

TREEPLOTICS: PROCESSAMENTO, MÉTRICAS ECOLÓGICAS E VISUALIZAÇÃO INTERATIVA PARA INVENTÁRIOS FLORESTAIS PADRONIZADOS

Renato Soares Vanderlei

renato.vanderlei@gmail.com

Eduardo M. Vasconcelos

eduardo.vasconcelos@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

Inventários florestais padronizados são fundamentais para o monitoramento e estudos comparativos de ecossistemas tropicais, porém sua análise exploratória frequentemente exige conhecimentos de programação, limitando o acesso de pesquisadores, educadores e estudantes. Este trabalho apresenta o TreePlotics, um dashboard desenvolvido em R/Shiny que automatiza a ingestão, o processamento e a visualização de dados de inventários florestais, com foco em portabilidade, usabilidade e funcionamento offline das principais funcionalidades. O sistema implementa um pipeline de ETL (Extract, Transform, Load) capaz de validar informações de árvores, calcular atributos ecológicos e disponibilizar métricas no nível de parcela, incluindo rankings taxonômicos, mapas da localização de cada árvore e visualizações gráficas customizáveis. A aplicação foi empacotada com R Portable e utiliza mecanismos de proteção do código por criptografia. Em testes com dados reais (618 registros), o processamento do pipeline de ETL foi concluído em menos de 3 segundos, enquanto a inicialização completa da versão portátil apresentou média de 8,5 segundos. No cenário de estresse com 147 mil registros (dados reais de 330 parcelas), o processamento foi finalizado em 34,3 segundos, mantendo o tempo de resposta reativa dos filtros inferior a 3 segundos. A avaliação de usabilidade com cinco participantes de diferentes níveis acadêmicos indicou elevada facilidade de uso para a maioria dos módulos, percepção de maior rapidez em comparação com planilhas eletrônicas e intenção unânime de uso em análises futuras. Os resultados demonstram que o TreePlotics reduz barreiras técnicas na exploração de inventários florestais, constituindo uma ferramenta portátil, segura e acessível para atividades de pesquisa e ensino.

Palavras-chave: inventários florestais; visualização de dados; Shiny; R; usabilidade; dashboard.

ABSTRACT

Standardized forest inventories are essential for monitoring and comparative studies of tropical ecosystems; however, their exploratory analysis often requires

programming skills, limiting accessibility for researchers and educators. This study presents TreePlotics, an R/Shiny dashboard that automates the ingestion, processing, and visualization of forest inventory data, focusing on portability, usability, and offline availability of its core functionalities. The system implements an ETL (Extract, Transform, Load) pipeline capable of validating input data, calculating ecological attributes, and providing aggregated metrics, taxonomic rankings, spatial maps, and customizable graphical visualizations. The application was packaged with R Portable and includes code protection mechanisms based on encryption. Tests using real data (618 records) showed that the ETL pipeline processing was completed in less than 3 seconds, whereas the portable version initialization required an average of 8.5 seconds. In a stress scenario with 147,000 records (330 plots), data processing was finished in 34.3 seconds, with reactive filter response times remaining under 3 seconds. A usability assessment with five participants with different academic backgrounds indicated high ease of use for most modules, faster data exploration compared with spreadsheets, and willingness to adopt the tool in future analyses. The results demonstrate that TreePlotics reduces technical barriers to forest inventory exploration, providing a portable, secure, and accessible tool for research and educational applications.

Keywords: forest inventories; data visualization; Shiny; R; usability; dashboard.

1 INTRODUÇÃO

Inventários florestais constituem a base empírica para uma ampla gama de estudos ecológicos e aplicações em conservação, fornecendo informações essenciais sobre a composição, a estrutura e a dinâmica das comunidades vegetais (Corona et al., 2011). Durante um inventário são registrados atributos estruturais e taxonômicos de cada indivíduo amostrado, como diâmetro do tronco, altura, posição espacial, identidade taxonômica e, quando aplicável, o número de fustes pertencentes a uma mesma árvore. Essas informações permitem calcular métricas ecológicas amplamente utilizadas, como densidade de indivíduos, riqueza de espécies, distribuição de classes de diâmetro, área basal e estimativas de biomassa e carbono obtidas por modelos alométricos — equações matemáticas que estimam variáveis de difícil mensuração, como biomassa, a partir de medidas estruturais não destrutivas, como diâmetro, altura e densidade da madeira (Chave et al., 2014). Em conjunto, essas métricas subsidiam estudos sobre biodiversidade, funcionamento de ecossistemas, dinâmica da vegetação, manejo florestal, restauração ecológica e monitoramento dos estoques de carbono e das mudanças climáticas (Chave et al., 2014).

Para garantir que inventários realizados em diferentes regiões e momentos possam ser comparados de forma consistente, diversas redes internacionais estabeleceram protocolos padronizados para coleta, organização e validação desses dados. Iniciativas como o ForestPlots.net, o ForestGEO e a rede DRYFLOR definem procedimentos para o delineamento das parcelas, mensuração dos atributos estruturais, identificação taxonômica, organização dos bancos de dados e controle de qualidade, permitindo integrar informações provenientes de milhares de parcelas distribuídas em diferentes biomas tropicais (Corona et al., 2011; Moonlight

et al., 2021; ForestPlots.net, 2024; ForestGEO, 2026). Essa padronização ampliou significativamente o potencial para análises comparativas em larga escala e para o compartilhamento seguro de informações entre grupos de pesquisa.

Apesar desses avanços, a exploração inicial dos inventários florestais ainda depende, em grande parte, de planilhas eletrônicas ou de linguagens de programação, como R e Python. Atividades como o cálculo de métricas estruturais (área basal, distribuição de diâmetros), a identificação de indivíduos multi-fustes e a síntese de informações por parcela frequentemente exigem múltiplas etapas de processamento ou conhecimentos em programação, representando uma barreira para pesquisadores, estudantes e profissionais sem formação em ciência de dados.

