



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA
CAMPUS JORGE AMADO
CENTRO DE FORMAÇÃO EM CIÊNCIAS AGROFLORESTAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Shakespeare Antonio Rodrigues

Efeitos de gradientes edáficos no estoque de carbono de Florestas de Restinga

Itabuna – Bahia

2025

Shakespeare Antonio Rodrigues

Efeitos de gradientes edáficos no estoque de carbono de Florestas de Restinga

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Centro de Formação em
Ciências Agroflorestais da Universidade
Federal do Sul da Bahia, com vistas a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Orientador(a): Luiz Fernando Silva
Magnago

Itabuna – Bahia

2025

Shakespeare Antonio Rodrigues

Efeitos de gradientes edáficos no estoque de carbono de Florestas de Restinga

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Centro de Formação em Ciências Agroflorestais da Universidade Federal do Sul da Bahia, com vistas a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador(a): Luiz Fernando Silva Magnago

Este trabalho foi submetido a avaliação e julgado aprovado em: 09/12/2025.



Documento assinado digitalmente
LUIZ FERNANDO SILVA MAGNAGO
Data: 17/12/2025 15:11:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Fernando Silva Magnago
Orientador

Universidade Federal do Sul da Bahia



Documento assinado digitalmente
JOMAR GOMES JARDIM
Data: 15/12/2025 14:37:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jomar Gomes Jardim
Membro Convidado



Documento assinado digitalmente
DANIEL PIOTTO
Data: 17/12/2025 10:13:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sul da Bahia

Prof. Dr. Daniel Piotto

Membro Convidado

Universidade Federal do Sul da Bahia

Itabuna – Bahia

2025

VERSO DA FOLHA DE ROSTO

FICHA CATALOGRÁFICA EMITIDA PELO SETOR DA BIBLIOTECA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, aos meus amados pais, Herbene e Antônio, por serem a base da minha estrutura e por acreditarem incondicionalmente no meu potencial e na minha jornada.

Aos meus avós maternos, Luiz e Isabel, por todo o apoio e carinho oferecidos durante a construção desta etapa acadêmica.

E, *in memoriam*, à minha avó paterna, Maria Anita, cuja memória e apoio constante seguirão sendo uma inspiração, mesmo após sua partida neste ano.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder saúde, sabedoria e resiliência, pilares fundamentais que sustentaram toda esta jornada acadêmica.

Aos meus pais, Herbene e Antônio, por serem a base de tudo, oferecendo suporte integral e auxílio constante na minha formação, tanto como pessoa quanto como estudante.

Aos meus amados avós maternos, Luiz e Isabel, por terem acreditado em mim desde o início e por proverem todo o suporte e amparo necessários em cada etapa.

Guardo com imenso carinho a memória de minha avó paterna, Maria Anita, cuja contribuição na minha formação como pessoa e na transmissão de bons princípios será inesquecível.

À minha família, por sempre acreditarem em mim.

À minha madrinha, Fernanda, que sempre esteve disponível para me dar suporte.

A meu padrinho, Jackson, por sempre me apoiar.

Agradeço aos meus amigos, Giuseppe, Osny, Ítalo, Danillo, Luciano, Matheus, Salvador, Vladimir, Luan e Lucas que com seu apoio e valiosos conselhos, foram essenciais para me manter resiliente ao longo desta trajetória.

À minha família escolhida na universidade: Edylla Mayra, João Pedro França, Beatriz Lins e Gabriel Montanher, irmãos de vida com os quais construí um relacionamento que levarei comigo com muito afeto.

Estendo minha gratidão aos amigos que a vida acadêmica me proporcionou: Ana Luíza, Elaine, Thaísa Rodrigues, Gabriele Freitas, Maria Eduarda, Paulo Coelho, Wallace Plácido, Gabriel Borges, João Pedro Cardoso por todos os momentos únicos e inesquecíveis que compartilhamos.

Ao meu orientador, Luiz Magnago, por ter me dado a oportunidade de realizar tanto o presente estudo quanto a iniciação científica.

Aos meus antigos orientadores, Ricardo Gabriel e Ana Paula, que me ensinaram não apenas conteúdo técnico, mas também importantes valores para a vida.

À minha orientadora de estágio, Mara Lúcia, pela oportunidade de aprendizado prático.

Aos demais professores não citados, fica registrada minha imensa gratidão por todos os conhecimentos transmitidos com dedicação e pela amizade que foi construída durante o curso.

Por fim, agradeço à Universidade, especialmente ao Centro de Formação em Ciências Agroflorestais, por meio do qual fui auxiliado com projetos de pesquisa e bolsa, concretizando este trabalho.

RESUMO

As mudanças climáticas intensificam a necessidade de compreender o papel dos ecossistemas terrestres no sequestro e estocagem de carbono. Entre esses ambientes, as florestas de restinga se destacam pela elevada heterogeneidade edáfica e hidrológica, que influenciam diretamente sua estrutura e funcionalidade ecológica. Este estudo investigou como gradientes de alagamento e variáveis edáficas afetam a biomassa aérea, o estoque de carbono e os parâmetros dendrométricos (DAP, altura e densidade da madeira) em formações florestais do Parque Natural Municipal de Jacarenema, no Espírito Santo.

Foram amostradas 80 parcelas permanentes distribuídas em quatro formações: Floresta Não Inundável (FNI), Floresta Inundável (FIV), Floresta de Transição (FNT) e Floresta Inundada (FIN). Para cada indivíduo arbóreo foram mensurados DAP, altura total e densidade da madeira. A biomassa aérea foi estimada com equações alométricas e o carbono aéreo foi calculado por meio do fator de conteúdo de carbono. Amostras de solo (0–10 cm) foram analisadas quanto à fertilidade, acidez, granulometria e CTC. As relações entre estrutura florestal, carbono e variáveis edáficas foram avaliadas por ANOVA e inferência multimodelo. Os resultados mostraram diferenças estruturais marcantes entre as formações. A FIN apresentou maior densidade de indivíduos, enquanto a FNT exibiu maior DAP, altura e estoque de carbono. A biomassa aérea variou significativamente ao longo do gradiente hidrológico, refletindo restrições fisiológicas impostas pelo alagamento contínuo. A modelagem indicou que SB, CTC e saturação por alumínio são os principais preditores do carbono acima do solo, com solos distróficos e ácidos concentrando maiores estoques.

