

Crescimento diamétrico e tempo de passagem em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal

Diametric growth and time of passage in an Atlantic Forest fragment under forest recovery

Bruno Oliveira Lafeta ^{*1(ORCID 0000-0003-2913-6617)}, **Alan Reges Ferreira da Silva** ^{1(ORCID 0000-0002-2716-6276)}, **Diego dos Santos Vieira** ^{2(ORCID 0000-0003-3780-1189)}, **Mateus dos Reis** ^{1(ORCID 0000-0002-0344-8113)}, **Carlos Henrique Lopes Ribeiro** ^{1(ORCID 0000-0001-8246-3487)}, **Luis Henrique de Andrade Guimarães** ^{1(ORCID 0000-0001-6075-9308)}

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, São João Evangelista, MG, Brasil. *Autor para correspondência: bruno.lafeta@ifmg.edu.br

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, Brasil.

Submissão: 03/12/2023 | Aceite: 17/04/2024

RESUMO

Investigações científicas sobre a dinâmica de comunidades vegetais promovem estratégias apropriadas para o manejo de florestas naturais, com fins conservacionistas ou sustentavelmente exploratórios. O objetivo foi avaliar a acurácia de modelos de regressão para projetar o crescimento em diâmetro e calcular o tempo de passagem por classe diamétrica de fustes em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação. O trabalho foi conduzido em um fragmento de 2,53 ha no município de São João Evangelista (MG). O inventário foi realizado aos 80 e 104 meses após início do processo de recuperação. Os dados de incremento periódico anual (IPA) em diâmetro foram utilizados para os cálculos do tempo de passagem e idade relativa. As estimativas temporais para o alcance dos diâmetros mínimos de 5, 10, 20 e 30 cm foram de 5, 9, 15 e 21 anos, respectivamente. Conclui-se que os modelos Logístico e de Curtis, adaptados para a estimativa de IPA, são eficientes para a avaliação do tempo de passagem, fornecendo informações precisas sobre a dinâmica de crescimento no fragmento em estudo. Fragmentos durante a recuperação florestal podem exibir taxas de crescimento semelhantes entre classes de diâmetro.

PALAVRAS-CHAVE: amplitude de classe diamétrica; fuste; incremento periódico anual; modelagem.

ABSTRACT

Scientific investigations on the dynamics of plant communities promote appropriate strategies for management of natural forests, with conservationist or sustainably exploratory purposes. This research aimed to evaluate accuracy of regression models to project diameter growth and calculate passage time by diametric class of stems in an Atlantic Forest fragment under recovery. The work was carried out in a fragment of 2.53 ha in São João Evangelista municipality (MG). Inventory was performed at 80 and 104 months after starting the recovery process. Annual periodic increment (API) in diameter data was used to calculate passage time and relative age. Temporal estimates for reaching the minimum diameters of 5, 10, 20, and 30 cm were 5, 9, 15, and 21 years, respectively. It is concluded that the logistic and Curtis models, adapted for the IPA estimation, are efficient for analysis of passage time, providing accurate information on growth dynamics within the fragment under study. Fragments during forest recovery may exhibit similar growth rates between diameter classes.

KEYWORDS: diameter class amplitude; stem; annual periodic increment; modeling.

INTRODUÇÃO

Informações sobre a dinâmica de florestas naturais são essenciais para a análise da estruturação de formações lenhosas e definição de estratégias conservacionistas e de manejo sustentável (SIRAMI et al. 2018, SALES et al. 2021). O prognóstico da dinâmica do crescimento fornece subsídios essenciais para a administração racional de recursos madeireiros ou não.

O domínio de Mata Atlântica por sua vez, é reconhecido como um dos hotspots de maior diversidade de espécies lenhosas no mundo. Mesmo diante de lei protetiva e exclusiva do domínio (Lei nº 11.428, BRASIL 2006), sua fragmentação tem se intensificado com o avanço da urbanização, explorações

irregulares de madeira, queimadas, mudanças climáticas e instalação de empreendimentos agropecuários e minerários (PINTO 2021, FILGUEIRAS et al. 2019, RODER et al. 2023). O contínuo monitoramento de tal domínio é imprescindível para a implementação de políticas públicas voltadas à conservação e criação de diretrizes para o seu manejo, especialmente, aplicadas a fragmentos florestais em recuperação, cuja compreensão da dinâmica do crescimento ainda não se encontra completamente elucidada.

A modelagem do crescimento e produção é uma abordagem estatística que permite realizar prognósticos da condição biométrica lenhosa, útil para o estabelecimento de áreas protegidas, planejamento do ciclo de corte e melhoria da compatibilidade dos sistemas de exploração às tipologias vegetais (PIRES et al. 2021). Por outro lado, a representação matemática da dinâmica de crescimento é um grande desafio para os gestores de florestas naturais, uma vez que sua complexidade estrutural exige sistemas flexíveis e adaptáveis ao manejo (DIONISIO et al. 2018, CANETTI et al. 2021).