Plataformas de análise de dados de propósito geral, como Power BI (Microsoft, 2024), Tableau (Salesforce, 2024) e Google Looker Studio (Google, 2024), disponibilizam recursos avançados para análise visual, mas sua utilização envolve uma curva de aprendizado considerável. A construção de dashboards geralmente requer a preparação prévia das bases de dados, definição de relacionamentos entre tabelas, criação manual de indicadores e configuração individual de gráficos e painéis. Além disso, essas plataformas não incorporam rotinas específicas para inventários florestais, exigindo que métricas como área basal, identificação de indivíduos multi-fustes ou resumos por parcela sejam previamente calculadas ou implementadas pelo usuário, e suas versões gratuitas frequentemente impõem restrições de armazenamento, compartilhamento ou acesso a funcionalidades avançadas.

Diante desse contexto, este trabalho apresenta o TreePlotics, uma aplicação desenvolvida em R/Shiny para processamento, cálculo de métricas ecológicas e visualização interativa de inventários florestais padronizados. O sistema integra um pipeline de ETL (extração, transformação e carregamento de dados), processamento automático de variáveis estruturais, cálculo de indicadores ecológicos e ferramentas de exploração visual em uma interface gráfica acessível, dispensando conhecimentos de programação. A aplicação foi empacotada utilizando R Portable, permitindo sua execução sem instalação prévia de dependências, e incorpora criptografia simétrica para proteger o código-fonte e dados sensíveis (como coordenadas geográficas e informações de espécies ameaçadas) durante a execução offline, uma vez que os dados são processados exclusivamente em memória RAM e não são persistidos em disco. O objetivo deste trabalho é descrever a arquitetura e as funcionalidades do TreePlotics e avaliar seu desempenho computacional, sua portabilidade e sua usabilidade como ferramenta de apoio à análise exploratória de inventários florestais.

2 METODOLOGIA

2.1 Seleção da estrutura dos dados

O TreePlotics foi desenvolvido utilizando como referência o formato padronizado de inventários florestais adotado por redes colaborativas como o ForestPlots.net, que reúne milhares de parcelas permanentes distribuídas globalmente e estabelece protocolos consistentes para armazenamento de dados (ForestPlots.net, 2024). Entretanto, a arquitetura do sistema foi projetada para processar qualquer conjunto

de dados que contenha as variáveis mínimas necessárias para o cálculo das métricas implementadas.

Para utilizar o TreePlotics, o usuário não precisa realizar nenhuma transformação prévia nos dados. Basta carregar, diretamente pela interface de boas-vindas do sistema, os arquivos no formato padronizado gerados pelas plataformas de inventário (Plot Dump e Metadata). O sistema é responsável por toda a leitura, interpretação e mapeamento interno das colunas, garantindo que o pesquisador não precise se preocupar com a estruturação técnica dos dados.

Os dados de inventário são compostos por registros de fustes individuais contendo informações estruturais, como diâmetro, altura e posição espacial, além da identificação taxonômica e do agrupamento de fustes pertencentes ao mesmo indivíduo. O foco da versão atual do TreePlotics está na exploração de censos únicos, não contemplando análises temporais entre diferentes campanhas de monitoramento.

Os dados validados pelo ForestPlots.net são caracterizados em dois arquivos Excel: um contendo os registros do inventário e definições das variáveis, e outro com metadados relacionados às parcelas (e.g., nome, identificação, coordenadas geográficas, dados climáticos, altitude). Essa estrutura foi utilizada como modelo para o desenvolvimento do sistema.

2.2 Arquivos de entrada e arquitetura do sistema

A aplicação foi desenvolvida utilizando uma arquitetura modular, separando os componentes de ingestão de dados, processamento, visualização e interface gráfica. O módulo de ingestão realiza a leitura das planilhas, padronização dos nomes das variáveis e validação dos dados de entrada. O módulo de processamento calcula atributos derivados, como área basal e identificação de indivíduos com mais de um tronco. Os módulos de visualização são responsáveis pela geração de gráficos interativos, mapas espaciais e tabelas dinâmicas, enquanto a interface foi desenvolvida com tecnologias web integradas ao Shiny, incluindo CSS, HTML e JavaScript. Os principais pacotes utilizados no desenvolvimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais pacotes R utilizados no TreePlotics

Pacote	Função	Referência
shiny	Framework para aplicações web reativas	Chang et al. (2024)
DT	Tabelas interativas com busca, ordenação e paginação	Xie, Cheng & Tan (2024)
leaflet	Mapas interativos e visualização espacial das parcelas	Cheng, Karambelkar & Xie (2024)
plotly	Gráficos interativos (barras, dispersão e histogramas)	Sievert (2020)
shinyWidgets	Componentes avançados de interface (e.g., <i>pickerInput</i> , <i>switchInput</i>)	Perrier, Meyer & Granjon (2024)