Conclui-se que o estoque de carbono em florestas de restinga é determinado pela interação entre o regime de alagamento e gradientes edáficos, reforçando a necessidade de considerar a heterogeneidade ambiental no manejo, conservação e restauração desses ecossistemas costeiros.

Palavras-chave: Biomassa, Condições Edáficas, Floresta de Restinga.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

Climate change intensifies the need to understand the role of terrestrial ecosystems in carbon sequestration and storage. Among these environments, coastal dune forests stand out due to their high edaphic and hydrological heterogeneity, which directly influences their ecological structure and functionality. This study investigated how flooding gradients and edaphic variables affect aboveground biomass, carbon stock, and dendrometric parameters (DBH, height, and wood density) in forest formations of the Jacarenema Municipal Natural Park, in Espírito Santo, Brazil.

Eighty permanent plots were sampled, distributed across four formations: Non-Flooded Forest (NFF), Flooded Forest (IFV), Transitional Forest (TFF), and Flooded Forest (FIN). For each tree, DBH, total height, and wood density were measured. Aboveground biomass was estimated using allometric equations and aboveground carbon was calculated using the carbon content factor. Soil samples (0–10 cm) were analyzed for fertility, acidity, particle size distribution, and cation exchange capacity (CEC). The relationships between forest structure, carbon, and edaphic variables were evaluated using ANOVA and multi-model inference. The results showed marked structural differences between the formations. The FIN (Forest Forest) presented a higher density of individuals, while the FNT (Coastal Forest) exhibited greater DBH (diameter at breast height), height, and carbon stock. Aboveground biomass varied significantly along the hydrological gradient, reflecting physiological constraints imposed by continuous flooding. Modeling indicated that SB (Soil Biomass), CEC, and aluminum saturation are the main predictors of aboveground carbon, with dystrophic and acidic soils concentrating higher stocks.

It is concluded that carbon stock in restinga forests is determined by the interaction between the flooding regime and edaphic gradients, reinforcing the need to consider environmental heterogeneity in the management, conservation, and restoration of these coastal ecosystems.

Key Words: Biomass, Soil Conditions, Restinga Forest.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	METODOLOGIA.....	12
2.2	Inventário Florestal e Parâmetros Dendrométricos.....	13
2.3	Classificação dos Regimes de Alagamento e Delineamento Amostral	14
2.4	Análise do Solo e Variáveis Edáficas.....	14
2.5	Análise Estatística	15
3	RESULTADOS	17
3.1	Fatores edáficos influenciando o carbono.....	18
4	DISCUSSÃO	20
4.1	Influência do regime de alagamento na estrutura da vegetação.....	21
4.2	Efeitos das propriedades edáficas no estoque de carbono	22
4.3	Gradiente hidrológico como determinante do carbono aéreo.....	23
5	CONCLUSÃO.....	24
	REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais da atualidade, manifestando-se no aumento de temperaturas e na intensificação de eventos extremos, como secas e inundações (IPCC, 2023). O aquecimento do planeta é impulsionado pela ação antrópica, decorrente de mais de um século de queima de combustíveis fósseis e do uso insustentável da terra, incluindo o desmatamento e a agropecuária intensiva (IPCC, 2023). Contudo, considerado apenas o Brasil, o desmatamento tem sido, historicamente, o fator com maior contribuição (~46% de emissões de CO₂ na série histórica) para o aquecimento global (SEEG, 2025). Nesse cenário, a mitigação das mudanças climáticas depende primariamente do sequestro e da estocagem de carbono por ecossistemas terrestres, os quais são considerados grandes sumidouros de CO₂ (Machado, 2005). É essencial, portanto, aprofundar a compreensão sobre as relações ecológicas e estruturais que determinam a capacidade de florestas e formações vegetais em reter carbono, maximizando a sua contribuição para o balanço global e reduzindo o efeito antrópico no clima.

O Brasil se destaca globalmente pelo potencial de mitigação das mudanças climáticas, em função de sua vasta cobertura vegetal e da diversidade de seus biomas (Soterroni *et al.*, 2023). Por um lado, biomas como a Amazônia, que representa a maior floresta tropical do planeta, e o Cerrado, com sua rica biodiversidade, atuam como gigantescos reservatórios naturais de carbono (C), sequestrando CO₂ da atmosfera (SEEG, 2023). Por outro lado, a principal fonte de emissões brasileiras ainda reside na mudança do uso da terra (SEEG, 2023), o que torna a conservação e a quantificação precisa do carbono em todas as fitofisionomias do território nacional uma prioridade estratégica. Nesse contexto, a Mata Atlântica, um *hotspot* de biodiversidade altamente ameaçado, possui um papel significativo no balanço de carbono regional (Machado *et al.*, 2019). Dentro desse bioma, as Florestas de Restinga constituem ecossistemas costeiros de alta complexidade, esses ecossistemas têm relevância climática e ecológica significativa, porém as mesmas não são tão aprofundadas em questão de disponibilidade de pesquisas sobre a dinâmica do carbono (MEA, 2005; Marques, Silva e Liebsch, 2015).

A Restinga é um ecossistema brasileiro resultado do avanço e regressão do mar sobre o continente, formando regiões arenosas durante o período Quaternário

(Martin *et al.*, 1997). A heterogeneidade desses depósitos arenosos aliados aos processos pedogenéticos, como formação dos Espodossolos e Neossolos Quartzarênicos, auxilia para a existência de diferentes gradientes edáficos (Magnago *et al.*, 2010). Os Espodossolos geralmente são os tipos de solos mais costumeiramente encontrados nos ambientes de restinga (Oliveira; Jacomine e Camargo, 1992). Segundo Sauer *et al.* (2007) a formação desses solos ocorre após a mobilização e translocação de partículas, diferenciando o horizonte eluvial e iluvial, formando o Espodossolo. Outro tipo de solo também costumeiramente encontrado nas áreas de Restinga são os Neossolos Quartzarênicos, os quais são solos minerais de sequência de horizontes A-C e diferem dos Espodossolos principalmente pela ausência de horizonte espódico (Gomes *et al.*, 2007). Sua localização em relação aos Espodossolos difere quanto à proximidade do mar, enquanto os Espodossolos ocorrem imediatamente após as praias, os Neossolos Quartzarênicos são encontrados em posições mais afastadas do mar, em planícies costeiras denominadas “Restingas” (Oliveira; Jacomine e Camargo, 1992). Essas variações da morfologia do solo ao longo do ecossistema são fundamentais para compreender a distribuição da vegetação presente e os processos biogeoquímicos (Magnago *et al.*, 2010) no qual o sequestro de carbono está incluído.

