/GB_Maps/Globbiomass_global_dataset.html.

附录B. 高质量田野数据收集实践的分析与讨论



照片B1. TLS数据收集

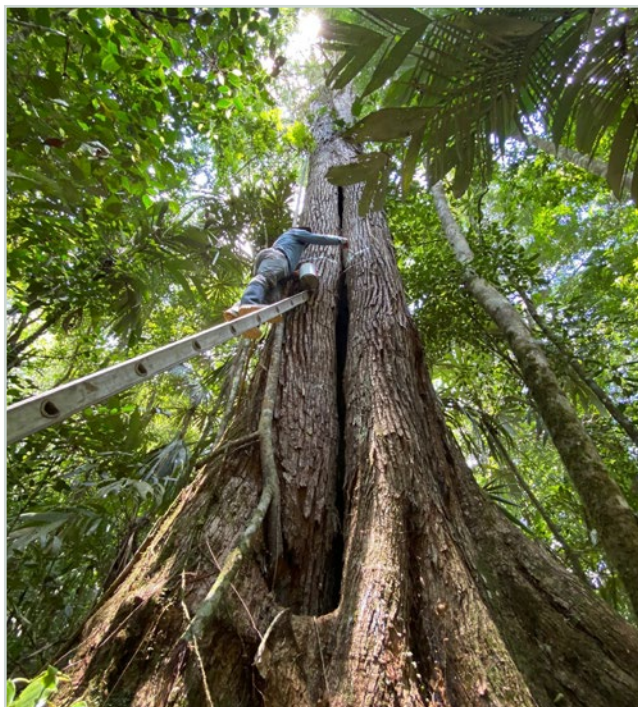
使用TLS（传输层安全）来收集体积数据已被证明是成功的。这包括能够从通常未在样本中覆盖到的大树中获取数据，而这些样本用于发展异速生长方程。这有助于处理由于在树直径超出样本范围的案例中使用方程外推而产生的不确定性。由于它们对树体积的更全面表示，获得的结果与TLS导出的树级生物量估计一致，而这通常高于使用异速生长方程得出的估计。（Sylvera等人已经在热带湿润森林、北方森林和红木森林等其他森林中报道了类似的结果。）这解决了基于异速生长的生物量估计（例如，关于树高估计【Terry等人2024】）的持续偏差问题，并应有助于通过指导良好实践和避免低估或高估来提高一致性。例如，这类成功应支持莫桑比克在其森林类型估计更新方面，如果处理了与统计代表性相关的问题。

在实地部署地面激光扫描技术

TLS数据收集预计比传统的国家森林资源清查方法更快地提高树木和地块级别的数据质量。然而，它确实需要理想的天气条件。首先，它需要在旱季进行，因为森林冠层中的水会导致激光雷达光束向各个方向反弹，使得数据采集成为不可能。其次，风况会移动树枝，导致TLS从单个树枝产生多个目标，这使得建模树结构成为不可能。这些因素可能会缩短有效数据收集的时间窗口，并可能导致比预期更长的现场调查和不可预见的花费。此外，数据收集需要访问TLS传感器（成本超过10万美元），并且需要培训人员。³¹

TLS产生大量数据，这对数据存储和传输构成挑战。评估确定了数据湖是最合适的解决方案。Sylvera通过亚马逊网络服务S3与世界银行和莫桑比克MRV团队交换了收集到的数据。

³¹ 注意到ASA研究为莫桑比克MRV团队提供了培训。



尽管数据存储和传输可以得到解决，TLS数据处理具有挑战性，且尚未标准化。其结果对森林生物量测量的科学原理仍在发展中（Arrizza 等人，2024年）。使用TLS数据还要求对木质和非木质植被成分进行充分的区分，这是一项特别具有挑战性的任务，需要科学家开发新的方法，包括需要准确校准的辐射测量方法，以及像本例中的ASA一样使用从点的3D坐标中获得点云的大小、形状、位置、密度、粗糙度和曲率几何方法。机器学习技术很常见，并且正在测试像神经网络等新方法（Arrizza 等人，2024年）。

照片B2. 在胸高处测量树木直径

注：传统方法中最大的问题之一是，在胸高处测量树木直径并不总是件简单直接的任务。在这种情况下，需要在大树的支柱以上测量，将其作为胸高的起点，这需要使用梯子。这通常会导致对树木生物量的低估，因为树桩并未包含在估算之中。