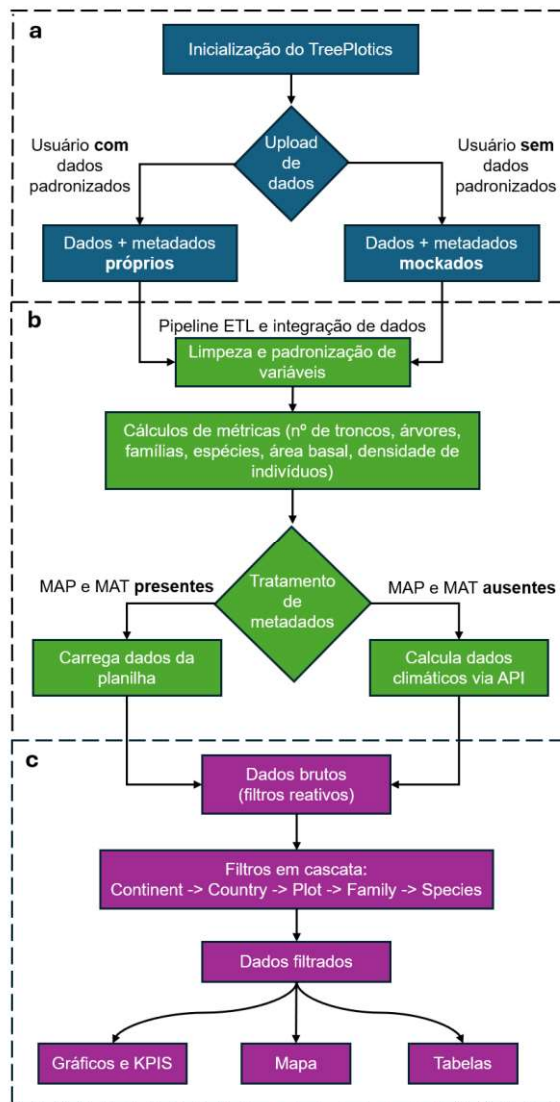
tidyverse	Manipulação, transformação e sumarização dos dados	Wickham et al. (2019)
esquisse	Geração interativa de gráficos por meio de interface drag-and-drop	Meyer & Perrier (2024)
readxl	Leitura de arquivos de inventário e metadados em formato Excel	Wickham & Bryan (2023)
janitor	Padronização e limpeza automática de nomes de colunas	Firke (2023)
httr	Comunicação com a API Open-Meteo para obtenção de dados climáticos	Wickham (2024)
jsonlite	Processamento de respostas JSON retornadas pela API climática	Ooms (2024)
shinyjs	Manipulação de elementos HTML/CSS e implementação dos temas da interface	Attali (2021)

Fonte: o autor (2026).

2.3 Pipeline de processamento de dados

Após a definição dos arquivos de entrada pelo usuário ou ativação do modo demonstrativo com dados simulados (Figura 1a), o TreePlotics inicia seu pipeline automatizado de ETL (Extraction, Transformation, and Loading).

Figura 1. Fluxograma esquemático do pipeline de processamento e arquitetura reativa do TreePlotics. (a) Camada de Entrada e Inicialização: Mapeamento do fluxo de inicialização com suporte a dados próprios carregados via upload ou conjuntos de dados demonstrativos (mockados). (b) Pipeline de ETL e Integração de Dados: Etapa de ingestão onde ocorre a padronização sintática de variáveis, validação e cálculo de métricas ecológicas estruturais (como identificação de indivíduos multi-fuste, área basal e codificação automática de parcelas); seguida pelo tratamento de metadados com resolução de variáveis macroclimáticas (MAT e MAP) de forma direta ou via requisição à API Open-Meteo. (c) Camada Reativa e Interface do Usuário (UI): Consolidação da base de dados no nível de fuste (stem) armazenada na estrutura central do Shiny (dados_brutos), alimentando o sistema de filtros dinâmicos em cascata geográfica e taxonômica para renderização em tempo real das saídas visuais (Gráficos, KPIs, Mapas interativos e Tabelas).



Fonte: o autor (2026).

Na etapa de extração e padronização (Figura 1b), o sistema aplica uma limpeza sintática nos nomes das colunas via algoritmo `clean_names`, converte os tipos de dados e valida os registros. Caso o identificador da parcela (`plot_code`) não esteja explicitamente presente na planilha, o pipeline realiza uma derivação adaptativa a partir do nome do arquivo original. O algoritmo extrai os primeiros seis caracteres do arquivo — substituindo eventuais sublinhados (`_`) por hífen (`-`) —, replicando fielmente a convenção de nomenclatura e o padrão de codificação de inventários exportados da plataforma ForestPlots.net (e.g., um arquivo nomeado `BAU_01_plotdump.xlsx` gera automaticamente o código BAU-01).

Na sequência de transformação (Figura 1b), o sistema processa a arquitetura dos fustes. Indivíduos multi-tronco são identificados dinamicamente através do campo `stem_group_id`, resultando na geração de um identificador único de base genética (`genet_id`) para diferenciar árvores individuais de fustes ramificados (M: para múltiplos e S: para troncos únicos). A partir do ponto de medição de diâmetro selecionado pelo usuário (e.g., POM 1300 ou POM 300), o sistema calcula métricas

estruturais básicas, como a área basal individual, descartando de forma automática registros inconsistentes ou com valores nulos de diâmetro.

A fase subsequente realiza o tratamento e integração dos metadados geográficos e ambientais (Figura 1b). As coordenadas (latitude e longitude) e a área amostral da parcela passam por filtros de consistência espacial. Se as variáveis macroclimáticas de Temperatura Média Anual (MAT) e Precipitação Média Anual (MAP) estiverem presentes no arquivo de metadados uploadado, o sistema faz o carregamento direto desses valores. Caso estejam ausentes, o pipeline dispara uma consulta assíncrona à API do Open-Meteo (baseada no modelo de reanálise ERA5), estimando os parâmetros climáticos locais em tempo real com base no posicionamento geográfico da parcela.

Por fim, os dados consolidados no nível de fuste (stem) são injetados na Camada Reativa (Figura 1c) e instanciados no objeto central dados_brutos (reactiveVal). Essa estrutura reativa alimenta os filtros em cascata ordenados por hierarquia geográfica e taxonômica (Continent → Country → Plot → Family → Species), gerando o subconjunto dinâmico dados_filtrados que atualiza instantaneamente os componentes da interface do usuário (Gráficos, KPIs, Mapas e Tabelas de resumo por parcela).

2.4 Funcionalidades implementadas

As funcionalidades do TreePlotics foram organizadas em seis módulos de visualização e exploração de dados, permitindo que as informações processadas pelo pipeline de ETL sejam analisadas de forma interativa sem a necessidade de programação.

O módulo Dashboard fornece uma visão geral do conjunto de dados por meio de indicadores agregados (KPIs), incluindo número de indivíduos, fustes, espécies, famílias, parcelas, países e área basal total. Além disso, apresenta distribuições das variáveis estruturais e ambientais, bem como um mapa interativo com a localização das parcelas e uma tabela resumindo métricas por unidade amostral.

