Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Modelagem do crescimento e produção aplicado ao manejo florestal na Amazônia brasileira

Tito Nunes de Castro

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba 2016 Tito Nunes de Castro Engenheiro Florestal

Modelagem de crescimento e produção aplicado ao manejo florestal na Amazônia brasileira

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador: Prof. Dr. JOÃO LUIS FERREIRA BATISTA

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Castro, Tito Nunes de

Modelagem do crescimento e produção aplicado ao manejo florestal na Amazônia brasileira / Tito Nunes de Castro. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016. 147 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Incremento diamétrico 2. Mortalidade 3. Recrutamento 4. Exploração de Impacto Reduzido 5. Exploração Convencional I. Título

CDD 634.9285 C355m

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - O autor"

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer ao Professor Doutor João Luis Ferreira Batista, base de grande parte do meu conhecimento na minha área de atuação, desde a graduação, por ter aceitado me orientar novamente nessa etapa, pelos ensinamentos nos mais diversos assuntos repassados a minha pessoa e principalmente pelo apoio e confiança depositados em mim.

Ao Professor Doutor Edson Vidal, pela disponibilização dos dados utilizados nessa pesquisa, pela confiança, e também pelos conhecimentos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais, no qual convivi durante esses anos e tive contato pelos corredores e salas de aula do Departamento, por fazer parte desse meu ciclo acadêmico e pelo conhecimento repassado à mim.

Aos integrantes do CMQ pelos momentos de descontração durante os cafezinhos e também pelas conversas enriquecedoras sobre os mais diversos assuntos. E especialmente aos meus "irmãos" de orientador, Rafaela, Esthevan, Eimi e Andrea pela amizade.

À República Área 51, representado por todos atuais moradores e ex-moradores, por me acolher e ser minha segunda família durante esse meu ciclo acadêmico.

Ao Eng. Florestal Rildo e todos os funcionários da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, como também a todos os alunos que passaram pelo estágio de férias, pela aprendizagem absorvida nesses janeiros e julhos no qual estive na estação como monitor de inventário florestal.

À minha mãe Silvana, e ao meu pai Raymundo e a todos os meus familiares, por todo o amor e confiança.

À Lívia, que "surgiu" como um presente de Deus para mim nesse último ano de doutorado, por todo seu amor, seu carinho, companheirismo e cumplicidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a minha pesquisa concedida em forma de bolsa de doutorado.

À todas as pessoas que eu passaram por minha vida nesse período que de certa forma contribuíram para o meu engradecimento como pessoa.

Meus sinceros agradecimentos!

"O princípio de tudo é o número" Pitágoras (* 570 a.C. †495 a.C)

.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Exploração florestal na Amazônia brasileira	19
1.1.1 Exploração Convencional	22
1.1.2 Exploração de Impacto Reduzido	22
1.2 Modelagem de crescimento e produção na avaliação do manejo florestal	23
1.3 A estatística da modelagem do crescimento e produção	25
1.3.1 Método de comparação baseado em modelos	26
1.4 Considerações	30
1.4.1 Área de estudos e coleta de dados	30
1.4.2 Hipóteses	31
1.4.3 Objetivos	32
Referências	34
2 A UTILIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL E DISTRIBUIÇÃO GAMMA N	NA MO-
DELAGEM DO ERRO ALEATÓRIO EM MODELOS DE CRESCIMENTO E PROD	UÇÃO .
2.1 Introdução	39
2.2 Material e Métodos	40
2.2.1 Estimação dos Parâmetros	40
2.2.2 Efeito estocástico com distribuição Weibull	41
2.2.3 Efeito estocástico com distribuição Gamma	42
2.2.4 Conjunto de dados utilizados	44
2.2.5 Ajuste e seleção do modelo de incremento diamétrico	44
2.3 Resultados	45
2.4 Conclusão	46
Referências	54
3 COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE COLHEITA FLORESTAL AT	RAVÉS
DA MODELAGEM DO INCREMENTO DIAMÉTRICO DE ÁRVORES INDIVIDU	AIS NA
AMAZÔNIA BRASILEIRA	55
3.1 Introdução	55
3.2 Material e Métodos	56
3.2.1 Área e estudo	56
3.2.2 Amostragem	57
3.2.3 Agrupamento dos dados	57
3.2.4 Incremento diamétrico anual	59
3.2.5 Modelagem do incremento diamétrico anual	60

3.3 Resultados e discussão	
3.3.1 Ajuste e seleção dos modelos	
3.3.2 Comportamento do incremento diamétrico anual (cm/ano) em cada g	grupo de espécies.71
3.4 Conclusão	80
Referências	
4 MODELAGEM DA MORTALIDADE PARA COMPARAÇÃO DE M	AÉTODOS DE CO-
LHEITA FLORESTAL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	
4.1 Introdução	
4.2 Material e Métodos	
4.2.1 Área de estudo	
4.2.2 Amostragem	
4.2.3 Probabilidade de mortalidade	
4.2.4 Ajuste e seleção dos modelos	
4.3 Resultados e Discussão	
4.4 Conclusão	
Referências	
5 COMPARAÇÃO DE DUAS EXPLORAÇÕES NA AMAZÔNIA ORIEN	VTAL BRASILEIRA
ATRAVÉS DA MODELAGEM DO RECRUTAMENTO	
5.1 Introdução	
5.2 Material e Métodos	
5.2.1 Área de estudo	
5.2.2 Amostragem	
5.2.3 Probabilidade de recrutamento	
5.2.4 Ajuste e seleção dos modelos	
5.3 Resultados e discussão	
5.4 Conclusão	
Referências	
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	
APÊNDICES	

RESUMO

Modelagem de crescimento e produção aplicado ao manejo florestal na Amazônia brasileira

A floresta Amazônica possui um papel ambiental, social e econômico importante para a região, para o país e para o mundo. Dessa forma, técnicas de exploração que visam a diminuição dos impactos causados à floresta são essenciais. Com isso, o objetivo dessa tese é comparar a Exploração de Impacto Reduzido com a Exploração Convencional na Amazônia brasileira através de modelos empíricos de árvore individual de crescimento e produção. O experimento foi instalado na fazenda Agrossete, localizada em Paragominas - PA. Em 1993, três áreas dessa fazenda foram selecionadas para exploração. Na primeira área, 105 hectares foram explorados através da Exploração de Impacto Reduzido. Na segunda área, 75 hectares foram submetidos à Exploração Convencional. E, por fim, a terceira área foi mantida como área testemunha. A coleta de dados de diâmetro à altura do peito e a identificação das espécies dentro de uma parcela de 24,5 hectares, instalada aleatoriamente em cada área, foi realizada nos anos de 1993 (antes da colheita), 1994 (seis meses depois da colheita), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009. Dessa forma, as três áreas foram comparadas através do ajuste de um modelo de incremento diamétrico, considerando que efeito estocástico podia assumir outras quatro distribuições além da distribuição normal, de um modelo de probabilidade de mortalidade e de um modelo de probabilidade de recrutamento. O comportamento do incremento diamétrico indicou que as áreas que foram submetidas a exploração possuem o mesmo comportamento em quase todos os grupos de espécies, com exceção do grupo de espécies intermediárias. Os indivíduos que são submetidos a exploração possuem um maior crescimento em diâmetros quando comparados com área que não sofreu exploração. Além disso, assumir o efeito estocástico com distribuição Weibull melhorou o ajuste dos modelos. Em relação à probabilidade de mortalidade, novamente as áreas que sofreram exploração possuem comportamento semelhante quanto à mortalidade, mas diferente da área que não foi explorada, sendo que os indivíduos localizados nas áreas exploradas possuem uma maior probabilidade de morte em relação aos presentes na área não explorada. Os modelos de probabilidade de recrutamento indicaram diferença apenas entre as áreas exploradas e a área controle. Sendo que, as áreas exploradas apresentaram uma maior taxa de recrumento em comparação a área não explorada. Portanto, o comportamento individual das árvores após a exploração é o mesmo na Exploração Convencional e na Exploração de Impacto Reduzido.

Palavras-chave: Incremento diamétrico; Mortalidade; Recrutamento; Exploração de Impacto Reduzido; Exploração Convencional

ABSTRACT

Yield and growth modeling applied to Brazilian Amazon forest management

The Amazon forest has an important environmental, social and economic role for the region, the country and the world. Thus, logging techniques aimed the mitigation of impacts caused to the forest are essential. Hence, the purpose of this thesis is to compare the Reduced Impact Logging to the Conventional Logging in the Brazilian Amazon through individual tree empirical yield and growth models. In 1993, three areas of this farm had selected for logging. In the first area, 105 hectares were harvested by Reduced Impact Logging. In the second area, 75 hectares underwent Conventional Logging. Finally, the third area was kept as a control area. The diameter at breast height and the species identification were collect inside a 24.5 hectares plot, located randomly in each area. The data were collect in 1993 (before harvest), 1994 (six months after the harvest), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 and 2009. Therefore, the three areas were compared by adjusting a diameter increment model, whereas stochastic effect may take five different distributions, a survival probability model, and a recruitment probability model. The behavior of the diameter increment indicated the areas were subject to logging have the same behavior in almost every successional groups of species, except in the intermediate species group. Individuals who are undergoing harvest have a greater diameter growth compared with the area that has not logged. Also, assume the stochastic effect with Weibull distribution improve the fit of models. Regarding the probability of survival, logged areas have similar behavior, but different from another area that has not harvest. The individuals located in the logged areas have an increased mortality rates. Recruitment probability models indicated a difference only between the logged area with not logged area. The logging areas presented a bigger recruitment rates than not logged area. Then, the individual behavior of trees after logging is the same for Reduced–Impact Logging and Conventional Logging.

Keywords: Diameter increment; Mortality; Recruitment; Reduced-Impact Logging; Conventional Logging

LISTA DE FIGURAS

1.1 Esquema simplificado representando as etapas de ajuste de um modelo de crescimento e
produção de árvore individual (adaptado de Vanclay (1994))24
1.2 Gráfico boxplot das distribuições dos dados simulados. No qual, o eixo X representa os
conjuntos de dados simulados
1.3 Distribuição dos dados simulados e seus respectivos modelos ajustados
1.4 Localização da área de estudo 31
1.5 Esquematização das parcelas alocadas na área de estudo. A parcela (a) foi alocada nas áreas
de EIR e EC. A parcela (b) foi alocada na área controle
2.1 Resíduo (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados assumindo o efeito es-
tocástico com distribuição Normal, Weibull e Gamma. A linha contínua é a linha de tendência
dos resíduos
2.2 Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros do modelo com efeito estocástico
com distribuoção Weibull
2.3 Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros do modelo com efeito estocástico
com distribuoção Gamma
2.4 Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros do modelo com efeito estocástico
com distribuoção Normal
2.5 Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados (linha contínua) e a distribuição dos resíduos
simulados (linha tracejada)
2.6 Dados simulados de incremento diamétrico anual (preto), assumindo o efeito estocástico
com distribuição Normal, Weibull e Gamma, sobre os dados observado (cinza) para as três
distribuições
2.7 Distribuição dos dados simulados para as três distribuições estudadas (Normal, Weibull e
Gamma) com a distribuição dos dados observados
3.1 Tamanho e forma da parcela de estudo do incremento diamétrico. A área em cinza contém
as árvores que foram utlizadas para o ajuste do modelo, enquanto que, as árvores presentes na
área restante foram utlizadas apenas para cálculo dos ´índices de competição57
3.2 Exemplo de cálculo dos índices de competição, sendo $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto
<i>i</i> e a árvore competidora <i>j</i> , e o raio de 7,5 metros
3.3 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo suces-
sional Pioneiras (A) em seus respectivos tratamentos
3.4 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo suces-
sional Demandante de luz (B) em seus respectivos tratamentos
3.5 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo suces-
sional Intermediárias (C) em seus respectivos tratamentos
3.6 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo suces-
sional Tolerantes à sombra (D) em seus respectivos tratamentos

3.7 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para os grupos suces-
sional Emergentes (E) e Sem grupo definido (N)
3.8 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo suces-
sional Intermediárias (C) para a EIR
3.9 Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo suces-
sional Intermediárias (C) para a EC
3.10 Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional Pioneiras (A), no qual,
as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)
3.11 Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional Demandante de luz (B),
no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal) 75
3.12 Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional Intermediárias (C), no
qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)
3.13 Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional Tolerante à sombra (D),
no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)
3.14 Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional Emergentes (E) e Sem
grupo definido (N), no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área
basal)
3.15 Comportamento do incremento médio anual (Δd) considerando os diferentes grupos su-
cessionais e suas respectivas explorações
3.16 Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o
grupo sucessional Pioneiras (A) 80
3.17 Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o
grupo sucessional Demandante de luz (B)81
3.18 Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o
grupo sucessional Intermediárias (C)
3.19 Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o
grupo sucessional Tolerante à sombra (D)82
3.20 Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o
grupo sucessional Emergentes (E) e Sem grupo definido (N)83
4.1 Tamanho e forma da parcela de estudo da mortalidade. A área em cinza contém as árvores
que foram utilizadas no modelo e as árvores da área em branco foram utilizadas apenas para
cálculo dos índices de competição 89
4.2 Dispersão dos resíduos do modelo de probabilidade de mortalidade anual selecionado 94
4.3 Dispersão dos resíduos dos modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados
separado por tratamentos (Areas exploradas e Area controle)
4.4 Modelos de probabilidade de mortalidade anual ajustados para cada tratamento, no qual, os
pontos em cinza são os dados observados a linha central o modelo ajustado e as linhas externas
são os intervalos de confiança com 95 % de probabilidade. Para a área não explorada, a linha
pontilhada que continua a partir da linha contínua é uma projeção do modelo

5.1 Tamanho e forma da parcela de estudo da probabilidade de recrutamento. A área em cinza
contém as árvores que foram utilizadas no modelo e a área em branco cotém as árvores que
foram utlizadas apenas para cálculo dos índices de competição 103
5.2 Perfil de log-verossimilhança negativa de um parâmetro sem estabilidade em sua estimativa
5.3 Perfis de log-verossimilhança negativa dos parâmetros estimados do modelo de probabili-
dade de recrutamento anual selecionado109
5.4 Dispersão dos resíduos do modelo de probabilidade de recrutamento dividos por área ex-
plorada (EIR e EC agregadas) e por área controle110
5.5 Dispersão dos resíduos do modelo de probabilidade de recrutamento anual selecionado 111
5.6 Curvas dos modelos de probabilidade de recrutamento ajustados por valores de área basal
(m2/ha) do povoamento. As diferentes linhas indicam o valor do índice de competição 3 (DAP
médio)
5.7 Curvas dos modelos de probabilidade de recrutamento ajustados por área basal, no qual
cada linha representa o DAP médio das árvores dentro a área de influência de raio 7,5 metros .

LISTA DE TABELAS

1.1 Média, desvio padrão e número de observações dos diferentes tratamentos do conjunto de
dados simulados
2.1 Critério de Seleção de Akaike dos modelos de incremento diamétrico ajustados
2.2 Parâmetros dos erro estimados para os diferentes ajustes dos modelos de incremento diamétrico
3.1 Grupos sucessionais utilizados para a separação das espécies em grupos
3.2 Número de indivíduos observados em cada grupo ao longo do tempo
3.3 Equações utilizadas para descrever o comportamento do incremento diamétrico médio an-
ual. Sendo Δd_x o incremento médio anual, em cm=ano, da árvore x; β_i os parâmetros estimados
do modelo; I_{Cx} o índice de competição da árvore x; d o DAP das árvore x em cm
3.4 Índices de competição utilizados. Sendo, d_i o DAP da árvore objeto em cm; d_j o DAP da
árvore competidora em cm; \bar{d}_g o diâmetro médio quadrático; G a área basal por hectare; n o
número de indivíduos em torno da árvore objeto; $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto e a
árvore competidora em metros
3.5 Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada
distribuição, confrontando o modelo geral e o modelo por exploração63
3.6 Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada
distribuição, confrontando o modelo por exploração e o modelo por grupo sucessional 64
3.7 Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada
distribuição, confrontando o modelo por grupo sucessional e o modelo por exploração e grupo
sucessional
3.8 Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada
distribuição, confrontando o modelo por exploração e grupo sucessional e o modelo por exploração,
grupo sucessional e valor comercial
3.9 Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada
distribuição confrontando o modelo em que as explorações são diferentes e o modelo no qual
as duas explorações (EIR e EC) possuem o mesmo comportamento
3.10 Comparação do comportamento do incremento diamétrico anual por grupo sucessional
considerando as explorações (EIR e EC) iguais (Agregado) e diferentes (Separado). As células
em cinza indicam o modelo selecionado
3.11 Modelos de incremento diamétrico selecionados confrontando o melhor modelo sele-
cionado com a situação no qual alguns grupos de espécies possuem crescimento diferente entre
as explorações (Tabela 3.10)
3.12 Parâmetros dos modelos de incremento diamétrico selecionados e seus respectivos erro
padrão (S_x)
4.1 Equações utilizadas para descrever o comportamento da probabilidade de sobrevivência.
Sendo P_s a probabilidade de sobrevivência; β_i os parâmetros estimados do modelo; IC o índice
de competição; d o DAP das árvores em cm90

4.2 Índices de competição utilizados. Sendo, d_i o DAP da árvore objeto em cm; d_j o DAP da
árvore competidora em cm; $\bar{d_g}$ o diâmetro médio quadrático; G a área basal por hectare; n o
número de indivíduos em torno da árvore objeto; $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto e a
árvore competidora em metros90
4.3 Número de observações (número de período \times número de classes) em cada tratamento . 91
4.4 Modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados confrontando o modelo geral
e o modelo por exploração
4.5 Modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados confrontando o modelo por
período e por exploração
4.6 Modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados
4.7 Parâmetros dos modelos de probabilidade de sobrevivência $(1 - P_m)$ selecionados e seus
respectivos erro padrão (S_x)
5.1 Equações utilizadas para modelar a probabilidade de recrutamento. Sendo P_r a probabili-
dade de recrutamento; β_i os parâmetros do modelo; G_i a área basal (m ² /ha) da área de entorno
do indivíduo i ; e I_C o índice de competição do indivíduo i
5.2 Índices de competição utilizados. Sendo, d_i o DAP da árvore objeto em cm; d_j o DAP da
árvore competidora em cm; \bar{d}_g o diâmetro médio quadrático; G a área basal por hectare; n o
número de indivíduos em torno da árvore objeto; $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto e a
árvore competidora em metros; n o número de indivíduos em torno da árvore objeto 105
5.3 Critério de Seleção de Akaike dos modelos de probabilidade de recrutamento testados.
Agrupamento indica a separação dos dados pelo grupo indicado; Equação indica o número da
equação utilizada; I_C indica qual índice de competição foi utilizado; AIC é o valor do critério
de seleção do modelo; k é o número de parâmetros do modelo; e $\delta {\rm AIC}$ é a diferença do AIC do
modelo em relação ao melhor modelo107
5.4 Parâmetros dos modelos de probabilidade de recrutamento selecionados e seus respectivos
erro padrão (S_x)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Exploração florestal na Amazônia brasileira

A Amazônia Legal possui uma área de aproximadamente 5.217.423 km^2 abrangendo todos os estados da região Norte e parte do Mato Grosso, Goiás e Maranhão, o que corresponde a 61% do território brasileiro. Sua área de floresta primária é de 4.910.262 km^2 , no qual, os tipos de vegetação que ocorrem nessa região são: floresta ombrófila densa (1.874.483 km^2), floresta ombrófila aberta (1.415.345 km^2), floresta estacional semidecidual (243.299 km^2), floresta estacional decidual (21.957 km^2), campinarana (208.384 km^2), savana (868.827 km^2), savana estépica (14.855 km^2), formação pioneira (97.697 km^2), refúgio vegetacional (7.794 km^2) e ecótono (32.786 km^2) (IBGE, 2011).

Essa região apresenta uma das maiores biodiversidades do mundo, contendo, aproximadamente, um quarto das espécies de fauna existentes no globo e mais de 20.000 espécies de plantas endêmicas. A sua rede fluvial é a maior do mundo, correspondente por 20% da água doce despejadas nos oceanos. Além disso possui função reguladora do clima, no qual mudanças nos ecossistemas amazônicos podem provocar impactos na circulação atmosférica, no transporte de umidade para e da região e, consequentemente, no ciclo hidrológico não somente da América do Sul, mas também em outras partes do mundo (CORREIA, ALVALA, MANZI, 2008).

Considerando apenas as áreas de floresta ombrófila densa, floresta ombrófila aberta, floresta estacional semidecidual e floresta estacional decidual, que totalizam 3.555.084 km^2 , e uma exploração máxima de 30 m^3/ha (definido por legislação), a Amazônia Legal tem um potencial exploratório de mais de 10 bilhões de metros cúbicos. Entretanto, esses valores não consideram Áreas de Preservação Permanente (APP), terras indígenas, florestas de preservação integral, entre outras, o que diminui consideravelmente o valor total de exploração da floresta amazônica. Além disso, dificilmente é retirado de uma área de exploração 30 m^3/ha devido a restrições de quantidade de árvores exploráveis e legislação, o que reduz esse potencial quase pela metade.

Portanto, isso mostra a importância estratégica que essa região possui para o Brasil, tornandoa de grande importância políticas de conservação desse ecossistema e região (SABOGAL et al. 2006).

A exploração florestal na Amazônia brasileira de forma predatória teve início na década de 1970 pelo regime da ditadura militar com o programa de integração do território nacional através da abertura de estradas. Esse programa incentivou muitas pessoas a se deslocar de suas regiões de origem para ocupar a região norte do Brasil. Além disso, as estradas permitiram que a exploração madeireira atingisse áreas de floresta de terra firme (VERÍSSIMO et al., 1992; STONE, 1998; BARRETO et al., 1998; FEARNSIDE, 2005). Dessa época até o início da década de 1990 a exploração ocorria, principalmente, nas várzeas de forma predatória.

A partir da década de 1990, ocorreram várias mudanças na legislação florestal brasileira,

como, por exemplo, a regulamentação do artigo 15 do código florestal através do decreto no 1282, de 19 de outubro de 1994 (BRASIL, 1994), no qual instituiu e regulamentou a exploração florestal na Amazônia com a necessidade de um plano de manejo. Posteriormente, esse decreto foi revogado pelo decreto no 5975 de 30 de novembro de 2006 (BRASIL,2006a). O estabelecimento de critérios para exploração, como intensidade, duração de ciclo e diâmetro mínimo de corte com a finalidade de garantir a sustentabilidade da exploração (BRASIL, 2009).

Durante essa década, também aumentou a preocupação mundial em relação as questões que envolviam o meio ambiente, culminando na Conferência do Meio Ambiente e de Homem das Nações Unidas (ECO - 92). Durante essa década, o conceito de manejo florestal no Brasil foi desenvolvido, o que levou a introdução de técnicas de exploração florestal como a Exploração de Impacto Reduzido (EIR).

A partir dos anos 2000, a legislação brasileira avançou bastante na questão da exploração florestal na Amazônia através da criação do Programa Nacional de Florestas (BRASIL, 2000), da Lei de Gestão de Florestas Públicas, criação do Serviço Florestal Brasileiro (BRASIL, 2006b), entre outras coisas.

Dessa forma, junto com os esforços por parte dos órgãos governamentais e não governamentais, a exploração na Amazônia vem avançando bastante na busca por uma exploração com menor impacto e alguns trabalhos demonstram que a EIR vem alcançando isso. Holmes et al. (2002) estudaram o impacto da exploração na floresta amazônica comparando as duas explorações. Após a Exploração Convencional (EC), o número de árvores de interesse comercial remanescente atingiu 49 % do total antes da exploração, enquanto que na EIR esse percentual atingiu 71 %, indicando que a EIR possui uma grande vantagem em relação a EC através da diminuição do impacto causado à floresta. Além disso, Jonhs, Barreto e Uhl (1996) demonstraram que existe uma maior abertura no dossel e formação de grandes clareiras na exploração não planejada em comparação com a exploração planejada. Veríssimo et al. (1992) observaram que utilizando a técnica de Exploração Convencional até 43 % das árvores podem sofrer algum dano dependendo da intensidade de colheita.

Apesar de ser relativamente recente, muitas das técnicas presentes na Exploração de Impacto Reduzido não são novas, a sua utilização depende mais de obstáculos econômicos e de novos programas de incentivo para promover o uso dessas técnicas. Aumentando o uso dessas técnicas, provavelmente irá diminuir os impactos ambientais e haverá um ganho na produção nos futuros ciclos (SAYER, VANCLAY, BYRON, 1997). Entretanto, a EIR não deve ser confundida com produção sustentável de madeira ou com manejo florestal sustentável, ela é apenas um pré-requisito para alcançar esses patamares (PRIYADI et al., 2006; PUTZ et al., 2008). Sist e Ferreira (2007) afirmaram que com a utilização apenas da técnica da EIR na floresta Amazônica não é possível alcançar o manejo florestal sustentável, sendo necessária a implementação de novos tratamentos silviculturais para garantir a total recuperação do volume da floresta, sendo que em seu estudo após um ciclo de 30 anos, em um cenário otimista, apenas 50% dos indivíduos com interesse comercial vão se regenerar a ponto de atingir o diâmetro mínimo de corte reduzindo drasticamente a produção no segundo ciclo de corte. Castro (2012) mostrou que é necessário o aumento do ciclo de corte utilizado no Brasil, pois ciclos de 30 anos não garantem a recuperação do volume de madeira comercial para os níveis antes da colheita. Em outro estudo realizado na Indonésia, Sist et al. (2003) observaram que para a Exploração de Impacto Reduzido ser realizada de forma mais sustentável, deve se cortar apenas os indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) entre 60 e 100 cm. Entretanto, a adoção de algumas dessas alternativas, como, por exemplo, a exploração de indivíduos entre 60 e 100 cm de DAP, pode tornar a exploração inviável economicamente devido ao baixo número de indivíduos que estarão nessa faixa de diâmetro.