O conhecimento da taxa de crescimento vegetal auxilia a tomada de decisões silviculturais em programas de manutenção e recomposição lenhosa, além do manejo sustentável (PIRES et al. 2021). Contudo, a informação da idade das árvores, recurso pertinente para a modelagem biométrica, é de difícil quantificação em florestas tropicais. Uma alternativa é o cálculo da idade relativa de uma espécie ou povoamento nativo a partir da estimativa do crescimento periódico em diâmetro, assumindo que o tamanho arbóreo seja diretamente proporcional à idade.

A partir do cálculo da idade relativa, obtém-se a estimativa do tempo de passagem, que representa o intervalo temporal médio para que todos os indivíduos de uma classe diamétrica cresçam e alcancem outra classe de tamanho superior (GOVEDAR et al. 2021). Tal metodologia permite entender resumidamente a evolução da distribuição de indivíduos por classe de diâmetro ao longo do tempo e a definição de ciclos de corte, proporcionando elementos quantitativos sobre a produção sustentável. Todavia, investigações científicas sobre o tempo de passagem têm sido exaustivamente aplicadas a florestas de maior porte, sendo poucos os trabalhos em áreas de formação lenhosa mais inicial, como ambientes em processo de recuperação (SANTOS et al. 2017).

Os serviços ecológicos da floresta manejada em sistema policíclico devem ser mantidos após eventual intervenção e os estoques remanescentes devem permitir uma produção contínua das explorações sequenciais (CANETTI et al. 2021, PIRES et al. 2021). A definição do ciclo ideal de corte é fundamentada na estimativa do tempo de passagem, período temporal o qual a floresta demanda para a reposição do estoque explorado próximo ou similar àquele original, prévio à intervenção ambiental (DIONISIO et al. 2018). É conveniente salientar que o manejo deve ser realizado com cautela, considerando a composição florística e aspectos estruturais da floresta, como densidade, dominância, posição sociológica, distribuição de diâmetros, crescimento, mortalidade e regeneração (CANETTI et al. 2021, HOUÉNON et al. 2022).

Pesquisas relacionadas ao manejo sustentável promovem o desenvolvimento de técnicas e protocolos mais adequados que satisfaçam demandas de produtores, sociedade e meio ambiente, apontando indicações para a administração dos potenciais ecológicos e comerciais da vegetação de acordo com o seu ritmo de crescimento, direcionada por espécie, ambiente ou região (PINTO 2021). Mediante exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia de modelos de regressão para projetar o crescimento em diâmetro e calcular o tempo de passagem por classe diamétrica de fustes em um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em um fragmento de Mata Atlântica no município de São João Evangelista - MG, em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, nas coordenadas de 18°33'5,05" Sul e 42°45'50,40" de longitude Oeste (Datum Sirlgas 2000). O clima da região é do tipo Cwa (temperado chuvoso mesotérmico) pela classificação do sistema internacional de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 21,2 °C e 1.000 mm, respectivamente (CLIMATE-DATA.ORG 2023).

O fragmento de Mata Atlântica possui 2,53 ha e encontra-se em fase de recuperação florestal desde novembro de 2013. O histórico de uso e ocupação do solo contempla sucessivos monocultivos de *Coffea arabica* L. por período de, aproximadamente, 10 anos. O tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com o horizonte A proeminente, textura arenosa, relevo ondulado e a 690 m de altitude.

O inventário florestal contínuo foi realizado aos 80 e 104 meses após início do processo de

recuperação do fragmento de Mata Atlântica. A amostragem contemplou o lançamento de 9 parcelas quadradas de 20 x 20 m (400 m²), equivalente a uma intensidade amostral de 14,23%. Todos os fustes dos indivíduos arbóreos com circunferência a 1,30 m de altura do solo (CAP, cm) igual ou superior a 10 cm foram mensurados com auxílio de fita métrica, sendo calculado o respectivo diâmetro (DAP, cm) pela razão entre CAP e o valor de π (3,141592654...).

Os dados de incremento periódico anual (IPA, cm ano⁻¹) do intervalo inventariado de dois anos foram submetidos às análises de Boxplot e de normalidade pelo teste de Shapiro Wilk. Calculou-se a mediana da distribuição de IPA por classe diamétrica. Avaliaram-se duas amplitudes de classe diamétrica (3 e 5 cm) e sete modelos de regressão para o estabelecimento de relações funcionais com vistas à estimativa da mediana de IPA, totalizando 14 combinações de ajuste. A determinação da quantidade de classes diamétricas fundamentou-se na definição prévia de intervalos regulares de classe, de forma empírica, considerando a amplitude total de diâmetros amostrados e informações analíticas aplicadas à vegetação nativa em recuperação florestal (CAMPOS & LEITE 2017, SANTOS et al. 2017).