O módulo Taxonomy permite explorar a composição taxonômica do inventário por meio de gráficos de abundância relativa e tabelas interativas contendo informações como número de indivíduos, número de fustes e área basal por grupo taxonômico.

O módulo Explore integra o pacote esquisse, possibilitando a construção de visualizações personalizadas a partir das variáveis disponíveis no inventário ou em conjuntos de dados resumidos, utilizando uma interface gráfica de arrastar e soltar.

O módulo Plot 2D representa a distribuição espacial dos indivíduos dentro das parcelas, utilizando as coordenadas cartesianas registradas em campo e permitindo a inspeção de atributos associados a cada indivíduo, como identificação taxonômica, dimensões e estrutura multi-tronco.

O sistema também disponibiliza módulos de inspeção dos dados originais e de suas definições, permitindo ao usuário consultar os registros carregados e os metadados associados às variáveis presentes no inventário.

A interface foi implementada utilizando os mecanismos reativos do Shiny, permitindo que alterações nos filtros de seleção sejam propagadas automaticamente para todos os componentes dependentes sem necessidade de recarregamento da aplicação. Adicionalmente, a aplicação oferece suporte a diferentes temas visuais (claro e escuro) e foi distribuída utilizando R Portable, possibilitando sua execução sem instalação de dependências adicionais. Os scripts da aplicação são protegidos por criptografia simétrica, sendo descriptografados dinamicamente durante a execução.

2.5 Avaliação do sistema

A avaliação do TreePlotics foi conduzida em duas dimensões complementares: desempenho computacional e validação funcional. Os testes foram realizados em um notebook Lenovo Gaming 3i (Intel Core i7-10750H, 16 GB RAM, Windows 11), representando um ambiente típico de uso para pesquisadores e estudantes, uma vez que a aplicação é distribuída como uma ferramenta desktop portátil, sem necessidade de servidores dedicados.

2.5.1 Desempenho computacional

Para verificar a viabilidade do processamento em computadores pessoais, foram realizadas medições do tempo necessário para a execução do pipeline de ETL e para a inicialização da versão portátil. Utilizou-se um conjunto de dados reais provenientes de uma parcela do Parque Nacional do Catimbau (Pernambuco, Brasil), totalizando 618 registros — volume representativo de um inventário florestal típico em 1 hectare.

O tempo de processamento do pipeline de ETL (leitura, limpeza, transformação e integração dos dados) foi medido com o pacote *tictoc*, excluindo o tempo de renderização da interface. Para a inicialização da versão portátil, considerou-se o intervalo entre a execução do aplicativo e a exibição da tela inicial, incluindo o carregamento do ambiente R Portable e a descriptografia dos scripts. Os tempos foram registrados em cinco repetições independentes para cada métrica.

Complementarmente, para avaliar a escalabilidade do sistema em cenários mais exigentes, foi realizado um teste com um conjunto de dados consolidado de 330 parcelas e aproximadamente 147 mil registros, simulando a integração de múltiplos inventários para análises comparativas em larga escala.

2.5.2 Validação funcional

A validação funcional consistiu na execução de todas as funcionalidades implementadas no sistema, incluindo carregamento de dados, aplicação de filtros, atualização reativa dos componentes, alternância entre temas claro e escuro e operação sem conexão com a internet. Nesse último cenário, verificou-se quais funcionalidades permanecem operacionais e quais dependem de conexão ativa.

2.6 Avaliação de usabilidade

A avaliação de usabilidade do TreePlotics foi conduzida por meio de um questionário online estruturado, aplicado após a utilização da versão portátil da aplicação. O objetivo da avaliação foi analisar a percepção dos usuários quanto à facilidade de uso das funcionalidades implementadas, à utilidade da ferramenta em comparação com métodos tradicionais baseados em planilhas eletrônicas e ao potencial de utilização em futuras análises de inventários florestais. O questionário completo utilizado para a avaliação de usabilidade encontra-se disponível no Material Suplementar S1.

Inicialmente, foram coletadas informações sobre o perfil dos participantes, incluindo vínculo acadêmico, experiência prévia com inventários florestais e nível de familiaridade com planilhas eletrônicas e programação. Essas informações permitiram caracterizar o público avaliado e verificar a aplicabilidade do sistema para usuários com diferentes níveis de experiência computacional.

A facilidade de uso dos principais módulos do TreePlotics foi avaliada por meio de uma escala Likert de cinco pontos, variando de 1 (muito difícil) a 5 (muito fácil), incluindo tarefas como carregamento de arquivos, interpretação dos indicadores principais, utilização dos filtros, identificação de métricas ecológicas, exploração da composição taxonômica, geração de gráficos personalizados, visualização espacial das parcelas e inspeção dos dados brutos.

A percepção de utilidade foi avaliada por questões comparativas em relação ao uso de planilhas eletrônicas, considerando a rapidez na visualização e síntese dos dados, a simplicidade da exploração das informações e a intenção de utilização do TreePlotics em análises futuras. Também foi disponibilizado um campo aberto para comentários e sugestões de melhorias.

Os resultados da avaliação foram compilados por meio de estatísticas descritivas, incluindo frequências relativas das respostas, médias das pontuações obtidas nas escalas de usabilidade e síntese qualitativa dos comentários fornecidos pelos participantes.