Tendo em vista todos esses desafios, a adoção de técnicas exploratórias que reduzam o impacto na floresta e alcancem o manejo sustentável ainda é um desafio tanto no Brasil quanto em outras florestas tropicais no mundo (PRIYADI et al., 2006). Portanto, ainda existe a necessidade de compreender certos processos que ocorrem dentro da floresta após a exploração, como, por exemplo, o recrutamento, a mortalidade, incremento diamétrico, diversidade de espécies, dano da colheita, entre outros, para melhoria nas técnicas de exploração com a finalidade de alcançar o *Manejo Florestal Sustentável*.

O Manejo Florestal Sustentável foi instituido em legislação através da lei no 11.284 e do Decreto no 5.975, sendo suas práticas definidas através da Instrução Normativa no 5 do MMA de 2006, revisada e modificada com a Resolução CONAMA no 406 de 2009 . Ele é definido de várias formas por diferentes autores, sendo que na legislação é definido como "a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies" (BRASIL, 2009). As práticas definidas em legislação foram principalmente em relação a intensidade e duração do ciclo de corte e diâmetro mínimo de corte. Para locais com exploração mecanizada a intensidade de exploração é de no máximo 30 m³/ha com ciclo de corte de 30 a 35 anos. Para áreas sem mecanização a intensidade de exploração a intensidade de aploração a intensidade de aploração a intensidade de asploração a intensidade de exploração a intensidade de exploração a intensidade de exploração de máximo 10 m³/ha e ciclo de corte de no mínimo 10 anos. Em ambos os casos o diâmetro mínimo de corte é de 50 cm. Práticas que foram estabelecidas a fim de garantir a sustentabilidade da exploração. Apesar disso, muitas delas foram estabelecidas sem um prévio conhecimento do comportamento da floresta após essas intervenções.

Algumas considerações deveriam ter sido levantadas na definição dessas leis. O Bioma Amazônia em toda sua extensão é composto principalmente por duas tipologias florestais, a floresta ombrófila densa e a floresta ombrófila aberta. Dentro delas encontra-se uma grande quantidade de ambientes que formam ao todo 53 ecossistemas (SAYRE et al., 2008). Além disso, existe uma grande diversidade de espécies que altera de uma região para outra. Sendo que cada uma delas possuem padrões de crescimento diferente. Essas considerações levam a pensar se é adequado a generalização da floresta para a definição de técnicas silviculturais ou se deveria pensar em técnicas diferentes para espécies com padrões semelhantes de crescimento em determinada região da floresta.

1.1.1 Exploração Convencional

A Exploração Convencional (EC) é a mais utilizada na região Amazônica. Nela, a exploração da floresta é realizada sem nenhum planejamento, o que ocasiona um maior impacto a floresta e a grande perda de madeira. Suas etapas correspondem basicamente em definir uma área de exploração, sem nenhum conhecimento da quantidade e localização das árvores com interesse de corte. Dessa forma, a equipe de motosserristas seguem para a localização e corte das árvores de interesse comercial. Após isso, a construção de estradas e pátios de estocagem é iniciada, sendo a última realizada em local de relevo plano e sem muitas árvores grandes que possam dificultar a abertura da área. Por fim, realiza-se o arraste das toras derrubadas até as estradas de arraste seguindo para os pátios de estocagem aonde, por sua vez, serão levadas para as serrarias (SILVA, 2002; CASTRO, 2012). Devido a falta de um mapeamento das árvores que foram abatidas, essa exploração ocasiona a perda de árvores abatidas esquecidas ou não encontradas com a abertura dos ramais de arraste. Essa procura, por sua vez, ocasiona uma maior abertura no dossel da floresta aumentando o impacto causado à floresta.

1.1.2 Exploração de Impacto Reduzido

Com o intuito de diminuir os impactos provenientes da exploração floresta foi criada a Exploração de Impacto Reduzido (EIR). Essa exploração é realizada em três etapas básicas: atividades pré-exploratórias, atividades exploratórias e atividades pós-exploratórias. Essas etapas estão descritas a seguir, de acordo com Amaral et al .(1998) e Zarin et al. (2007):

As atividades pré-exploratórias consistem em delimitação da unidade de trabalho e realização do censo dos indivíduos maiores que 40 cm de diâmetro à altura do peito (DAP) (etapas realizadas 2 anos antes da exploração), corte dos cipós com diâmetro maior que 2 cm presente nas árvores que serão derrubadas (etapa realizada entre 1 e 2 anos antes da exploração) e delimitação das estradas principais e dos pátios de estocagem (etapas realizadas 1 ano antes da exploração).

As atividades exploratórias são a orientação da colheita pela equipe de planejamento através de pequenas trilhas marcadas com balizas e fitas plásticas coloridas e a confecção de mapas para conferência pela equipe de derrubada e arraste. Orientações são distribuídas no local de abertura de estradas principais, nos pátios de estocagem, nos ramais de arraste e na direção de queda das árvores, possibilitando a abertura das estradas e dos pátios de estocagem. Após isso, a derrubada das árvores selecionadas é realizada de acordo com a legislação e as boas práticas de segurança do trabalho. E por fim, os ramais de arraste são abertos por tratores de arraste em busca das árvores abatidas.

As atividades pós-exploratórias consistem nos tratamentos silviculturais, como, por exemplo, o plantio de mudas e o favorecimento do crescimento de espécies de interesse comercial e também no monitoramento da floresta através da medição e instalação de parcelas de inventário contínuo.

1.2 Modelagem de crescimento e produção na avaliação do manejo florestal

Para análise do crescimento e produção florestal, a sua modelagem aparece como uma ferramenta essencial. Modelos de crescimento e produção são peças fundamentais para o planejamento florestal, indicando quanto será o ganho do produtor ao final de um ciclo de produção. Isso demonstra a necessidade da escolha do ajuste de um modelo com baixo viés para não prejudicar o planejamento florestal que é dependente de predições precisas da produção para inferir sobre o ciclo de corte, investimentos financeiros e operações silviculturais (ATTA–BOATENG, MOSER, 2000). Apesar disso, essa técnica não é tão difundida em áreas de florestas nativas com intuito de exploração madeireira em comparação com áreas de plantação florestal. Na primeira, ela tem mais caráter científico do que operacional.

A modelagem de crescimento e produção serve como meio de projetar os parâmetros da floresta, demonstrando uma síntese da dinâmica da floresta, sendo utilizado também como ferramenta de decisão na formulação de políticas florestais (VANCLAY, 1994). Ela permite ajudar a preencher a lacuna de conhecimento e informação na avaliação da sustentabilidade à longo prazo (PHILLIPS et al., 2004). Para isso, modelos confiáveis são necessários para a regulação e determinação da produção sustentável nas florestas nativas (VANCLAY, 1989).

Dessa forma, a modelagem pode ser realizada em diferentes escalas (modelos de povoamento, de classe de diâmetro e árvore individual). A modelagem de povoamento é baseada nos parâmetros da população, como, por exemplo, área basal e volume da população. Modelos de classe de diâmetro são bastante utilizados para prover informações da estrutura do povoamento. Enquanto que modelos de árvore individual utilizam a árvore individual como unidade básica de ajuste (VANCLAY, 1994).

Na análise do crescimento de árvores individuais, a modelagem do incremento diamétrico, mortalidade e recrutamento são fundamentais para a modelagem, simulação e projeção do crescimento e produção da floresta em longo prazo (ROSSI et al, 2007a, 2007b). Esses modelos entram em um sistemas de equações que juntas conseguem simular o crescimento e produção da floresta periodicamente. Sendo as variáveis principais dos modelos o DAP e o índice de competição, que irá definir se o modelo é dependente ou independente de distância. Índices independentes de distância tentam incluir a capacidade média de crescimento da árvore dentro de uma determinada área, enquanto os índices dependentes de distância requerem as coordenadas das árvores vizinhas para medir a influência dessas árvores no crescimento da árvore estudada (TOMÉ, BUKHART, 1989). De modo simplificado, nesse tipo de modelo entra-se com os dados do povoamento inicial e a partir de modelos de incremento diamétrico, mortalidade e recrutamento é simulado ano a ano o desenvolvimento do povoamento até alcançar o período final desejado (Figura 1.1). Incremento diamétrico é definido como o quanto a árvore acresce em valor de DAP ao final de determinado período, normalmente anual. A mortalidade é modelada como a probabilidade de sobrevivência de determinado indivíduo ao final de um período. Recrutamento é a probabilidade de certo indivíduo alcançar ou passar determinado



tamanho limite após período determinado (VANCLAY, 1994).

Figura 1.1 – Esquema simplificado representando as etapas de ajuste de um modelo de crescimento e produção a nível individual (adaptado de Vanclay (1994))

Entretanto, em florestas mistas inequiâneas, como é o caso da floresta Amazônica, a grande quantidade de espécies dificulta em um bom ajuste dos modelos devido aos diferentes hábitos de crescimento e forma de tronco. Para tentar contornar esse problema, Vanclay (1995) sugere agrupar as espécies em grupos de características similares, sendo estas não definidas por grupos botânicos, mas por grupos de hábitos de crescimento semelhantes, pois espécies do mesmo gênero podem possuir características de forma e tamanho do tronco totalmente discrepantes. Isso torna a etapa de formação dos grupos de espécies um processo chave no desenvolvimento de modelos para florestas tropicais (ALDER, SILVA, 2000).

Sendo assim, a utilização dessas técnicas podem ser de grande auxílio para os produtores florestais garantirem uma produção sustentável com melhor planejamento dos seus lucros ao longo dos anos. Estudos que utilizaram dessa técnica indicam futuros caminhos para o manejo nessas florestas. Vanclay (1989) construiu um modelo de crescimento para as árvores comerciais de uma floresta tropical na Australia auxiliando os tomadores de decisões determinando a produção sustentável de madeira e o quanto pode ser cortado. Phillips et al. (2004) ajustaram um modelo com base no SYMFLOR para criar estratégias de manejo para a floresta Amazônica brasileira. van Gardingen, Valle e Thompson (2006) sugeriram uma menor intensidade de exploração da floresta Amazônica através dos resultados obtidos com seu modelo. Valle et al. (2007) destacaram, através da calibração do SIMFLORA para uma área explorada por EIR e EC na Amazônia, a necessidade de incrementar as técnicas da EIR com o intuito de alcançar o manejo sustentável. Castro (2012) indicou, através de um modelo empírico de crescimento e produção à nível de povoamento, a necessidade de aumento do ciclo de produção almejando o manejo sustentável. Huth e Ditzer (2001) simularam o crescimento de uma floresta tropical através do FORMIX3 após exploração e indicaram um ciclo de 80 a 100 anos com a

utlização de técnicas de baixo impacto almejando um manejo sustentável.

Dessa forma, os trabalhos que estudem essa temática ainda contribuem bastante com o desenvolvimento das técnicas de exploração em florestas tropicais, tanto no Brasil quanto em outros países. Esses estudos possuem importância para estabelecer sistemas de regulação e controle de exploração que compatibilizem com o manejo sustentável das florestas, determinar possíveis distúrbios provenientes da exploração florestal e também fornecer informções essenciais para comparar o efeitos de diferentes sistemas de manejo (VANCLAY, 1995; VALLE et al., 2007).

1.3 A estatística na modelagem do crescimento e produção

A estatística é parte fundamental da biometria florestal. A partir dela é possível estimar parâmetros de modelos de interesse florestal e realizar inferências sobre eles. Em sua maioria, trabalhos de modelagem de crescimento e produção utilizam a estatística clássica, através de análises de regressão, para estimar e inferir sobre os modelos (STAGE, 1973; FINEGAN, CAMACHO, ZAMORA, 1999; GOURLET–FLEURY, HOULLIER, 2000; ALDER, SILVA, 2000; SILVA et al., 2002; PHILLIPS et al., 2004; VALLE et al., 2007). Entretanto, essa abordagem requer uma estrutura dos dados bastante engessada, no qual, os resíduos necessitam ter normalidade e variância homogênea.

Uma alternativa à estatística clássica é a inferência pelo Axioma da Verossimilhança. O Axioma da verossimilhança baseia-se no Princípio da verossimilhança e na Lei da Verossimilhança para a estimação dos parâmetros de um modelo. A Lei da verossimilhança estabelece a função de log-verossimilhança negativa no qual indica o processo de estimação dos parâmetros, enquanto que o Princípio da Verossimilhança estabelece que a comparação entre duas hipóteses pode ser realizada pela função de log-verossimilhança por ela conter toda informação que os dados podem oferecer sobre as duas hipóteses (BATISTA, 2014). Dessa forma, a estimativa dos parâmetros de um modelo estocástico serão definidos pela *Estimativa de Máxima Verossimilhança*, que considera a melhor estimativa dos parâmetros aquela que maximiza a função de verossimilhança. A função de verossimilhança é a função de densidade no qual a observação é fixa e os valores dos parâmetros são variáveis. Ela é descrita a seguir, no qual, \mathcal{L} é o valor de log-verossimilhança; $\hat{\theta}$ é o parâmetro a ser estimado; ln é o logaritmo natural; e $f(x_i)$ é a função de verossimilhança.

$$\mathcal{L}(\hat{\theta}|x) = \sum_{1}^{n} \ln\left(f(x_i)\right) \tag{1.1}$$

A seguir é demonstrado um exemplo de aplicação dessa inferência na comparação de dois tratamentos.

1.3.1 Método de comparação baseada em modelos

O método consiste na comparação de modelos ajustados a dados com dois diferentes tratamentos. Primeiramente, ajusta-se a mesma distribuição probabilística a cada um dos tratamentos separadamente e também para a união dos dois tratamentos. Dessa forma, terá dois ajustes diferentes, uma considerando os dados como diferentes, tendo um modelo de distribuição probabilística para cada tratamento, e outra considerando-os iguais, com o mesmo ajuste da distribuição para ambos. Por exemplo, para um conjunto de dados com distribuição normal, primeiramente considera um modelo no qual ambos os tratamentos possuem a mesma média e mesmo desvio padrão no ajuste com os dados agregados, enquanto que no segundo momento considera um modelo no qual os tratamentos possuem médias e desvio padrão diferentes ajustando os modelos com os dados separados. Para o ajuste dessas distribuições utiliza-se o método da máxima verossimilhança.

Para a seleção dos modelos, indicando o melhor ajuste, é utilizado o Critério de Informação de Akaike (AIC). O AIC é um estimador de distância relativa entre a realidade conceitual e o seu modelo aproximado (BURNHAM, ANDERSON, 2004). Essa distância é estimada através da função de máxima verossimilhança. Esse critério é uma importante ferramenta na seleção de modelos, indicando o modelo que mais se aproxima do modelo verdadeiro. Ele é definido pela seguinte expressão:

$$AIC = -2\mathcal{L}(\hat{\theta}|x) + 2K \tag{1.2}$$

No qual, $\hat{\theta}$ é o estimador de máxima verossimilhança do modelo, $\mathcal{L}(\hat{\theta}|x)$ é a função de logverossimilhança e K é o número de parâmetros do modelo. Esse critério é mais seletivo que a log-verossimilhança negativa, pois o AIC penaliza ela pelo número de parâmetros. Sendo assim, o modelo que obtiver o menor valor do AIC será o selecionado, pois este é o que mais se aproxima do modelo real. Por regra canônica, modelos que apresentam uma diferença do AIC menor que 2 são igualmente plausíveis.

Exemplo prático

Como exemplo desse método foi simulado 5 conjuntos de dados com distribuição normal considerando cada um deles como um tratamento diferente (Tabela 1.1). Sendo assim, foi comparado dois conjuntos com médias e desvio padrão semelhantes, dois conjuntos de dados com média semelhante e desvio padrão diferente, dois conjuntos de dados com média e desvio padrão diferentes e por fim, dois conjuntos de dados com média e desvio padrão semelhantes e número de observações diferentes. A seguir, encontra-se os 5 conjunto de dados aleatorizados:

A = {26,7; 32,4; 32,4; 29,7; 17,6; 33,1; 31,9; 18,3; 32,5; 39,8; 41,7; 24,8; 22,1; 19,1; 34,0; 24,1; 8,4; 7,7; 29,8; 30,3; 30,9; 32,6; 21,2; 37,2; 39,1; 27,2; 28,7; 35,9; 36,1; 20,7; 29,1; 34,0; 30,4; 35,9; 44,3; 41,9; 12,4; 11,7; 26,1; 46,7}

 $B = \{22,0; 32,0; 11,4; 16,7; 25,1; 27,4; 36,5; 48,2; 35,2; 39,9; 25,5; 27,5; 29,0; 28,5; 26,3; 18,6; 47,5; 24,2; 31,9; 32,1; 35,7; 48,0; 39,5; 23,6; 14,6; 35,9; 19,2; 29,9; 25,7; 14,3; 42,9; 29,7; 35,6; 23,3; 24,8; 46,7; 26,6; 24,4; 16,1; 43,4\}$

C = {29,6; 26,4; 27,1; 33,1; 30,6; 25,6; 31,5; 28,1; 30,1; 28,9; 30,0; 33,2; 31,8; 31,7; 30,2; 30,7; 30,6; 37,8; 27,5; 33,1; 29,3; 29,0; 28,7; 34,9; 24,1; 30,0; 33,5; 35,2; 33,5; 33,6; 33,4; 31,8; 32,8; 28,6; 32,2; 29,0; 32,2; 26,1; 29,6; 32,1}

 $D = \{13,2; 3,1; 15,4; 13,4; 14,8; 0,2; 18,2; 6,4; -0,4; 8,2; 1,3; 17,4; 12,5; 14,2; 8,8; 14,6; 12,2; 9,7; 16,1; 8,8; 10,6; 10,4; 9,2; 9,7; 14,2; 6,0; 7,9; 5,7; 11,7; 11,3; 5,8; 12,4; 16,2; 6,4; 7,3; 9,6; 13,4; 7,8; 7,9; 9,1\}$

 $E = \{32,7; 37,3; 22,4; 29,4; 19,9; 40,6; 36,5; 25,5; 38,2; 27,0; 35,0; 37,1; 30,1; 29,2; 20,5; 33,4; 33,0; 15,0; 42,4; 45,1; 10,1; 27,9; 43,4; 17,6; 32,6; 23,3; 23,6; 37,4; 20,6; 34,2; 42,2; 46,1; 44,5; 36,4; 32,6; 8,0; 27,3; 21,9; 15,6; 37,9; 26,8; 31,0; 22,1; 30,6; 16,6; 31,5; 12,2; 29,4; 31,6; 12,7; 44,5; 44,0; 29,7; 38,2; 9,5; 26,7; 33,9; 25,9; 8,1; 50,1; 37,2; 29,8; 44,0; 47,2; 14,6; 22,4; 21,4; 32,6; 42,9; 42,0; 31,9; 36,3; 38,6; 21,3; 26,5; 42,4; 34,9; 39,4; 46,4; 31,1; 35,1; 32,8; 29,0; 18,9; 18,5; 29,5; 27,0; 40,6; 33,9; 19,5; 41,1; 33,2; 34,8; 15,6; 37,1; 38,6; 23,6; 24,2; 24,2; 24,5; 30,3\}$

Dados	Média	Desvio Padrão	Número de observações
A	28,96	9,43	40
В	29,63	9,80	40
С	30,68	2,84	40
D	10,01	4,53	40
Е	30,39	9,81	100

Tabela 1.1 – Média, desvio padrão e número de observações dos diferentes tratamentos do conjunto de dados simulados

• Dados com média e desvio padrão semelhantes

Conjunto de dados:

A e B

Modelos de distribuição probabilística ajustados:

 MODELO A
 MODELO B
 MODELO A \cup B

 $A \sim N(28, 96; 9, 31)$ $B \sim N(29, 63; 9, 67)$ $AB \sim N(29, 30; 9, 50)$

Critério de Seleção de Akaike dos modelos ajustados: $AIC_A + AIC_B = 595, 13 (4 \text{ parâmetros})$ $AIC_{A\cup B} = 591, 29 (2 \text{ parâmetros})$

Conclusão:

O AIC indicou que o modelo que utiliza a mesma média e o mesmo desvio padrão (dados agregados) é o modelo mais plausível. Portanto, os dois conjuntos de dados são seme-lhantes.

• Dados com média semelhante e desvio padrão diferente

Conjunto de dados:

A e C

Modelos de distribuição probabilística ajustados:

modelo A	MODELO C	modelo $A \cup C$
$A \sim N(28, 96; 9, 31)$	$C \sim N(30, 68; 2, 80)$	$AC \sim N(29, 82; 6, 93)$

Critério de Seleção de Akaike dos modelos ajustados:

 $AIC_A + AIC_C = 496,04$ (4 parâmetros)

 $AIC_{A\cup C} = 540, 80$ (2 parâmetros)

Conclusão:

O AIC indicou que o modelo que utiliza um desvio padrão e uma média diferente (dados separados) para cada conjunto de dados é o mais plausível. Portanto, os dois conjunto de dados não são semelhantes.

• Dados com média e desvio padrão diferentes

Conjunto de dados:

A e D

Modelos de distribuição probabilística ajustados:

 MODELO A
 MODELO D
 MODELO A \cup D

 $A \sim N(28, 96; 9, 31)$ $D \sim N(10, 01; 4, 47)$ $AD \sim N(19, 49; 11, 56)$

Critério de Seleção de Akaike dos modelos ajustados:

 $AIC_A + AIC_D = 533, 36$ (4 parâmetros)

 $AIC_{A\cup D} = 622, 62$ (2 parâmetros)

Conclusão:

O AIC indicou que o modelo que utiliza um desvio padrão e uma média diferente (dados separados) para cada conjunto de dados é o mais plausível. Portanto, os dois conjunto de dados não são semelhantes.

Dados com média e desvio padrão semelhantes, mas número de observações diferentes

Conjunto de dados:

A e E

Modelos de distribuição probabilística ajustados:

modelo A	modelo E	modelo $A \cup E$
$A \sim N(28, 96; 9, 31)$	$E \sim N(30, 39; 9, 76)$	$AE \sim N(29, 98; 9, 66)$

Critério de Seleção de Akaike dos modelos ajustados:

 $AIC_A + AIC_E = 1039, 55$ (4 parâmetros)

 $AIC_{A\cup E} = 1036, 30$ (2 parâmetros)

Conclusão:

O AIC indicou que o modelo que utiliza a mesma média e o mesmo desvio padrão (dados agregados) é o modelo mais plausível. Portanto, os dois conjuntos de dados são seme-lhantes.

• Conclusões

O comportamento das análise seguiu os resultados esperados. Quando os valores de média e desvio eram semelhantes o AIC selecionou o modelo agregado como o modelo mais plausível indicando que os modelos eram semelhantes, e quando a média ou o desvio padrão não eram semelhantes o AIC indicou como modelo mais plausível o que ajustava cada conjunto de dados separado, o que indicava que eles não eram semelhantes. A diferença entre cada modelo fica mais fácil de se observar em um gráfico (Figura 1.2 e Figura 1.3). Essa comparação só pode ser feita para dados de mesma natureza.



Figura 1.2 – Gráfico boxplot das distribuições dos dados simulados. No qual, o eixo X representa os conjuntos de dados simulados.



Figura 1.3 - Distribuição dos dados simulados e seus respectivos modelos ajustados

1.4 Considerações

1.4.1 Área de estudo e coleta dos dados

O presente estudo foi conduzido na fazenda Agrossete (3°17'S, 47°34'W), localizada a 30 quilômetros da sede do município de Paragominas, nordeste do Pará (Figura 1.4). O clima local é classificado, segundo a classificação de Köppen-Geiger, como quente e úmido do tipo Awi, ou seja, clima tropical chuvoso com intenso período de estiagem (BASTOS et al., 2006). Possui um período de chuvas regulares (janeiro a maio) e um período mais seco (junho a novembro), com pluviosidade média de 40 mm/mês e 1700 mm/ano. Os solos da região são do grupo Latossolo Amarelo, pobres e bem profundos, com textura variando da média a muito argilosa, com relevo variando de plano à ondulado. A vegetação da área de estudo é do tipo floresta ombrófila densa (IBGE, 2011).



Figura 1.4 – Localização da área de estudo

Em 1993, três áreas de floresta foram selecionadas para a realização do experimento de comparação e acompanhamento da exploração florestal na área de estudo. A instalação e acompanhamento foi realizado pela equipe do Instituto de Meio Ambiente e Homem na Amazônia (IMAZON). Na primeira área, foi explorada 75 ha através de Exploração Convencional. Na segunda área foi explorado 105 ha através da Exploração de Impacto Reduzido. E na terceira não foi realizada a exploração para servir com área testemunha. Em cada uma dessa áreas foi alocada aleatoriamente uma parcela de 24,5 ha, no qual todos os indivíduos maiores de 25 cm de DAP foram medidos e identificada a sua espécie na área total da parcela, sendo que, os indivíduos com algum valor comercial foram medidos a partir de 10 cm de DAP. Além disso, foi instalada uma sub parcela de 5,25 ha nas três áreas descritas, onde a medição das árvores foi feita em todos os indivíduos acima de 10 cm de DAP (Figura 1.5).

A coleta de dados foi realizada primeiramente em 1993 (seis meses antes da exploração), 1994 (após a exploração), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009. Foram coletados dados de DAP, nome popular da espécie e coordenada cartesiana dentro da parcela nesses períodos de coleta de dados.

1.4.2 Hipóteses

A Exploração de Impacto Reduzido possui a premissa de diminuir o impacto causado pela colheita de madeira em comparação com a Exploração Convencional realizada na Amazônia brasileira. Além disso, suas técnicas de exploração devem permitir a total recuperação de seu volume ao final do seu ciclo de corte. Devido as diferentes técnicas de exploração, os modelos de crescimento e produção devem possuir diferente comportamento entre as explorações. As



Figura 1.5 – Esquematização das parcelas alocadas na área de estudo. A parcela (a) foi alocada nas áreas de EIR e EC. A parcela (b) foi alocada na área controle

diferenças devem aparecer nos modelos de incremento diamétrico, recrutamento e mortalidade. Com essas premissas esse trabalho possui os objetivos listados a seguir.

1.4.3 Objetivos

Geral

Este trabalho tem como objetivo criar um modelo de crescimento e produção empírico de árvore individual para a Amazônia oriental brasileira após exploração comparando a Exploração de Impacto Reduzido com a Exploração Convencional e com uma área no qual não houve exploração.