A modelagem foi realizada considerando toda a diversidade de espécies do fragmento florestal. Testaram-se cinco modelos de regressão lineares e dois não lineares (Tabela 1), rotineiramente adotados no setor florestal para a modelagem biométrica (CAMPOS & LEITE 2017). Os parâmetros dos modelos lineares de regressão foram estimados empregando o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO). A convergência dos parâmetros da regressão não linear baseou-se no método iterativo de Levenberg-Marquardt.

Tabela 1. Modelos testados para a estimativa da mediana do incremento periódico anual em diâmetro (IPA, cm ano⁻¹) em função do centro de classe diamétrica (CC, cm) para um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal.

Table 1. Models tested to estimate the median of annual periodic increment in diameter (API, cm year⁻¹) as a function of the diameter class center (CC, cm) for a fragment of Atlantic Forest under forest recovery.

Modelo	Forma de ajuste	Característica
----- Modelos lineares -----		
(1)	$IPA = \beta_0 + \beta_1 CC + \varepsilon$	Linear simples
(2)	$IPA = \beta_0 + \beta_1 CC + \beta_2 CC^2 + \varepsilon$	Linear quadrático
(3)	$Ln(IPA) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{CC} + \varepsilon$	Adaptação do Modelo hipsométrico de Curtis.
(4)	$IPA = \beta_0 + \beta_1 Ln(CC) + \varepsilon$	Adaptação do Modelo hipsométrico de Henricksen.
(5)	$Ln(IPA) = \beta_0 + \beta_1 Ln(CC) + \varepsilon$	Adaptação do Modelo hipsométrico de Stoffels e Soest.
----- Modelos não lineares -----		
(6)	$IPA = \beta_0 e^{-\beta_1 - \beta_2 CC} + \varepsilon$	Gompertz
(7)	$IPA = \beta_0 / (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 CC}) + \varepsilon$	Logístico

β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros dos modelos de regressão e ε = erro aleatório.

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com o valor ponderado dos escores estatísticos (VP), obtido a partir dos valores da Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e critério de informação de Akaike (Akaike Information Criterion, AIC). O VP é uma soma de pontuação calculada pela atribuição de pesos às medidas de acurácia, sendo designado peso 1 para a equação mais eficiente, 2 para a segunda e assim sucessivamente, de acordo com a metodologia proposta por THIERSCH (1997). Menores valores de VP, MDA, RQEM e AIC implicam melhor qualidade preditiva. Selecionaram-se três equações para as análises gráficas subsequentes.

O primeiro IPA da menor classe diamétrica foi estimado utilizando-se o menor DAP dos fustes mensurados. Os demais diâmetros foram definidos sucessivamente pela soma do DAP anterior com o seu IPA estimado. A primeira idade relativa foi calculada por meio da divisão do menor DAP mensurado pelo primeiro IPA estimado. Essa idade representou a idade necessária para um fuste ingressar na primeira classe diamétrica. O cálculo das demais idades relativas pautou-se na soma de um ano para cada IPA estimado, tendo a primeira idade relativa como base. O tempo de passagem entre as classes diamétricas foi encontrado por meio da diferença entre as menores idades relativas correspondentes a duas classes

diamétricas consecutivas.

Para diagnóstico de efeito estatístico, considerou-se o nível de significância de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.1.3 (R CORE TEAM 2022), por meio dos pacotes “Metrics” (HAMNER & FRASCO 2018), “minpack.lm” (ELZHOV et al. 2022) e “stats” (R CORE TEAM 2022).

RESULTADOS

O inventário florestal contemplou 595 fustes ha⁻¹ e 464 árvores ha⁻¹, amostrados em duas ocasiões. Os valores mínimos e máximos de DAP por fuste foram de 3,18 (aproximadamente 10 cm de CAP) a 24,16 cm na primeira ocasião e de 3,18 a 30,24 cm na segunda ocasião. Os incrementos periódicos anuais em diâmetro estão discriminados por classe diamétrica na Figura 1, sendo identificada a presença de outliers superiores entre 6 a 9 cm de DAP (centro de classe de 7,5 cm).