尽管有木质叶片分离工具（例如，CANUPO、TreeQSM、SimpleTree、TLSeparation、LeWoS、FORTLS和TLS2trees）的软件可用，Sylvera仍使用专有软件进行数据处理。这表明数据分析技术仍在不断发展，而TLS数据共享将为基于深度学习的方法打开大门，以加速分类技术。然而，在FCPF和ISFL报告中使用这些方法可能会存在问题，因为系统和方法需要接受审计。需要保证一个合理水平的可靠性，以确保用的模型没有偏差，从而避免估计结果的偏差。在这次ASA研究中，TLS估计值高于通过全形学得出的值，可能会产生多个发现，并在审计过程中需要对这些发现进行澄清。

这些问题导致了根据CALM协议对TLS使用的评估（如前所述），这不仅基于本研究的TLS经验，而且基于相关文献和MRV经验。GFOI是森林MRV研究、能力建设、数据和方法指南方面的领先组织。CALM借鉴了NASA的应用就绪级别概念，开发了所谓的“评估中的概念”（CUA）相关于REDD+ MRV。在此范围内，很明显，尽管本报告呈现的结果展示了TLS在改善树木和地块水平生物量估计方面的巨大潜力——鉴于处理尚未标准化——FCPF和ISFL国家的TLS使用仍处于CALM分类的第3级和第5级之间（表B1）。这表明TLS使用仍处于预操作阶段，其中一些组件仍在研究和开发阶段（例如，点云数据分类）。

Sylvera的方法)。鉴于所有FCPF国家都已对其第一份监测报告进行了验证和核实，其生物质估算已确定在剩余的节目报告安排中。因此，不太可能使用更新和潜在改进的TLS估算。

TLS目前正在被如Sylvera之类的组织收购，目标是创建一个代表性数据库，以向政府间气候变化专门委员会更新各国在他们的温室气体清单中所使用的默认值。

关于在获取最佳数据的需求下，基于在哥伦比亚和莫桑比克MRV团队中部署该技术的困难进行的讨论，揭示了使用TLS数据的另一种方法。而不是直接推导生物量估计值，可以使用体积数据重新校准在国家级森林清查中通常使用的异速生长方程，以消除在开发过程中进行抽样造成的偏差。Sylvera正在探索这种方法。

表B1. CALM评估技术部署准备情况的标准评分准则

阶段	等级	里程碑	示例支持信息
研究和 发展	1. 基础研究 (概念)	- CUA 已声明其应用程序的目标在 REDD+ 监测、报告和核实 (MRV) 系统中 - CUA的先决条件详细说明	- 文献综述 - 概念说明文件可供获取
	2. 应用概念 (发明)	- CUA 构建的简要提纲并创建 - 预定的关键优先目标和范围 CUA 识别出的	研究提案已提交或批准
	3. 理念证明 (已确立可行性)	- CUA设计是独立进行的已审查 - CUA设计细节有详细记录 - 令人信服的论点提出 CUA的可行性	- 公开发表物概述了该应用正在考虑并提供分析。支撑该概念 - 适当的校准和验证数据是可用
	4. 通用规划 在外部环境中 (原型/计划)	- CUA 的组成部分带来的共同与外部互动问题已解决 - 对CUA的影响已理解并减轻；缓解	实验数据/出版物可供获取适用于小型场景
预- 运营	5. 具体的规划 相关环境 (潜在确定)	- 影响及所需变更已经审查，并分析了利弊。已理解 - 已接受进入beta测试阶段	- 小规模实验数据/出版物场景可供选择。 - 实验数据/出版物可在以下网址查阅国家/司法级别。 - 评估适用于REDD+的方法 MRV 情境。
	6. 演示在 相关环境 潜在 证明了 (demonstrated)	- 原型CUA在以下环境中进行了beta测试模拟操作环境 - 结果已审查和评估	- 数据/估计是在以下情况下获得的/制定的以一贯稳定和可持续的方式处理日常事务国家监控 - 发表概述处理工作流程的文献在 REDD+ 监测、报告和核查 (MRV) 背景下的应用可用
运营	7. 确立于一个 运营环境 功能 证明了 (demonstrated)	- CUA 已在运营中采用环境 - CUA已经证明了其预先操作阶段6	- 在该国积极实施和扩大产能组织被授权执行 REDD+ MRV - CUA已被用于以下开发向联合国气候变化框架公约提交的报告中的估算或其它双边安排/项目
	应用已完成 并且合格 (功能已验证)	- 在操作环境中使用的CUA并对结果进行了审查并展示给按预期运营 - CUA认证结果及批准 - 文档和培训已完成	- CUA已被用于以下开发向联合国气候变化框架公约提交的报告中的估算或其它双边安排/项目 - 核心数据可用于常规监控
	9. 运营 部署和使用 (持续使用)	持续在运营中使用CUA环境	CUA 已遭受技术影响评估/技术分析流程联合国气候变化框架公约 (或相当于第三方的验证/验证过程至少进行一次