Especificos

Como objetivos específicos este trabalho possui:

- Ajuste de um modelo de incremento diamétrico, recrutamento, mortalidade;
- Determinação da diferença entre as explorações, através de modelos, quanto ao seu incremento diamétrico, recrutamento e mortalidade;
- Determinação de um índice de competição mais adequado para a situação dessa floresta;
- Demonstrar a utilização de outras técnicas de ajustes de modelos no qual o erro aleatório pode possuir outras distribuições além da distribuição normal;
- Auxílio aos tomadores de decisão da região amazônica no planejamento da exploração;
- Determinação da diferença de incremento diamétrico, recrutamento e mortalidade entre espécies divididas por diferentes grupos sucessionais.

Referências

ALDER, D.; SILVA, J. N. M. An empirical cohort model for management of terra firme forests in the brazilian amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 130, n. 1, p. 141–157, 2000.

AMARAL, P.; VERÍSSIMO A.; BARRETO, P.; VIDAL, E. **Floresta para sempre:** um manual para a produção de madeira na Amazônia. Belém: IMAZON, 1998. 130 p.

ATTA-BOATENG, J.; MOSER, J. W. A compatible growth and yield model for the management of mixed tropical rain forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, p. 311–323, 2000.

BARRETO, P.; AMARAL, P.; VIDAL, E.; UHL, C. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 108, n. 1, p. 9–26, 1998.

BASTOS, T. X.; SILVA, G.; PACHECO, N. A.; FIGUEIREDO, R. O. Informações agroclimáticas do município de Paragominas para o planejamento agrícola. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 14. **Anais...** Florianópolis: SBMET, 2006. 6 p.

BATISTA, J. L. F. **Biometria florestal segundo o axioma da verossimilhança com aplicações em mensuração florestal**. 2014. 401 p. Tese (Livre docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

BRASIL. Presidência da República. Decreto n 1.282, de 19 de outubro de 1994. Regulamenta os arts. 15, 19, 20 e 21 da lei n 4.771, de 15 de setembro de 1965, e dá outras providências.
Diário Oficial da União, Brasília, out. 1994. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/cciviln 03/decreto/1990-1994/D1282.htmi. Acesso em: 20 abr. 2014.

BRASIL. Decreto no 3.420 de 20 de abril de 2000. Dispõe sobre a criação do programa nacional de florestas - PNF, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, abr. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/cciviln 03/decreto/D3420.htmi. Acesso em: 20 abr. 2014.

BRASIL. Presidência da República. Lei no 11.284 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produço sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF altera as leis nos 10.683, de 28 de maio de 2000, 5.868, de 12 de dezembro de 1972, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, mar. 2006. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/cciviln03/nato2004-2006/2006/lei/l11284.htmi. Acesso em: 20 abr. 2014.

BRASIL. Presidência da República. Decreto no 5.975 de 30 de novembro de 2006. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 40, inciso iii, da lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 20 da lei no 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos decretos nos 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 de abril de 2000, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, nov. 2006. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/cciviln03/nAto2004-2006/2006/Decreto/D5975.htmi. Acesso em: 20 abr. 2014.

BRASIL. Resolução CONAMA n. 406 de 2 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma amazônia. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 26, p. 100, out. 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/cciviln 03/decreto/1990-1994/D1282.htmi. Acesso em: 20 abr. 2014.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: Understanding aic e bic in model selection. **Sociological Methods Research**, Beverly Hills, v. 33, n. 2, p. 261–304, 2004.

CASTRO, T. N. de. **Comparação de diferentes formas de colheita florestal na Amazônia brasileira através da modelagem da produção e do crescimento**. 2012. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CORREIA, F. W. S.; ALVALA, R. C. dos S.; MANZI, A. O. Modeling the impacts of land cover change in amazonia: a regional climate model (rcm) simulation study. **Theoretical and Applied Climatology**, Amsterdam, v. 93, p. 225–244, 2008.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in brazilian amazonia: History, rates, and consequences. **Conservation Biology**, Boston, v. 19, n. 3, p. 680–688, 2005.

FINEGAN, B.; CAMACHO, M.; ZAMORA, N. Diameter increment patterns among 106 tree species in a logged and silviculturally treated costa rican rain forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 121, n. 3, p. 159–176, 1999.

GOURLET-FLEURY, S.; HOULLIER, F. Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 131, n. 1, p. 269–289, 2000.

HOLMES, T.; BLATE, G.; ZWEEDE, J.; PEREIRA JR, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em comparação à exploração florestal convencional na Amazônia Oriental**. 2. ed. Belém. Fundação Floresta Tropical, 2002. 68 p.

HUTH, A.; DITZER, T. Long-term impacts of logging in a tropical rain forest – a simulation study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 33–51, 2001.
IBGE. **Geoestatísticas de recursos naturais da Amazônia Legal 2003**. Rio de Janeiro, 2011. Estudos e Pesquisas Informações Geográficas número 8. 247 p.

JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 89, p. 59–77, 1996.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.C; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; van GARDINGEN, P. R. An individual-based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern amazon. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 173, p. 335–354, 2004.

PRIYADI, H.; GUNARSO, P.; SIST, P.; DWIPRABOWO, H. Reduced-impact logging (ril) research and development in malinau research forest, east Kalimantan: a challenge of RIL adoption. FORESTRY, M. of (Ed.). In: ITTO-MoF Regional Workshop on RIL Implementation in Indonesia with Reference to Asia-Pacific Region: Review and Experiences. **Anais...** Bogor, 2006. 16 p.

PUTZ, F.; SIST, P.; FREDERICKSEN, T.; DYKSTRA, D. Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 7, p. 1427–1433, 2008.

ROSSI, L. M. B.; KOEHLER, H. S.; ARCE, J. E.; SANQUETTA, C. R. Modelagem de recrutamento em florestas. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, p. 453–467, 2007.

ROSSI, L. M. B.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, 2007.

SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N.; ZWEEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira. Belém, CIFOR (Ed.), 2006. 72 p.

SAYER, J.; VANCLAY, J.; BYRON, N. Technologies for sustainable forest management: challenges for the 21st century. CIFOR (Ed.). **Cifor ocasional paper**. Victoria Falls, 1997. 11 p.

SAYRE, R.; BOW, J.; JOSSE, C.; SOTOMAYOR, L.; TOUVAL, J. Terrestrial ecosystems of South America. In: North America land cover summit – a special issue of the Association of American Geographers. **Anais...** Washington, p. 131–152, 2008.

SILVA, L. N. **Exploração tradicional e planejada numa área da Amazônia Oriental: fitossociologia e diversidade de espécies arbóreas.** 2002. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

36

SILVA, R. P. D.; SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; CHAMBERS, J. Q.; NAKAMURA, S.; HIGUCHI, N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in central amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.166, n.1, p. 295–301, 2002. 72 p.

SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the eastern amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2(3), p. 199–209, 2007.

SIST, P.; SHEIL, D.; KARTAWINATA, K.; PRIYADI, H. Reduced-impact logging in Indonesian Borneo: some results confirming the need for new silvicultural prescriptions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 179, n. 1, p. 415–427, 2003.

STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. USDA Forest Service Research Paper. Ogden, 137, 1973. 40 p.

STONE, S. W. Using a geographic information system for applied policy analysis: the case of logging in the eastern amazon. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 27, n. 1, p. 43–61, 1998.

TOMÉ, M.; BURKART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, Bethesda, v. 35, n. 3, p. 816–831, set. 1989.

VALLE, D.; PHILLIPS, P; VIDAL, E.; SCHULZE, M.; GROGAN, J.; SALES, M.; van GARDINGEN, P. Adaptation of a spatially explicit individual tree-based growth and yield model and long-term comparison between reduced-impact and conventional logging in eastern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2, p. 187–198, 2007.

VANCLAY, J. K. A growth model for north Queensland rainforests. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 245–271, 1989.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield:** Applications to mixed tropical forests. CABI (Ed.), Wallingford, 1994. 329 p.

VANCLAY, J. K. Synthesis: Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods. **Forest Science**, Bethesda, v. 41, n. 1, p. 7–42, 1995.

van GARDINGEN, P. R.; VALLE, D.; THOMPSON, I. Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajós national forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 231, p. 184–195, 2006.

VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R; UHL, C. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old amazonian frontier: the case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 169–199, 1992.

38

ZARIN, D. J.; SCHULZE, M.; VIDAL, E.; LENTINI, M. Beyond reaping the first harvest: management objectives for timber production in the Brazilian Amazon. **Conservation Biology**, Boston, v. 21, n. 4, p. 916–926, 2007.

2 A UTILIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL E DISTRIBUIÇÃO GAMMA NA MODELAGEM DO ERRO ALEATÓRIO EM MODELOS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Resumo

Este trabalho tem como objetivo indicar uma alternativa à modelagem dos componentes estocásticos, através de modelos com erro aleatório com distribuição Gamma ou Weibull. Dessa forma, o resíduo de modelos com distribuição Weibull e distribuição Gamma deve possuir os seguintes parâmetros, respectivamente: $\varepsilon \sim Weibull\left(\hat{\alpha}, \frac{f(x)}{\Gamma(1/\hat{\alpha}+1)}, -f(x)\right); \varepsilon \sim Gamma\left(\hat{\alpha}, \frac{f(x)}{\hat{\alpha}}, -f(x)\right)$. Os resultados com dados de incremento diamétrico indicou que a utilização dessa alternativa melhorou o ajuste dos modelos, de acordo com o Critério de Informação de Akaike.

Palavras-chave: Distribuição probabilística; Resíduo; Biometria florestal

Abstract

This chapter has as aim to indicate an alternative to stochastic modeling through models with Weibull and Gamma random error distributions. Thus, the model residuals with Weibull and Gamma distributions should have the follow parameters: $\varepsilon \sim Weibull\left(\hat{\alpha}, \frac{f(x)}{\Gamma(1/\hat{\alpha}+1)}, -f(x)\right)$; $\varepsilon \sim Gamma\left(\hat{\alpha}, \frac{f(x)}{\hat{\alpha}}, -f(x)\right)$. The results with increment diameter data, showed the use of this alternative can improve the adjust, according to Akaike Information Criteria.

Keywords: Probabilistic distribution; Residual; Forest biometrics

2.1 Introdução

A definição de uma variável aleatória sobre a média estatística, estimada por funções, é de grande importância em estudos de fenômenos naturais, como, por exemplo, o crescimento, devido ao comportamento estocástico da natureza (STAGE, 1973).

Entretanto, para diferentes processos, como, por exemplo, crescimento de árvores individuais, a distribuição assumida para essa variação é a normal. Estudos que ajustam uma função de crescimento e produção as assume como uma distribuição Normal de média zero e variância constante estimada pela análise de regressão (STAGE, 1973; VANCLAY, 1994). E para alcançar essa pressuposição de erro com distribuição Normal e com variância homogênea, esses estudos utilizam de artifícios, como a regressão quantílica, regressão ponderada, transformação logarítmica dos dados, entre outros (STAGE, 1973; VANCLAY, 1994; FINEGAN, CAMACHO, ZAMORA, 1999; GOURLET–FLEURY, HOULLIER, 2000; ALDER, SILVA, 2000; SILVA et al., 2002; PHILLIPS et al., 2004; VALLE et al., 2007). Essa estratégia visa diminuir o erro de predição que seria encontrado com o ajuste de um modelo para todos os dados ou então com eles em sua forma original. Entretanto, dados que representam a população são "descartados", e assim, a variabilidade deles não é considerada. Modelos mais realistas e com baixo viés são necessários tendo em vista que modelos biométricos podem ser utilizados como ferramentas de tomada de decisão e para formulação de políticas florestais (VANCLAY, 1994). Assim, surge a necessidade de realização da modelagem com dados sem transformação, buscando um ajuste mais realista.

Portanto, este capítulo tem como objetivo indicar uma alternativa à modelagem dos componentes estocásticos do modelo, introduzindo um novo método através da distribuição Weibull e distribuição Gamma.

2.2 Material e Método

2.2.1 Estimação dos parâmetros

No ajuste do modelo, a variável resposta é descrita pela esperança da distribuição somado a um erro aleatório (Equação 2.1). Sendo assim, a esperança é descrita pela média em uma distribuição Normal.

$$y_i = E(y_i|x_i) + \varepsilon \tag{2.1}$$

Portanto, a variável resposta é descrita pela equação a seguir.

$$y_i = \mu + \varepsilon \tag{2.2}$$

Nesse caso o parâmetro de média irá variar conforme o modelo a ser ajustado ($\mu = g(x)$), e o parâmetro de desvio padrão será fixo caso o modelo seja homocedástico, com o erro seguindo distribuição Normal de média 0 e desvio padrão ajustado pelo modelo ($\varepsilon \sim N(0, \hat{\sigma})$).

O Método da Máxima Verossimilhança foi utilizado para a estimação dos parâmetros do modelo. Ele consiste em encontrar o valor do parâmetro que maximiza a função de logverossimilhança. A função de verossimilhança é a função de densidade no qual a observação é fixa e os valores dos parâmetros são variáveis. A função de verossimilhança é descrita a seguir, no qual, \mathcal{L} é o valor de log-verossimilhança; $\hat{\theta}$ é o parâmetro a ser estimado; ln é o logaritmo natural; e $f(x_i)$ é a função de verossimilhança.

$$\mathcal{L}(\hat{\theta}|x) = \sum_{1}^{n} \ln\left(f(x_i)\right) \tag{2.3}$$

A distribuição Normal tem sua função de densidade descrita na Equação 2.4, no qual, μ é o parâmetro de média e σ é o parâmetro de desvio padrão.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], x \in (-\infty, \infty)$$
(2.4)

Entretanto, nesse estudo foi considerado o ajuste de modelos no qual o erro aleatório obtinha distribuição Weibull e distribuição Gamma.

A função de densidade da distribuição Weibull está descrita na Equação 2.5, no qual, α é o parâmetro de forma e β é o parâmetro de escala.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^{\alpha}} x^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right], & \text{se } x \ge 0\\ 0, & \text{se } x < 0 \end{cases}$$
(2.5)

A distribuição Gamma tem sua função de densidade descrita pela Equação 2.6, no qual α é o parâmetro de forma e θ é o parâmetro de escala.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha - 1}e^{\frac{-x}{\theta}}}{\Gamma(\alpha)\theta^{\alpha}}, & \text{se } x \ge 0\\ 0, & \text{se } x < 0 \end{cases}$$
(2.6)

2.2.2 Efeito estocástico com distribuição Weibull

Para realizar a modelagem dos dados considerando uma distribuição Weibull com dois parâmetros, o parâmetro de forma (α) da distribuição é considerado fixo e o parâmetro de escala (β) varia em função de esperança da distribuição (E(X)) definida pelo modelo a ser ajustado (g(x)). Portanto, considerando que a esperança da distribuição Weibull com dois parâmetros é definida pela seguinte expressão:

$$E(X) = \beta \times \Gamma(1/\alpha + 1) \tag{2.7}$$

O parâmetro de escala estimado fica definido como:

$$\hat{\beta} = \frac{E(X)}{\Gamma(1/\hat{\alpha} + 1)} \tag{2.8}$$

Sendo a esperança (E(X)) o modelo a ser ajustado aos dados. Dessa forma, para definir o comportamento do erro aleatório, toma-se como base uma distribuição Weibull de 3 parâmetros, pois o efeito estocástico deve possuir valores positivos e negativos, tornando necessária a definição de um parâmetro de locação (θ) na distribuição. A esperança da distribuição Weibull com 3 parâmetros é demonstrada a seguir:

$$E(X) = \theta + \beta \times \Gamma(1/\alpha + 1)$$
(2.9)

A esperança do efeito estocástico em qualquer modelo deve ser sempre 0, portanto:

$$E(\varepsilon) = 0 \tag{2.10}$$

Considerando que o efeito estocástico possui distribuição Weibull de três parâmetros, sua esperança é definida como:

$$E(\varepsilon) = \theta + \beta \times \Gamma(1/\alpha + 1)$$
(2.11)

No qual, seu valor é igual a zero:

$$\theta + \beta \times \Gamma(1/\alpha + 1) = 0 \tag{2.12}$$

Dessa forma, o valor do parâmetro de locação estimado será:

$$\hat{\theta} = -\hat{\beta} \times \Gamma(1/\hat{\alpha} + 1) \tag{2.13}$$

Entretanto já se conhece o valor de $\hat{\beta}$ definido na equação 2.8.

$$\hat{\theta} = -\frac{E(X)}{\Gamma(1/\hat{\alpha}+1)} \times \Gamma(1/\hat{\alpha}+1)$$
(2.14)

Portanto, o valor do parâmetro de locação estimado é definido como:

$$\hat{\theta} = -E(X) \tag{2.15}$$

Como os valores de α e β já são conhecidos pelo ajuste do modelo, o efeito estocástico seguirá a seguinte distribuição:

$$\varepsilon \sim Weibull\left(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\theta}\right)$$
 (2.16)

Substituindo pelos valores estimados:

$$\varepsilon \sim Weibull\left(\hat{\alpha}, \frac{E(X)}{\Gamma(1/\hat{\alpha}+1)}, -E(X)\right)$$
(2.17)

Sendo que a esperança da população (E(X)) é a função ajustada g(x). Portanto:

$$\varepsilon \sim Weibull\left(\hat{\alpha}, \frac{g(x)}{\Gamma(1/\hat{\alpha}+1)}, -g(x)\right)$$
(2.18)

Sendo assim, modelos ajustados considerando uma distribuição Weibull serão sempre heterocedásticos caso a esperança da população não seja constante. Isso irá ocorrer pois a variância, que é definida pela equação 2.19, irá variar conforme os valores do parâmetros de escala e de forma. Nesse caso o primeiro varia conforme os valores de esperança da população.

$$Var(X) = \beta^2 \left\{ \Gamma \left[1 + \left(\frac{2}{\alpha}\right) \right] - \Gamma \left[1 + (1+\alpha) \right]^2 \right\}$$
(2.19)

2.2.3 Efeito estocástico com distribuição Gamma

A análise do efeito estocástico considerando uma distribuição Gamma é bem semelhante da distribuição Weibull. Considerando uma distribuição Gamma com dois parâmetros, o parâmetro de forma (α) da distribuição é considerado fixo e o parâmetro de escala (θ) varia em função

de esperança da distribuição (E(X)) definida pelo modelo a ser ajustado (g(x)). Portanto, considerando a esperança da distribuição Gamma com dois parâmetros definida pela seguinte expressão:

$$E(X) = \alpha \times \theta \tag{2.20}$$

O parâmetro de escala estimado é definido como:

$$\hat{\theta} = \frac{E(X)}{\alpha} \tag{2.21}$$

Dessa forma, para definir o comportamento do efeito estocástico, toma-se como base uma distribuição Gamma de 3 parâmetros, pois o erro deve possuir valores positivos e negativos, tornando necessária a definição de um parâmetro de locação (m) na distribuição. A esperança da distribuição Gamma com 3 parâmetros é demonstrada a seguir:

$$E(X) = m + \alpha \times \theta \tag{2.22}$$

Como a esperança do erro aleatório em qualquer modelo deve ser sempre 0 ($E(\varepsilon) = 0$), e ele com distribuição Gamma tem sua esperança definida pela equação (2.23).

$$E(\varepsilon) = m + \alpha \times \theta \tag{2.23}$$

(2.24)

O valor estimado do parâmetro de locação será definido pela seguinte expressão:

$$\hat{m} = -\hat{\alpha} \times \hat{\theta} \tag{2.25}$$

(2.26)

Entretanto já se conhece o valor de $\hat{\theta}$ definido na equação 2.21. Substituindo-o:

$$\hat{m} = -\frac{E(X)}{\hat{\alpha}} \times \hat{\alpha} \tag{2.27}$$

Portanto, o valor estimado do parâmetro de locação será a esperança da população negativa.

$$\hat{m} = -E(X) \tag{2.28}$$

Como os valores de $\hat{\theta}$ e $\hat{\alpha}$ já são conhecidos pelo ajuste do modelo, o erro seguirá a seguinte distribuição:

$$\varepsilon \sim Gamma\left(\hat{\alpha}, \hat{\theta}, \hat{m}\right)$$
 (2.29)

Substituindo pelos valores estimados:

$$\varepsilon \sim Gamma\left(\hat{\alpha}, \frac{E(X)}{\hat{\alpha}}, -E(X)\right)$$
 (2.30)

Assim como na distribuição Weibull, os modelos que seguem uma distribuição Gamma serão também sempre heterocedásticos caso a esperança da população não seja constante. Ocorre pelo mesmo princípio da distribuição Weibull, no qual o parâmetro de escala varia conforme a esperança da população, tornando o modelo heterocedástico.

Sendo assim, modelos ajustados considerando uma distribuição Gamma serão sempre heterocedásticos caso a esperança da população não seja constante. Isso irá ocorrer pois a variância, que é definida pela equação 2.31, irá variar conforme os valores do parâmetros de escala e de forma. Nesse caso o primeiro varia conforme os valores de esperança da população.

$$Var(X) = \alpha \theta^2 \tag{2.31}$$

2.2.4 Conjunto de dados utilizados

Para demonstrar as vantagens de determinar o erro aleatório com outra distribuição além da normal, foi selecionado dados de incremento diamétrico anual de árvores do grupo sucessional *Tolerantes à sombra* submetidas à Exploração de Impacto Reduzido. Esse conjunto de dados possui 357 observações. Esses dados são provenientes de uma floresta Ombrófila densa localizada no município de Paragominas - PA, conforme descrição na seção 1.4.1. Os dados de diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores com DAP acima de 10 cm foram coletados após a exploração nos anos de 1994, 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009, em uma área de 4,11 hectares. Foi optado a utilização de apenas um grupo sucessional para a estimativa dos parâmetros com objetivo de utilizar dados que possuam um comportamento semelhante, pois diferentes grupos sucessionais podem possuir taxas de incremento diamétrico discrepantes (VANCLAY, 1994).

2.2.5 Ajuste e seleção do modelo de incremento diamétrico

Primeiramente foi ajustado um modelo de incremento diamétrico anual para a mesma situação considerando a parte estocástica do modelo com distribuição Normal, Weibull e Gamma. A equação 2.32 foi a utilizada no ajuste do modelo. A escolha dessa equação foi baseada no comportamento do incremento diamétrico, que tende a diminuir ou aumentar conforme se aumenta o diâmetro (VANCLAY, 1994; SILVA et al., 2002)

$$E(\Delta d|d) = e^{\beta_0 + \beta_1 \times (1/d)} + \varepsilon$$
(2.32)

O critério de seleção dos modelos utilizados foi o Critério de Informação de Akaike (AIC), conforme descrito na seção 1.3.1.

2.3 Resultados

Após o ajuste, o AIC indicou que o modelo que considerava a parte estocástica com distribuição Weibull e com distribuição Gamma foi superior à que considerava uma distribuição Normal (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Critério de Seleção de Akaike dos modelos de incremento diamétrico ajustados

Distribuição	AIC	k	ΔAIC
Gamma	-112,9	3	0
Weibull	-112,8	3	0,1
Normal	304,4	3	417,2

Observando a dispersão dos resíduos, a distribuição Weibull e a distribuição Normal, obtiveram valores bem semelhantes, enquanto que a distribuição Gamma superestimou levemente os valores de Δd (Figura 2.1). Os perfis de log-verossimilhança apresentaram estabilidade nas estimativas dos parâmetros para a distribuição Weibull (Figura 2.2), Gamma (Figura 2.3) e Normal (Figura 2.4).

Para observar a qualidade do ajuste, foi analisada a distribuição dos erros através de um histograma dos resíduos do modelo ajustado junto com a distribuição dos erros simulados pelos parâmetros estimados dos modelos (Tabela 2.2) para cada uma das distribuições (Figura 2.5). Sendo assim, o erro simulado dos modelos com distribuição Weibull e Gamma foram semelhantes aos erros observados com o ajuste do modelo, enquanto que o erro simulado da distribuição Normal foi diferente do que o modelo ajustado encontrou.

	_
Erro aleatório	
$c \sim Normal(0:0, 3675)$	_
e ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' ' '	
$\varepsilon \sim Weibull\left(0,8597; \frac{-0.9399-5.5802(1/d)}{\Gamma(1/0.8507+1)}; -(-0.9399-5.5802(1/d))\right)$	
$\left\{\begin{array}{c} 1 & 1 & (1/0,033(\pm 1)) \\ 0 & (000, -5, 0)(41(1/1)) \\ 0 & (1/0,033(\pm 1)) \\ 0 & (1/0,0$	
$\varepsilon \sim Gamma\left(0,7901; \frac{-0.4896-5.0441(1/d)}{0.7001}; -(-0.4896-5.0441(1/d))\right)$	
(, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	

Tabela 2.2 – Parâmetros dos erro estimados para os diferentes ajustes dos modelos de incremento diamétrico

Em seguida, foram simulados dados de incremento diamétrico anual com a utilização dos modelos ajustados anteriormente, utilizando a equação 2.32 considerando o erro aleatório (ε) seguindo a 3 diferentes distribuições. Os dados simulados com a distribuição Weibull e a distribuição Gamma ficaram semelhantes aos dados observados, enquanto os dados simulados com erro com distribuição Normal obteve valores negativos (Figura 2.6), o que não ocorre

com esse tipo de conjunto de dados, pois não existe incremento diamétrico negativo em período anual em árvores, salvo raras excessões.

Por fim, foram simulados três conjuntos de dados (DAP e incremento diamétrico anual) considerando os três modelos ajustados anteriormente. Para isso, foi selecionado como distribuição do DAP uma distribuição Gamma e a partir dos parâmetros estimados dessa distribuição criouse 357 observações de DAP. A partir desses dados simulados, com os modelos ajustados calculouse o incremento diamétrico anual de cada observação, considerando o erro aleatório. A distribui– ção dos dados de incremento simulados foi colocada em um gráfico junto com a distribuição dos dados observados (Figura 2.7). Com isso, pode–se notar que a distribuição Normal diferenciouse dos dados observados, comprovando que o ajuste considerando uma distribuição Weibull ou Gamma são bem mais aplicados a esse conjunto de dados.