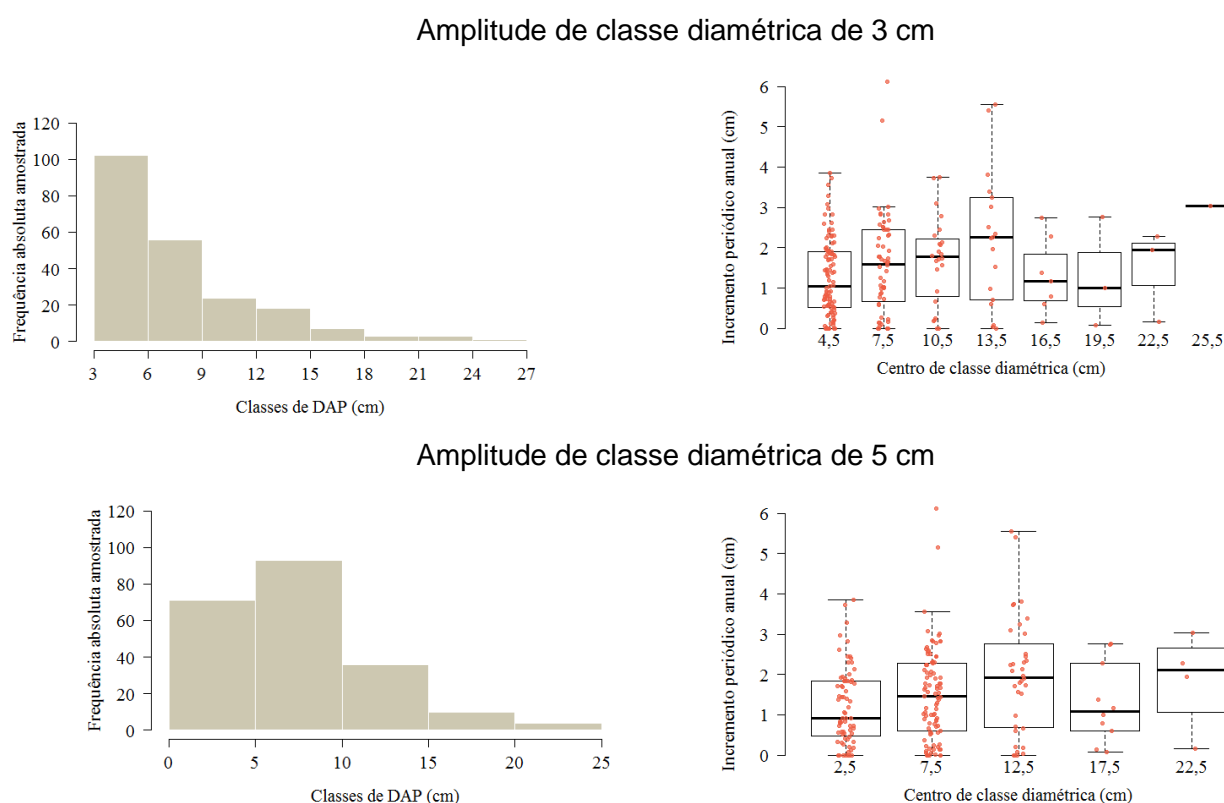


Figura 1. Distribuição diamétrica de fustes amostrados no ano de 2020 em um fragmento de Mata Atlântica sob processo de recuperação florestal à esquerda e Boxplot de seus incrementos periódicos anuais em diâmetro até 2022 à direita.

Figure 1. Diameter distribution of sampled stems in the year 2020 in a fragment of Atlantic Forest under forest recovery process on the left, and Boxplot of their periodic annual increments up to 2022 on the right.

A ausência de normalidade pelo teste de Shapiro Wilk ($p \leq 0,01$) foi constatada para todo o conjunto dos dados de incremento e, quando analisada por classe diamétrica, para as amplitudes de 3 cm (centros de classe de 4,5 e 10,5 cm) e 5 cm de diâmetro (centros de classe de 2,5, 7,5 e 12,5 cm). Desse modo, procedeu-se com a modelagem para a estimativa da mediana de incremento periódico em função do centro de classe diamétrica para o fragmento estudado de Mata Atlântica sob recuperação florestal (Tabela 2).

A qualidade de ajuste melhorou com o aumento da amplitude das classes diamétricas. Ao se comparar as amplitudes de 3 e 5 cm, as estatísticas de MDA, RQEM e AIC reduziram em torno de 38,32%, 36,00% e 45,62%, respectivamente. As equações (5-3), (5-4) e (5-7), referentes aos modelos ajustados (3), (4) e (7), apresentaram os menores desvios (baixos valores ponderados de escores estatísticos). Essas equações, foram selecionadas para as análises gráficas subsequentes (Figura 2).

Tabela 2. Coeficientes e qualidade de ajuste das equações obtidas para a estimativa da mediana do incremento periódico anual médio por classe diamétrica (IPA, cm ano⁻¹) em função do centro de classe (CC, cm) para um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal.