3 RESULTADOS

3.1 Desempenho computacional e validação funcional

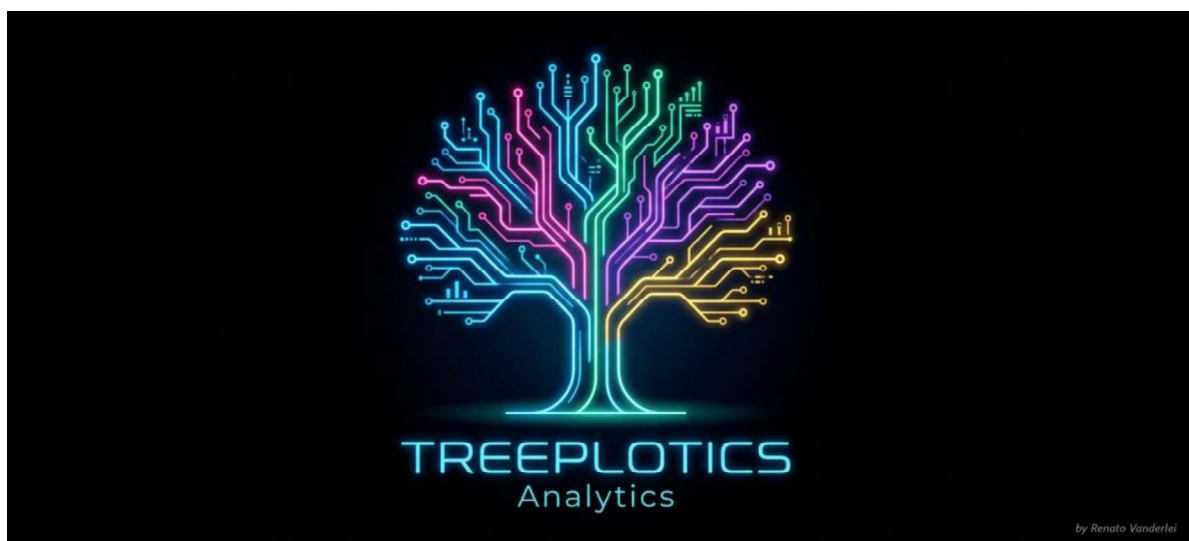
O TreePlotics demonstrou capacidade de processar inventários florestais de forma eficiente, apresentando tempo total de inicialização e carregamento inferior a 10 segundos (média: 8,5 segundos; cinco repetições). O processamento de dados para o cenário de 1 hectare (618 registros) foi concluído em menos de 3 segundos. Os componentes reativos da interface responderam às alterações de filtros também em menos de 3 segundos, sem travamentos ou necessidade de recarregamento da aplicação. No cenário de estresse (147 mil registros, 330 parcelas), o processamento foi concluído em 34,3 segundos, com atualizações de filtros inferiores a 5 segundos.

Os testes funcionais confirmaram o correto funcionamento das principais características do sistema, incluindo a atualização em cascata dos filtros taxonômicos e espaciais, alternância entre os modos claro e escuro, carregamento automático do modo demonstrativo e execução offline. Na ausência de conexão com a internet, todas as funcionalidades locais permaneceram operacionais, com exceção da obtenção automática de variáveis climáticas via API e da renderização das camadas cartográficas externas.

3.2 Interface e funcionalidades do sistema

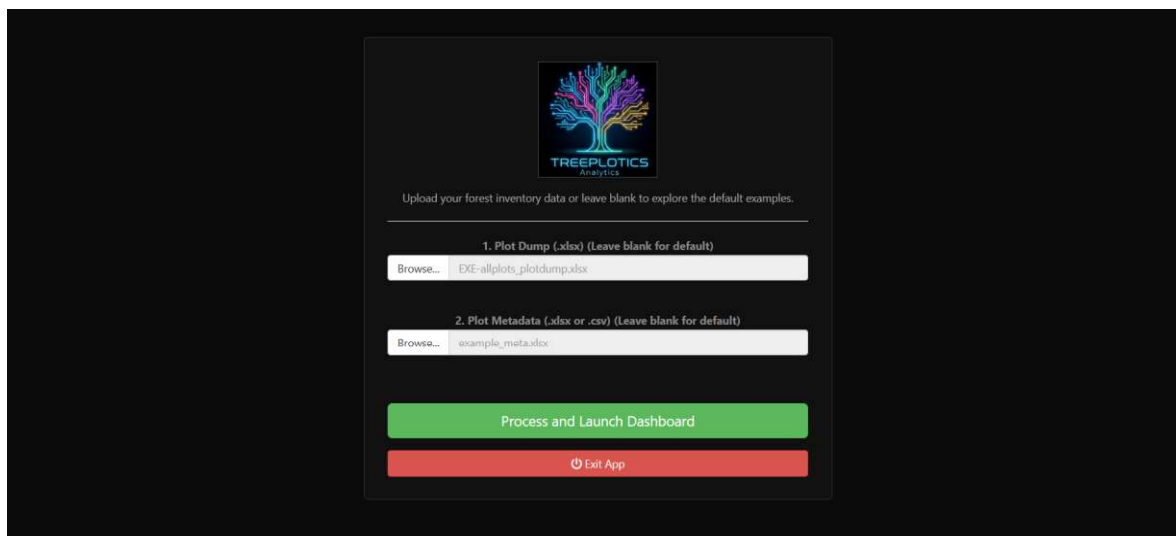
A interface do TreePlotics é composta por uma tela inicial de carregamento (Figura 2), seguida pela tela de boas-vindas e seleção dos arquivos de entrada (Figura 3). Nesta tela, o usuário é instruído como carregar os dados necessários, tendo ou não acesso ao ForestPlots.net. Após o processamento dos dados, o sistema disponibiliza módulos especializados para análise e exploração dos inventários florestais.

Figura 2. Splash screen com 2 segundos de duração exibindo a logo do sistema TreePlotics.



Fonte: o autor (2026).