2.4 Conclusão

Nessa abordagem, foi demonstrado que o erro aleatório dos modelos estocásticos podem seguir outras distribuições além da distribuição normal. Neste caso, o erro aleatório do modelo seguiu claramente uma distribuição Weibull. Além de ser observado graficamente essa diferença, o AIC também indicou isso.

Na natureza existem diversos processos com diferentes comportamentos, saindo das pressuposições da estatística clássica onde os erros aleatórios devem possuir distribuição normal e homocedasticidade. Exemplos desses processos na área florestal são encontrados principalmente em dados empíricos de árvores individuais com diferentes idades e espécies. Portanto essa abordagem amplia as possibilidades de entendimento dos processos que a estatística clássica tenta explicar por meio de transformação de dados e testes estatísticos.







Figura 2.1 – Resíduo (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados assumindo o efeito estocástico com distribuição Normal, Weibull e Gamma. A linha contínua é a linha de tendência dos resíduos



Figura 2.2 – Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros do modelo com efeito estocástico com distribuição Weibull



Figura 2.3 – Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros do modelo com efeito estocástico com distribuição Gamma



Figura 2.4 – Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros do modelo com efeito estocástico com distribuição Normal



Figura 2.5 – Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados (linha contínua) e a distribuição dos resíduos simulados (linha tracejada)







Figura 2.6 – Dados simulados de incremento diamétrico anual (preto), assumindo o efeito estocástico com distribuição Normal, Weibull e Gamma, sobre os dados observado (cinza) para as três distribuições



Figura 2.7 – Distribuição dos dados simulados para as três distribuições estudadas (Normal, Weibull e Gamma) com a distribuição dos dados observados

Referências

ALDER, D.; SILVA, J. N. M. An empirical cohort model for management of terra firme forests in the brazilian amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 130, n. 1, p. 141–157, 2000.

FINEGAN, B.; CAMACHO, M.; ZAMORA, N. Diameter increment patterns among 106 tree species in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 121, n. 3, p. 159–176, 1999.

GOURLET-FLEURY, S.; HOULLIER, F. Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 131, n. 1, p. 269–289, 2000.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.C; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; van GARDINGEN, P. R. An individual-based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern amazon. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 173, p. 335–354, 2004.

ROYALL, R. The likelihood paradigm for statistical evidence. **The nature of scientific** evidence. Statistical, philosophical, and empirical considerations. University of Chicago Press, Chicago, p. 119–152, 2004.

SILVA, R. P. D.; SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; CHAMBERS, J. Q.; NAKAMURA, S.; HIGUCHI, N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in central amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 295–301, 2002. 72 p.

STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. USDA Forest Service Research Paper. Ogden, 137, 1973. 40 p.

VALLE, D.; PHILLIPS, P; VIDAL, E.; SCHULZE, M.; GROGAN, J.; SALES, M.; van GARDINGEN, P. Adaptation of a spatially explicit individual tree-based growth and yield model and long-term comparison between reduced-impact and conventional logging in eastern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2, p. 187–198, 2007.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield:** Applications to mixed tropical forests. CABI (Ed.), Wallingford, 1994. 329 p.

3 COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE COLHEITA ATRAVÉS DA MODELAGEM DO INCREMENTO DIAMÉTRICO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Resumo

A modelagem do incremento diamétrico é uma importante ferramenta na descrição do progresso de uma floresta após exploração, como também, para comparação de diferentes operações florestais. Dessa forma, esse capítulo tem como objetivo comparar a Exploração Convencional (EC) com a Exploração de Impacto Reduzido (EIR) através do ajuste de modelos empíricos de incremento diamétrico. Foram utilizados dados provenientes de inventário contínuo de uma floresta ombrófila densa localizada no município de Paragominas – PA. Três parcelas de 5,25 ha foram instaladas em uma área que foi realizada EIR, em outra com EC e uma terceira no qual nenhuma exploração foi realizada. Os dados foram coletados nos anos de 1994 (seis meses depois da exploração), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009. Modelos lineares e não lineares foram ajustados pelo método da máxima verossimilhança , considerando o incremento diamétrico função do DAP e do índice de competição. Portanto, os modelos indicaram que não existe diferença entre a Exploração de Impacto Reduzido e a Exploração Convencional quanto ao incremento diamétrico individual, menos nas espécies do grupo sucessional intermediária. Entretanto, as áreas exploradas diferem da área no qual não foi realizado exploração. Sendo que, a exploração da floresta aumenta o incremento em diâmetro dos indivíduos.

Palavras-chave: Exploração de Impacto Reduzido; Exploração Convencional; Modelos empíricos; Floresta tropical

Abstract

The increment modeling is an important tool for forest progress description after logging, as also to compare different logging systems. Thus, this chapter aims to compare the Reduced–Impact Logging with the Conventional Logging through empiric diameter increment models. Data from continuous inventory at a rainforest in Paragominas, state of Para, were utilized. Three 5.25 ha plots were installed at an area with Reduced–Impact Logging, another with Conventional Logging and a third without logging. The data was collected in 1994 (six months after logging), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 and 2009. Linear and non-linear models were fitted with maximum likelihood method, with diameter increment as a function of DBH and competition index. Then, the models have indicated do not exist a difference between both logging systems, least for the intermediate successional species group. However, the logged areas have a different behavior in relation with not logged area. Therefore, the logging increases the diameter increment of individuals.

Keywords: Reduced-Impact Logging; Conventional Logging; Empiric models; Tropical forest

3.1 Introdução

A região amazônica possui um potencial econômico para o Brasil e ao mundo devido a sua floresta. Isso faz com que a sua exploração deva ser realizada de forma que garanta o menor impacto e sua total recuperação após um período de tempo. Dessa forma, o aprimoramento das técnicas de exploração florestal é fundamental na busca pelo manejo florestal sustentável. Para isso, estudos que detalham o comportamento da floresta após a exploração são importantes para

definir novas técnicas, melhorar as existentes e assegurar a conservação desses ecossistemas (SCHAAF et al., 2005; SIST, FERREIRA, 2007; GONÇALVES, SANTOS, 2008).

A Exploração de Impacto Reduzido (EIR), técnica criada com o intuito de diminuir o impacto causado pela exploração, é relativamente recente e ainda não se conhece os impactos a longo prazo que essa operação pode ocasionar à floresta. Estudos que avaliem esses impactos e comparem com outros tipos de exploração são necessários.

Uma ferramenta de auxílio ao planejamento florestal e avaliação do manejo é a modelagem de seu crescimento e produção. Esses modelos requerem a modelagem de três componentes da floresta, o recrutamento, a mortalidade e o incremento diamétrico. Entretanto, essa modelagem ainda é bastante prejudicada pelo grande quantidade de espécies nas florestas tropicais com diferentes hábitos de crescimento e pela lacuna de experimentos de longo período de coleta de dados (VANCLAY, 1994; GOURLET–FLEURY, HOULLIER, 2000). Esse grande número de espécies nas florestas tropicais inviabiliza o ajuste de um modelo para cada árvore do povoamento. Dessa forma, o procedimento mais indicado é a agregação de indivíduos de características de crescimento semelhante em grupos com o objetivo de reduzir o número de funções a serem ajustadas (VANCLAY, 1994).

O incremento diamétrico possui um conceito simples e é relativamente fácil de mensurar a predizer (VANCLAY, 1994), o que torna uma alternativa viável ao tomador de decisão no acompanhamento do crescimento da floresta. A sua modelagem requer o conhecimento da competição sofrida pela árvore descrita através de índices de competição (CONTRERAS, AF-FLECK, CHUNG, 2011).

Sendo assim, a modelagem do incremento diamétrico pode ser utilizado na descrição do progresso de uma floresta após exploração, como também, para comparação de diferentes operações florestais. Diversos estudos utilizaram dessa ferramenta para inferir sobre o desenvolvimento da floresta (VANCLAY, 1991; ZHANG, AMATEIS, BURKHART, 1997; FINE-GAN, CAMACHO, ZAMORA, 1999; GOURLET–FLEURY, HOULLIER, 2000; SILVA et al., 2002; SCHAAF et al., 2005). Entretanto, trabalhos que utilizem a modelagem do incremento diamétrico como comparação de explorações em florestas tropicais através de modelos empíricos é praticamente inexistente.

Dessa forma, esse capítulo tem como objetivo comparar a Exploração Convencional (EC) com a EIR através do ajuste de modelos empíricos de incremento diamétrico, definindo o melhor índice de competição para essa situação e também comparando diversos tipos de distribuição probabilística associada à estocasticidade do modelo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

O presente estudo foi realizado em uma área de floresta ombrófila densa localizada no município de Paragominas – PA, conforme descrição na seção 1.4.1. O experimento foi instalado em 1993 com três diferentes tratamentos. No primeiro foi explorada uma área de 105 ha com a técnica da Exploração de Impacto Reduzido. Na segunda foi explorada uma área de 75 ha por Exploração Convencional. E na última não foi realizada nenhuma exploração para ela servir como área testemunha.

3.2.2 Amostragem

Dentro de cada uma das áreas foi locada uma parcela de 75 metros por 700 metros, totalizando 5,25 ha, no qual foi mensurado o diâmetro à altura do peito (DAP) e identificada a espécie de todas as árvores com DAP acima de 10 cm. A coleta dos dados ocorreu nos anos de 1993 (antes da exploração), 1994 (seis meses após a exploração), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009.

Na parcela de 5,25 ha, foi alocada uma parcela menor de 60 metros por 685 metros (Figura 3.1). Isso foi realizado devido a utilização de um área de influência para cálculo do índice de competição de raio de 7,5 metros para cada índivíduo. Portanto, a área de estudo em cada tratamento possui 4,11 ha. Para a modelagem do incremento diamétrico anual, cada indivíduo mensurado dentro dessa área de estudo foi considerado uma unidade amostral. Os índivíduos que se localizavam nos 1,13 ha restantes foram contabilizados apenas para o cálculo dos índices de competição.



Figura 3.1 – Tamanho e forma da parcela de estudo do incremento diamétrico. A área em cinza contém as árvores que foram utilizadas para o ajuste do modelo, enquanto que, as árvores presentes na área restante foram utilizadas apenas para cálculo dos índices de competição

3.2.3 Agrupamento dos dados

Para a divisão do indivíduos em grupos de espécies foram utilizadas duas características das árvores. A primeira foi em relação ao grupo sucessional no qual a espécie pertencia. Sendo assim, as divisões foram: espécies pioneiras, espécies demandante de luz, espécies intermediárias, espécies tolerantes à sombra, espécies emergentes e espécies não identificadas ou com grupos sucessionais não definidos (Tabela 3.1). A outra divisão foi em relação ao valor comercial da espécie. Dessa forma, as espécies foram agrupadas em duas classes: com valor comercial (agrupando espécies com alto, médio e baixo valor comercial) e nenhum valor comercial. Essas divisões foram baseadas no trabalho de Macpherson et al. (2010). A lista de espécies pertencente a cada grupo localiza-se no Apêndice A.

Tabela 3.1 – Grupos sucessionais utilizados para a separação das espécies em grupos, de acordo com Macpherson et al. (2010)

	Grupo sucessional	Descrição
A	Pioneiras	Sementes pequenas, reprodução precoce, colonização agressiva com a abertura de dossel, rápido crescimento, alta taxa de mortalidade, densidade da madeira baixa e adulta com tamanho relativamente pequeno, sendo que a maioria das espécies não atingem 100 cm de DAP
В	Demandantes de luz	Plântulas intolerantes à sombra e com capacidade de rápido crescimento sob alta luminosidade, porém com ausência de características das pioneiras clássicas, como, produção pre- coce de sementes e estatura pequena dos adultos
С	Intermediárias	Possui regeneração de plântulas no sub-bosque menos abundante que espécies tolerantes à sombra e geralmente madeira com menor densidade e maior taxa de crescimento em comparação a esse grupo
D	Tolerante à sombra	Geralmente possui sementes grandes, plântulas capazes de sobrevivência prolongada em sub bosques sombreados, madeira de alta densidade e menores taxas de crescimento
Ε	Emergentes	Madeira com densidade alta, distribuição de diâmetros al- tamente enviesada com a predominância de árvores bem velhas e grandes. Plântulas são intolerantes à sombra, porém crescem mais lentamente em comparação à pioneiras e espécies demandantes de luz
Ν	Sem grupo sucessional definido	Indivíduo em que a espécie não foi indentificada, ou não possui conhecimento sobre o seu grupo sucessional

Com isso, o número de observações em cada classe (Tratamento, grupo sucessional e valor comercial) ao longo do tempo encontra-se na Tabela 3.2. Devido ao pequeno número de observações nos grupos Sucessionais Intermediárias (C), Emergentes (E) e Sem grupo sucessional definido (N) algumas alterações na divisão dos grupos foi realizada. O grupo Intermediárias (C) não foi agrupado por valor comercial, e os grupos Emergentes (E) e Sem grupo

sucessional definido (N) não foram agrupados por valor comercial e nem por tratamento. Esse pequeno número de observações podem enviesar o ajuste dos modelos, por isso esse procedimento foi utilizado.

Grupo sucessional	Valor	EIR	EC	Controle
A	Comercial	77	74	119
	Não comercial	55	62	111
В	Comercial	254	156	231
	Não comercial	177	97	115
С	Comercial	276	178	466
	Não comercial	28	24	86
D	Comercial	124	103	194
	Não comercial	167	190	291
Е	Comercial	56	40	58
	Não comercial	2	0	0
N	Comercial	0	0	4
	Não comercial	18	27	112

Tabela 3.2 – Número de indivíduos observados em cada grupo ao longo do tempo

3.2.4 Incremento diamétrico anual

O incremento médio anual representa o quanto cada árvore aumenta em seu valor de DAP anualmente. Ele foi calculado através da equação 3.1, no qual Δd_x representa o incremento diamétrico anual em cm/ano da árvore x; d_{xi} representa o DAP de determinada árvore x no período i; d_{xj} representa o DAP da mesma árvore x no período j, sendo sempre i > j.

$$\Delta d_x = \frac{d_{xi} - d_{xj}}{i - j} \tag{3.1}$$



Figura 3.2 – Exemplo de cálculo dos índices de competição, sendo $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto *i* e a árvore competidora *j*, e o raio de 7,5 metros

3.2.5 Modelagem do incremento diamétrico anual

O incremento diamétrico anual foi modelado em função do DAP e do índice de competição de cada árvore na área de estudo ($\Delta d \sim f(d, I_C)$). As equações utilizadas encontram-se na Tabela 3.3. Modelos lineares e não lineares foram ajustados aos dados de incremento diamétrico anual. As equações foram baseada no modelo de hipérbole e exponencial. Os índices de competição utilizados (Tabela 3.2) nos modelos foram calculados para cada árvore individualmente conforme Figura 3.2, utilizando uma área de influência da competição de raio 7,5 metros. Dessa forma, os modelos de incremento diamétrico anual são dependentes de distância.

Para estimar os parâmetros dos modelos foi utilizado o Método da Máxima Verossimilhança. O método da máxima verossimilhança consiste em estimar os parâmetros do modelo utilizando as suas estimativas o qual tornam máximo o valor da função de verossimilhança. A função de verossimilhança, por sua vez, é a função de densidade no qual a observação é fixa e os parâmetros são variáveis.

A seleção e o ajuste dos modelos foi realizada baseada no Princípio da Verossimilhança. Ele implica que duas hipóteses são consideradas equivalentes se, e apenas se, elas gerarem a mesma função de verossimilhança, ou seja, todas as razões de verossimilhança serão iguais o que significa que elas possuem a mesma função de verossimilhança (ROYALL, 2004) e consequentemente são igualmente plausíveis. Para a seleção dos modelos foi utilizado o Critério de Seleção de Akaike (AIC), conforme descrição na seção 1.3.1.

Os modelos foram ajustados considerando que o efeito estocástico assumia cinco diferentes distribuições (Normal, Log-normal, Exponencial, Gamma e Weibull). Dessa forma, a esperança da distribuição utilizada é o comportamento do incremento diamétrico anual em relação ao seu

Tabela 3.3 – Equações utilizadas para descrever o comportamento do incremento diamétrico médio anual. Sendo Δd_x o incremento médio anual, em cm/ano, da árvore x; β_i os parâmetros estimados do modelo; I_{Cx} o índice de competição da árvore x; d o DAP das árvore x em cm

Número	Equação
1	$\Delta d_x = \beta_0 + \beta_1 \ln d_x$
2	$\Delta d_x = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln d_x)$
3	$\Delta d_x = \exp(\beta_0 + \beta_1(1/d_x))$
4	$\Delta d_x = \beta_0 + \beta_1 \ln d_x + \beta_2 I_{Cx}$
5	$\Delta d_x = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln d_x + \beta_2 I_{Cx})$
6	$\Delta d_x = \exp(\beta_0 + \beta_1(1/d_x) + \beta_2 I_{Cx})$

DAP $(E(X) = \Delta d)$ e os parâmetros da distribuição escolhida serão os estimadores de sua esperança.

Ou seja, para a distribuição Normal a esperança (E(X)) é igual a sua média (μ) . Portanto, os parâmetros da equação modelada serão os estimadores da média da distribuição Normal.

$$E(X) = \mu \tag{3.2}$$

$$\hat{\mu} = E(X) \tag{3.3}$$

Para a distribuição Log-normal a esperança é função da média logarítmica (μ) e da variância logarítmica (σ^2). Portanto, defini-se os parâmetros da equação ajustada e a variância logarítmica como os estimadores da média logarítmica da distribuição Log-normal.

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$
(3.4)

$$\hat{\mu} = \ln(E(X)) - \frac{\sigma^2}{2}$$
(3.5)

Na distribuição Exponencial, a esperança é função do parâmetro de taxa (λ). Sendo assim, os parâmetros da equação modelada serão os estimadores do parâmetro de taxa da distribuição Exponencial.

Tabela 3.4 – Índices de competição utilizados. Sendo, d_i o DAP da árvore objeto em cm; d_j o DAP da árvore competidora em cm; \bar{d}_g o diâmetro médio quadrático; G a área basal por hectare; n o número de indivíduos em torno da árvore objeto; $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto e a árvore competidora em metros

Índice	Equação	Fonte
I_{C1}	d_i^2/\bar{d}^2	Glover e Hool (1979)
I_{C2}	$d_i^2/{\bar{d_g}}^2$	Stage (1973)
I_{C3}	G	Área basal/ha
I_{C4}	n	Contreras, Affleck e Chung (2011)
I_{C5}	$\sum d_j/(d_i \times dist_{ij})$	Hegyi (1974)
I_{C6}	$\sum \arctan d_i/dist_{ij}$	Rouvinen e Kuuluvainen (1997)
I_{C7}	$\sum (d_j/d_i) \times e^{\frac{16 \times dist_{ij}}{d_j + d_i}}$	Martin e Ek (1984)

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \tag{3.6}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{E(X)} \tag{3.7}$$

Na distribuição Gamma, a esperança é função do parâmetro de forma (α) e do parâmetro de escala (θ). Dessa forma, os parâmetros da equação e o parâmetro de escala da distribuição serão os estimadores do parâmetro de escala da distribuição Gamma.

$$E(X) = \alpha \times \theta \tag{3.8}$$

$$\hat{\theta} = \frac{E(X)}{\alpha} \tag{3.9}$$

Na distribuição Weibull, a esperança é função dos parâmetros de forma (α) e de escala (β). Sendo assim, os parâmetros da equação de incremento diamétrico e o parâmetro de forma serão os estimadores do parâmetro de escala da distribuição Weibull.

$$E(X) = \beta \Gamma(1 + \frac{1}{\alpha}) \tag{3.10}$$

$$\hat{\beta} = \frac{E(X)}{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})} \tag{3.11}$$

Portanto, os modelos serão ajustados através do método da máxima verossimilhança, analisando se os tratamentos, grupos sucessionais e valor comercial e a combinação deles produzem efeitos sobre o incremento diamétrico anual e determinando se existe diferença entre eles. Para isso, os dados foram separados conforme os diferentes grupos que cada indivíduo estava contido (tratamento, grupo sucessional e valor comercial).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Ajuste e seleção dos modelos

Primeiramente foram ajustados modelos que não consideravam os efeitos dos tratamentos e modelos que consideravam o efeito dos tratamentos. Os modelos ajustados considerando os efeitos do tratamento foram superiores aos outros (Tabela 3.5). Além disso, os modelos que consideraram que o efeito estocástico do modelo não seguiam uma distribuição Normal foram bastante superiores, obtendo uma diferença de mais de 5.000 unidades no AIC com o melhor modelo ajustado.

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração	Weibull	4	1	-376,7	12	0,0
Exploração	Weibull	6	1	-375,2	12	1,5
Exploração	Gamma	4	1	-373,0	12	3,7
Exploração	Gamma	6	1	-370,7	12	6,0
Geral	Gamma	5	3	-258,0	4	118,7
Geral	Gamma	6	3	-257,2	4	119,5
Exploração	Exponencial	4	1	62,8	9	439,5
Exploração	Exponencial	6	1	66,9	9	443,6
Exploração	Log-normal	6	3	67,5	12	444,2
Exploração	Log-normal	6	1	72,3	12	449,0
Exploração	Normal	6	1	5149,6	12	5.526,3
Exploração	Normal	4	1	5149,7	12	5.526,4

Tabela 3.5 – Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada distribuição, confrontando o modelo geral e o modelo por exploração

Como o melhor modelo foi o que considerava o efeito dos tratamentos, ele foi comparado com o modelo que considerava o incremento diamétrico médio anual com efeito dos grupos sucessionais das espécies. Sendo assim, o AIC indicou que a adição do efeito dos grupos sucessionais em vez da adição do efeito dos tratamentos melhora o modelo em 60 unidades de AIC (Tabela 3.6). E assim como anteriormente, os modelos que consideravam o efeito

estocástico com uma distribuição normal apresentaram-se bem inferiores às outras distribuições quando utilizado o AIC.

Tabela 3.6 –	Mode	los d	le incremento	o diamétrico	selecionado	s considerando	OS	dois	melho	ores
	para	cada	distribuição,	confrontanc	lo o modelo	por exploraçã	o e	o m	odelo	por
	grupo	suce	essional							

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Grupo sucessional	Gamma	6	3	-436,7	24	0,0
Grupo sucessional	Weibull	6	3	-435,7	24	1,0
Grupo sucessional	Gamma	5	3	-433,4	24	3,3
Grupo sucessional	Weibull	5	3	-431,5	24	5,2
Exploração	Weibull	4	1	-376,7	12	60,0
Grupo sucessional	Exponencial	6	3	-32,4	18	404,3
Grupo sucessional	Exponencial	5	3	-28,2	18	408,5
Grupo sucessional	Log-normal	6	3	32,5	24	469,2
Grupo sucessional	Log-normal	5	3	40,1	24	476,8
Grupo sucessional	Normal	5	3	4930,1	24	5.366,8
Grupo sucessional	Normal	4	3	4937,6	24	5.374,3

Em seguida, foi considerado modelos que incluiam o efeito dos tratamentos e dos grupos sucessionais em seus ajustes. Esses modelos também foram superiores aos modelos que consideravam apenas os grupos sucessionais como efeito em seus ajustes (Tabela 3.7). E as distribuições Weibull e Gamma foram superiores às outras distribuições

Tabela 3.7 – Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada distribuição, confrontando o modelo por grupo sucessional e o modelo por exploração e grupo sucessional

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração e grupo sucessional	Weibull	1	-	-465,6	54	0,0
Exploração e grupo sucessional	Weibull	6	3	-461,1	72	4,5
Exploração e grupo sucessional	Gamma	1	-	-446,5	54	19,1
Exploração e grupo sucessional	Gamma	6	3	-446,2	72	19,4
Grupo sucessional	Gamma	6	3	-436,7	24	28,9
Grupo sucessional	Weibull	6	3	-435,7	24	29,9

Por fim, foi adicionado o efeito das árvores com e sem valor comercial a efeito dos tratamentos e grupos sucessionais no ajuste. Em comparação aos modelos anteriores, esse último obteve um melhor ajuste (Tabela 3.8).

Dessa forma, quanto mais específica foi a divisão das espécies em grupos, melhor foi o ajuste dos modelos aos dados. Apesar disso, não se realizou a modelagem por espécie devido a pequena quantidade de dados que seriam utilizados para o ajuste dos modelos. O que ocasionaria modelos com viés elevado que possivelmente não convergiriam.

Um último ajuste foi realizado considerando que as duas explorações (EIR e EC) possuem um mesmo comportamento para com o incremento diamétrico médio anual, mas diferente da área onde não foi realizada exploração. O modelo ajustado foi o mesmo que os dois melhores selecionados na situação anterior (modelo determinístico 1 e modelo determinístico 6

Tabela 3.8 – Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada distribuição, confrontando o modelo por exploração e grupo sucessional e o modelo por exploração, grupo sucessional e valor comercial

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	1	-	-524,0	96	0
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-511,6	132	12,5
Exploração e grupo sucessional	Weibull	1	-	-465,6	54	58,5
Exploração e grupo sucessional	Weibull	6	3	-461,1	72	62,9

com o índice de competição 3, considerando a parte estocástica do modelo com distribuição Weibull para ambos os casos). Esse ajuste foi superior aos selecionados antes, indicando que a exploração da floresta, seja qualquer uma das técnicas, muda o comportamento do incremento diamétrico anual em comparação com uma área não explorada, mas não existe diferença entre os tipos de exploração (Tabela 3.9). Foi observado também comportamento do Δd em cada grupo sucessional e valor comercial considerando as duas explorações iguais e diferentes (Tabela 3.10). Dessa forma, o tipo de exploração muda o comportamento do incremento diamétrico anual apenas no grupo sucessional das espécies Intermediárias (C) e do grupo Demandante de luz (B) com valor comercial. Nos outros grupos, as explorações não causam uma diferenciação no incremento diamétrico, indicando que não existe diferença entre a EIR e a EC. A Tabela 3.11 mostra os valores do AIC do modelo selecionado anteriormente e do modelo que considera as explorações iguais, exceto no grupo sucessional Intermediárias (C) e para as espécies comerciais do grupo sucessional Demandante de luz (B), sendo este último o melhor modelo.