Table 2. Coefficients and fit quality of the equations obtained to estimate the median of annual periodic increment in diameter (API, cm year⁻¹) as a function of the diameter class center (CC, cm) for a fragment of Atlantic Forest under forest recovery.

Equação	β_0	β_1	β_2	MDA	RQEM	AIC	VP
----- Classes diamétricas com amplitude de 3 cm -----							
(3-1)	0,989698	0,049010	-	0,4744	0,5556	19,3011	33
(3-2)	1,781138	-0,084567	0,004453	0,4744	0,5244	20,3758	34
(3-3)	0,732663	-2,840109	-	0,4561	0,5881	10,9072	28
(3-4)	0,268302	0,565674	-	0,4507	0,5694	19,6925	31
(3-5)	-0,281168	0,294412	-	0,4685	0,5775	10,9317	30
(3-6)	376,686200	1,774341	0,005760	0,4764	0,5471	21,0518	38
(3-7)	-0,000051	-1,000049	0,000001	0,4662	0,5241	20,3660	30
----- Classes diamétricas com amplitude de 5 cm -----							
(5-1)	0,992331	0,040425	-	0,3215	0,3662	10,1441	18
(5-2)	0,881207	0,066572	-0,001046	0,3110	0,3636	12,0722	21
(5-3)	0,599343	-1,723694	-	0,2707	0,3511	5,5134	8
(5-4)	0,600196	0,392496	-	0,2776	0,3502	9,6976	10
(5-5)	-0,289245	0,280830	-	0,3030	0,3564	5,8867	12
(5-6)	1,708577	0,368961	0,327570	0,2655	0,3500	11,6898	11
(5-7)	1,703865	2,358996	0,388844	0,2657	0,3497	11,6819	10

Equação (i-j) = i representa a amplitude de classe diamétrica e j, o modelo de regressão apresentado na Tabela 1; MDA = Média dos Desvios Absolutos; RQEM = Raiz Quadrada do Erro Médio; AIC = critério de informação de Akaike; VP = Valor ponderado dos escores estatísticos e; β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros dos modelos de regressão.

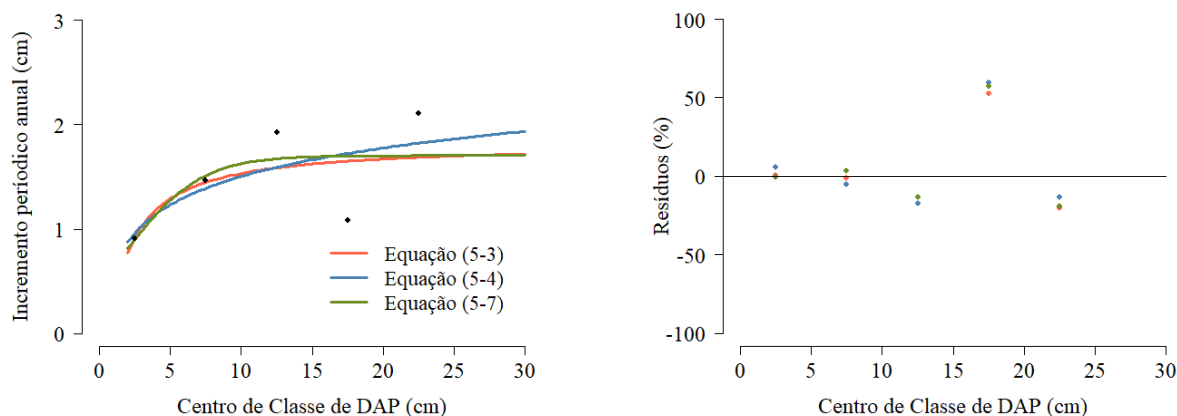


Figura 2. Curvas de incremento periódico anual e distribuição de resíduos percentuais de equações selecionadas para a análise do tempo de passagem em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal à esquerda e à direita, respectivamente.

Figure 2. Annual periodic increment curves and percentage residue distribution of equations selected for the analysis of passage time in a fragment of Atlantic Forest under forest recovery on the left and right, respectively.

O comportamento assintótico foi verificado em todas as curvas geradas com as equações selecionadas, referente à amplitude de classe diamétrica de 5 cm. Menores dispersões de resíduos percentuais foram observadas nas equações (5-3) e (5-7). Calcularam-se a idade relativa e o tempo de passagem por classe diamétrica para ambas as equações (Tabela 3). Para o fragmento em fase de recuperação florestal, a aplicação das equações resultou em tendência à estabilização entre as classes diamétricas de 5 a 25 cm. Nessa tabela encontram-se informações sobre a tendência do tempo de passagem além do intervalo diamétrico inventariado, caso haja pouca variação de interações ecológicas na comunidade.