Os solos tendem a obter características específicas referente ao ambiente em que ele está inserido, como variação de nutrientes e condições de umidade, por exemplo (Pereira *et al.*, 2019). Por conta dessas características que os solos tendem a obter, ele vai se tornar mais propício para diferentes tipos de comunidades vegetais, ou então ele tende a influenciar nas variações da estrutura e fisiologia das plantas que nele estão inseridas. A vegetação de Restinga cresce em solos pobres nutricionalmente (Araújo e Lacerda, 1987) e é heterogênea tanto florística como estruturalmente, apresentando formações distintas mesmo estando próximas espacialmente (Silva, 1999). Segundo Lainé, Ourry e Salette (1998), as raízes são expostas a mudanças espaciais e temporais quanto à concentração de nutrientes no solo, dessa forma havendo uma adaptação por parte das plantas, onde elas modificam-se fisiologicamente e morfologicamente, resultando em modificações nos sistemas de raízes.

Estudos realizados em ecossistemas de restinga reforçam a existência de uma relação entre a estrutura da vegetação e o acúmulo de carbono ao longo de gradientes edáficos. De acordo com Dias *et al.* (2006), ao analisarem a biomassa

aérea de *Clusia hilariana* Schltdl. observou-se que o estoque de carbono variou proporcionalmente à densidade e à cobertura vegetal. Os autores identificaram valores entre 0,64 e 8,63 t ha⁻¹, dependendo da proporção de cobertura das copas e do porte dos indivíduos. Além disso, a serrapilheira representou cerca de 31% da biomassa total, resultado relacionado à baixa decomposição dos detritos orgânicos em solos arenosos e pobres em nutrientes. Essa combinação de condições edáficas restritivas e de uma estrutura vegetal adaptada promove o acúmulo de carbono tanto na biomassa viva quanto no solo. Nesse mesmo sentido, Magnago *et al.* (2013) observaram que propriedades do solo influenciam diretamente a área basal e a altura de árvores das formações de Restinga, indicando possíveis relações com a biomassa florestal. Assim, as variações estruturais da vegetação, condicionadas pelas propriedades do solo, exercem influência direta sobre o potencial de estocagem de carbono em florestas de restinga.

A complexidade das Florestas de Restinga decorre, em grande parte, da influência de fatores abióticos locais, como os gradientes edáficos e o regime hidrológico (Magnago *et al.*, 2010). Variações na drenagem e o consequente alagamento do solo atuam como filtros ambientais, determinando composição florística e a estrutura da vegetação (Magnago *et al.*, 2010). Solos constantemente saturados ou alagados tendem a impor um estresse fisiológico às plantas, devido à anoxia e da alteração na disponibilidade de nutrientes, que, por sua vez, limita o crescimento (DAP e altura) e a densidade de indivíduos (Magnago, 2009). Por outro lado, essas condições hidromórficas podem favorecer a preservação do carbono orgânico do solo (COS), ao inibir a atividade microbiana e desacelerar a decomposição da matéria orgânica (Amendola *et al.*, 2018). Assim, compreender a influência desses fatores sobre os estoques de carbono é, portanto, essencial para uma estimativa acurada do balanço de carbono desse ecossistema.

Dado o exposto, o Parque Natural Municipal de Jacarenema, no Espírito Santo, se torna o cenário ideal para o presente estudo, uma vez que abriga um mosaico de formações florestais de Restinga que ocorrem ao longo de diferentes gradientes de alagamento, sendo um local com conhecimento prévio de estudos com Restinga. Nesse sentido, a ausência de estudos sobre como a variação da hidrologia e das variáveis edáficas do solo influencia nas diferenças significativas nos estoques de carbono e na estrutura das árvores (DAP, altura e densidade da madeira) se configura como a principal lacuna de conhecimento que esta pesquisa visa

preencher. O objetivo do presente estudo foi analisar o efeito de gradientes edáficos e regimes de alagamento sobre o estoque de carbono (biomassa aérea e solo) e os parâmetros dendrométricos (DAP, altura total e densidade da madeira) dessas formações florestais. Partimos do pressuposto de que o alagamento impõe um filtro que reduz a biomassa aérea e carbono acima do solo.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi conduzida no Parque Natural Municipal de Jacarenema (PNMJ) (Figura 1), localizado no município de Vila Velha, litoral do estado do Espírito Santo, Brasil. O PNMJ abrange uma área significativa de ecossistemas costeiros, incluindo a fitofisionomia de Floresta de Restinga, um componente da Mata Atlântica. Este local é caracterizado por um mosaico de formações florestais que se desenvolvem sobre depósitos arenosos do Quaternário, sendo influenciado por uma forte heterogeneidade ambiental, em particular por um claro gradiente hidrológico que define os regimes de alagamento do solo.

Figura 1 – Área do Parque Natural Municipal de Jacarenema, Espírito Santo



2.2 Inventário Florestal e Parâmetros Dendrométricos

Foram implementadas 80 parcelas permanentes de 5m x 25m estabelecidas no ano de 2008. Nessas parcelas foram medidos todos os indivíduos arbóreos com diâmetro a 1,3m do solo ($DAP \geq 4.8$). Também foram estimadas a altura total (ht). O material botânico foi coletado e em seguida determinado a partir de consultas ao Herbário CVRD da Vale do Rio Doce, Herbário VIES da Universidade Federal do Espírito Santo e Herbário MBML do Museu de Biologia Mello Leitão, consultas a literatura específica e envio a especialistas. O material encontrado em estágio fértil foi depositado na coleção do Herbário VIES.