Tabela 3.9 – Modelos de incremento diamétrico selecionados considerando os dois melhores para cada distribuição confrontando o modelo em que as explorações são diferentes e o modelo no qual as duas explorações (EIR e EC) possuem o mesmo comportamento

1						
Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração*, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-561,2	64	0,0
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	1	-	-524,0	96	37,1
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-511,6	132	49,6
Exploração*, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	1	-	-475,7	48	85,5
				-		

*Considerando as duas explorações (EIR e EC) com o mesmo comportamento no Δd

A exploração muda o comportamento do incremento em relação a áreas não exploradas, mas não existe diferenciação do incremento quando se compara duas formas de exploração da floresta.

Em relação aos índices de competição estudados, o que obteve melhores resultados no ajuste dos modelos foi a área basal por hectare. Ela se mostrou melhor em todas as situações ajustadas, exceto, quando foi modelado apenas pelo efeito dos tratamentos. Nesse caso, o índice de competição proposto por Glover e Hool (1979) foi que obteve o melhor ajuste.

Tabela 3.10 – Comparação do comportamento do incremento diamétrico anual por grupo sucessional considerando as explorações (EIR e EC) iguais (Agregado) e diferentes (Separado). As células em cinza indicam o modelo selecionado

Grupo	Valor	AIC			
Sucessional	Comercial	Agregado	Separado		
A	Com	102,0	106,9		
	Sem	88,6	92,4		
В	Com	2,7	-2,3		
	Sem	355,8	363,0		
С	_	237,3	222,9		
D	Com	-189,6	-190,0		
	Sem	-111,2	-105,6		

Tabela 3.11 – Modelos de incremento diamétrico selecionados confrontando o melhor modelo selecionado com a situação no qual alguns grupos de espécies possuem crescimento diferente entre as explorações (Tabela 3.10)

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC		
Exploração*, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-572,7	64	0,0		
Exploração**, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-561,2	64	11,5		

*Considerando as duas explorações (EIR e EC) com o mesmo comportamento no Δd , menos para o grupo sucessional C e para as espécies comerciais do grupo sucessional B

*Considerando as duas explorações (EIR e EC) com o mesmo comportamento no Δd

A dispersão dos resíduos dos modelos selecionados estão tendendo a zero (Figuras 3.3, 3.4, 3.6 e 3.7). Entretanto, o resíduo observado no grupo sucessional Intermediárias (Figura 3.5) não foi satisfatório, pois nas duas áreas exploradas (EIR e EC) existe uma superestimação dos valores de incremento predito conforme aumenta o seu valor. Sendo assim, optou-se por observar a dispersão dos erros nos outros modelos ajustados para essa situação. O índice de competição utilizado para esses modelo foi o número 3, pois foi o que obteve uma melhor resposta em relação aos outros na modelagem do incremento diamétrico. Com isso, para a EIR, mantevese o mesmo modelo, pois os outros apresentaram uma dispersão dos resíduos semelhantes a do modelo selecionado pelo AIC (Figura 3.8). Para a EC, o modelo 3 obteve uma melhor dispersão dos resíduos (Figura 3.9), sendo ele escolhido no lugar do modelo 6. Dessa forma, o modelo final com a troca do modelo do grupo obteve um AIC de -573, 3 unidades contra -572, 7 unidades do modelo anterior, indicando que não existe diferença entre esses modelos. Todos os modelos ajustados estão no Apêndice B.



Figura 3.3 – Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo sucessional *Pioneiras* (A) em seus respectivos tratamentos

Valores preditos (cm/ano)

Os perfis de verossimilhança indicam estabilidade na estimativa dos parâmetros (Apêndice B). Todos eles possuem formato de parábola.

Dessa forma, o modelo selecionado é o referente a equação 3.12, com os parâmetros ajustados presentes na Tabela 3.12. Os perfis de verossimilhança negativa de todos os parâmetros estimados estão no Apêndice B. Os perfis indicaram que os parâmetros tiveram suas estimativas estabilizadas.

$$\hat{\Delta d} = \exp\left(\beta_0 + \beta_1(1/d) + \beta_2 I_{C3}\right) + \varepsilon \tag{3.12}$$

Valores preditos (cm/ano)

E o erro aleatório segue uma distribuição Weibull com os parâmetros de forma (α), escala (β) e locação (θ) definidos pela Equação 3.13.

$$\varepsilon \sim \text{Weibull}\left(\hat{\alpha}, \frac{e^{\left(\hat{\beta}_{0}+\hat{\beta}_{1}(1/d)+\hat{\beta}_{2}I_{C3}\right)}}{\Gamma\left(1/\hat{\alpha}+1\right)}, -e^{\left(\hat{\beta}_{0}+\hat{\beta}_{1}(1/d)+\hat{\beta}_{2}I_{C3}\right)}\right)$$
(3.13)

Outros autores utilizaram da estatística clássica para encontrar diferença entre diferentes



Área explorada - sem valor comercial

Área controle - sem valor comercial

0.25

0.30

0.35

0.40

Valores preditos (cm/ano)

0.45

0.50

68

Figura 3.4 - Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo sucessional Demandante de luz (B) em seus respectivos tratamentos



Figura 3.5 – Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo sucessional *Intermediárias* (C) em seus respectivos tratamentos



Figura 3.6 – Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo sucessional *Tolerantes à sombra* (D) em seus respectivos tratamentos



Espécies Emergentes

Espécies sem grupo definido



Figura 3.7 – Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para os grupos sucessional *Emergentes* (E) e *Sem grupo definido* (N)



Figura 3.8 – Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo sucessional *Intermediárias* (C) para a EIR

tratamentos no incremento diamétrico. Silva et al. (2002) utilizaram uma ANOVA para determinar a diferença no incremento diamétrico entre 3 classes de diâmetro e entre três classes de relevo. Finegan, Camacho e Zamora (1999) também usou de ferramentas da estatística clássica, como análise de correlação e teste Tukey para inferir sobre o incremento diamétrico em uma floresta tropical na Costa Rica. Gourlet–Fleury e Houllier (2000) precisaram utilizar transformação logarítmica dos dados para minimizar a heterocedasticidade dos resíduos. Entretanto, o uso de uma ANOVA para análise desses dados iria trazer um viés elevado devido ao erro não seguir uma distribuição normal e ser heterocedástico, violando os pressupostos da estatística clássica.

3.3.2 Comportamento do incremento diamétrico anual (cm/ano) em cada grupo de espécies

As espécies do grupo sucessional Pioneiras (A) sem valor comercial na área controle tem um maior incremento diamétrico anual (Δd), em cm/ano, que nas áreas exploradas a partir de 35 cm de DAP aproximadamente. Antes desse valor, as áreas exploradas possuem um maior Δd que a área controle, sendo que ambas obtém um acréscimo no Δd conforme aumenta o DAP. Para as espécies com valor comercial, dentro desse grupo sucessional, nas áreas exploradas existe um acréscimo no Δd conforme aumenta o DAP diferente da área controle que apresenta um decréscimo conforme aumenta o DAP (Figura 3.10).


Figura 3.9 – Resíduos (cm/ano) dos modelos de incremento diamétrico ajustados para o grupo sucessional *Intermediárias* (C) para a EC

As áreas exploradas sem valor comercial, para o grupo sucessional Demandante de luz (B), é a que apresenta os maiores valores de Δd , aumentando conforme existe um aumento no DAP. Em contrapartida, na área controle o Δd se mantém praticamente constante conforme aumenta o DAP. Para as espécies com valor comercial, a EIR apresenta um maior Δd que a EC e a área controle. A última apresenta um Δd praticamente constante enquanto as outras apresentam um acréscimo no Δd conforme aumenta o DAP (Figura 3.11).

No grupo sucessional Intermediárias (C) a EIR obteve um maior Δd , variando de 0,2 a 0,8 cm/ano conforme aumenta o DAP. Em seguida, apareceu a EC com Δd variando de 0,2 a 0,6 cm/ano. A área controle apresentou um acréscimo muito pequeno em comparação com as outras áreas, mantendo-se praticamente constante, com Δd variando de 0,2 a 0,3 cm/ano. Em todos os casos os valores de Δd aumentam conforme aumenta o DAP (Figura 3.12).

As espécies do grupo sucessional Tolerante à sombra (D) sem valor comercial nas áreas exploradas apresentaram um acréscimo no Δd conforme aumenta o DAP, variando de 0,2 a 0,4 cm/ano aproximadamente. Enquanto que na área controle essas espécies possuem um decréscimo conforme aumenta o DAP. Para as espécies com valor comercial, as áreas exploradas possuem um maior incremento (variando de 0,1 a 0,5 cm/ano aproximadamente) em relação à área controle (0,1 a 0,3 cm/ano aproximadamente). Em ambos os casos, os valores de Δd aumentam conforme aumenta o DAP (Figura 3.13).



Figura 3.10 – Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional *Pioneiras* (A), no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)

Evelanação	Grupo	Valor	$\hat{\beta_0}$	$\hat{\beta_1}$	$\hat{eta_2}$	$\hat{\alpha}$
Exploração	Sucessional	Comercial	(S_x)	(S_x)	(S_x)	(S_x)
			-0.2295	-8.1892	-0.0112	1.2506
	٨	com	(0.2513)	(5.0847)	(0.0087)	(0.0802)
	А		0.2663	-24.5616	-0.0030	0.8743
		sem	(0.4367)	(8.7094)	(0.0199)	(0.0648)
Árao ovrlorodo	D	som	0.3812	-15.5674	-0.0068	0.8657
Alea exploitada	D	Selli	(0.2370)	(4.6859)	(0.0075)	(0.0425)
		com	-0.4879	-17.8252	-0.0045	0.7662
	Л	COIII	(0.2925)	(4.9108)	(0.0083)	(0.0405)
	D	sem	-0.8457	-6.7971	-0.0047	0.8604
		sem	(0.2272)	(4.6157)	(0.0077)	(0.0359)
	D	com	-0.0346	-15.0189	-0.0077	0.8615
EID	D	COIII	(0.2772)	(4.5159)	(0.0106)	(0.0441)
LIK	C		-0.0669	-12.6403	-0.0030	0.9727
	C	-	(0.2185)	(3.4788)	(0.0079)	(0.0450)
	В	0.0 m	-0.8400	-8.1259	-0.000064	0.8050
EC		com	(0.4080)	(6.4471)	(0.0209)	(0.0512)
EC	C*	-	-0.4285	-11.3229	_	0.7557
			(0.2198)	(4.6787)	—	(0.0427)
	А	com	-0.3984	3.9785	-0.0367	1.4554
			(0.2109)	(4.6151)	(0.0058)	(0.1103)
		sem	2.3155	-72.011	-0.0422	0.8122
			(0.5417)	(12.945)	(0.0141)	(0.0603)
		com	-1.4042	0.7129	0.0095	0.7556
	В	COIII	(0.3452)	(5.2206)	(0.0075)	(0.0395)
Controle	D	sem	-0.9488	-3.5715	0.0194	0.9408
Controle		sem	(0.4175)	(8.3336)	(0.0085)	(0.0725)
	C		-1.0720	-4.1627	0.0020	0.7272
	C	-	(0.1893)	(3.0816)	(0.0045)	(0.0242)
		com	-0.9123	-8.0924	-0.0200	0.6739
	Л	COIII	(0.3840)	(6.2997)	(0.0075)	(0.0372)
	D	sem	-1.7351	9.1202	-0.0036	0.7405
		sem	(0.2631)	(5.8067)	(0.0050)	(0.0337)
Todaa	Е		0.0315	-19.930	-0.0194	0.8214
Touas		-	(0.3097)	(5.5985)	(0.0063)	(0.0542)
Todas	N		-0.8344	-7.7587	-0.0129	0.7391
Todas	1N	-	(0.4188)	(11.0042)	(0.0068)	(0.0453)

Tabela 3.12 – Parâmetros dos modelos de incremento diamétrico selecionados e seus respectivos erro padrão (S_x)

*Nesse caso foi utilizado o modelo 3, ao invés do modelo 6 - índice 3

As espécies emergentes (E) apresentam um acréscimo do Δd conforme aumenta o DAP, começando em 0,1 e chegando perto de 0,7 cm/ano aproximadamente (Figura 3.14).

As espécies sem grupo sucessional definido (N) o Δd aumenta conforme aumenta o DAP,



Figura 3.11 – Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional *Demandante de luz* (B), no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)

variando de um pouco menos de 0,2 a um pouco mais de 0,3 cm/ano aproximadamente (Figura 3.14).

Dessa forma, entre as espécies pioneiras, as que estão contidas na área controle e não possuem valor comercial, são as que tem o maior acréscimo no incremento conforme aumenta o DAP. Dentre as espécies demandante de luz, as árvores presente na área explorada, sem valor



Figura 3.12 – Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional *Intermediárias* (C), no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)



Figura 3.13 – Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional *Tolerante à sombra* (D), no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)

comercial, são as de maior incremento conforme aumenta o DAP. Nas espécies intermediárias a EIR possui os indivíduos com maior incremento conforme aumenta o valor de DAP. O mesmo

Espécies emergentes





Espécies sem grupo definido

Figura 3.14 – Curva do incremento médio anual (Δd) para o grupo sucessional *Emergentes* (E) e *Sem grupo definido* (N), no qual, as linhas indicam diferentes valores de índice de competição (área basal)

ocorre paras as árvores da área explorada com valor comercial no grupo tolerante à sombra (Figura 3.15). Sendo assim, o maior crescimento é encontrado para o grupo Pioneiras (A) na área controle sem valor comercial. De modo geral, as espécies sem valor comercial são as que

possuem maior incremento diamétrico em todos os grupo sucessionais no qual foi modelado com divisão de valor comercial. Outro resultado esperado foi o maior incremento para as áreas exploradas em relação à área controle. Isso acontece devido ao manejo reduzir a competição e melhorar o crescimento individual das árvores.



Figura 3.15 – Comportamento do incremento médio anual (Δd) considerando os diferentes grupos sucessionais e suas respectivas explorações

Analisando o comportamento do incremento diamétrico anual em relação à competição, é observado um comportamento diferente entre os grupos de espécies. A maioria dos grupos apresenta um diminuição no valor do incremento diamétrico quando aumenta a competição (Área basal) (Figuras 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20). Esse comportamento indica que essas árvores são prejudicadas com o aumento da competição, ou seja, quanto maiores as árvores ou maior a quantidade de árvores em seu área de influência menor será o seu crescimento. Em contrapartida, outros grupos de espécies apresentaram um acréscimo do incremento diamétrico conforme foi aumentado a competição. Indicando que essas árvores estão ganhando a competição com as outras árvores. Esse comportamento só foi observado na área controle para espécies Demandante de luz (B) (Figura 3.16). Esse resultado pode ter sido encontrado devido algum erro na estimativa dos parâmetros, pois é esperado que a competição influencie negativamente ou não influencie no crescimento individual das árvores. E, por fim, em dois grupos de espécies a competição não influencia no incremento diamétrico, no grupo de espécies Demandante de luz (B) com valor comercial na EC (Figura 3.16), e no grupo Intermediárias (C) na EC e na Área controle (Figura 3.18). Em qualquer valor de área basal nesses grupos, os valores de incremento diamétrico serão o mesmo.

O comportamento do incremento diamétrico por indivíduo semelhante entre as duas explorações não indica que o comportamento do povoamento será o mesmo. Outros estudos que trabalharam com esse assunto comprovaram isso. Castro (2012) demonstrou em seu estudo na mesma área, através de um modelo de povoamento que as duas explorações possuem crescimento divergentes após a exploração. A área de EIR recuperou o volume pré–exploratório mais rapidamente em relação à EC. Valle et al. (2007) e West et al. (2014) também obteve o mesmo resultado no qual a EIR recuperou mais rapidamente seu volume em relação à EC.

O resultado encontrado de maior incremento nas árvores com maiores DAPs corrobora com o estudo de Silva et al. (2002) no qual, em uma floresta localizada na região central da Amazônia, as árvores de maior diâmetro foram as que obtiveram o maior incremento. Diferentemente do indicado por Vanclay (1994) no qual conforme aumenta o diâmetro da árvore, menor será seu incremento anual. Essa situação foi observada apenas em dois casos, no grupo de espécies pioneiras da área controle com valor comercial e no grupo de espécies tolerante à sombra da área controle com valor comercial. Schaaf et al. (2005) observaram um maior incremento diamétrico em árvores presentes em classes de diâmetro de 40 a 80 cm em seu estudo em uma Floresta Ombrófila Mista no sul do estado do Paraná.

Esses resultados demonstram que estudos que analisam o incremento diamétrico em florestas mistas é bastante importante devido ao comportamento heterogêneo das árvores dentro do povoamento.



Figura 3.16 – Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o grupo sucessional *Pioneiras* (A)

3.4 Conclusão

A área basal da área de influência da árvore demonstrou ser o melhor índice para modelar o incremento diamétrico anual, sendo superior a índices com cálculo bem mais complexo.

O comportamento do incremento médio anual em função do DAP sugere que os modelos estocásticos não possuam erro com distribuição normal. Os modelos que sugeriram uma distribuição Weibull do erro foram selecionados pelo AIC. Essa abordagem é importante na simulação do crescimento da floresta devido a distribuição do incremento em florestas tropicais possuir distribuições diferente da Normal. Além disso, essa abordagem torna-se mais realista para o entendimento dos processos da floresta e mais simples na análise de seu crescimento.

As áreas exploradas apresentaram o mesmo incremento diamétrico médio anual para as espécies encontradas no local, exceto para as espécies do grupo Intermediária e do grupo Demandante de luz com valor comercial. Demonstrando que a intervenção exploratória na floresta altera o comportamento individual do crescimento das árvores, porém isso não ocorre entre diferentes tipos de exploração, exceto para um pequeno grupo de espécies.

Entretanto, não deve se confundir o comportamento individual com o da população. Sendo que, o tipo de exploração não foi determinante no crescimento em diâmetro individual. Porém, o uso desse modelo em simuladores deve mostrar uma diferença entre o crescimento populacional na comparação das duas explorações.



Figura 3.17 – Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o grupo sucessional *Demandante de luz* (B)

Área basal (m²/ha)



Figura 3.18 – Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o grupo sucessional *Intermediárias* (C)



Figura 3.19 – Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o grupo sucessional *Tolerante à sombra* (D)



Figura 3.20 – Curva do incremento médio anual (Δd) versus índice de competição (área basal) para o grupo sucessional *Emergentes* (E) e *Sem grupo definido* (N)

Referências

CASTRO, T. N. de. **Comparação de diferentes formas de colheita florestal na Amazônia brasileira através da modelagem da produção e do crescimento**. 2012. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 262, p. 1939–1949, 2011.

FINEGAN, B.; CAMACHO, M.; ZAMORA, N. Diameter increment patterns among 106 tree species in a logged and silviculturally treated costa rican rain forest. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 121, n. 3, p. 159–176, 1999.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. Forest Science, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 275–282, 1979.

GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na floresta nacional do Tapajós, Pará. Acta Amazonica, Manaus, v. 38, n. 2, p. 229–244, 2008.

GOURLET-FLEURY, S.; HOULLIER, F. Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 131, n. 1, p. 269–289, 2000.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. **Growth models for tree and stand simulation**, Royal College of Forestry Stockholm, Estocolmo, n. 30, p. 74–90, 1974.

MACPHERSON, A. J.; SCHULZE, M.; CARTER, D. R.; VIDAL, E. A model for comparing reduced impact logging with conventional logging for an eastern amazonian forest. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 260, n. 11, p. 2002–2011, 2010.

MARTIN, G. L.; EK, A. R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, Bethesda, Society of American Foresters, v. 30, n. 3, p. 731–743, 1984.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature scots pine forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 27, n. 6, p. 890–902, 1997.

ROYALL, R. The likelihood paradigm for statistical evidence. **The nature of scientific** evidence. Statistical, philosophical, and empirical considerations. University of Chicago Press, Chicago, p. 119–152, 2004.

SCHAAF, L. B.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANQUETTA, C. R.; GALVÃO, F. Incremento diamétrico e em área basal no período 1979–2000 de espécies arbóreas de uma floresta ombrófila mista localizada no sul do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 2, 2005.

SILVA, R. P. D.; SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; CHAMBERS, J. Q.; NAKAMURA, S.; HIGUCHI, N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in central Amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 295–301, 2002. 72 p.

SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2–3, p. 199–209, 2007.

STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. USDA Forest Service Research Paper. Ogden, 137, 1973. 40 p.

VALLE, D.; PHILLIPS, P; VIDAL, E.; SCHULZE, M.; GROGAN, J.; SALES, M.; van GARDINGEN, P. Adaptation of a spatially explicit individual tree-based growth and yield model and long-term comparison between reduced-impact and conventional logging in eastern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2, p. 187–198, 2007.

VANCLAY, J. K. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 42, n. 3, p. 143–168, 1991.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield:** Applications to mixed tropical forests. CABI (Ed.), Wallingford, 1994. 329 p.

WEST, T. A. P., VIDAL, E., PUTZ, F. E. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 314, p. 59–63, 2014.

ZHANG, S.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Constraining individual tree diameter increment and survival models for loblolly pine plantations. **Forest Science**, Bethesda, Society of American Foresters, v. 43, n. 3, p. 414–423, 1997.

4 modelagem da mortalidade para comparação de métodos de colheita florestal na amazônia brasileira

Resumo

A mortalidade é um dos processos chave para a compreensão do desenvolvimento florestal, principalmente após pertubações na floresta, como, por exemplo, exploração florestal. Sendo assim, esse capítulo tem como objetivo o ajuste de um modelo de probabilidade de mortalidade para comparação entre a Exploração Convencional e a Exploração de Impacto Reduzido. Os dados foram coletados em uma floresta ombrófila densa localizada no município de Paragominas – PA. Três tratamentos foram realizados na área. O primeiro foi a Exploração de Impacto Reduzido. O segundo foi a Exploração Convencional. E a última não foi realizada exploração. Dentro de cada uma dessas áreas foi instalada aleatoriamente uma parcela de 5,25 ha, no qual todos os indivíduos com DAP maior que 10 cm foram identificados e mensurado seu DAP. A probabilidade de mortalidade foi calculada por classe de DAP. A probabilidade de sobrevivência foi ajustada em função do DAP e do índice de competição através do método da máxima verossimilhança. Os modelos indicaram que ambas explorações possuem as mesma taxas de mortalidade, mas diferem da área não explorada. Sendo que, as taxas de mortalidade apresentam valores maiores nas áreas exploradas em comparação as área não exploradas.

Palavras-chave: Sobrevivência; Floresta tropical; Exploração de Impacto Reduzido; Exploração Convencional; Biometria florestal

Abstract

The mortality is a key process to understand forest development, principally after forest disturbance, as logging. Thus, this chapter aims to fit a survival probability model to compare the Reduced–Impact Logging and the Conventional Logging. The data was collected at a rainforest in Paragominas, in the state of Para. Three treatments were accomplished at the location. The first was the Reduced–Impact Logging. The second was the Conventional Logging. The last one was kept as a control area without logging. Three 5.25 ha plots were randomly installed inside the areas. All individuals with DBH bigger than 10 cm was measured and it had identifyed the specie. The mortality probability was fitted as a function of DBH and competition index through maximum likelihood method. The models indicated both logging system has the same mortality rates, but differents from the control area. The mortality rates indicate bigger values at logged areas than not logged area.

Keywords: Survival; Tropical forest; Reduced-Impact Logging; Conventional Logging; Forest biometrics

4.1 Introdução

A compreensão dos processo de mortalidade em florestas tropicais são essenciais para o conhecimento dos sistemas naturais, possibilitando avanços no entendimento das dinâmicas florestais, além de serem indicadoras das funções dos ecossistemas (KORNING, BALSLEV, 1994; ROSSI et al., 2007). Sendo que ela pode ser causada por diversos fatores, naturais ou não, como, por exemplo, idade, competição, doenças ou pragas, corte ou abate das árvores, injúrias entre outros (SANQUETTA, CORTE, EISFELD, 2009).

Entretanto, existem algumas dificuldades para modelagem da mortalidade. Fatores como o

monitoramento a longo prazo da floresta, a grande quantidade de espécies presentes em florestas tropicais fazem dela um desafio ao pesquisador florestal (HAWKES, 2000; VANCLAY, 1991).

O entendimento desses processos dentro da floresta surge devido ao curto prazo que técnicas de diminuição de impactos exploratórios foram introduzidos no Brasil. A Exploração de Impacto Reduzido foi introduzida no território brasileiro a partir da década de 1990 como alterntiva à Exploração Convencional, que é realizada sem planejamento e com um grau mínimo de controle (HOLMES et al., 2002). Portanto, estudos que buscam comparar explorações na busca de um manejo sustentável e através da proposta de novas metodologias de colheita são importantes devido ao pouco conhecimento do impacto proveniente das explorações (SIST, FERREIRA, 2007; GONÇALVES, SANTOS, 2008).

São poucos os estudos que tentam compreender as taxas de mortalidade (KORNING, BASL-SEV, 1994; HAWKES, 2000). Lewis et al., (2004) utilizaram a taxa de mortalidade calculada em diferentes florestas pelo mundo para determinar o intervalo ótimo entre os levantamentos no cálculo da mortalidade. Para comparar duas áreas de florestas de Araucária com históricos diferentes. Sanquetta, Corte e Eisfeld (2009) determinaram as taxas de mortalidade de cada local. Lang e Knight (1983) definiram as taxas de mortalidade de uma floresta tropical por inventários realizados em um período de 10 anos. Estudos que comparam técnicas de exploração em florestas tropicais a partir da mortalidade são mais escassos. Muitos dos estudos apenas utilizam a mortalidade como um componente dos modelos de crescimento e produção e não para compreensão do impacto do processo exploratório. Huth e Ditzer (2001), Phillips et al., (2004), Valle et al. (2007) utilizaram a mortalidade como componente de modelos (FORMIX3, SYMFLOR e SIMFLORA respectivamente) para a simulação do crescimento e produção da floresta tropical após exploração.