注释： CUA = 正在评估的概念； MRV = 监测、报告和核查； REDD+ = 减少森林砍伐和森林退化导致的排放； U N F C C C = 联合国气候变化框架公约。

通过无人机激光扫描和航空方式进行数据收集

激光扫描



照片B3：空中激光雷达

机载激光雷达数据处理涉及根据信号往返森林冠层和土壤表面的强度和时间来估计森林冠层的高度。这现在是标准程序，许多FCPF国家已经尝试过这样的数据集。这项ASA研究的创新之处在于结合使用TLS和机载激光雷达数据。TLS得到的生物质和树冠高度估计值与使用Sylvera开发的方法（考虑生物质制图相关的问题）从高密度UVA-LS数据和低密度ALS数据得到的冠层高度估计值进行了相关性分析。采用这种方法，成功为50,000公顷的兴趣区域创建了生物质图。然而，将此类地图投入使用却存在问题。关于如何使用生物质图的数据来估计生物质——例如，结合某一类型森林的平均生物质和森林砍伐数据来估计结果排放——的讨论尚未定义出最佳使用地图的方法。GFOI目前正在制定关于在MRV过程中制定这些估计的良好实践指南。一个早期共识的领域是，从生物质图中得出的估计值不应在像素级别使用。这是因为，即使这些地图没有偏差，像素级别的不确定性通常计算超过估计值的100%，使得相关的生物质估计不可靠且无法使用。如果目标是跟踪生物质随时间的变化，这种情况尤其如此。这也对将遥感数据生成的估计值进行放大有影响，例如莫桑比克赞比西省ERP区域的情况。

部署无人机激光扫描和地面激光扫描在野外

尽管使用机载激光雷达获取数据是常见的，但这个过程是困难的。与使用TLS获取数据类似，条件需要完美无缺，因此操作的窗口很小。此外，限制限制了无人机部署。此外，无人机部署的物流和国安影响使得该项目不得不放弃在哥伦比亚的数据获取活动。基于其更高的自主性和双推进系统的特点，混合型无人机能够被使用。



照片B4. 用于数据采集的无人驾驶无人机

注意：激光雷达传感器可被观察到位于无人机下方。

额外一层防止事故的保险措施，尤其是在携带昂贵的激光雷达设备时。优质燃料是安全无人机操作的基础，但可用的燃料质量低下，导致必须进行受控的紧急降落，这损坏了激光雷达并延误了实地调查几周，在此期间，新的传感器被运来，并且对造成紧急情况的原因有了深入的了解。雨季的临近进一步加剧了这一情况。

提升机载激光雷达数据至减排计划区域

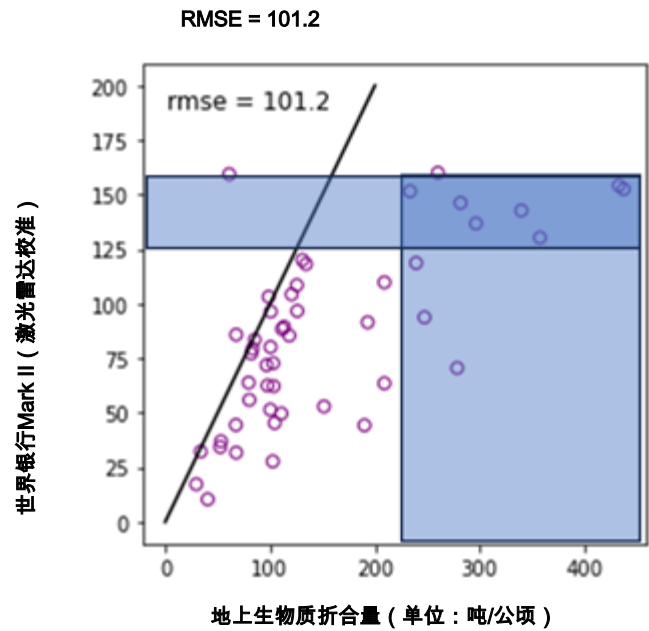
建模结果显示，与国家森林调查数据和其他可用的生物质数据集相比，性能有所提升。此外，确定了一个生成基于模型生物质估算的基本步骤，即使用地面数据消除模型偏差（Málaga Durán 2024）。