Tabela 3. Estimativas de idade relativa e tempo de passagem por classe diamétrica para um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal, assumindo a amplitude de classe de 5 cm.

Table 3. Estimates of relative age and passage time per diametric class for a fragment of Atlantic Forest under forest recovery, assuming a class width of 5 cm.

Centro de Classe (cm)	IPA (cm ano ⁻¹)	Idade mínima ----- (meses) ----- ----- Equação (5-3) -----	Idade máxima -----	Tempo de passagem (anos)
7,5	1,3276	60	96	4
12,5	1,5611	108	132	3
17,5	1,6345	144	168	3
22,5	1,6768	180	204	3
27,5	1,7040	216	240	3
32,5	1,7228	252	276	3
37,5	1,7364	288	312	3
42,5	1,7469	324	336	2
47,5	1,7525	348	372	3
----- Equação (5-7) -----				
7,5	1,4827	62	98	4
12,5	1,6746	110	134	3
17,5	1,6997	146	170	3
22,5	1,7033	182	206	3
27,5	1,7038	218	242	3
32,5	1,7039	254	266	2
37,5	1,7039	278	302	3
42,5	1,7039	314	338	3
47,5	1,7039	350	374	3

DISCUSSÃO

O fragmento de Mata Atlântica em fase de recuperação apresentou distribuição diamétrica na forma de J-invertido, típico das florestas tropicais. Trata-se de uma tendência comum em florestas sem perturbações intensivas, com maior frequência de fustes nas menores classes diamétricas (Figura 1). Isso é um indicativo de que a densidade de árvores de menor porte suporta a comunidade de árvores maiores (REIS et al. 2018).

O desempenho da modelagem para a estimativa de IPA não foi comprometido pela presença outliers superiores contidos no intervalo de 6 a 9 cm de DAP (Figura 1), visto que as variáveis dependentes especificadas nos modelos de regressão representaram informações medianas de incremento em cada classe diamétrica (Tabela 1). É relevante destacar que a mediana é uma medida de tendência central não influenciada por valores extremos, tornando-se útil em situações cujas distribuições biométricas não seguem a normalidade, tendência essa também constatada nos dados de incremento segundo o teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,01$). A similaridade observada entre as distribuições de incremento relativas às amplitudes de classe de 3 e 5 cm de diâmetro foi mais evidente nas menores classes de tamanho, o que pode ser atribuída, em parte, a assimetrias na dispersão de IPA dentro de cada intervalo biométrico.

As regressões para as estimativas de incremento em diâmetro foram consideradas, na maioria, satisfatórias, em virtude da riqueza de espécies intrínseca ao ecossistema natural, complexidade de processos ecológicos e da variabilidade do crescimento em ambiente inequívoco (GOVEDAR et al. 2021). Estabeleceram-se 14 relações funcionais para a estimativa da mediana de incremento periódico anual em função do centro de classe diamétrico (Tabela 1). O uso do valor ponderado dos escores estatísticos foi

essencial para auxiliar a seleção de equações.

A adoção da amplitude de 5 cm para as classes diamétricas promoveram a qualidade de ajustamento dos modelos de regressão (Tabela 2). É provável que a concentração de mais fustes na amplitude de 5 cm tenha contribuído com a representatividade por classe de tamanho, melhorando a qualidade de ajuste (Figura 1). O melhor desempenho preditivo foi constatado nas equações (5-3) e (5-7). A consistência biológica de ambas as equações foi evidenciada em seus coeficientes e comprovada por inspeção gráfica (Figura 1). O valor negativo do coeficiente angular da equação (5-3) e positivo de assíntota (representada por β_0) da equação (5-7) denotaram comportamento ascendente do incremento periódico anual com o crescimento em diâmetro dos fustes.

A estimativa da mediana do incremento periódico anual dos fustes diferenciou-se pouco com o aumento das classes diamétricas. A similaridade do tempo de passagem entre essas classes pode ter sido consequência da condição de recuperação a qual o fragmento encontra-se, haja vista que, espera-se maiores diferenças de incremento entre classes de tamanho com a intensificação da competição devido ao fechamento de dossel e avanço do estágio de regeneração (TAIZ & ZEIGER 2013).

Não se identificou uma estimativa de diâmetro, que a partir da qual, houvesse declínio na sua taxa de crescimento. Isto, provavelmente, foi consequência da predominância de indivíduos em fase juvenil e/ou em fase de maturação no fragmento em recuperação florestal. Pesquisas têm demonstrado reduções das taxas do crescimento de plantas com a aproximação da fase de senescência, diminuindo o incremento diamétrico (SCOLFORO et al. 1996, PIRES et al. 2021). Portanto, cuidados devem ser tomados para um apropriado uso da modelagem do incremento periódico em diâmetro. Recomenda-se, sempre que possível, o teste de diversos modelos de regressão e seleção do mais adequado a partir de uma criteriosa avaliação pautada em um conjunto de estatísticas de acurácia.