Sendo assim, esse capítulo tem como objetivo o ajuste de um modelo de probabilidade de mortalidade para comparação entre áreas exploradas, por Exploração Convencional e Exploração de Impacto Reduzido, e áreas não exploradas.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo

A área de estudo é localizada na fazenda Agrossete a 30 km da sede do município de Paragominas – PA, conforme descrição na seção 1.4.1. A vegetação é caracterizada como floresta ombrófila densa.

O experimento foi instalado em 1993 com três diferentes tratamentos. No primeiro foi explorada uma área de 105 ha com a técnica da Exploração de Impacto Reduzido. Na segunda foi explorada uma área de 75 ha por Exploração Convencional. E na última não foi realizada nenhuma exploração para ela servir como área testemunha.

4.2.2 Amostragem

Dentro de cada uma das áreas foi instalada uma parcela de 75 metros por 700 metros, totalizando 5,25 ha, no qual foi mensurado o diâmetro à altura do peito (DAP) e identificada a espécie de todas as árvores com DAP acima de 10 cm. A coleta dos dados ocorreu nos anos de 1993 (antes da exploração), 1994 (seis meses após a exploração), 1995, 1996, 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009.

Na parcela de 5,25 ha, foi alocada uma parcela menor de 60 metros por 685 metros (Figura 4.1). Isso foi realizado devido a utilização de uma área para cálculo do índice de competição com raio de 7,5 metros para cada indivíduo. Portanto a área de estudo em cada tratamento possui 4,11 ha. Os indivíduos que se localizavam nos 1,13 ha restantes foram contabilizados apenas para o cálculo dos índices de competição.



Figura 4.1 – Tamanho e forma da parcela de estudo da mortalidade. A área em cinza contém as árvores que foram utilizadas no modelo e as árvores da área em branco foram utilizadas apenas para cálculo dos índices de competição

4.2.3 Probabilidade de mortalidade

Para a modelagem da mortalidade, foi escolhido a probabilidade de sobrevivência como variável resposta. Ela possui a vantagem, em comparação com a probabilidade de mortalidade, de ser um processo Markov, ou seja, a sobrevivência após um período de n anos é dada pela n-ésima potência da probabilidade anual de sobrevivência (VANCLAY, 1994).

Foi utilizado a função logistica $(P_s = (1 + e^{f(X)})^{-1})$ para a modelagem da probabilidade de sobrevivência, pois é uma forma de forçar a predição no intervalo (0,1) (VANCLAY, 1994). Sendo P_s a probabilidade de sobrevivência e f(X) uma função com as variáveis preditoras. As equações utilizadas encontram-se na Tabela 4.1. As equações foram baseada no modelo de hipérbole e exponencial. A probabilidade de sobrevivência foi modelada em função do DAP e do índice de competição $(P_s \sim f(d, I_C))$. Os índices de competição foram calculados individualmente para cada árvore, considerando uma área com raio de 7,5 metros em torno dela, através das equações contidas na Tabela 4.2, sendo realizado após isso, a média do índice de competição para cada classe dentro de cada período.

Tabela 4.1 – Equações utilizadas para descrever o comportamento da probabilidade de sobrevivência. Sendo P_s a probabilidade de sobrevivência; β_i os parâmetros estimados do modelo; I_C o índice de competição; d o DAP das árvores em cm

Número	Equação
1	$P_s = (1 + e^{\beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 I_C})^{-1}$
2	$P_s = (1 + e^{\beta_0 + \beta_1 (1/d) + \beta_2 I_C})^{-1}$
3	$P_s = (1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 I_C})^{-1}$

Tabela 4.2 – Índices de competição utilizados. Sendo, d_i o DAP da árvore objeto em cm; d_j o DAP da árvore competidora em cm; \bar{d}_g o diâmetro médio quadrático; G a área basal por hectare; n o número de indivíduos em torno da árvore objeto; $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto e a árvore competidora em metros

Índice	Equação	Fonte
I_{C1}	d_i^2/\bar{d}^2	Glover e Hool (1979)
I_{C2}	$d_i^2/{ar d_g}^2$	Stage (1973)
I_{C3}	G	Área basal/ha
I_{C4}	n	Contreras, Affleck e Chung (2011)
I_{C5}	$\sum d_j/(d_i \times dist_{ij})$	Hegyi (1974)
I_{C6}	$\sum \arctan d_i / dist_{ij}$	Rouvinen e Kuuluvainen (1997)
I_{C7}	$\sum (d_j/d_i) \times e^{\frac{16 \times dist_{ij}}{d_j + d_i}}$	Martin e Ek (1984)

A probabilidade de sobrevivência (P_s) foi calculada a partir da probabilidade de mortalidade $(1 - P_s)$. No qual, t é o intervalo de tempo, em anos; N_T é o número total de indivíduos na classe i dentro do tratamento j no início do período; N_M é o número de indivíduos mortos no final do período na classe i dentro do tratamento j, conforme Sheil e May (1996).

$$(1 - P_s) = \left(\frac{N_M}{N_T}\right)^{1/t} \tag{4.1}$$

Os tratamentos são as áreas de EIR, EC e a área controle, e as classes de DAP as seguintes: $10 \vdash 15; 15 \vdash 20; 20 \vdash 25; 25 \vdash 30; 30 \vdash 35; 35 \vdash 40; 40 \vdash 45; 45 \vdash 50; 50 \vdash 55; 55 \vdash 60; 60 \vdash 65; 65 \vdash 70; > 70$

Dessa forma, o número de observações (número de período \times número de classes) se encontra na Tabela 4.3. Devido ao pequeno número de observações dentro dos tratamentos, optou-se por não realizar o estudo da mortalidade por grupos sucessionais, o que ocasionaria modelos com viés elevado.

Tratamento	Número de observações
EIR	59
EC	55
Área controle	43

Tabela 4.3 – Número de observações (número de período × número de classes) em cada tratamento

4.2.4 Ajuste e seleção dos modelos

Para estimar os parâmetros dos modelos foi utilizado o Método da Máxima Verossimilhança. O método da máxima verossimilhança consiste em estimar os parâmetros do modelo utilizando as suas estimativas o qual tornam máximo o valor da função de verossimilhança. A seleção e o ajuste dos modelos foi realizada com a utilização da Inferência pelo Axioma da Verossimilhança. Ela é baseada na Lei da Verossimilhança e no Princípio da Verossimilhança (BATISTA, 2014). Ele, por sua vez, implica que duas hipóteses são consideradas equivalentes se, e apenas se, elas gerarem a mesma função de verosimilhança, ou seja, todas as razões de verossimilhança serão iguais o que significa que elas possuem a mesma função de verossimilhança (ROYALL, 2004) e consequentemente são igualmente plausíveis. O ajuste considerou os erros com distribuição Normal.

O Critério de Seleção de Akaike (AIC) foi o utilzado na seleção dos modelos, conforme Capítulo 1.

Portanto, os modelos serão testados considerando o efeito dos tratamentos, ou seja, para analisar a diferença entre as diferentes explorações quanto à mortalidade. Será ajustado também considerando o efeito do período de medição, para observar se existe mudança da taxa de mortalidade conforme mudou o período.

4.3 Resultados e Discussão

Primeiramente o efeito dos tratamentos sobre a mortalidade das árvores foi analisado através do AIC, comparando o ajuste com os dados dos tratamentos agregados e separados. Os modelos que consideravam o efeito dos tratamentos, ou seja, considerando as diferentes técnicas de colheita com taxas de mortalidade diferente, foi superior em 77 unidades do AIC em comparação ao melhor modelo que não considerava o efeito dos tratamentos (Tabela 4.4).

5 U	jerar e o modero por exproração						
	Agrupamento	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC	
	Exploração	1	6	-520,7	12	0,0	
	Exploração	1	_	-520,5	9	0,2	
	Exploração	1	4	-520,5	12	0,2	
	Exploração	1	5	-520,2	12	0,5	
	Exploração	1	1	-519,4	12	1,3	
	Geral	1	6	-443,7	4	77,0	

Tabela 4.4 – Modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados confrontando o modelo geral e o modelo por exploração

Em seguida, observou se existe diferença na mortalidade entre os diferentes períodos de coleta de dados. O AIC indicou que o agrupamento dos modelos por exploração continuava sendo superior na estimação dos parâmetros dos modelos em comparação aos modelos agrupados pelos períodos. Esses modelos foram superiores em mais de 5 unidades de AIC considerando o melhor modelo para cada situação (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados confrontando o modelo por período e por exploração

1 1	1 3				
Agrupamento	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração	1	6	-520,7	8	0,0
Exploração	1	_	-520,5	6	0,2
Exploração	1	4	-520,5	9	0,2
Exploração	1	5	-520,2	12	0,5
Exploração	1	1	-519,4	12	1,3
Período	1	4	-515,0	24	5,7
Período	1	6	-513,0	24	7,7
5					

Por fim, foi analisado se existe diferença entre as duas explorações (EIR e EC) na probabilidade de mortalidade, através do ajuste de modelos com os dados de EIR e EC agregados. Dessa forma, foi considerado que a EIR e a EC possuiam as mesmas taxas de mortalidade. O AIC indicou que não existe diferença no comportamento da probabilidade de sobrevivência entre a EIR e EC (Tabela 4.6). Portanto, a exploração da floresta tropical altera a probabilidade de determinado indivíduo morrer, mas o tipo de exploração não influencia essa alteração.

Agrupamento	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC	
Exploração*	1	_	-524,9	6	0,0	
Exploração	1	_	-520,5	9	4,3	
Exploração	1	4	-520,5	12	4,3	
Exploração	1	_	-520,2	12	4,7	
Exploração*	1	4	-381,8	8	143,0	
10 11 1						

Tabela 4.6 – Modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados

*Considerando as duas explorações (EIR e EC) agregadas.

Nesta situação, os modelos indicaram que a utilização de índices de competição não são determinantes para modelar a mortalidade, pois o melhor modelo não os utiliza como parâmetros. Modelos como o FORMIX, SYMFLORA e SIMFLOR se baseiam em modelos de mortalidade apenas em função do diâmetros das árvores (HUTH, DITZER, 2001; PHILLIPS et al., 2004; VALLE et al., 2007).

A análise dos resíduos mostrou-se satisfatória. Obteve uma dispersão constante (homocedástico) e tendendo a zero. Essa tendência foi observada tanto com os resíduos juntos (Figura 4.2) quanto com eles separados pelo modelo ajustado apenas para as áreas exploradas e para a área controle (Figura 4.3).

Sendo assim, o modelo selecionado é o que utilizou a equação 1, sem a utilização de índices de competição, considerando as explorações (EIR e EC) agregadas, com os valores dos parâmetros estimados na Tabela 4.7. Os perfis de verossimilhança indicam que existiu uma estabilização nas estimativas dos parâmetros. Todos os modelos ajustados com seus AICs e os perfis de log-verossimilhança negativa estão no apêndice C.

A probabilidade de mortalidade indica que na área controle as taxas são menores que nas áreas exploradas para indivíduos com DAP abaixo de 100 cm, a partir desse tamanho, a área que não possui exploração passa a ter uma maior mortalidade (Figura 4.4). Entretanto, não é seguro afirmar que a partir de 100 cm a área sem exploração tem uma maior mortalidade, pois trata-se de projeção do modelo. Portanto, pode ser que a partir de 60 cm os dados tenham outro comportamento (para a área controle), diferente do que o modelo sugere. Entretanto, para as Áreas exploradas, existem dados com indivíduos até 120 cm de DAP. Além disso, as áreas exploradas possuem uma maior dispersão dos dados (maior desvio padrão), indicando que a mortalidade possui valores mais dispersos em relação à média em comparação a área controle, que possui uma menor dispersão dos dados.

Portanto, a exploração da floresta tropical implica em uma mudança no comportamento da mortalidade dos indivíduos. Ela faz com que a probabilidade de morte aumente, principalmente com relação aos indivíduos com DAP menores que 60 cm.

Entretanto, após certo período de tempo as taxas de mortalidade encontradas nas áreas exploradas devem igualar as taxas presentes na área não explorada, devido ao processo de recuperação natural da floresta. Dessa forma, em um período de 15 anos de medição, nem



Figura 4.2 – Dispersão dos resíduos do modelo de probabilidade de mortalidade anual selecionado



Figura 4.3 – Dispersão dos resíduos dos modelos de probabilidade de mortalidade anual selecionados separado por tratamentos (Áreas exploradas e Área controle)

a EIR e a EC apresentaram taxas iguais a da área controle, indicando que elas ainda não estão recuperadas.

Outro ponto importante é que a igualdade entre as taxas de mortalidade das explorações não indica que as mesmas irão ter crescimento parecido. Valle et al. (2007) e Castro (2012) observaram um maior crescimento na EIR em relação a EC através da modelagem do crescimento e

Exploração	$\hat{eta_0}$	$\hat{eta_1}$	$\hat{\sigma}$
	(S_x)	(S_x)	(S_x)
Árao explorado	-2.4398	0.0121	0.0600
Area explorada	(0.1102)	(0.0022)	(0.0040)
Áras controlo	-4.6059	0.0337	0.0190
Alea collulole	(0.2981)	(0.0062)	(0.0020)

Tabela 4.7 – Parâmetros dos modelos de probabilidade de sobrevivência $(1 - P_m)$ selecionados e seus respectivos erro padrão (S_x)

produção após exploração.

O comportamento esperado em uma floresta tropical é que a distribuição de diâmetros possua uma maior concentração de indivíduos nas classes menores de DAP, diminuindo em uma taxa exponencial, conforme aumenta a classe de DAP (UMAÑA, ALENCAR, 1998). O que remete a uma menor mortalidade entre os individuos mais jovens (menor classe de DAP) e uma maior mortalidade entre os indivíduos mais velhos (maiores classes de DAP). Situação observada as duas situações (áreas exploradas e área não explorada).

Esse mesmo comportamento da mortalidade foi encontrado no trabalho de Vanclay (1991), no qual os menores diâmetros possuiam a maior probabilidade de sobrevivência.

Valle et al. (2007) utilizaram um modelo derivado do SIMFLORA, no qual, a probabilidade de mortalidade é função do DAP. A probabilidade foi calculada para duas classes de DAP e obteve como resultado que as classes maiores possuem uma maior taxa de mortalidade corroborando com os resultados obtidos nesse capítulo.

Entretanto, Phillips et al. (2004) modelaram a probabilidade de mortalidade em função do DAP como um proceso estocástico, como componente do modelo de crescimento e produção SYMFOR e obteve como resultado que as classes menores de DAP apresentaram uma maior probabilidade de mortalidade, diferindo dos resultados encontrados nesse estudo.

4.4 Conclusão

Para o calculo das taxas de mortalidade não é necessário a utilização de índices de competição tendo em vista que o modelo selecionado possui como variável preditora.

A exploração da floresta aumenta as taxas de mortalidade, principalmente, entre os indivíduos mais jovens. Porém, não existe diferenciação nas taxas de mortalidade entre as explorações.

A igualdade entre as taxas de mortalidade das duas explorações indica que é necessário um maior entendimento dos processos que ocorrem dentro da floresta, como, por exemplo, recrutamento, biodiversidade, incremento diamétrico, entre outros, na análise da exploração. A exploração de menor impacto não garante uma melhora nas taxas de mortalidade na floresta comparada com uma exploração convencional.



Áreas exploradas





Figura 4.4 – Modelos de probabilidade de mortalidade anual ajustados para cada tratamento, no qual, os pontos em cinza são os dados observados a linha central o modelo ajustado e as linhas externas são os intervalos de confiança com 95 % de probabilidade. Para a área não explorada, a linha pontilhada que continua a partir da linha contínua é uma projeção do modelo

Referências

BATISTA, J. L. F. **Biometria florestal segundo o axioma da verossimilhança com aplicações em mensuração florestal**. 2014. 401 p. Tese (Livre docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

CASTRO, T. N. de. **Comparação de diferentes formas de colheita florestal na Amazônia brasileira através da modelagem da produção e do crescimento**. 2012. 72 p. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western montana forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, p. 1939–1949, 2011.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 275–282, 1979.

GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na floresta nacional do Tapajós, Pará. Acta Amazonica, Manaus, v. 38, n. 2, p. 229–244, 2008.

HAWKES, C. Woody plant mortality algorithms: description, problems and progress. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 126, n. 2, p. 225–248, 2000.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. **Growth models for tree and stand simulation**, Royal College of Forestry Stockholm, Estocolmo, n. 30, p. 74–90, 1974.

HOLMES, T.; BLATE, G.; ZWEEDE, J.; PEREIRA JR, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em comparação à exploração florestal convencional na Amazônia Oriental**. 2. ed. Belém. Fundação Floresta Tropical, 2002. 68 p.

HUTH, A.; DITZER, T. Long-term impacts of logging in a tropical rain forest – a simulation study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 33–51, 2001.

KORNING, J.; BALSLEV, H. Growth and mortality of trees in amazonian tropical rain forest in Ecuador. **Journal of Vegetation Science**, Knivsta, v. 5, n. 1, p. 77–86, 1994.

LANG, G. E.; KNIGHT, D. H. Tree growth, mortality, recruitment, and canopy gap formation during a 10-year period in a tropical moist forest. **Ecology**, Tempe, p. 1075–1080, 1983.

LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; SHEIL, D.; VICENTI, B.; BAKER, T. R.; BROWN, S.; GRAHAM, A. W.; HIGUCHI, N.; HILBERT, D. W.; LAURANCE, W. F.; LEJOLY, J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NUÑEZ VARGAS, P.; SONKÉ, B.; SUPARDI, N.; TERBORGH, J. W.; VÁQUEZ, MARTÍNEZ, R. Tropical forest tree mortality, recruitment and turnover rates: calculation, interpretation and comparison when census intervals vary. Journal of Ecology, Oxford, v. 92, n. 6, p. 929–944, 2004.

MARTIN, G. L.; EK, A. R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, Bethesda, v. 30, n. 3, p. 731–743, 1984.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.C; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; van GARDINGEN, P. R. An individual-based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern amazon. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 173, p. 335–354, 2004.

ROSSI, L. M. B.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, 2007.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature scots pine forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 27, n. 6, p. 890–902, 1997.

ROYALL, R. The likelihood paradigm for statistical evidence. **The nature of scientific** evidence. Statistical, philosophical, and empirical considerations. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, p. 119–152, 2004.

SANQUETTA, C. R.; CÔRTE, A. P. D.; EISFELD, R. de L. Crescimento, mortalidade e recrutamento em duas florestas de araucária (Araucaria angustifolia (bert.) o. ktze.) no estado do Paraná, Brasil. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 101–112, 2009.

SHEIL, D.; MAY, R. M. Mortality and recruitment rate evaluations in heterogeneous tropical forests. **Journal of ecology**, Oxford, p. 91–100, 1996.

SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the eastern amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2(3), p. 199–209, 2007.

STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. USDA Forest Service Research Paper. Ogden, 137, 1973. 40 p.

UMA NA, C. L. A.; ALENCAR, J. C. Distribuições diamétricas da floresta tropical úmida em uma área no município de Itacoatiara – AM. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 167–190, 1998.

VALLE, D.; PHILLIPS, P; VIDAL, E.; SCHULZE, M.; GROGAN, J.; SALES, M.; van GARDINGEN, P. Adaptation of a spatially explicit individual tree-based growth and yield model and long-term comparison between reduced-impact and conventional logging in eastern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2, p. 187–198, 2007.

VANCLAY, J. K. Mortality functions for north Queensland rain forests. Journal of Tropical Forest Science, Kuala Lumpur, v. 4, n. 1, p. 15–36, 1991.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield:** Applications to mixed tropical forests. CABI (Ed.), Wallingford, 1994. 329 p.

5 COMPARAÇÃO DE DUAS EXPLORAÇÕES NA AMAZÔNIA ORIENTAL BRASILEIRA ATRAVÉS DA MODELAGEM DO RECRUTAMENTO

Resumo

A modelagem do recrutamento possui papel determinante para o acompanhamento da floresta após exploração devido à duvidas presentes nas técnicas de exploração de baixo impacto garatirem uma recuperação da floresta. Dessa forma, esse capítulo tem como objetivo comparar a exploração de impacto reduzido com a exploração convencional através da modelagem do recrutamento. Para isso, utilizou dados proveniente de um inventário contínuo em três diferentes áreas, localizadas em Paragominas – PA. A primeira área foi explorada por Exploração de Impacto Reduzido. A segunda explorada por Exploração Convencional. E na terceira não foi realizada nenhuma exploração. Os dados foram coletados nos anos de 1994 (após a exploração), 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009. A probabilidade de recrutamento foi calculada por classe de área basal em torno das árvores recrutadas. O melhor ajuste foi dos modelos que consideraram a Exploração Convencional e a Exploração de Impacto Reduzido com as mesmas taxas de recrutamento e diferentes da área controle. As áreas exploradas apresentaram uma maior taxa de recrumento em comparação a área não explorada.

Palavras-chave: Exploração de Impacto Reduzido; Exploração Convencional; Floresta tropical

Abstract

The recruitment modeling has a important role to follow the forest development after logging, due to doubts present in low impact logging techniques to ensure forest recovery. Thus, this chapter aims to compare the Reduced–Impacto Logging with Conventional Logging through recruitment modeling. For this, data from continuous inventory, localized at Paragominas, state of Para, in three differents areas were utilized. The data were collected in 1994 (after logging), 1998, 2000, 2003, 2006 and 2009. The recruitment probability were calculated by classes of basal area around the recruted tree. The best fit were from models that consider the Conventional Logging and the Reduced–Impact Logging with the same recruitment rates, but different from control area. The logging areas presented a bigger recruitment rates than not logged area.

Keywords: Reduced-Impact Logging; Conventional Logging; Tropical forest

5.1 Introdução

A exploração na Amazônia brasileira possui grande importância econômica para a região e para o Brasil (SABOGAL et al., 2006). Esse cenário torna necessária a adoção de técnicas de exploração que conciliem a produção com a conservação da diversidade da floresta, com finalidade de alcançar o manejo sustentável. Para isso, é necessário o entendimento dos impactos provenientes da exploração (CHAZDON, 1998). Dessa forma, estudos que avaliem e comparem diferentes técnicas de manejo florestal são bastante importantes (KAMMESHEIDT, KÖLHER, HUTH, 2001; PEREIRA et al., 2002; HOLMES et al., 2002; PRIYADI et al., 2006; VALLE et al, 2007; BULFE et al., 2009; CASTRO, 2012).

A Exploração de Impacto Reduzido surge como uma técnica que busca a diminuição dos impactos na floresta provenientes da exploração florestal e a recuperação de sua estrutura após

um determinado ciclo de corte. Entretanto, devido à recente implementação dessa técnica no Brasil, ainda não se pode garantir a real eficácia dessa técnica. Dessa forma, estudos que trabalhem com a temática da dinâmica da floresta após a exploração são bastante importantes no aprimoramento do manejo florestal. Sendo a mortalidade e o recrutamento um dos descritores fundamentais na descrição de povoamentos florestais (LEWIS et al., 2004).

Entretanto essa técnica de exploração é baseada em princípios silviculturais determinados em legislação como o Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) e o ciclo de corte estabelecidos por critérios satisfatórios para indústrias madeireiras, mas não considerando as exigências ecológicas de espécies presentes na floresta (CASTRO, 2012). Sendo que alguns estudos apresentam dúvidas na capacidade destas técnicas em garantir ciclos de corte sucessivos sem alteração na diversidade e da produção (SIST et al., 2003; SIST, FERREIRA, 2007; VALLE et al., 2007; CASTRO, 2012). Dessa forma, estudos que abordem o desenvolvimento da floresta após exploração é importante.

Portanto, a modelagem do recrutamento possui papel determinante para o acompanhamento da floresta após exploração. O recrutamento é definido como a quantidade de árvores que são menores a determinado tamanho no início do período de crescimento e que ao final desse período atingem o tamanho definido (VANCLAY, 1994; ROSSI et al., 2007).

Estudos que tentam compreender as taxas de recrutamento após exploração são escassos. Muitos dos estudos que utilizam da modelagem do recrutamento o fazem como parte do modelo de crescimento e produção e não como objetivo final do estudo. Valle et al. (2007) utilizaram da calibração do SIMFLORA para avaliação do manejo florestal, no qual um dos componentes do modelo era o recrutamento. Phillips et al. (2004) modelaram o recrutamento como função do crescimento médio de uma determinada área pra calibração do SYMFLOR. Vanclay (1989) fez a predição do total de árvores recrutada em uma floresta tropical australiana através de uma função linear da área basal e qualidade de sítio. Stage (1973) utilizou variáveis ambientais, distância da árvore-mãe, área basal residual e tempo após o distúrbio como variáveis de seu modelo de recrutamento para avaliar o crescimento da floresta após 10 e 20 anos de distúrbio.

Dessa forma, esse capítulo tem como objetivo comparar a exploração de impacto reduzido com a exploração convencional através da modelagem do recrutamento, definindo as taxas de recrutamento e também a diferença em relação a uma área não explorada.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se dentro do município de Paragominas – PA, conforme descrição na seção 1.4.1. A floresta estudada é classificada como floresta ombrófila densa (IBGE, 2011).

O experimento foi instalado em 1993 com três diferentes tratamentos. O primeiro deles foi explorada uma área de 105 hectares através da Exploração de Impacto Reduzido. A segunda área foi explorado 75 hectares por Exploração Convencional. E por fim, na última área,

nenhuma exploração foi realizada com o intuito de manter uma área controle.

5.2.2 Amostragem

Dentro de cada uma das áreas foi instalada uma parcela de 75 metros por 700 metros, totalizando 5,25 ha, no qual foi mensurado o diâmetro à altura do peito (DAP) e identificada a espécie de todas as árvores com DAP acima de 10 cm. A coleta dos dados de recrutamento ocorreram nos anos de 1994 (primeira coleta após exploração), 1998, 2000, 2003, 2006 e 2009.