正如在为较大区域校准的生物量图中所常见，对低生物量区域的估计往往被高估，而对高生物量区域的估计则往往被低估——这可能是信号饱和和效应的结果。选择U-net模型是因为它似乎受饱和和影响较小，这可能是由于它能够考虑到空间趋势、相关性和模式。因此，U-net的结果似乎能够更准确地预测ERP区域内的高低值，并保持ALS校准数据集的纹理。然而，与基于ALS的估计一样，由于存在相当大的不确定性，这些估计不能在像素级别使用。因此，直接使用基于地图的时间序列数据来估计生物量的变化是不建议的。考虑模型传播、相关性和自相关的区域平均值是更好的选择。此外，关于评估来自生物量图的排放因子相关的不确定性，尚未达成共识。

该区域及六个一公顷地块的ALS数据均属于非概率样本，这是偏倚的另一个来源。这意味着整个推理模型无法保证无偏性，因此

需要额外的验证检查。此外，由于审计目的，方法并不完全透明，潜在的偏见使得估计值无效。鉴于莫桑比克已经对其第三份监测报告进行验证，并且其第四个也是最后一个监测期计划于2023-2024年进行，更新排放系数是不切实际的。

图B1. 比较莫桑比克减排项目区域U-net模型估算值与国家森林资源清查估算值



注：在生物质总量超过200吨/公顷时，估算图变得对数值不敏感。MT = 公吨；ha = 公顷；RMSE = 均方根误差；NFI = 国家森林清查。

除了输入数据中的偏差问题，U-net地图在估计高于200 MT/ha的生物量时精度降低（图B1），这引发了这些制图努力的价值问题，考虑到生成高质量实地数据所需的重大投资，这些努力似乎微不足道。使用ALS生成的感兴趣区域生物量估计的整体成本接近70万美元，其中一半由Silvera补贴，其余由世界银行承担。尽管TLS生成的树级估计结果出色，但它们缺乏代表性，使得其效用超越异速生长改进的疑问。空中激光雷达的使用被CALM归类为第6级和第7级（表B1）。实际操作使用是定期发生的，但由于生物量图中的偏差，基于样本的生物量估计已被搁置。重新思考它们在限制偏差和额外不确定性的方式下用于外推的使用是值得考虑的。

参考文献

Arrizza, S., S. Marras, R. Ferrara, and G. Pellizzaro. 2024. “地面激光扫描 (TLS) 在树木结构研究中的应用 : 从3D点云中进行木质-叶片分类方法综述。” *遥感应用 : 社会与环境* 36 (11月) : 101364. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101364> .

Avitabile, V., R. Pilli, and A. Camia. 2020. *欧洲森林生物量 : 森林生物量图、样地调查和国家级统计数据的一体化评估*。联合研究中心报告 , 欧洲委员会。
<https://doi.org/10.2760/758855>.

Chave, J., M. Réjou-Méchain, A. Búrquez, E. Chidumayo, M.S. Colgan, W.B. Delitti, A. Duque, T. Eid, P. M. Fearnside, R.C. Goodman, M. Henry, A. Martínez-Yrizar, W.A. Mugasha, H.C. Muller-Landau, M. Mencuccini, B.W. Nelson, A. Ngomanda, E.M. Nogueira, E. Ortiz-Malavassi, R. Pélissier, P. Ploton, C.M. Ryan, J.G. Saldarriaga, and G. Vieilledent. 2014. “Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees.” *全球变化生物学* 20: 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629> .

Demol, M., N. Aguilar-Amuchastegui, G. Bernotaite, M. Disney, L. Duncanson, E. Elmendorp, A. Espejo, A. Furey, S. Hancock, J. Hansen, H. Horsley, S. Langa, M. Liang, A. Locke, V. Manjate, F. Mapanga, H. Omidvar, A. Parsons, E. Peneva-Reed, T. Perry, B.L. Puma Vilca, P. Rodríguez-Veiga, C. Sutcliffe, R. U pham, B. de Walque 和 A. Burt. 2024. “Multi-Scale LiDAR Measurements Suggest Miombo Woodlands Contain Substantially More Carbon than Thought.” *《通信地球与环境》* 第五条 第三百六十六条
<https://doi.org/10.1038/s43247-024-01448-x>.