Embora o levantamento florístico não tenha sido realizado neste trabalho, curtos intervalos do tempo de passagem nas menores classes diamétricas (em torno de três a quatro anos) revelaram um crescimento inicial rápido (acima de $1,4 \text{ cm ano}^{-1}$) em comparação com outras formações lenhosas de maior porte e em estágios mais avançados de regeneração. Enfatiza-se que indivíduos mais juvenis e distribuídos em florestas maduras possuem a expectativa de menores incrementos periódicos em diâmetro, em razão da maior competição por radiação luminosa inerente às condições de subdossel florestal (PIRES et al. 2021). Têm sido encontrados os seguintes incrementos até 10 cm de diâmetro para as seguintes espécies da floresta Amazônica: $< 0,7 \text{ cm ano}^{-1}$ para *Erismia uncinatum* Warm., *Hymenolobium excelsum* Ducke e *Trattinnickia burserifolia* Mart. (CANETTI et al. 2021); $< 0,5 \text{ cm ano}^{-1}$ para *Carapa guianensis* Aubl. e *Tetragastris altissima* (Aubl.) Swart (PIRES et al. 2021) e; $< 0,2 \text{ cm ano}^{-1}$ para *Minquartia guianensis* Aubl. (ANDRADE et al. 2017).

Predições futuras do incremento em diâmetro de árvores permite a definição de estratégias apropriadas para o manejo de florestas naturais, com fins conservacionistas ou sustentavelmente exploratórios. A estimativa de idade relativa à qual o fragmento alcançou o diâmetro mínimo que o classifica como estágio médio de regeneração (10 cm, CONAMA 2007) ocorreu, aproximadamente, aos nove anos. Esta informação é de grande relevância técnica para o planejamento de estratégias de manejo, posto que, intervenções em domínio de Mata Atlântica são cada vez mais restritas com o avanço do seu estágio de regeneração, regulamentadas pela Lei 11.428 (BRASIL 2006).

As médias de diâmetro calculadas para os fustes maiores que 5 cm de DAP, valor mínimo em pedidos de intervenção ambiental em Minas Gerais (Resolução Conjunta nº 3.102; SEMAD & IEF 2021), foram de $9,24 \pm 4,09 \text{ cm}$ e $10,79 \pm 9,03 \text{ cm}$ nos anos de 2020 e 2022, respectivamente. Essas dimensões implicam que o fragmento se encontra diametricamente em estágio médio de regeneração, conforme a Portaria nº 392 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 2007). Ressalta-se que esta portaria se baseia em um conjunto de aspectos quantitativos e qualitativos para a classificação de estágios de regeneração na unidade federativa de Minas Gerais.

Apesar da análise de viabilidade econômica não ter sido objeto principal de estudo neste trabalho, a instalação do regime de manejo deve estar em concordância com a Lei 11.428 (BRASIL 2006), a qual restringe o manejo em Mata Atlântica apenas a espécies arbóreas pioneiras e em fragmentos em estágios inicial ou médio de regeneração, cuja presença de pioneiras seja superior a 60% em relação aos demais grupos ecológicos. Para as ocasiões de manejo florestal sustentável com fins madeireiros, estimaram-se os ciclos de corte de 15 anos para o diâmetro mínimo comercializável (DMC) de 20 cm, de 18, 21 e 32 anos

para os diâmetros de 25, 30 e 50 cm, respectivamente. A fim de se manter o fragmento florestal nas condições de manejo impostas por essa lei, é provável que haja a necessidade de eventual redução do DMC e intensificação da exploração com ciclos de corte mais curtos.

Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para a definição de programas conservacionistas sem supressão da vegetação nativa e/ou manejo sustentável na região de estudo. Salienta-se que os resultados apresentados não implicam em recomendação de manejo florestal madeireiro, sendo necessárias mais pesquisas sobre a exequibilidade técnica e econômica em consonância com legislações vigentes.

CONCLUSÃO

Os modelos Logístico e de Curtis, adaptados para a estimativa do incremento periódico anual, são eficientes para cálculos relacionados ao tempo de passagem vegetal em fragmento em fase de recuperação florestal. A amplitude da classe de 5 cm de diâmetro é adequada para cálculos do tempo de passagem de fragmentos sujeitos a recuperação florestal por mais de seis anos.