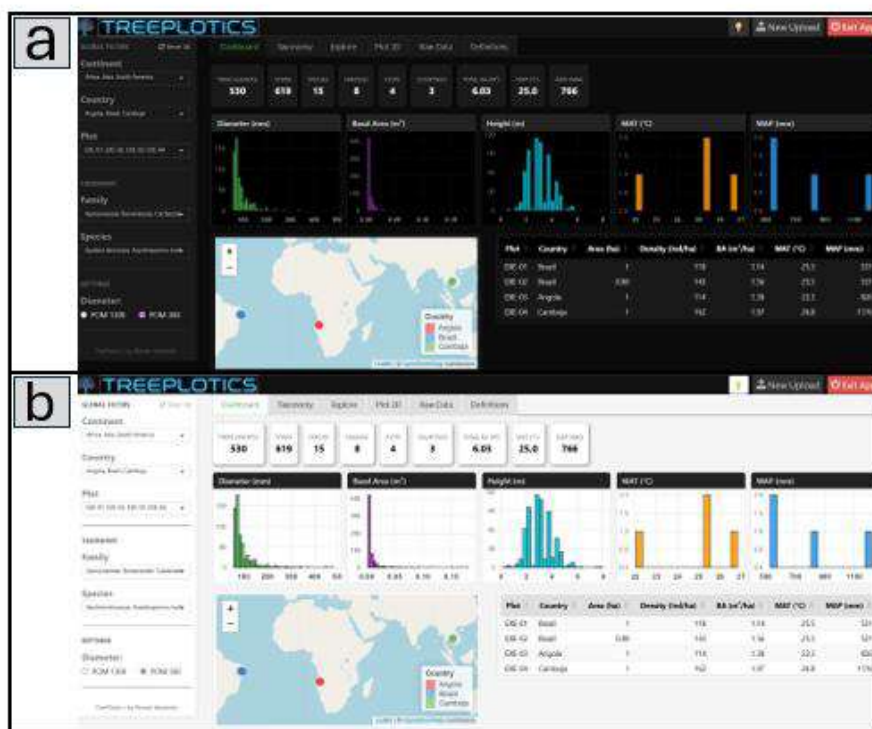
Figura 3. Tela de boas-vindas, com botões de upload, processamento, e saída do TreePlotics.



Fonte: o autor (2026).

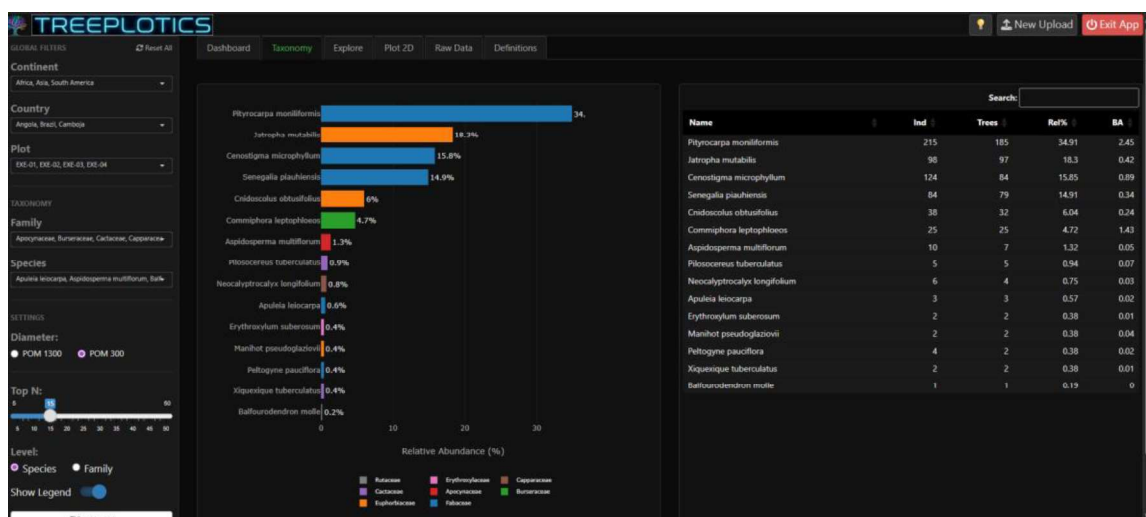
O módulo Dashboard apresenta uma síntese geral dos dados por meio de indicadores estruturais da vegetação, distribuições das variáveis ambientais em histogramas e visualização espacial das parcelas (Figuras 4a e 4b). A aba Taxonomy permite explorar a composição taxonômica e a dominância/raridade dos grupos registrados (Figura 5), enquanto o módulo Explore possibilita a criação de visualizações personalizadas por meio de uma interface gráfica sem necessidade de programação (Figura 6). O módulo Plot 2D apresenta a distribuição espacial dos indivíduos dentro das parcelas e seus atributos associados (Figura 7). Por fim, os módulos Raw Data e Definitions permitem a inspeção dos registros originais e a consulta dos metadados das variáveis disponíveis (Figuras 8 e 9).

Figura 4. (a) Tela inicial pós-carregamento dos dados no TreePlotics, exibindo a aba “Dashboard” com métricas no nível de parcelas, filtros em cascata, mapa com localização das parcelas, histogramas com a distribuição de dados, e tabela com resumo de informações das parcelas carregadas; (b) Modo claro da mesma tela inicial pós-carregamento “Dashboard”.



Fonte: o autor (2026).

Figura 5. Aba “Taxonomy” do sistema TreePlotics, exibindo um gráfico de rank de abundância e uma tabela ordenando as espécies mais dominantes dos dados carregados.



Fonte: o autor (2026).

Figura 6. Aba “Explore” do sistema TreePlotics, exibindo um exemplo de gráfico do tipo boxplot onde o usuário escolhe as variáveis a serem utilizadas na geração de gráficos.



Fonte: o autor (2026).

Figura 7. Aba “Plot 2D” do sistema TreePlotics, exibindo a configuração espacial das árvores e perfis dentro do espaço de 100 metros por 100 metros da parcela selecionada. As cores representam diferentes espécies, enquanto o tamanho do círculo representa o diâmetro da árvore.



Fonte: o autor (2026).