A densidade básica da madeira de cada indivíduo arbóreo foi obtida com o pacote **BIOMASS**, especificamente com a função *getWoodDensity()*, utilizando informações de família, gênero, espécie e parcela. Esse pacote é amplamente utilizado em estudos de ecologia de florestas tropicais, pois agrega bases de dados globais de densidade da madeira com critérios taxonômicos robustos.

A biomassa acima do solo (AGB) foi calculada com a função *computeAGB()*, que incorpora o diâmetro (DAP), altura total e densidade da madeira, seguindo equações alométricas tropicais recomendadas. A biomassa foi posteriormente convertida em carbono (AGC) assumindo o fator de conversão de 0,5, prática padrão em ecologia florestal (IPCC, 2006).

A equação a seguir mostra a equação alométrica para estimativa da Biomassa.

$$AGB = 0,0673 * (pD^2H)^{0,976}$$

Onde: *AGB* – Biomassa Aérea

p – Densidade da madeira em g/cm^3

D – Diâmetro à altura do peito (DAP)

H – Altura total da árvore

2.3 Classificação dos Regimes de Alagamento e Delineamento Amostral

Para avaliar o efeito do regime hidrológico, o inventário florestal e as análises de solo foram realizados em parcelas permanentes classificadas em três categorias diferentes, representando o gradiente de alagamento:

Floresta Inundável (FIV): áreas que são periodicamente alagadas.

Floresta Não Inundável (FNI): áreas de maior altitude e boa drenagem, que não apresentam saturação hídrica visível ou persistente.

Floresta de Transição (FNT): áreas intermediárias, sujeitas a alagamentos temporários e de menor duração.

Floresta Inundada (FIN): áreas de depressão ou baixa drenagem, caracterizadas pela saturação hídrica e alagamento persistente do solo ao longo do ano.

O delineamento amostral considerou a repetição de parcelas em cada um desses regimes, garantindo a representatividade da variação hidrológica local.

2.4 Análise do Solo e Variáveis Edáficas

Amostras de solo foram coletadas em cada uma das 80 parcelas amostrais para análises químicas e físicas.

Repetições: Três repetições de amostras de solo foram coletadas em cada parcela.

Profundidade: A amostragem foi realizada na profundidade de 0 a 10cm.

Preparo: As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 0,02m de diâmetro.

Classificação/Hidrologia: A classificação do solo e da drenagem foi realizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Para registrar a variação hídrica, foram instalados piezômetros a 2 metros de profundidade em cada fisionomia, para acompanhar a flutuação do lençol freático.

Para caracterizar os gradientes edáficos associados aos regimes de alagamento, amostras de solo foram coletadas em cada categoria (FNI, FT, FIN) para análises laboratoriais. As seguintes variáveis edáficas foram determinadas:

Composição Granulométrica: Percentual de areia, silte e argila, determinado para classificar a textura do solo.

Acidez (pH): O indicador direto da acidez ativa do solo foi o pH medido em água. Além disso, a acidez foi inferida pela concentração de Alumínio trocável, um componente indicador de solos ácidos.

Macronutrientes: Concentrações de nutrientes essenciais como Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K).

Capacidade de Troca Catiônica (CTC): Indicador da fertilidade e da capacidade do solo de reter cátions.

Os dados de solo e os parâmetros dendrométricos foram correlacionados para testar o pressuposto de que o alagamento e as variáveis edáficas influenciam o estoque de carbono.

2.5 Análise Estatística

As variáveis do solo (pH, CTC, SB, MO, areia grossa, argila, Al, ISNA) foram padronizadas (z-score) com a função *across()* do pacote **dplyr**, produzindo variáveis centradas e escaladas. Essa padronização é necessária para comparabilidade entre preditores com diferentes unidades e para evitar que variáveis em maior escala influenciem indevidamente os coeficientes dos modelos.

A matriz de correlação de Pearson entre os atributos padronizados foi obtida para avaliar colinearidade estrutural entre os preditores edáficos. Essa matriz foi posteriormente usada no procedimento de seleção multimodelo (*subset = abs(corr_matrix) < 0.8*). O objetivo foi excluir modelos contendo pares de variáveis altamente colineares, evitando redundância e instabilidade nos coeficientes estimados.

A relação entre o estoque de carbono por parcela (AGC) e os atributos físico-químicos do solo foi avaliada por meio de um modelo linear generalizado (GLM) do tipo Gaussiano:

$$AGC \sim ISNA_z + PH_{H_2O\_z} + SB_z + AL_z + CTC_z + MO_z + AREIA.GROS_z + ARGILA_z$$

Esse modelo GLM buscou identificar como e quais diferentes propriedades do solo influenciam o estoque de carbono em florestas de restinga, reconhecidamente ambientes oligotróficos e com forte variação granulométrica e química.

A seleção dos melhores modelos foi conduzida com o pacote **MuMIn**, utilizando a função *dredge()* com:

- exclusão de combinações colineares ($\text{corr} > 0,8$),
- ranking por AICc,
- seleção dos modelos com $\Delta\text{AICc} \leq 4$.

Essa abordagem de busca permite comparar múltiplas estruturas de modelos e evitar dependência de um único modelo máximo. Os efeitos médios e suas incertezas foram obtidos com *model.avg()*.

Os coeficientes foram extraídos e convertidos em tamanhos de efeito padronizados com erros padrão ajustados, produzindo uma tabela dos preditores que mais influenciam o carbono. Esses resultados foram apresentados em gráfico tipo *forest plot* utilizando **ggplot2**.

Para avaliar como diferentes fisionomias de restinga (por exemplo, floresta alta, floresta baixa, vegetação aberta) diferem estruturalmente, foram ajustados modelos lineares generalizados (GLM) para:

- diâmetro médio (DAP),
- altura média,
- densidade da madeira (WD),
- estoque de carbono (AGC),
- densidade de indivíduos (modelado com família Poisson).