Duncanson, L., J. Armston, M. Disney, V. Avitabile, N. Barbier, K. Calders, S. Carter, J. Chave, M. Herold , N. MacBean, R. McRoberts, D. Minor, K. Paul, M. Réjou-Méchain, S. Roxburgh, M. Williams, C. Albinet, T. Baker, H. Bartholomeus, J.F. Bastin, D. Coomes, T. Crowther, S.J. Davies, Stuart J., S. De Bruin, M. De Kauwe, G. Domke, R. Dubayah, M. Falkowski, L. Fatoyinbo, S. Goetz, P. Jantz, I. Jonckheere, T. Jucker, H. Kay, J. Kellner, N. Labriere, R. Lucas, E. Mitchard, F. Morsdorf, E. Næsset, T. Park, O.L. Phillips, P. Ploton, S. Puliti, S. Quegan, S. Saatchi, C. Schaaf, D. Schepaschenko, K. Scipal, A. Stovall, C. Thiel, M.A. Wulder, F. Camacho, J. Nickeson, M. Román, and H. Margolis. 2021. *地面木质生物质产品验证良好实践协议*。
地球观测卫星委员会 , 校准与验证工作组 , 陆地产品验证小组。版本 1.0 , 由 L. Duncanson、M. Disney、J. Armston、J. Nickeson、D. Minor 和 F. Camacho 编写。 https://lpvs.gsfc.nasa.gov/PDF/CEOS_WGC_V_LPV_Biomass_Protocol_2021_V1.0.pdf .

Duque, A., T. Eid, P.M. Fearnside, R.C. Goodman, M. Henry, A. Martínez-Yrizar, W.A. Mugasha, H.C. Muller-Landau, M. Mencuccini, B.W. Nelson, A. Ngomanda, E.M. Nogueira, E. Ortiz-Malavassi, R. Pélissier , P. Ploton, C.M. Ryan, J.G. Saldarriaga, and G. Vieilledent. 2014. “改进的异速生长模型以估算热带树木的地上生物量。” *全球变化生物学* 20: 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629> .

Kattenborn, T., F. Schiefer, J. Frey, H. Feilhauer, M. Mahecha, and C. Dormann. 2022. “时空自相关的训练与验证样本会导致卷积神经网络性能评估膨胀。”
国际摄影测量与遥感开放期刊 5: 100018.
<https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100018> .

Krisanski, S., M.S. Taskhiri, S. Gonzalez Aracil, D. Herries, A. Muneri, M.B. Gurung, J. Montgomery, and P. Turner. 2021. “森林结构复杂性工具：一款开源、全自动测量森林点云的工具。” *遥感* 13 (22): 4677. <https://doi.org/10.3390/rs13224677> .

李, Y., 李, M., 李, C., 刘, Z.。2020。《使用机器学习算法利用Landsat 8和Sentinel-1A数据估算森林地上生物量》。 *科学报告* 10: 9952. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67024-3> .

马兰加·杜兰, N. 2024. “将国家森林清查与全球生物质地图整合。”荷兰瓦赫宁根大学博士论文。 <https://doi.org/10.18174/660644> .

Mugasha, W.A., T. Eid, O. Bollandas, R. Malimbwe, S. Chamshama, E. Zahabu, 和 J. Katani. 2013. “坦桑尼亚姆博木林中树木地上和地下生物量预测的异速生长模型。” *森林生态与管理* 310. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.003> .

Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner, 编著. 2003. “土地利用变化和林业 (LUCF) 领域良好实践指南。”第3章. *良好实践指南：土地利用、土地利用变化和林业* 第1卷 气候变化政府间气候变化专门委员会

Pham, T.D., N.N. Le, N.T. Ha, L.V. Nguyen, J. Xia, N. Yokoya, T.T. To, H.X. Trinh, L.Q. Kieu, and W. Takeuchi. 2020. “在越南金瓯生物圈保护区利用融合Sentinel-2和ALOS-2 PALSAR-2数据的极梯度提升决策树算法估算红树林地上生物量” *遥感* 12 (5): 777. <https://doi.org/10.3390/rs12050777> .