Figura 8. Aba “Raw data” do sistema TreePlotics, onde o usuário encontra a sua base de dados carregada em formato de planilha eletrônica, com filtros interativos para filtros, consultas ou ordenação de dados.

	plot_code	tree_id	stem_group_id	main_stem_tag	pv_tag_no	tag_no	t1	t2	x	y	family	species	subspecies
1	EXE-01	1	104096	1		1	1	1	4	2.15	Apocynaceae	Aspidosperma multiflorum	
2	EXE-01	2				10	1	2	5.6	40	Euphorbiaceae	Jatropha mutabilis	
3	EXE-01	3				11	1	1	7.6	9	Fabaceae	Pithecarpa monilliformis	
4	EXE-01	4				119	1	3	10	58.2	Fabaceae	Pithecarpa monilliformis	
5	EXE-01	5				12	1	1	6.3	7.6	Fabaceae	Cenostigma microphyllum	
6	EXE-01	6				137	1	5	10	93.4	Fabaceae	Senegalia piauiensis	
7	EXE-01	7				14	1	1	0	15	Euphorbiaceae	Jatropha mutabilis	
8	EXE-01	8				15	1	1	7.1	11.9	Fabaceae	Cenostigma microphyllum	

Fonte: o autor (2026).

Figura 9. Aba “Definitions” do sistema TreePlotics, onde o usuário pode verificar o significado de cada coluna presente na aba “Raw data”.

	HEADER	UNITS	DESCRIPTION
1	Tree ID		Unique identifier of each stem in the ForestPlots.net database.
2	Stem Group ID		For multiple stemmed trees, the unique identifier of each multi-stem group in the ForestPlots.net database.
3	Main Stem Tag		For multiple stemmed trees, the tag number of the largest stem (largest diameter) from all the linked stems.
4	Pv. Tag No		The previous field tag number of the stem
5	Tag No		The current field tag number of the stem
6	T1		Subplot: number or code of the primary subplot where the tree is located (as collected in the field). For a standard 1 ha plot, T1 corresponds to the 25 20m x 20m subplot division
7	T2		Additional subplot system: number or code of the secondary subplot (as collected in the field)
8	X		x co-ordinate, as collected in the field
9	Y		y co-ordinate, as collected in the field
10	Family		Family name following APGIII: the current family determination uploaded to ForestPlots
11	Species		Latin binomial name (ie. Genus species): the current species determination uploaded to ForestPlots
12	Subspecies		Subspecies (ie taxonomic category that ranks below species): the current subspecies determination uploaded to ForestPlots
13	Variety		Variety (ie taxonomic rank below that of subspecies): the current variety uploaded to ForestPlots
14	Recommended family		ForestPlots' best estimate of the taxonomically accepted family name. This name is the current family determination that has been updated with any synonym information that has been uploaded to the database.
15	Recommended Species		ForestPlots' best estimate of the taxonomically accepted latin binomial (Genus species) name. This name is the current species determination that has been updated with any synonym information that has been uploaded to the database.

Fonte: o autor (2026).

3.3 Avaliação de usabilidade

A avaliação de usabilidade foi realizada com cinco participantes, sendo quatro discentes e um docente, todos com experiência prévia em inventários florestais. Os participantes apresentaram diferentes níveis de familiaridade com ferramentas computacionais, variando de intermediário a especialista no uso de planilhas eletrônicas e de ausência de experiência até nível avançado em programação.

De forma geral, o TreePlotics apresentou elevada facilidade de uso, com médias majoritariamente superiores a 4,0 para a maior parte das funcionalidades avaliadas (Tabela 2). As funções relacionadas ao carregamento dos dados, identificação de métricas estruturais e exploração taxonômica obtiveram as maiores avaliações, com

médias próximas ao valor máximo da escala. As menores avaliações foram observadas nos módulos Explore e Plot 2D, principalmente devido à necessidade de maior orientação inicial ao usuário, conforme apontado nos comentários qualitativos.

Tabela 2. Média das avaliações de facilidade de uso das funcionalidades do TreePlotics em uma escala Likert de 1 (muito difícil) a 5 (muito fácil).

Funcionalidade	Média
Carregar inventário	4.8
Carregar metadados	4.6
Compreender indicadores	3.6
Identificar indivíduos	4.8
Identificar área basal	4.8
Identificar espécies abundantes	4.8
Usar filtros	4.4
Gerar gráficos personalizados	3.8
Interpretar Plot 2D	4
Verificar dados brutos	4.6
Alternar tema	4.5*

* Considerando apenas os usuários que utilizaram a funcionalidade (3 respostas válidas). Fonte: o autor (2026).

Quanto à utilidade percebida, todos os participantes concordaram que o TreePlotics tornou a visualização e síntese dos dados mais rápida em comparação ao uso convencional de planilhas eletrônicas, e quatro dos cinco participantes concordaram que o sistema simplifica a exploração dos dados com nota máxima (5). Além disso, todos os avaliadores indicaram que utilizariam a ferramenta em análises futuras.

Os comentários abertos reforçaram os resultados quantitativos, destacando como principais pontos positivos a rapidez na obtenção de resumos ecológicos, a exploração da composição taxonômica e a geração de gráficos personalizados. Como sugestões de melhoria, foram indicadas principalmente a inclusão de instruções adicionais para funcionalidades mais complexas, correções de pequenos problemas de visualização e a expansão do suporte para novos tipos de dados ecológicos.

4 DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que o TreePlotics atende ao objetivo proposto de tornar a exploração inicial de inventários florestais mais acessível, integrando etapas de ingestão de dados, processamento de métricas ecológicas e visualização interativa em uma única interface gráfica. A automatização dessas etapas reduz a necessidade de operações manuais em planilhas ou da elaboração de scripts específicos, permitindo que informações como riqueza taxonômica, estrutura da vegetação, área basal e distribuição espacial dos indivíduos sejam obtidas rapidamente.

A avaliação de usabilidade reforça esse potencial de aplicação, uma vez que todos os participantes indicaram que o TreePlotics tornou a visualização e síntese dos dados mais rápida quando comparada ao uso de planilhas eletrônicas, e todos afirmaram que utilizariam a ferramenta em análises futuras. Um aspecto relevante é que os avaliadores apresentavam diferentes níveis de familiaridade com programação, desde ausência de experiência até nível avançado, sugerindo que a interface consegue atender tanto usuários sem formação computacional quanto pesquisadores com maior experiência em análise de dados. A principal limitação da avaliação de usabilidade é o tamanho amostral reduzido (N=5), o que impede generalizações estatísticas, embora os resultados qualitativos indiquem tendências positivas.