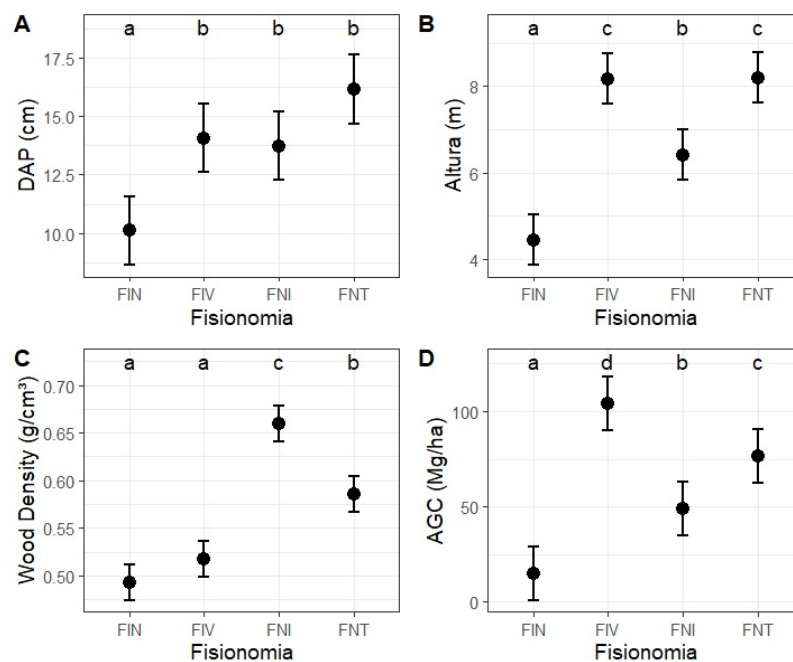
A escolha do GLM Gaussiano para as métricas contínuas se deve à distribuição aproximadamente normal após agregação por parcela. A densidade de indivíduos foi modelada com GLM Poisson, pois é uma variável de contagem.

As diferenças entre fisionomias foram avaliadas com o pacote **emmeans**, que calcula as médias marginais ajustadas e seus intervalos de confiança de 95%. Em seguida, aplicou-se o procedimento de comparações múltiplas via **multcomp** (função *clm*), que gera letras indicando grupos estatisticamente distintos após ajuste para múltiplos testes. Os resultados foram apresentados em gráficos com IC95% gerados pela função personalizada *plot_ci_letras()*, construída com **ggplot2** e integrada em painéis via **cowplot**. Todos os pacotes foram utilizados através do software estatístico *R*.

3 RESULTADOS

A análise estrutural das formações florestais de Restinga no Parque Natural Municipal de Jacarenema demonstrou que o regime hidrológico do solo atua como um forte filtro ambiental, modulando significativamente os parâmetros dendrométricos das comunidades florestais.

Gráfico 1 – Análise de Variância do Gradiente de Inundação e Variáveis Estruturais na Restinga do Parque Natural Municipal de Jacarenema, Vila Velha, ES, Brasil. Foi utilizada FIN para a Floresta Inundada e FIV para a Inundável. As áreas de terra firme são representadas pela FNI (Floresta Não Inundada), e as zonas mistas pela FNT (Floresta de Transição).



Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) (Gráfico 1) confirmaram diferenças significativas na densidade de indivíduos ($F_{3,32} = 5,84$; $p = 0,003$) e no Diâmetro à Altura do Peito (DAP) ($F_{3,32} = 4,21$; $p = 0,011$) entre as formações.

A Floresta Inundada (FIN) apresentou a maior densidade (1.980 ± 210 ind.ha⁻¹), resultado compatível com ambientes sob inundação constante, que favorecem o estabelecimento de grande quantidade de indivíduos de menor porte. Em contraste, a Floresta de Transição (FNT) exibiu o maior DAP médio ($17,3 \pm 2,8$

cm) e a maior altura média ($11,8 \pm 1,9$ m), sugerindo que condições de menor estresse hídrico permitem o desenvolvimento de árvores maiores e mais robustas.

O estoque de carbono seguiu esse mesmo padrão ($F_{3,32} = 6,11$; $p = 0,002$), com valores mais altos na FNT ($78,4 \pm 9,1$ MgC ha⁻¹) e mais baixos na FIN ($52,7 \pm 7,4$ MgC ha⁻¹). Esses resultados indicam que formações com maior proporção de indivíduos de grande porte (FNT), acumulam mais biomassa e, consequentemente, mais carbono. Comparações múltiplas indicaram que a FNT difere significativamente das duas formações inundáveis ($p < 0,05$), enquanto a FIN apresenta valores intermediários devido às restrições fisiológicas impostas pela inundação completa, que limitam crescimento, altura, diâmetro e acumulam biomassa mais lentamente.

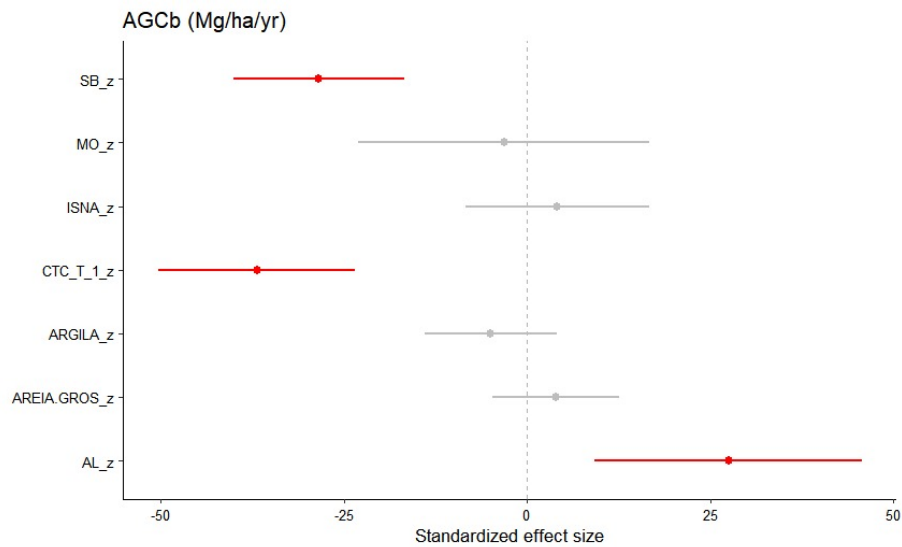
A densidade da madeira demonstrou uma variação significativa entre as quatro fisionomias, o que é um reflexo das diferentes estratégias de investimento estrutural das espécies em resposta ao gradiente edáfico-hídrico. A Floresta Não Inundável (FNI), cuja é a área com a melhor drenagem e menor teor de nutrientes, registrou a maior densidade da madeira.