菲利普斯, O., 贝克, T., 费尔德帕什, T., 布里尼恩, 以及来自阿尔梅达, 阿罗约, 阿伊马尔, 查韦, 达维拉·卡多索, 赵克-杰, Higuchi, 霍里尼奥, 吉梅内斯, 刘易斯, S., 劳埃德, 洛佩斯-贡萨雷斯, 马尔希, 马里蒙, 蒙特亚古多, 尼尔, 帕蒂诺, 皮科克, 佩纳·克鲁斯, 克里斯蒂娜·佩纽埃拉, 皮卡文斯, 普里埃托, 克萨达, 拉米雷斯, 施瓦茨, 席尔瓦, 席尔维拉, 范德海登, 瓦斯科斯。2001. *RAINFOR 林地设立与复测手册* 英国皇家学会 https://rainfor.org/wp-content/uploads/sites/129/2022/06/RAINFOR_field_manual_EN.pdf .

齐, C.R., 易, L., 苏, H., 和顾, L.J.。2017. “PointNet++：在度量空间中点集的深度分层特征学习。”arXiv计算机科学, 计算机视觉与模式识别。 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02413> .

罗纳伯格, O., 菲舍尔, P., 布洛克斯, T. 2015. U-net：用于生物医学图像分割的卷积网络。在 *医学图像计算与计算机辅助介入——MICCAI 2015* 18届国际会议论文集, 慕尼黑, 10月5日至9日。第三部分, 由N. Navab、J. Hornegger、W. M. Wells和A. F. Frangi编辑。Springer国际出版社。

Sexton, J. O., X. P. Song, M. Feng, P. Noojipady, A. Anand, C. Huang, D. Kim, K. Collins, S. Channan, C. DiMiceli, and J. R. Townshend. 2013. “Global, 30-m Resolution Continuous Fields of Tree Cover : Landsat-Based Rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields With LiDAR-Based Estimates of Error” *《国际数字地球杂志》* 6 (5): 427–448. <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.786146>.

Singman, P. 无日期. “什么是数据湖？数据湖与数据仓库的区别。” LakeFS (博客), 更新于2024年7月19日.
<https://lakefs.io/blog/data-lakes/>.

Terryn, L., K. Calders, F. Meunier, M. Bauters, P. Boeckx, B. Brede, A. Burt, J. Chave, A. Carlos L. d a Costa, B. D'hont, M. Disney, T. Jucker, A. Lau, S. G. W. Laurance, E. Eiji Maeda, P. Meir, S. M. Krishna Moorthy, M. Henrique Nunes, A. Shenkin, T. Sibret, T. E. Verhelst, P. Wilkes, and H. Verbeeck. 2024. “从地面激光扫描衍生的新树高同态关系揭示热带雨林中与森林清查方法的实质性差异。” *全球变化生物学* 30 (8) : e17473.
<https://doi.org/10.1111/gcb.17473>.

世界银行. 2021a. *评估创新技术与基于遥感估算森林碳储量和动态准备情况*。 华盛顿特区：世界银行
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/305171624007704483/pdf/Assessment-of-Innovative-Technologies-and-Their-Readiness-for-Remote-Sensing-Based-Estimation-of-Forest-Carbon-Stocks-and-Dynamics.pdf>.

世界银行. 2021b. *政策路径：向第二代测量、报告和核查 (MRV 2.0) 发展*。
华盛顿特区：世界银行
https://www.forestcarbonpartnership.org/sites/fcp/files/policy_brief_r5.pdf.

Zanne, A., G. Lopez-Gonzalez, D.A. Coomes, J. Ilic, S. Jansen, S. Lewis, R. Miller, N. Swenson, M. Wiemann, and J. Chave. 朝向全球木材经济图谱 (数据集) 。 Dryad.
<https://doi.org/10.5061/dryad.234>.

The logo consists of two overlapping squares. The front square is a medium green and contains the text 'FOREST CARBON PARTNERSHIP' in white, bold, sans-serif capital letters. The word 'FOREST' is on the top line, 'CARBON' is on the second line, and 'PARTNERSHIP' is on the third line. Below 'PARTNERSHIP', the word 'FACILITY' is written in a smaller, white, sans-serif font, with wide letter spacing.

**FOREST
CARBON
PARTNERSHIP**
F A C I L I T Y

世界银行 1818 H Street,
NW 华盛顿 , DC 20433 ,
美国

www.forestcarbonpartnership.org