Na parcela de 5,25 ha, foi alocada uma parcela menor de 60 metros por 685 metros (Figura 5.1). Isso foi realizado devido a utilização de um área de influência para cálculo do índice de competição de raio de 7,5 metros para cada índivíduo. Portanto a área de estudo em cada tratamento possui 4,11 ha. Os índivíduos que se localizavam nos 1,13 ha restantes foram contabilizados apenas para o cálculo dos índices de competição.



Figura 5.1 – Tamanho e forma da parcela de estudo da probabilidade de recrutamento. A área em cinza contém as árvores que foram utilizadas no modelo e a área em branco cotém as árvores que foram utilizadas apenas para cálculo dos índices de competição

5.2.3 Probabilidade de recrutamento

Recrutamento é referido a indivíduos que alcançam determinado tamanho, como, por exemplo, DAP ou altura (VANCLAY, 1994). Neste caso, o recrutamento foi considerado para todas as árvores que não estavam presentes na medição anterior e atingiram DAPs maiores de 10 cm no período seguinte. Todas as árvores recrutadas no período *i* foram divididas em classes de área basal (m²/ha) referente ao entorno do indivíduo recrutado. As classes divididas foram: $0 \vdash 5; 5 \vdash 10; 10 \vdash 15; 15 \vdash 20; 20 \vdash 25; 25 \vdash 30; 30 \vdash 35; 35 \vdash 40; 40 \vdash 45; 45 \vdash 50; \geq 50$ (m²/ha). A totalidade de árvores no período *i* também foi dividida em classes de área basal referentes ao seu entorno. Dessa forma, a probabilidade de recrutamento foi calculada pela razão entre o número de árvores recrutadas no período i dentro da classe de área basal do seu entorno k e o número total de indivíduos no período anterior dentro da mesma classe k de área basal do entorno dos indivíduos, conforme Equação 5.1. As equações foram baseada no modelo de hipérbole e exponencial.

$$P_R = \left(\frac{N_R}{N_T}\right)^{1/t} \tag{5.1}$$

Sendo, N_R o número de indivíduos que recrutou do período *i* para o período *j* na classe *k*; N_T o número de indivíduos total no período *i* dentro da classe *k*; *t* o intervalo de tempo entre o período *i* e *j* em anos.

A probabilidade de recrutamento foi modelada através da função logística ($P_R = (1 + e^{f(X)})^{-1}$), o que garante a predição no intervalo (0,1) (VANCLAY, 1994). Além disso, ela foi modelada em função da área basal (m^2 /ha) e do índice de competição ($P_R = f(G, I_C)$), todos considerados na área com raio de 7,5 m em torno da árvore objeto. Os índices de competição estudados estão na Tabela 5.2.

Cada exploração possui 49 observações, no qual representam o número de classes (11) vezes o número de períodos (5). O número de observações não chega a 55 em cada exploração devido algumas classes não apresentarem indivíduos.

Tabela 5.1 – Equações utilizadas para modelar a probabilidade de recrutamento. Sendo P a probabilidade de recrutamento; β_i os parâmetros do modelo; G_i a área basal (m^2/ha) da área de entorno do indivíduo i; e I_C o índice de competição do indivíduo i

Número	Equação
1	$P = (1 + e^{\beta_0 + \beta_1 G_i + \beta_3 I_C})^{-1}$
2	$P = (1 + e^{\beta_0 + \beta_1 (1/G_i) + \beta_3 I_C})^{-1}$
3	$P = (1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \ln(G_i) + \beta_3 I_C})^{-1}$

Para uma posterior utilização desse modelo de recrutamento em um simulador, primeiramente calcula-se a área basal da respectiva parcela. Após isso, determina-se quantos indivíduos estão presentes dentro dela e relaciona a taxa de recrutamento predita com a área basal da parcela, para então determinar quantos indivíduos irão recrutar dentro da área estabelecida.

5.2.4 Ajuste e seleção dos modelos

O Método da Máxima Verossimilhança foi o utilizado para a estimação dos parâmetros dos modelos. Ele estima os parâmetros utilizando as suas estimativas o qual tornam máximo o valor da função de verossimilhança, no qual, é definida como a função de densidade onde a

Tabela 5.2 – Índices de competição utilizados. Sendo, d_i o DAP da árvore objeto em cm; d_j o DAP da árvore competidora em cm; \bar{d}_g o diâmetro médio quadrático; G a área basal por hectare; n o número de indivíduos em torno da árvore objeto; $dist_{ij}$ a distância entre a árvore objeto e a árvore competidora em metros; n o número de indivíduos em torno da árvore objeto

Índice	Equação	Fonte
I_{C1}	$d_i^2/ar{d}^2$	Gloover e Hool (1979)
I_{C2}	$d_i^2/{ar d_g}^2$	Stage (1973)
I_{C3}	$dA{A}$	DAP médio da área de entorno
I_{C4}	n	Contreras, Affleck e Chung (2011)
I_{C5}	$\sum \frac{d_j}{(d_i imes dist_{ij})}$	Hegyi (1974)
I_{C6}	$\sum \arctan \frac{d_i}{dist_{ij}}$	Rouvinen e Kuuluvainen (1997)
I_{C7}	$\sum \left(\frac{d_j}{d_i} \times e^{\frac{16 \times dist_{ij}}{d_j + d_i}}\right)$	Martin e Ek (1984)

observação é fixa e os parâmetros são variáveis.

A seleção dos modelos foi realizada com a utilização do Princípio da Verossimilhança. Ele implica que duas hipóteses são consideradas equivalentes se, e apenas se, elas gerarem a mesma função de verosimilhança, ou seja, todas as razões de verossimilhança serão iguais o que significa que elas possuem a mesma função de verossimilhança (ROYALL, 2004). O critério de seleção utilizado foi o AIC, conforme Capítulo 1. O erro aleatório foi ajustado através de uma distribuição Normal.

O ajuste dos modelos considerou o efeito dos tratamentos, realizando o ajuste com os dados agregados e separados por técnica de colheita, definindo se as explorações influenciam no recrutamento. Foi ajustado também considerando o efeito dos períodos de medição após a colheita, determinando se as taxas de recrutamento mudam conforme tempo após a exploração. Para isso, os parâmetros dos modelos foram estimados com os dados separados por períodos e comparados com o modelo ajustado com os dados agregados.

5.3 Resultados e Discussão

Primeiramente o efeito dos tratamentos sobre o recrutamento dos indivíduos foi analisado através da comparação dos AIC dos modelos ajustados com os tratamentos agregados e separados. O melhor modelo que considera o efeito dos tratamentos foi superior em 109,5 unidades do AIC em relação ao melhor modelo com os dados agregados (sem considerar o efeito dos tratamentos). Esse resultado indica uma possível diferenciação nas taxas de recrutamento entre os tratamentos.

Em seguida, foi analisado o efeito das explorações nas taxas de recrutamento agregando os dados de EIR e EC no ajuste dos modelos. Assim, o AIC indicou que esses modelos não melhoram o ajuste, sendo que o melhor modelo por tratamento foi superior em 15,9 unidades em relação ao melhor modelo com os dados das explorações agregados. Porém, os modelos de tratamento se mostraram superior apenas com a introdução do índice de competição 7 no modelo. O ajuste com o índice de competição 3 indica que o modelo com as explorações agregadas é superior. Esse resultado mostra a importância de utilizar diferentes índices de competição para o ajuste dos modelos, pois cada um pode ter uma influência diferente na estimação dos parâmetros.

Por fim, o efeito dos períodos de medição foram analisados através do ajuste de modelos com os dados separados por periodo. O AIC indicou esses modelos superiores aos melhores modelos por tratamento em 55 unidades. Dessa forma, esse resultado indica que os períodos influenciam mais nas taxas de recrutamento do que os tratamentos (Tabela 5.3).

Após isso, a estabilidade do ajuste dos parâmetros foi analisada através dos perfis de logverossimilhança negativos. Os modelos por período mostraram uma instabilidade na estimativa dos parâmetros com um perfil desuniforme de verossimilhança, o que diminui a confiança na estimativa (Figura 5.2). Com isso, os modelos por período foram descartados devido a essa instabilidade. Um maior número de observações seria necessário para uma melhor estimação desses parâmetros.

Alguns autores optaram por fazer a modelagem do recrutamento por grupos de espécies, relacionando uma taxa de recrutamento para cada grupo (VANCLAY, 1989; PHILLIPS et al., 2004; VALLE et al., 2007). Entretanto essa divisão não foi possível devido ao pequeno número de observações em cada classe, o que ocasionaria um perfil de log-verossimilhança negativa desuniforme ou sem convergência. Um maior número de parcelas ou então um tempo maior de coleta de dados para aumentar a amostra seria necessário.

Dessa forma, foi observado os perfis de log-verossimilhança negativa dos seguintes modelos conforme indicação pelo AIC. Os modelos com o índice de competição 7 não convergiram indicando que os parâmetros estimados não possuem uma solução ótima, inviabilizando a utlização desses modelos para predizer as taxas de recrutamento. O primeiro modelo que teve um perfil satisfatório foi o modelo com os dados de exploração agregado com a equação 3 e indice de competição 3 (Figura 5.3). Na análise dos resíduos desse modelo eles apresentaram um comportamento satifatório. Apenas o resíduo do modelo da área controle apresentou uma leve superestimação dos valores preditos a partir de valores de 0.06 de taxa de recrutamento (Figura 5.4). A dispersão dos dois modelos agregados não apresenta esse problema e tende a zero (Figura 5.5).

Portanto, o modelo que utiliza a equação 3, com o índice de competição 3 e que considera

Tabela 5.3 -	- Critério de Seleção de Akaike dos modelos de probabilidade de recrutamento tes-
	tados. Agrupamento indica a separação dos dados pelo grupo indicado; Equação
	indica o número da equação utilizada; IC indica qual índice de competição foi uti-
	lizado; AIC é o valor do critério de seleção do modelo; k é o número de parâmetros
	do modelo; e ΔAIC é a diferença do AIC do modelo em relação ao melhor modelo

Agrupamento	Equação	IC	AIC	k	ΔAIC
Período	1	3	-577,3	20	0
Período	3	3	-568,9	20	8,4
Período	2	3	-542,0	20	35,3
Exploração	3	7	-522,2	12	55,0
Exploração	2	7	-510,7	12	66,6
Exploração*	1	7	-506,4	8	70,9
Exploração*	2	3	-503,5	8	73,8
Exploração*	3	3	-503,0	8	74,3
Exploração*	3	3	-502,8	8	74,5
Exploração	1	3	-502,1	12	75,2
Exploração	3	3	-500,7	12	76,6
Exploração	2	3	-500,6	12	76,7
Exploração*	1	7	-486,1	8	91,2
Exploração*	3	4	-474,3	8	103,0
Exploração*	2	6	-452,6	8	124,7
Exploração*	2	4	-452,4	8	124,9
Exploração	2	4	-449,7	12	127,6
Exploração*	3	1	-436,4	8	140,9
Exploração	3	1	-434,0	12	143,3
Exploração*	2	1	-429,7	8	147,6
Exploração	2	1	-426,9	12	150,4
Geral	2	3	-412,8	4	164,5
Geral	3	3	-412,5	4	164,8
Geral	1	3	-412,1	4	165,2
Exploração*	2	7	-399,7	8	177,6
Exploração	3	4	-378,3	12	199,0
Exploração*	3	6	-324,1	8	253,2
Exploração*	1	4	-324,1	8	253,2
Exploração*	1	1	-324,1	8	253,2
Exploração*	1	6	-324,1	8	253,2

*EIR e EC com os dados agregados

as explorações agregadas (EIR e EC) foi o modelo selecionado. Seus parâmetros estimados encontram-se na Tabela 5.4.

Dentre os índices de competição estudados os dois melhores foram o DAP médio da área de entorno da árvore objeto (Índice 3) e o proposto por Martin e Ek (1984) (Índice 7). Entretanto, esse último apresentou problema de convergência para perfilhar os parâmetros. O índice proposto por Stage (1973)(Índice 2) e o proposto por Hegyi (1974) (Índice 5) não obtiveram ajuste


Figura 5.2 – Perfil de log-verossimilhança negativa de um parâmetro sem estabilidade em sua estimativa

pelo método da máxima verossimilhança.

Os modelos indicaram que as taxas de recrutamento se mantêm praticamente constantes em relação ao valor de área basal do povoamento, ou seja, a ocupação da floresta não influencia nas taxas de recrutamento do povoamento (Figura 5.6). Comparando os valores entre as áreas exploradas e a área controle, a primeira possui taxas duas vezes maior que a segunda aproximadamente. Portanto, a exploração está duplicando as taxas de recrutamento. Isso possivelmente ocorre devido a abertura de dossel que a exploração ocasiona, aumentando as taxas de recrutamento.

Em uma floresta tropical na Austrália, Vanclay (1992) observou que locais com menor área basal obtiveram maiores taxas recrutamento, sendo que, conforme aumentava os valores de área basal, menores ficavam as probabilidades anuais de recrutamento. Esse comportamento indica que locais com menor ocupação possui uma maior taxa que locais com maior ocupação. Esse re-



Figura 5.3 – Perfis de log-verossimilhança negativa dos parâmetros estimados do modelo de probabilidade de recrutamento anual selecionado

sultado foi diferente do encontrado por esse estudo no qual a ocupação da floresta não influencia nas taxas de recrutamento. Entretanto o tamanho dos indivíduos influenciou no recrutamento, comprovado pelo índice de competição.

O índice de competição mostra-se mais influente na determinação das taxas de recrutamento. Áreas com árvores de menor tamanho apresentam as maiores taxas. Esse comportamento foi observado tanto para a área explorada como para a área controle (Figura 5.7). Locais com muitas árvores pequenas provavelmente possuem uma maior abertura no dossel que locais com árvores maiores devido ao tamanho e idade. Áreas mais abertas estão propensas a uma maior regeneração de indivíduos, principalmente pioneiros, devido a uma maior presença de luz. Esses indivíduos tendem a crescer mais rápido e em maior quantidade que outros grupos sucessionais.

Os resultados obtidos indicam que dificilmente irá ocorrer recrutamento em locais próximos a árvores grandes (distâncias de ate 7,5 metros). Em área sem exploração (área controle) a partir de 35 cm é praticamente nula a chance de uma árvore recrutar, enquanto que nas áreas exploradas locais próximos a árvores de 60 cm a chance de haver recrutamento chega a quase



Áreas exploradas

Valores preditos



Área controle

Figura 5.4 – Dispersão dos resíduos do modelo de probabilidade de recrutamento dividos por área explorada (EIR e EC agregadas) e por área controle

zero.

A igualdade nas taxas de recrutamento entre a EIR e a EC não define que ambas irão ter o mesmo desenvolvimento ao longo dos anos após a colheita. Estudos que trabalharam com



Figura 5.5 – Dispersão dos resíduos do modelo de probabilidade de recrutamento anual selecionado

a temática do crescimento da floresta após a exploração indicam isso (PHILLIPS et al., 2004; VALLE et al., 2007). Castro (2012) demonstrou com um estudo na mesma área que a EIR permite um crescimento mais rápido da floresta em relação a EC. Em um período de aproximadamente 8 anos o volume total da área igualava valores pré–exploratórios na EIR, enquanto que, para a EC, o tempo necessário foi de 53 anos.

5.4 Conclusão

O melhor índice de competição para modelar o recrutamento foi o DAP médio da área do entorno da árvore recrutada. Entretanto, uma maior base de dados, com um maior número de parcelas e/ou um maior período de medição seria necessário devido ao índice proposto por Martin e Ek (1984) não apresentar convergência nos perfis de log-verossimilhança negativa dos parâmetros.

A Exploração de Impacto Reduzido (EIR) e a Exploração Convencional (EC) possuem a mesma taxa de recrutamento após a colheita florestal. A exploração da floresta faz as taxas de recrutamento praticamente dobrar em comparação com a área não explorada. Em todos os locais as taxas de recrutamento serão maiores em lugares com árvores de menor tamanho.

Portanto, o recrutamento é influenciado pela exploração da floresta e pelo tamanho das árvores presentes nela.

Tabela 5.4 – Parâmetros dos modelos de probabilidade de recrutamento selecionados e seus respectivos erro padrão (S_x)

1 1	(20 /			
Exploração	$\hat{eta_0}$	$\hat{eta_1}$	$\hat{eta_2}$	$\hat{\sigma}$
Exploração	(S_x)	(S_x)	(S_x)	(S_x)
Áraag avrianadag	0.5133	0.0756	0.0657	0.0645
Areas exploradas	(0.3445)	(0.0905)	(0.0136)	(0.0046)
Áras controla	0.7763	0.0231	0.1023	0.0172
Area controle	(0.3159)	(0.0884)	(0.0196)	(0.0017)



Áreas exploradas

Área basal (m²/ha)

Área controle



Figura 5.6 – Curvas dos modelos de probabilidade de recrutamento ajustados por valores de área basal (m²/ha) do povoamento. As diferentes linhas indicam o valor do índice de competição 3 (DAP médio)



Áreas exploradas

DAP médio (cm)

Área controle



Figura 5.7 – Curvas dos modelos de probabilidade de recrutamento ajustados por área basal, no qual cada linha representa o DAP médio das árvores dentro a área de influência de raio 7,5 metros

Referências

BULFE, N. M. L.; GALVÃO, F.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MAC DONAGH, P. Efeitos da exploração convencional e de impacto reduzido em uma floresta estacional semidecidual na provincia de Misiones, nordeste da Argentina. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 365–379, 2009.

CASTRO, T. N. de. **Comparação de diferentes formas de colheita florestal na Amazônia brasileira através da modelagem da produção e do crescimento**.2012. 72 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CHAZDON, R. L. Tropical forests-log'em or leave'em? **Science**(Washington), v. 281, n. 5381, p. 1295–1296, 1998.

CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western montana forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, p. 1939–1949, 2011.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, Bethesda, Society of American Foresters, v. 25, n. 2, p. 275–282, 1979.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. **Growth models for tree and stand simulation**, Royal College of Forestry Stockholm, Estocolmo, n. 30, p. 74–90, 1974.

HOLMES, T.; BLATE, G.; ZWEEDE, J.; PEREIRA JR, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em comparação à exploração florestal convencional na Amazônia Oriental**. 2. ed. Belém. Fundação Floresta Tropical, 2002. 68 p.

IBGE. **Geoestatísticas de recursos naturais da Amazônia Legal 2003**. Rio de Janeiro, 2011. Estudos e Pesquisas Informações Geográficas número 8. 247 p.

KAMMESHEIDT, L.; KÖLHER, P.; HUTH, A. Sustainable timber harvesting in Venezuela: a modelling approach. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 38, n. 4, p. 756–770, 2001.

LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; SHEIL, D.; VICENTI, B.; BAKER, T. R.; BROWN, S.; GRAHAM, A. W.; HIGUCHI, N.; HILBERT, D. W.; LAURANCE, W. F.; LEJOLY, J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NUÑEZ VARGAS, P.; SONKÉ, B.; SUPARDI, N.; TERBORGH, J. W.; VÁQUEZ, MARTÍNEZ, R. Tropical forest tree mortality, recruitment and turnover rates: calculation, interpretation and comparison when census intervals vary. Journal of Ecology, Oxford, v. 92, n. 6, p. 929–944, 2004.

MARTIN, G. L.; EK, A. R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, Bethesda, Society of American Foresters, v. 30, n. 3, p. 731–743, 1984.

116

PEREIRA, R.; ZWEEDE, J.; ASNER, G. P.; KELLER, M. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 168, n. 1, p. 77–89, 2002.

PHILLIPS, P. D.; AZEVEDO, C. P.C; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; van GARDINGEN, P. R. An individual-based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern amazon. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 173, p. 335–354, 2004.

PRIYADI, H.; GUNARSO, P.; SIST, P.; DWIPRABOWO, H. Reduced-impact logging (ril) research and development in malinau research forest, east Kalimantan: a challenge of RIL adoption. FORESTRY, M. of (Ed.). In: ITTO-MoF Regional Workshop on RIL Implementation in Indonesia with Reference to Asia-Pacific Region: Review and Experiences. **Anais...** Bogor, 2006. 16 p.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature scots pine forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 27, n. 6, p. 890–902, 1997.

ROYALL, R. The likelihood paradigm for statistical evidence. **The nature of scientific** evidence. Statistical, philosophical, and empirical considerations. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, p. 119–152, 2004.

SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N.; ZWEEDE, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira**. Belém, CIFOR (Ed.), 2006. 72 p.

SIST, P.; SHEIL, D.; KARTAWINATA, K.; PRIYADI, H. Reduced-impact logging in Indonesian Borneo: some results confirming the need for new silvicultural prescriptions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 179, n. 1, p. 415–427, 2003.

SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the eastern amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2(3), p. 199–209, 2007.

STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. **USDA Forest Service Research Paper**. Ogden, 137, 1973. 40 p.

VALLE, D.; PHILLIPS, P; VIDAL, E.; SCHULZE, M.; GROGAN, J.; SALES, M.; van GARDINGEN, P. Adaptation of a spatially explicit individual tree-based growth and yield model and long-term comparison between reduced-impact and conventional logging in eastern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 2, p. 187–198, 2007.

VANCLAY, J. K. A growth model for north Queensland rainforests. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 245–271, 1989.

VANCLAY, J. K. Modelling regeneration and recruitment in a tropical rain forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 22, p. 1235–1248, 1992.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield:** Applications to mixed tropical forests. CABI (Ed.), Wallingford, 1994. 329 p.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de outras distribuições para modelar o efeito estocástico dos modelos foi satisfatória, tendo em vista que, para os modelos de árvores individuais em incremento diamétrico, a distribuição Normal foi a que apresentou os piores valores de AIC.

O comportamento individual das árvores para todos os processos estudados, incremento diamétrico, mortalidade e recrutamento, indica que a exploração da floresta altera o desenvolvimento individual das árvores. Entretanto, o comportamento individual não pode ser confundido com o comportamento do povoamento. O crescimento total da população depende de fatores como a densidade de indivíduos, a ocupação deles no espaço e também o quanto perturbada foi a floresta com a exploração, como observado em outros estudos.

Dos sete índices de competição analisados, não foi encontrado um índice que fosse melhor para todas as situações específicas. Em cada estudo, um índice diferente foi selecionado. Para o modelo de incremento diamétrico, a área basal foi o melhor índice encontrado. O modelo de probabilidade de mortalidade obteve um melhor ajuste sem a utilização de um índice de competição. A probabilidade de recrutamento obteve um melhor ajuste com a utilização do DAP médio encontrado na área de entorno do índividuo recrutado.

Para a utilização desses modelos na simulação do crescimento e produção, deve-se considerar que todos os indivíduos, independentemente de qual grupo de espécie eles pertençam, irão possuir as mesmas taxas de mortalidade e recrutamento, dentro de seu tratamento, desde que possuam o mesmo valor de DAP (mortalidade) ou área basal em sua parcela (recrutamento). Isso acontece devido aos modelos ajustados serem separados apenas por exploração. Um maior conjunto de dados, através de um maior período de observação, é preciso para desenvolver o modelo por grupo sucessional e valor comercial. Entretanto, para a simulação do incremento diamétrico existe um modelo para cada grupo sucessional de espécies.

Portanto, esses modelos serão de grande importância para pesquisadores e tomadores de decisão da região amazônica na projeção do crescimento da floresta após exploração e regulação da produção na busca de um manejo sustentável. Principalmente, compreendendo em qual processo o seu manejo influencia na recuperação da floresta.