A portabilidade proporcionada pelo empacotamento com R Portable representa uma vantagem adicional, especialmente em contextos de campo, atividades de ensino e instituições com infraestrutura computacional limitada. Diferentemente das aplicações que dependem de servidores dedicados ou configurações complexas de instalação, o TreePlotics pode ser executado localmente em computadores Windows sem a necessidade de instalação prévia de ambientes de desenvolvimento ou pacotes adicionais. Além disso, a possibilidade de funcionamento offline preserva a utilização das principais funcionalidades do sistema em locais sem acesso à internet.

Apesar dos resultados positivos, a avaliação de usabilidade também evidenciou oportunidades de aprimoramento. Os módulos de exploração personalizada de gráficos e de visualização espacial (Plot 2D) receberam as menores avaliações de facilidade de uso, e os comentários dos participantes indicaram a necessidade de incluir orientações adicionais, tutoriais ou elementos de ajuda contextual que facilitem a utilização dessas funcionalidades por usuários sem familiaridade prévia com esse tipo de interface.

Entre as limitações atuais do sistema estão a dependência de conexão com a internet para obtenção automática de variáveis climáticas quando ausentes nos metadados, o suporte apenas a censos únicos e a necessidade de maior flexibilidade para incorporar dados de inventários em outros formatos.

Trabalhos futuros podem incluir a integração de modelos alométricos amplamente utilizados para estimativas de biomassa e carbono, como as equações propostas por Chave et al. (2014), suporte a múltiplos censos temporais, expansão dos formatos de entrada e saída de dados e implementação de mecanismos adicionais de suporte ao usuário, como tutoriais interativos e sistemas de ajuda incorporados à interface.

5 CONCLUSÃO

O TreePlotics alcançou seu objetivo de automatizar a exploração de inventários florestais, integrando processamento, métricas e visualização interativa em uma interface acessível, sem exigir programação. A arquitetura reativa, a portabilidade via R Portable e a criptografia de dados sensíveis garantem segurança e execução offline, diferenciais para aplicações ecológicas. O processamento mostrou-se eficiente, e a avaliação de usabilidade indicou alta aceitação. Como perspectivas,

prevê-se suporte a múltiplos censos e modelos de biomassa. Conclui-se que o TreePlotics é uma ferramenta prática, segura e acessível para o monitoramento de inventários florestais, com potencial para pesquisa e ensino.

REFERENCIAS

ATTALI, D. **shinyjs**: Easily Improve the User Experience of Your Shiny Apps in Seconds. R package version 2.1.0. [S. l.: s. n.], 2021.

CHANG, W. *et al.* **shiny**: Web Application Framework for R. R package version 1.9.1. [S. l.: s. n.], 2024.

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

CHENG, J.; KARAMBELKAR, B.; XIE, Y. **leaflet**: Create Interactive Web Maps with the JavaScript 'Leaflet' Library. R package version 2.2.1. [S. l.: s. n.], 2024.

CÓDIGO de Catalogação Anglo-Americano. 2. ed. São Paulo: FEBAB, 1985.

CORONA, P. *et al.* Contribution of large-scale forest inventories to biodiversity assessment and monitoring. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 262, n. 11, p. 2061–2069, 2011.

FIRKE, S. **janitor**: Simple Tools for Examining and Cleaning Dirty Data. R package version 2.2.0. [S. l.: s. n.], 2023.

FORESTGEO. **GEO-TREES**: Global Earth Observatory – Trees. 2026. Disponível em: <https://forestgeo.si.edu/geo-trees>. Acesso em: 30 jul. 2026.

FORESTPLOTS.NET. **Standardized plot data format**. 2024. Disponível em: <https://forestplots.net>. Acesso em: 30 jul. 2026.

GOOGLE. **Google Looker Studio**. 2024. Disponível em: <https://lookerstudio.google.com>. Acesso em: 30 jul. 2026.

IBGE. **Normas de Apresentação tabular**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

MEYER, F.; PERRIER, V. **esquisse**: Explore and Visualize Your Data Interactively. R package version 1.1.0. [S. l.: s. n.], 2024.

MICROSOFT. **Power BI**. 2024. Disponível em: <https://powerbi.microsoft.com>. Acesso em: 30 jul. 2026.

MOONLIGHT, P. W. *et al.* Expanding tropical forest monitoring into Dry Forests: The DRYFLOR protocol for permanent plots. **Plants, People, Planet**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 295–300, 2021.

OOMS, J. **jsonlite**: A Simple and Robust JSON Parser and Generator for R. R package version 1.8.8. [S. l.: s. n.], 2024.

OPEN-METEO. **Archive API Documentation**. 2024. Disponível em: <https://open-meteo.com>. Acesso em: 30 jul. 2026.

PERRIER, V.; MEYER, F.; GRANJON, D. **shinyWidgets**: Custom Inputs and Widgets for Shiny. R package version 0.8.0. [S. l.: s. n.], 2024.

R CORE TEAM. **R**: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

SIEVERT, C. **Interactive Web-Based Data Visualization with R, plotly, and shiny**. [S. l.]: Chapman and Hall/CRC, 2020.

TABLEAU. **Tableau**. 2024. Disponível em: <https://www.tableau.com>. Acesso em: 30 jul. 2026.

WICKHAM, H. **httr**: Tools for Working with URLs and HTTP. R package version 1.4.7. [S. l.: s. n.], 2024.

WICKHAM, H. *et al.* Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software**, [S. l.], v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

WICKHAM, H.; BRYAN, J. **readxl**: Read Excel Files. R package version 1.4.2. [S. l.: s. n.], 2023.

XIE, Y.; CHENG, J.; TAN, X. **DT**: A Wrapper of the JavaScript Library 'DataTables'. R package version 0.33. [S. l.: s. n.], 2024.