Em conjunto, os padrões estruturais observados reforçam que a heterogeneidade hidrológica das restingas é um dos principais fatores organizadores da estrutura florestal e do estoque de carbono, determinando gradientes claros de densidade e porte entre as formações estudadas.

3.1 Fatores edáficos influenciando o carbono

Efeitos padronizados das variáveis edáficas sobre o estoque de carbono acima do solo (AGC) obtidos por inferência de multimodelos (*multimodel inference*) de GLM (Gráfico 2). Os coeficientes representam a média ponderada dos modelos com $\Delta AIC \leq 4$, considerando o conjunto de modelos mais parcimoniosos. As barras verticais indicam intervalos de confiança de 95%. A linha pontilhada marca o valor nulo, acima do qual efeitos positivos são observados. Pontos e barras destacados em vermelho indicam efeitos estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$), enquanto os elementos em cinza representam efeitos não significativos. As variáveis foram previamente padronizadas (z-score), permitindo a comparação direta da magnitude dos efeitos.

Gráfico 2 – Efeitos padronizados das variáveis ambientais sobre o estoque de carbono acima do solo (AGCb).



A inferência multimodelo (Gráfico 2) mostrou que apenas três variáveis edáficas apresentaram efeitos consistentemente significativos sobre o estoque de carbono acima do solo (AGC): somatório de bases (SB_z), capacidade de troca catiônica total (CTC_T_1_z) e saturação por alumínio (AL_z). Esses padrões são amplamente coerentes com o gradiente químico descrito para a Restinga por Assis *et al.* (2011), onde predominam solos ácidos, arenosos, distróficos e com alta saturação por Al.

O SB_z apresentou efeito negativo e altamente significativo (Estim = -28,47; SE = 11,65; Z = 4,72; p = 0,000002), indicando que áreas com menor disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , como observado por Assis *et al.* (2011), que encontraram valores de SB de apenas 1,98 mmolc kg^{-1} na Restinga, onde tendem a acumular mais carbono.

De maneira semelhante, a CTC_T_1_z também apresentou efeito negativo significativo (Estim = -36,91; SE = 13,40; Z = 5,32; p < 0,000001). A baixa CTC encontrada em solos arenosos de restinga (Assis *et al.*, 2011, relataram 55,56 mmolc kg^{-1}) evidencia ambientes pobres em colóides orgânicos e minerais, restringindo a disponibilidade de nutrientes e selecionando espécies adaptadas a condições distróficas. Essas espécies tendem a apresentar maior compensação em biomassa lenhosa, o que explica o acúmulo aumentado de carbono nessas condições químicas restritivas.

Em contraste, a saturação por alumínio (AL_z) teve efeito positivo e significativo (Estim = 27,47; SE = 18,19; Z = 2,95; p = 0,003), consistente com os altos valores de m% registrados na Restinga por Assis *et al.* (2011) (81,25%). Solos altamente ácidos, com forte saturação por Al, favorecem espécies tolerantes ao alumínio que geralmente possuem madeira mais densa e crescimento lento, características que contribuem para maior estoque de carbono ao longo do tempo.

Embora variáveis como MO_z, ISNA_z, ARGILA_z e AREIA.GROS_z não tenham apresentado efeitos estatisticamente significativos, sua presença em modelos com $\Delta AICc \leq 4$ indica que a textura e a matéria orgânica ainda integram o cenário ambiental, embora com importância secundária frente à química do solo.

Efeitos padronizados das variáveis edáficas sobre o estoque de carbono acima do solo (AGC) obtidos por inferência de multimodelos (multimodel inference) de GLM. Os coeficientes representam a média ponderada dos modelos com $\Delta AIC \leq 4$, considerando o conjunto de modelos mais parcimoniosos. As barras verticais indicam intervalos de confiança de 95%. A linha pontilhada marca o valor nulo, acima do qual efeitos positivos são observados. Pontos e barras destacados em vermelho indicam efeitos estatisticamente significativos ($p \leq 0.05$), enquanto os elementos em cinza representam efeitos não significativos. As variáveis foram previamente padronizadas (z-score), permitindo a comparação direta da magnitude dos efeitos.

4 DISCUSSÃO

Os resultados encontrados evidenciam que o regime hidrológico é o formador principal de um filtro ambiental, estruturando a vegetação e modulando a capacidade de estocagem de carbono nas formações florestais de Restinga. A forte resposta das variáveis dendrométricas, especialmente densidade de indivíduos e DAP, demonstra que a interação entre hidrologia e atributos edáficos determina não apenas a composição estrutural, mas também o potencial funcional dessas formações em acumular biomassa aérea e carbono, corroborando estudos prévios nas restingas do Sudeste e Sul do Brasil (Magnago *et al.*, 2010; Dias *et al.*, 2006). Dessa forma, a compreensão da dinâmica entre o desenvolvimento vegetal, a fisionomia e a capacidade de estocagem de carbono, que é modulada pelo regime hidrológico,

confere aos nossos resultados uma grande contribuição no entendimento do papel das florestas de Restinga em cenários de mudanças climáticas.

4.1 Influência do regime de alagamento na estrutura da vegetação

A maior densidade de indivíduos observada na Floresta Inundada (FIN) confirma que ambientes sujeitos a alagamento persistente favorecem o recrutamento e a sobrevivência de indivíduos de pequeno porte, frequentemente adaptados a condições de anoxia e baixa disponibilidade de oxigênio no solo. Esse padrão já foi descrito como típico de restingas hidromórficas, onde espécies tolerantes à inundação tendem a formar populações densas e de baixo crescimento, corroborando com estudos prévios de Magnago (2009) e Scarano (2002). Por outro lado, o menor DAP médio nas formações inundadas indica que o alagamento impõe restrições fisiológicas ao desenvolvimento secundário das espécies. A limitação de oxigênio no solo reduz a atividade radicular, afeta a absorção de nutrientes e compromete processos de crescimento como a expansão cambial, resultando em árvores mais delgadas e de menor porte (Lainé; Ourry; Salette, 1998; Pereira *et al.*, 2019).