Fragmentos durante a recuperação florestal podem exibir taxas de crescimento relativamente similares entre classes diamétricas. Para o fragmento de Mata Atlântica em fase de recuperação em estudo, a estimativa do incremento periódico anual oscilou em torno de 1,5 a 1,7 cm ano⁻¹ (tempo de passagem de três anos em amplitudes de 5 cm) no intervalo de 10 a 25 cm de diâmetro. A idade relativa para os fustes alcançarem 5 cm de diâmetro foi de, aproximadamente, cinco anos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) - Campus de São João Evangelista-MG por todo apoio logístico, estrutural e suporte financeiro para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE CGC et al. 2017. Crescimento diamétrico e tempo de passagem de *Minquartia guianensis* após manejo na Floresta Nacional do Tapajós. Pesquisa Floresta Brasileira 37: 299-309.
- BRASIL. 2006. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/11428.htm. Acesso em: 07 nov. 2022.
- CAMPOS JCC & LEITE HG 2017. Mensuração Florestal: perguntas e respostas. 5.ed. Viçosa: UFV. 636p.
- CANETTI A et al. 2021. A new approach to maximize the wood production in the sustainable management of Amazon forest. Annals of Forest Science 78: 1-21.
- CLIMATE-DATA.ORG. 2023. Clima: São João Evangelista. Disponível em: <https://pt.climatedata.org/location/175926/>. Acesso em: 25 ago. 2023.
- CONAMA 2007. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – Portaria nº 392, de 25 de junho de 2007. Definição de vegetação primária e secundária de regeneração de Mata Atlântica no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=6991>. Acesso em: 07 nov. 2022.
- DIONISIO LFS et al. 2018. Growth, mortality, and recruitment of tree species in an Amazonian rainforest over 13 years of reduced impact logging. Forest Ecology and Management 430: 150-156.
- ELZHOV T et al. 2022. minpack. In: R interface to the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm found in MINPACK, Plus Support for Bounds. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/minpack.lm.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2023.
- FILGUEIRAS BKC et al. 2019. Cross-taxon congruence in insect responses to fragmentation of Brazilian Atlantic forest. Ecological Indicators 98: 523-530.
- GOVEDAR Z et al. 2021. Diameter structure of the stand and time of passage: an analysis in primeval forests Janj and Lom in Republic of Srpska (Bosnia and Herzegovina). Agriculture & Forestry 67: 89-102.
- HAMNER B & FRASCO M. 2018. Metrics: evaluation metrics for machine Learning. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/Metrics/Metrics.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2023.
- HOUÉNON GHA et al. 2022. Trees, Forests and People 9: 100283.
- PINTO LAA. 2021. Forest management criteria for *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. (Sapotaceae) in upland forests of Central Amazon based on dendrochronological study. Environmental Sciences Proceedings 3: 1-9.
- PIRES SAO et al. 2021. Growth modeling of *Carapa guianensis* and *Tetragastris altissima* for improved management in native forests in the Amazon. Ecological Modelling 456: 109683.
- R CORE TEAM 2022. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Disponível em:

- <https://www.R-project.org/>
- REIS LP et al. 2018. Estimation of mortality and survival of individual trees after harvesting wood using artificial neural networks in the amazon rain forest. *Ecological Engineering* 112: 140-147.
- RODER LR et al. 2023. Atlantic rainforest natural regeneration in fragmented formations affected by increasing human disturbance. *Journal of Environmental Management* 325: 116521.
- SALES et al. 2021. Silvicultural management system applied to logged forests in the Brazilian Amazon: a case study of adaptation of techniques to increase the yield and diversity of species forestry. *Diversity* 13: 509.
- SANTOS L et al. 2017. Idade relativa e tempo de passagem para *Eremanthus incanus* (Less.) Less em uma área em recuperação no município de Diamantina, MG. *Floresta e Ambiente* 24: e20150262.
- SCOLFORO JRS et al. 1996. Modelo de produção para floresta nativa como base para manejo sustentado. *Cerne* 2: 112-137.
- SEMAD. 2021. SECRETÁRIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS – IEF. Resolução Conjunta nº 3.102, de 26 de outubro de 2021. Dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental no âmbito do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=422474>. Acesso em: 07 nov. 2022.
- SIRAMI EV et al. 2018. Ideal planting space for merbau (*Intsia bijuga*) forest plantations in Papua based on distance-dependent competition. *Biodiversitas* 19: 2219-2231.
- TAIZ L & ZEIGER E. 2013. *Fisiologia vegetal*. 5.ed. Porto Alegre: Artmed. 954p.
- THIERSCH, A. 1981. A eficiência das distribuições diamétricas para prognose de *Eucalyptus camaldulensis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Lavras: UFLA. 155p.