A densidade da madeira demonstrou uma variação significativa entre as quatro fisionomias, o que é um reflexo das diferentes estratégias de investimento estrutural das espécies em resposta ao gradiente edáfico-hídrico (Bredin; Peres; Haugaasen, 2020). A Floresta Não Inundável (FNI), cuja é a área com a melhor drenagem e menor teor de nutrientes, registrou a maior densidade da madeira. De acordo com Chave *et al.* (2009), esse padrão sugere que, em solos mais pobres, as espécies tendem a adotar estratégias mais conservativas, investindo em tecidos lenhosos densos e duráveis para otimizar o uso de nutrientes escassos. Em contrapartida, as áreas sob alagamento (FIV) apresentaram as menores densidades.

No entanto, a relação entre a densidade e o estoque de carbono total revela um trade-off com o volume estrutural da floresta. Apesar de possuir a maior densidade, o Carbono aéreo da floresta não inundável foi o segundo menor, sendo superado pelo AGC da Floresta Inundável. Esse resultado demonstra que, na floresta inundável, a restrição imposta pela baixa densidade da madeira foi compensada pelo volume da biomassa, impulsionado pelas árvores mais altas e com maior DAP. Portanto, o volume total da biomassa, determinado pela estrutura da floresta, surge

como o principal fator preditor do estoque de carbono no gradiente, mesmo em ambientes onde a densidade do tecido lenhoso é menor.

Da mesma forma, nas formações não inundáveis (FNI) mostraram indivíduos com maiores valores de DAP e altura, o que sugere que condições mais favoráveis de aeração do solo e maior estabilidade hidrológica permitem o desenvolvimento de árvores de maior porte (Magnago *et al.*, 2013). Esses resultados são coerentes com registros de florestas de restinga da costa brasileira, onde ambientes bem drenados sustentam formações mais altas, com maior área basal e maior acúmulo de biomassa (Oliveira; Jacomine e Camargo, 1992; Marques, Silva e Liebsch, 2015; Pinto *et al.*, 2025).

O padrão observado confirma essa diferenciação estrutural, reforçando a hipótese de que o gradiente hidrológico é um dos principais mecanismos de organização das restingas, funcionando como um gradiente de estresse ecofisiológico que regula tanto o tamanho individual quanto a densidade das populações (Magnago *et al.* 2013; Pinto *et al.*, 2025; Lourenço Junior *et al.*, 2021).

4.2 Efeitos das propriedades edáficas no estoque de carbono

Os modelos lineares generalizados e a inferência multimodelo revelaram que variáveis edáficas como pH, saturação por bases (SB), CTC, teor de matéria orgânica (MO) e frações texturais (areia grossa e argila) contribuem de forma diferenciada para explicar o estoque de carbono aéreo das parcelas. Apesar de solos de restinga serem tipicamente arenosos e pobres em nutrientes, pequenas variações na fertilidade e na granulometria tiveram efeitos mensuráveis sobre o estoque de carbono. Essa sensibilidade do sistema é coerente com a literatura, que aponta que restingas apresentam alto grau de dependência da microvariação edáfica, especialmente em solos distróficos onde limitações químicas e físicas impactam diretamente o crescimento vegetal (Magnago *et al.*, 2013; Coelho *et al.*, 2010).

A influência positiva da matéria orgânica (MO), quando presente nos modelos, reflete dois processos complementares: (i) a matéria orgânica favorece a retenção hídrica e a agregação do solo, aumentando sua capacidade de suportar plantas de maior porte (Silva *et al.*, 2023); (ii) a própria MO compõe uma fração significativa do carbono total no sistema, especialmente em áreas de menor decomposição, como ambientes hidromórficos (Silva *et al.*, 2023). Contudo, esses resultados estão

alinhados com estudos em restingas do Sudeste, que demonstram que a serrapilheira e a matéria orgânica do solo podem representar até 30–50% do estoque total de carbono (Dias *et al.*, 2006; Amendola *et al.*, 2018).

A areia grossa apresentou efeito negativo sobre o estoque de carbono, o que reforça que solos mais arenosos, com menor capacidade de retenção de água e nutrientes, o crescimento vegetal é restringido e consequentemente há redução da biomassa acumulada. Esse padrão é costumeiramente observado em ecossistemas costeiros arenosos tropicais (Marques, Silva e Liebsch, 2015,).

Já o alumínio trocável (Al), frequentemente elevado em solos ácidos de restinga (Coelho *et al.*, 2010), mostrou relação inconsistente entre modelos, embora sua presença geralmente esteja associada à redução de crescimento vegetal. A falta de um padrão claro pode refletir adaptação de espécies locais à toxidez por Al, como descrito para comunidades vegetais especializadas em solos distróficos da Mata Atlântica costeira.

4.3 Gradiente hidrológico como determinante do carbono aéreo

A hipótese inicial de que o alagamento reduziria o estoque de carbono foi confirmada pelos resultados estruturais: formações inundadas apresentaram indivíduos menores, o que reduz o volume de biomassa aérea acumulada. Embora a densidade de indivíduos tenha sido alta na FIN, a biomassa e o carbono por hectare tendem a aumentar mais fortemente com a presença de árvores de maior porte (Mildrexler *et al.*, 2020), cenário encontrado nas FNI e, em menor escala, nas áreas de transição (FNT). Essa relação é esperada, pois a biomassa cresce de forma exponencial com o DAP, de modo que poucas árvores grandes estocam mais carbono do que muitas árvores pequenas (Chave, Réjou-Méchain e Búrquez, 2014). Assim, a heterogeneidade estrutural gerada pelo gradiente de alagamento traduz-se diretamente em diferenças no estoque de carbono aéreo, um padrão amplamente reconhecido em florestas costeiras tropicais.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo realizado nas formações de Restinga do Parque Natural Municipal de Jacarenema estabeleceu de maneira coesa que a heterogeneidade ambiental é o principal motor da organização estrutural e funcional da floresta, capaz de determinar a capacidade de estocagem de carbono. O regime hidrológico do solo impõe um forte filtro ambiental, modulando de forma significativa os parâmetros dendrométricos das comunidades. Observou-se uma clara diferenciação entre as fisionomias: as áreas sob inundação persistente (FIN) mantêm a maior densidade de indivíduos, mas de menor porte, uma estratégia de tolerância à anoxia, enquanto as áreas de transição (FNT), com menor estresse hídrico, sustentam árvores mais altas e robustas, com o maior Diâmetro à Altura do Peito (DAP) e o maior estoque de carbono. Essa variação demonstra que, embora a densidade da madeira seja maior em áreas não inundáveis com solos mais pobres (FNI), refletindo uma estratégia conservativa de otimização de nutrientes escassos, o volume estrutural da biomassa, determinado pela altura e DAP, é o principal fator preditor do estoque de carbono no gradiente. Além do exposto, a química do solo reforça esse controle: a baixa fertilidade (SB e CTC baixos) e a alta saturação por alumínio (AL) exercem filtros seletivos que favorecem espécies com características que, a longo prazo, contribuem para o acúmulo de carbono. Em suma, o gradiente hidrológico de Jacarenema traduz-se diretamente em uma heterogeneidade estrutural e funcional que, em conjunto com as restrições edáficas, regula o potencial de carbono da Restinga, fornecendo conhecimentos cruciais para a conservação e gestão desses ecossistemas costeiros vulneráveis em um contexto de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- AMENDOLA, D. *et al.* Soil hydromorphy and soil carbon: A global data analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 324, p. 9-17, 2018.
- ARAÚJO, D.S.D.; LACERDA, L. D. A natureza das restingas. **Ci. Hoje**, 6:42-48, 1987.
- ASSIS, M. A. *et al.* Florestas de restinga e de terras baixas na planície costeira do sudeste do Brasil: vegetação e heterogeneidade ambiental. *Biota Neotropica*, Campinas, SP, v. 11, n. 2, p. 83-101, 2011.

Bredin, Y. K.; Peres, C. A.; Haugaasen, T. Forest type affects the capacity of Amazonian tree species to store carbon as woody biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118297, 2020.

CHAVE, J. *et al.* Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, [S.l.], v. 12, n. 4, p. 351-366, 2009.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A. *et al.* Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, [S.l.], 2014.

COELHO, M. R. *et al.* Química e gênese de solos desenvolvidos sob vegetação de restinga no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1951-1964, 2010.

DIAS, A. T. C. *et al.* Aboveground biomass stock of native woodland on a Brazilian sandy coastal plain: estimates based on the dominant tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 226, p. 364-367, 2006. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.01.020.

GOMES, F. H. *et al.* Solos sob vegetação de restinga na Ilha do Cardoso (SP). I - Caracterização e classificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1563-1580, nov./dez. 2007.

IPCC. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Editado por: EGGLESTON, H. S. *et al.* Hayama, Japão: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

IPCC. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Mudança do clima 2023**: Relatório síntese. Tradução do Governo do Brasil. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações; 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 1º dez. 2025.

LAINÉ, P.; OURRY, A.; SALETTE, J. Effect of a localized supply of nitrate on NO₃ - uptake rate and growth of roots in *Lolium multiflorum* (Lam). **Plant Soil**, 202:61-67, 1998.

LOURENÇO JR. *et al.* Soil-associated drivers of plant traits and functional composition in Atlantic Forest coastal tree communities. **Ecosphere**, v. 12, n. 7, e03629, 2021. DOI: 10.1002/ecs2.3629.

MACHADO, A. *et al.* Dinâmica do volume, biomassa e carbono na Mata Atlântica por ferramenta de detecção de mudanças. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 4, p. 437-444, jul./ago. 2019.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MAGNANO, L. F. S. **Gradiente vegetacional e pedológico em Floresta de Restinga no Espírito Santo, Brasil**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

MAGNAGO, L. F. S. *et al.* Gradiente fitofisionômico-edáfico em formações florestais de Restinga no Sudeste do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 3, p. 734-746, 2010.

MAGNAGO, L. F. S. *et al.* Structure and diversity of restingas along a flood gradient in southeastern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 27, n. 4, p. 801-809, 2013.

MARQUES, M. C. M.; SILVA, M. A.; LIEBSCH, D. Coastal plain forests in southern and southeastern Brazil: ecological drivers, floristic patterns and conservation status. **Brazilian Journal of Botany**, v. 38, p. 1–13, 2015.

MARTIN, L. *et al.* **Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo**. Belo Horizonte: CPRM/FAPESP, 1997.

MEA – Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and human well-being: synthesis**. New York: WHO Press, 2005.

MILDREXLER, D. J. *et al.* Large Trees Dominate Carbon Storage in Forests East of the Cascade Crest in the United States Pacific Northwest. **Frontiers in Forests and Global Change**, [S. l.], v. 3, p. 594274, 5 nov. 2020.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**: Guia auxiliar para seu reconhecimento. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1992.

PEREIRA, M. G. *et al.* Formação e caracterização de solos. *In*: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Formação e caracterização de solos**. 2. ed. Seropédica, RJ: Embrapa Solos, 2019. Cap. 1. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1112549/1/Formacaoecaracterizacaodesolos2019.pdf>. Acesso em: 1º dez. 2025.

PINTO, M. M. *et al.* Correlações entre características do solo e da vegetação na Ilha do Cardoso, Cananeia, Brasil. **Hoehnea**, [S. l.], v. 52, p. e462024, 2025.

SAUER, D. *et al.* Podzol: soil of the year 2007 – a review on its genesis, occurrence, and functions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 170, p. 581-597, 2007.

SCARANO, F. R. Structure, function and floristic relationships of plant communities in stressful habitats marginal to the Brazilian Atlantic rainforest. ***Annals of Botany***, v. 90, n. 4, p. 517–524, 2002.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Observatório do Clima**. Disponível em: seeg.eco.br. Acesso em: 1º dez. 2025. Data da última atualização: 08 nov. 2024.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Observatório do Clima. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2021**. 10. ed. São Paulo: Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>. Acesso em: 1º dez. 2025.

SILVA, C. A. *et al.* Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. *In*: SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P. (org.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Cap. 1, p. 17-46.

SILVA, S. M. **Diagnóstico das Restingas no Brasil**. Departamento de botânica-setor de ciências biológicas. Universidade Federal do Paraná, 1999.

SOTERRONI, A. C. *et al.* Nature-based solutions are critical for putting Brazil on track towards net-zero emissions by 2050. **Global Change Biology**, Oxford, v. 29, n. 24, p. 7085–7101, 2023.