APÊNDICES

•

APÊNDICE A

Grupo sucessional	Espécies
Pioneiras	Apeiba albiflora Sprague, Apeiba burchelli Sprague, Apeiba echinata
	Gaertn., Apeiba sp, Bagassa guianensis Aublet, Bellucia grossulari-
	oides (L.) Triana., Bixa arborea, Cecropia destaque, Cecropia, obtusa,
	Cecropia sciadophylla Mart., Croton matourensis Aubl., Eugenia het-
	erochroma Diels, Jacaranda copaia (Aublet), D. Don, Jacaratia es-
	pinosa, Laetia procera (P. et E.) Eichl., Pouroma guianensis ssp. Guia-
	nensis, Pourouma minor, Raputia paraensis Ducke, Scheffera moroto-
	toni (Aubl.) Maguire, Shichozolobium amazonicum (Huber) ex. Ducke,
	<i>Sloanea, obtusa</i> Split., <i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy, <i>Zanthoxylum</i>
Demondonte de luz	rholfolia Lam.
Demandante de luz	Abdrema matarbifolia (Sandw), Allophylus robustus Radik, Anac-
	araium spruceanum Engl., Balizia, pedicellaris (DC.), , Bombax
	Casegria arborea (Pich) Urb. Cordia bicolor D.C. Cordia poeldiana
	Huber Cordia sagoti I. M. Johnston Cordia scabrida Mart Enterolo-
	hium maximum Eriotheca globosa (Aubl. Robyns) Eriotheca longi-
	<i>pedicellata</i> (Ducke) A. Robyns <i>Inga acreana</i> Harus <i>Inga alba</i> (SW)
	Willd., Inga capitata Desv., Inga cylindrica Mart, Inga dumosa Bth.
	Inga edulis Mart, Inga eplendens Willd., Inga falcistipula Ducke, Inga
	gracilifolia Ducke, Inga ingoides, Inga melinones Sagot, Inga thibal-
	diana DC., Macrolobium campestre Huber, Parkia decusata Ducke,
	Parkia gigantocarpa Ducke, Parkia multijuga Benth., Parkia nitida
	Miq., Simaruba amara Aublet, Sterculia speciosa Schum, Stryphnoden-
	dron palystachium, Tachigalia alba Ducke, Tapirira guianensis Aubl.,
	Terminalia guianensis Eichl., Trattinikia burseraefolia Mart
Intermediárias	Aioea densiflora Nees, Aiouea sp, Aniba williamsii O. C. Smidt, An-
	nona sp, Astronium lecointei Ducke, Auxemma oncocalyx (F. Allem)
	Taub., Brosimum amplicoma Ducke, Brosimum obovata L., Calophyl-
	lum brasiliense Camb., Carapa guianensis Aubl., Clarisa racemosa
	Ruiz e Pav., <i>Clarisia ilicifolia</i> (Spreng.) Lanj. & Grimes, <i>Copaifera</i>
	<i>duckei</i> Dwyer, <i>Couepia bracteosa</i> Bentn., <i>Dialium guianesis</i> (Aublet.)
	Sandwith, Eldeoluma glabrescens (Mart & Endi) Aubr Pelleg, Endo-
	Himatanthus sugurba (Spruce) Woodson Lagunaria crenata (Tul.)
	C Smith Licaria rigida Kosterm Luchea speciosa Willd Moronobea
	coccinea Aubl Nectandra cuspidata Nees Nectandra grandis Mez
	Nectandra pichurim Mez., Neoxythece robusta (M & Eichl) Aubr &
	Pell., Ocotea caudata Mez., Ocotea cernua (Nees) Mez., Ocotea fra-
	gantissima Ducke, Ocotea glomerata (Nees) mez, Ocotea guianensis
	Aublet, Ocotea longifolia Kunth., Ocotea petalanthera (Meiss) Mez,

Tabela 1 – Lista de espécies em cada grupo sucessional definida de acordo com Macpherson et al. (2010)

Ocotea rubra Mez., Ormosia coutinhoi Ducke, Parahancornia amapa Hub., Parimari rodolphii, Parinari campestris, Platymiscium filipes Benth, Poecilanthe effusa (Huber) Ducke, Pseudopiptadenia suaveolens, Pterocarpus rohrii Vahl., Sacoglottis amazonica Benth, Sagotia racemosa, Sclerobium goeldianum Huber, Sclerobium melanocaroum Ducke, Tachigalia paniculata Aublet, Tetragastris altissima (Aubl.) Swart, Tetragastris panamensis (Engl.) O.Kuntze, Virola michelii Hechel, Xylopia nitida Dunal

Tolerantes à sombra Aspidosperma album (Vahl) R. Bem. Ex Pinchom, Aspidosperma nitidum Benth. Ex. Nuell. Arg., Bowdichia nitida Spruce ex Benth, Bowdichia sp, Bowdichia virgiloides H. B. K., Chamaecrista xinguensis (Ducke) H.S. Irwin & Barneby, Chaunochiton Kappleri (Sag. Ex Engl.) Duke, Chrysophyllum lucentifollium subsp. Pachycarpum, Cupania hirsuta Radlk, Cupania scrobiculata L. C. Rich, Dendrobangia boliviana Rusbi, Diospyros dukei Sandw, Diospyros melinoni (Hiern) A. Smith, Diospyros praetermissa Sandwith, Diospyros sp, Diospyros tectranda Hiern, Diploon venezuelana Aubl., Drypetes variabilis Uittien, Duguetia echynophora R.E. Fr., Ecclinusa abbreviata Ducke, Eperua schonburgkiana Benth., Eschweilera apiculata, Eschweilera blanchetiana (berg) Miers, Eschweilera collina Eyma, Eschweilera coriaceae (A. P. Decandole), Eschweilera grandeflorum, Eschweilera pedicelata, Geissospermum sericeum Benth.et Holk., Glicoxilo sp, Guarea kunthiana A.Juss., Guatteria olivacea R.E.Fries, Guatteria poeppigiana Mart., Guatteria schomburgkiana Mart., Guatteria sp, Helicostiles tomentosa (P.& E.) Rusby, Lecythis chartacea Berg, Lecythis idatimon Aublet, Lecythis Lurida (Miers) mori, Licania heteromorpha Benth., Licania kunthiana Hook F., Licania octandra (Hoffmgg. Ex. R & S.) Kuntze, Lindackeria paraensis Kuhlm., Macrolobium campestre Huber, Manilkara amazonica (Huber) Standley, Manilkara huberi (Ducke) Chevalier, Manilkara paraensis, Maquira sclerophylla (Ducke) C.C.Berg, Maytenos guianensis Kl., Micropholis guianensis Aubl, Micropholis melinoniana Pierre, Minquartia guianensis Aubl., Mouriria plasschaerti Pulle., Neea sp., Perebea guianensis Aubl, Pithecolobium racemosum, Pouteria cladantha Sandwith, Pouteria eugeniifolia (Pierre) Bachni, Pouteria lasiocarpa (Mart.) Radlk, Pouteria macrophylla (Lam.) Eyma, Pouteria manausensis (Aubrev. & Pellegrini) Penn., Pouteria reticulata (Baill.) Eyma, Pouteria sp, Protium decandrum (Aublet) March., Protium opacum Swart., Protium tenuifolium Engl., Rinorea guianensis (Aubl) Schum., Sagotia racemosa, Sandwithiodoxa egregia (Sandw.)Aubr.& Pelleg., Sapium lanciolatum, Sarcaulus brasiliensis Eyma, Swartzia recurva Poeppig, Syzygiopsis oppositifolia Ducke, Talisia intermedia Radlk, Tapura amazonica Poep. et Engl., Theobroma speciosa Willd. Ex Spreng., Tovomita cephalostigma Vesque, Trichilia micrantha Benth, Zizyphus itacaiunensis Froes, Zollernia paraensis Huber

Emergentes	Brosimum potabile Ducke, Caryocar glabum (Aublet) Pers. spp.
	Glabrum, Caryocar villosum (Aublt.) Pers, Cedrela fissilis, Ce-
	drela odorata L., Couratari guianensis, Couratari oblongfolia Ducke
	et Knuth, Couratari sp., Dinizia excelsa Ducke, Dipteryx odorata
	(Aubl.) Willd, Hymenaea courbaril L., Hymenaea palustris Ducke,
	Hymenolobium flavum Ducke, Lecythis pisonis Cambess, Qualea lan-
	cifolia Ducke, Tabebuia impetiginosa (Mart. ex DC.) Standl., Tabebuia
	serratifolia (Vahl.) Nicholes

.

APÊNDICE B



Figura 1 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico nas áreas exploradas, grupo sucessional *Pioneiras* (A) e sem valor comercial.



Figura 2 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico nas áreas explorados, grupo sucessional *Pioneiras* (A) e com valor comercial.



Figura 3 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Pioneiras* (A) e sem valor comercial.



Figura 4 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Pioneiras* (A) e com valor comercial.



Figura 5 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico nas áreas exploradas, grupo sucessional *Demandante de luz* (B) e sem valor comercial.



Figura 6 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na EIR, grupo sucessional *Demandante de luz* (B) e com valor comercial.



Figura 7 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na EC, grupo sucessional *Demandante de luz* (B) e com valor comercial.



Figura 8 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Demandante de luz* (B) e sem valor comercial.



Figura 9 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Demandante de luz* (B) e com valor comercial.



Figura 10 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na EIR, grupo sucessional *Intermediária* (C).



Figura 11 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na EC, grupo sucessional *Intermediária* (C).



Figura 12 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Intermediária* (C).



Figura 13 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico nas áreas exploradas, grupo sucessional *Tolerante à sombra* (D) e sem valor comercial.



Figura 14 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico nas áreas exploradas, grupo sucessional *Tolerante à sombra* (D) e com valor comercial.



Figura 15 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Tolerante à sombra* (D) e sem valor comercial.



Figura 16 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico na área controle, grupo sucessional *Tolerante à sombra* (D) e com valor comercial.



Figura 17 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico para o grupo sucessional *Emergente* (E).



Figura 18 – Log-verossimilhança perfilhada dos parâmetros estimados para o modelo de incremento diamétrico para o grupo sucessional *Sem grupo definido* (N).

Tabela 2 – Critério de Seleção de Akaike de todos os modelos de incremento diamétrico testados. Sendo que, o Agrupamento indica o nível de divisão dos grupos no qual os modelos foram ajustados; a Distribição é a distribuição probabilística assumido para o erro aleatório; Equação indica a função selecionada para o ajuste; I_C é o índice de competição utilizado; AIC é o valor do Critério de Informação de Akaike; k é o número de parâmetros; e ΔAIC indica a diferença de AIC entre o modelo indicado e o melhor modelo.

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração*, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6**	3	-573,3	71	0,0
Exploração*, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-572,7	72	0,6
Exploração***, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-561,2	64	12,1
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	1	-	-524,0	96	49,3
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	2	-	-515,2	96	58,1
Exploração, grupo sucessional e valor comercial	Weibull	6	3	-511,6	132	61,7
Exploração e grupo sucessional	Weibull	1	-	-465,6	54	107,7
Exploração e grupo sucessional	Weibull	6	3	-461,1	72	112,2
Exploração e grupo sucessional	Weibull	3	-	-460,4	54	112,9
Exploração e grupo sucessional	Weibull	2	-	-453,9	54	119,4
Exploração e grupo sucessional	Weibull	5	3	-450,6	72	122,7
Exploração e grupo sucessional	Gamma	1	-	-446,5	54	126,8
Exploração e grupo sucessional	Gamma	6	3	-446,2	72	127,1
Exploração e grupo sucessional	Gamma	3	-	-441,3	54	132,0
Exploração e grupo sucessional	Weibull	4	5	-438,9	72	134,4
Grupo sucessional	Gamma	6	3	-436,7	24	136,6
Exploração e grupo sucessional	Gamma	5	3	-436,4	72	136,9
Exploração e grupo sucessional	Gamma	2	-	-435,8	54	137,5
Grupo sucessional	Weibull	6	3	-435,7	24	137,6
Grupo sucessional	Gamma	5	3	-433,4	24	139,9
Grupo sucessional	Weibull	5	3	-431,5	24	141,8
Exploração e grupo sucessional	Weibull	6	5	-428,0	72	145,3
Exploração e grupo sucessional	Weibull	5	5	-425,5	72	147,8
Grupo sucessional	Gamma	6	5	-416	24	157,3
Grupo sucessional	Weibull	6	5	-415,5	24	157,8
Grupo sucessional	Gamma	4	5	-413,5	24	159,8
Grupo sucessional	Gamma	5	5	-412,1	24	161,2
Grupo sucessional	Weibull	4	5	-411,8	24	161,5
Exploração e grupo sucessional	Gamma	6	5	-411,7	72	161,6
Grupo sucessional	Weibull	5	5	-410,8	24	162,5
Exploração e grupo sucessional	Gamma	5	5	-410,4	72	162,9
Grupo sucessional	Weibull	5	7	-409,3	24	164,0
Grupo sucessional	Weibull	6	7	-409,2	24	164,1
Grupo sucessional	Gamma	6	2	-408,4	24	164,9
Grupo sucessional	Gamma	5	7	-408,2	24	165,1
Grupo sucessional	Gamma	4	1	-407,6	24	165,7
Grupo sucessional	Gamma	6	7	-407,4	24	165,9
Grupo sucessional	Weibull	6	2	-406,5	24	166,8
Grupo sucessional	Weibull	6	6	-405,7	24	167,6
Grupo sucessional	Weibull	6	4	-405,5	24	167,8
Grupo sucessional	Weibull	4	1	-405,2	24	168,1
Grupo sucessional	Gamma	6	6	-404,9	24	168,4

*Considerando a EIR e EC com o mesmo comportamento, menos para o grupo sucessional B com valor comercial e o grupo sucessional C.

**Para o grupo sucessional C na EC foi utlizada a equação 3.

***Considerando a EIR e EC com o mesmo comportamento para o Δd .

Tabela 3 – Continuação Tabela 2.

a $5 - Continuação Tabela 2.$						
Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Grupo sucessional	Gamma	6	1	-404,8	24	168,5
Grupo sucessional	Gamma	6	4	-404,2	24	169,1
Grupo sucessional	Weibull	6	1	-403,6	24	169,7
Grupo sucessional	Weibull	4	6	-401,7	24	171,6
Grupo sucessional	Gamma	4	6	-401,6	24	171,7
Grupo sucessional	Weibull	4	4	-401,6	24	171,7
Grupo sucessional	Weibull	3	-	-401,5	18	171,8
Grupo sucessional	Gamma	3	-	-401,1	18	172,2
Grupo sucessional	Gamma	4	4	-401	24	172,3
Grupo sucessional	Weibull	5	4	-398,6	24	174,7
Grupo sucessional	Weibull	5	6	-398.2	24	175.1
Grupo sucessional	Gamma	5	6	-398.2	24	175.1
Grupo sucessional	Gamma	5	4	-398.1	24	175.2
Grupo sucessional	Gamma	1	_	-397.7	18	175.6
Grupo sucessional	Gamma	5	2	-397 7	24	175.6
Grupo sucessional	Weibull	1	-	-397.6	18	175.7
Grupo sucessional	Gamma	5	1	-397 5	24	133.7
Grupo sucessional	Weibull	5	2	-396.6	$\frac{24}{24}$	134.6
Grupo sucessional	Weibull	5	1	-396.4	$\frac{24}{24}$	134.8
Grupo sucessional	Gamma	2	1	-390,4	18	134,0
Grupo successional	Waibull	2	-	-394,3	10	136.0
Exploração o grupo successional	Gamma	2 1	- 5	-394,5	10	130,9
Exploração e grupo sucessional	Waibull	4	1	-309,5	12	141,0
Exploração	Weibull	4	1	-363,7	12	143,3
Exploração	Weibull	5	1	-378,9	12	152,5
Exploração	Commo	0	1	-3/4,2	12	157,0
Exploração	Gamma	4	1	-375	12	138,2
Exploração	Gamma	0	1	-570,7	12	100,5
Exploração	weibuli	4	2	-364,6	12	100,0
Exploração	Gamma	5	1	-362,3	12	168,9
Exploração	Weibull	6	/	-361,/	12	169,5
Exploração	Weibull	3	-	-361,1	9	170,1
Exploração	Gamma	6	3	-360,9	12	170,3
Exploração	Weibull	4	6	-360,8	12	170,4
Exploração	Weibull	6	2	-360,5	12	170,7
Exploração	Weibull	4	5	-359	12	172,2
Exploração	Weibull	6	5	-358,4	12	172,8
Exploração	Weibull	5	2	-358,2	12	173,0
Exploração	Gamma	5	3	-357,9	12	173,3
Exploração	Weibull	1	-	-357,8	9	173,4
Exploração	Gamma	6	7	-357,2	12	174,0
Exploração	Weibull	4	4	-357	12	174,2
Exploração	Gamma	4	2	-356,7	12	174,5
Exploração	Gamma	6	2	-356,5	12	174,7
Exploração	Gamma	3	-	-354,6	9	176,6
Exploração	Gamma	6	5	-354,3	12	176,9
Exploração	Weibull	6	3	-352,3	12	178,9
Exploração	Weibull	2	-	-352,3	9	178,9
Exploração	Gamma	4	5	-352	12	179,2
Exploração	Gamma	1	-	-351,8	9	179,4
Exploração	Weibull	5	7	-351,6	12	179,6
Exploração	Gamma	5	7	-351,2	12	180,0
Exploração	Gamma	6	4	-351	12	180,2
Exploração	Gaililla	0	+	-551	14	100,2

Tabela 4 – Collulluação Tabela 5.

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração	Gamma	6	6	-350,3	12	180,9
Exploração	Gamma	4	4	-348	12	183,2
Exploração	Gamma	4	6	-347,2	12	184,0
Exploração	Gamma	5	2	-346,7	12	184,5
Exploração	Gamma	5	5	-346,7	12	184,5
Exploração	Gamma	2	-	-346,4	9	184,8
Exploração	Weibull	6	4	-345.8	12	185.4
Exploração	Weibull	6	6	-345,2	12	186,0
Exploração	Weibull	5	3	-345	12	186,2
Exploração	Weibull	5	5	-343.4	12	187.8
Exploração	Gamma	5	4	-342.9	12	188.3
Exploração	Gamma	5	6	-342.2	12	189.0
Exploração	Weibull	5	4	-337.5	12	193.7
Exploração	Weibull	5	6	-335.4	12	195.8
Geral	Gamma	5	3	-258	4	273.2
Geral	Gamma	6	3	-257.2	4	274.0
Geral	Weibull	6	3	-251.8	4	279.4
Geral	Weibull	5	3	-251.7	4	279.5
Geral	Gamma	6	5	-246.3	4	284.9
Geral	Gamma	4	1	_240,5	4	287.4
Grupo sucessional	Gamma	5	1	-397 5	$\frac{1}{24}$	175.8
Grupo sucessional	Weibull	5	2	-396.6	$\frac{24}{24}$	176.7
Grupo sucessional	Weibull	5	1	-396.4	$\frac{24}{24}$	176.9
Grupo sucessional	Gamma	2	1	30/ 5	18	178.8
Grupo sucessional	Weibull	2	-	30/ 3	18	170,0
Exploração e grupo sucessional	Gamma	4	5	-380 3	72	184.0
Exploração	Weibull	4	1	-385 7	12	187.6
Exploração	Weibull	5	1	-378.0	12	107,0
Exploração	Weibull	5	1	374.2	12	100 1
Exploração	Gamma	4	1	-374,2	12	200.3
Exploração	Gamma	4	1	3707	12	200,5
Exploração	Waibull	0	2	-570,7	12	202,0
Exploração	Gamma	4	1	-304,0	12	200,7
Exploração	Waibull	5	1	-302,5	12	211,0
Exploração	Weibull	0	/	-301,7	12	211,0
Exploração	Gamma	5	2	-301,1	12	212,2
Exploração	Waibull	4	5	-300,9	12	212,4
Exploração	Weibull	4	2	-500,8	12	212,5
Exploração	Weibull	0	2 5	-500,5	12	212,0
Exploração	Weibull	4	5	-559	12	214,5
Exploração	Weibull	6	2	-358,4	12	214,9
Exploração	weibuli	5	2	-358,2	12	215,1
Exploração	Gamma	5	3	-357,9	12	215,4
Exploração	Weibull	l	-	-357,8	9	215,5
Exploração	Gamma	6	1	-357,2	12	216,1
Exploraçao	Weibull	4	4	-357	12	216,3
Exploração	Gamma	4	2	-356,7	12	216,6
Exploração	Gamma	6	2	-356,5	12	216,8
Exploração	Gamma	3	-	-354,6	9	218,7
Exploração	Gamma	6	5	-354,3	12	219,0
Exploração	Weibull	6	3	-352,3	12	221,0
Exploração	Weibull	2	-	-352,3	9	221,0
Exploração	Gamma	4	5	-352	12	221,3

Tabela 5 – Continuação Tabela 4

nuação Tabela	ι 4.					
Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Exploração	Gamma	1	-	-351,8	9	221,5
Exploração	Weibull	5	7	-351,6	12	221,7
Exploração	Gamma	5	7	-351,2	12	222,1
Exploração	Gamma	6	4	-351	12	222,3
Exploração	Gamma	6	6	-350,3	12	223,0
Exploração	Gamma	4	4	-348	12	225.3
Exploração	Gamma	4	6	-347.2	12	226.1
Exploração	Gamma	5	2	-346.7	12	226.6
Exploração	Gamma	5	5	-346.7	12	226.6
Exploração	Gamma	2	-	-346.4	9	226.9
Exploração	Weibull	6	4	-345.8	12	220,5
Exploração	Weibull	6	6	-345.2	12	227,5
Exploração	Weibull	5	3	-345	12	220,1
Exploração	Weibull	5	5	-343	12	220,5
Exploração	Carran	5	3	-545,4	12	229,9
Exploração	Gamma	5	4	-342,9	12	230,4
Exploração	Gamma	5	6	-342,2	12	231,1
Exploração	Weibull	5	4	-337,5	12	235,8
Exploração	Weibull	5	6	-335,4	12	237,9
Geral	Gamma	5	3	-258	4	315,3
Geral	Gamma	6	3	-257,2	4	316,1
Geral	Weibull	6	3	-251,8	4	321,5
Geral	Weibull	5	3	-251,7	4	321,6
Geral	Gamma	6	5	-246,3	4	327,0
Geral	Gamma	4	1	-243,8	4	329,5
Geral	Gamma	4	5	-241,6	4	331,7
Geral	Gamma	5	5	-241,5	4	331,8
Geral	Gamma	6	1	-240,3	4	333,0
Geral	Weibull	6	5	-239,2	4	334,1
Geral	Gamma	6	7	-235,1	4	338,2
Geral	Weibull	5	5	-234.3	4	339.0
Geral	Weibull	4	5	-234	4	339 3
Geral	Weibull	4	1	-233.9	4	339.4
Geral	Gamma	5	1	-233.6	4	330.7
Geral	Gamma	5	7	-233,0		340.0
Geral	Gamma	6	, Λ	-232,4	+ ∕	341.2
Geral	Waibull	6	-+ 1	2200	+ 1	3/17/
Geral	Gamma	6	1	220,9	4 1	342,4 342 5
Cerel	Gainma Waih-11	0	07	-230,8	4	342,3 244 1
Geral	weidull	0	/	-229,2	4	544,1 244.4
Geral	Gamma	4	4	-228,9	4	344,4 245.0
Geral	Gamma	4	6	-227,5	4	345,8
Geral	Gamma	6	2	-227,2	4	346,1
Geral	Gamma	4	2	-227	4	346,3
Geral	Weibull	5	7	-226,7	4	346,6
Geral	Weibull	6	4	-225,8	4	347,5
Geral	Gamma	5	4	-225,1	4	348,2
Geral	Gamma	3	-	-225	3	348,3
Geral	Weibull	6	6	-224,8	4	348,5
Geral	Weibull	5	1	-224,5	4	348,8
Geral	Gamma	5	6	-223,5	4	349,8
Geral	Weibull	4	4	-222,1	4	351,2
Geral	Weibull	4	6	-221 2	4	352 1
Ociai			0			JJ <u>J</u>

Tabela 6 – Continuação Tabela 5.

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Geral	Gamma	5	2	-219,3	4	354,0
Geral	Weibull	5	4	-218,7	4	354,6
Geral	Weibull	6	2	-218,7	4	354,6
Geral	Weibull	3	-	-218	3	355,3
Geral	Gamma	2	-	-218	3	355,3
Geral	Weibull	4	2	-217,6	4	355,7
Geral	Weibull	5	6	-217,5	4	355,8
Geral	Weibull	1	-	-213,9	3	359,4
Geral	Weibull	5	2	-211,1	4	362,2
Geral	Weibull	2	-	-210,9	3	362,4
Grupo sucessional	Exponencial	6	3	-32,4	18	540,9
Grupo sucessional	Exponencial	5	3	-28.2	18	545.1
Grupo sucessional	Exponencial	6	5	-7.7	18	565.6
Grupo sucessional	Exponencial	4	5	-4.4	18	568.9
Grupo sucessional	Exponencial	5	5	-2.7	18	570.6
Grupo sucessional	Exponencial	6	2	2.4	18	575.7
Grupo sucessional	Exponencial	5	7	2.6	18	575.9
Grupo sucessional	Exponencial	6	7	4.3	18	577.6
Grupo sucessional	Exponencial	4	1	6.7	18	580.0
Grupo sucessional	Exponencial	6	6	7.2	18	580.5
Grupo sucessional	Exponencial	6	4	8.5	18	581.8
Grupo sucessional	Exponencial	6	1	10	18	583.3
Grupo sucessional	Exponencial	4	6	11.4	18	584.7
Grupo sucessional	Exponencial	4	4	12.6	18	585.9
Grupo sucessional	Exponencial	5	6	16	18	589.3
Grupo sucessional	Exponencial	5	4	16.6	18	589.9
Grupo sucessional	Exponencial	5	2	17.5	18	590.8
Grupo sucessional	Exponencial	3	-	18.3	12	591.6
Grupo sucessional	Exponencial	5	1	20.4	18	593.7
Grupo sucessional	Exponencial	1	-	20,1	12	596.0
Grupo sucessional	Exponencial	2	_	22,7	12	600.3
Grupo sucessional	L'united and L'uni	6	3	32 5	$\frac{12}{24}$	605 8
Grupo sucessional	Log_normal	5	3	40.1	$\frac{24}{24}$	613.4
Grupo sucessional	Log-normal	6	5	52.2	24	625 5
Grupo sucessional	Log-normal	6	7	52,2	24	626 1
Grupo sucessional	Log_normal	5	7	54.8	$\frac{24}{24}$	628 1
Grupo sucessional	Log-normal	6	΄ Λ	55	24	628 3
Grupo sucessional	Log normal	6	6	56	$\frac{24}{24}$	620,3
Grupo sucessional	Log-normal	5	5	58.8	24	632.1
Grupo sucessional	Log-normal	4	6	62 A	24	635 7
Grupo sucessional	Log_normal	3	-	62,4	18	635.7
Exploração	Exponencial	4	1	62, 1	0	636.1
Grupo sucessional	L'ag-normal	- -	2	64.7	24	638 0
Grupo sucessional	Log-normal	5	2 4	65	24	638.3
Grupo sucessional	Log-normal	6	1	65 A	24	638 7
Grupo sucessional	Log-normal	5	6	66 5	24	630.8
Exploração	Evponencial	6	1	66.9	0	640.2
Exploração	L'ag-normal	6	3	67.5	12	640.8
Gruno successional	Log_normal	1	5	68	12	641 3
Exploração	Log_normal	6	-	723	12	645 6
Exploração	Log_normal	4	3	72,5	12	646 0
Grupo sucessional	Log-normal	2	-	72.8	18	646.1
Stupe successional	Log normal	-		12,0	10	010,1

Tabela 7 – Continuação Tabela 6.

induçuo Tubelu o					-	
Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Grupo sucessional	Log-normal	5	1	72,9	24	646,2
Exploração	Log-normal	6	7	73,2	12	646,5
Grupo sucessional	Log-normal	5	2	73,6	24	646,9
Exploração	Log-normal	4	1	74,3	12	647,6
Exploração	Log-normal	3	-	76	9	649,3
Exploração	Exponencial	5	1	78,1	9	651,4
Exploração	Log-normal	6	5	78,2	12	651,5
Exploração	Log-normal	5	3	78,6	12	651,9
Exploração	Log-normal	1	-	80,5	9	653,8
Exploração	Log-normal	6	6	80,6	12	653.9
Exploração	Exponencial	6	3	81	9	654,3
Exploração	Log-normal	6	2	81.2	12	654.5
Exploração	Log-normal	5	7	81.8	12	655.1
Exploração	Log-normal	4	5	81.8	12	655.1
Exploração	Log normal	6	4	81.8	12	655.1
Exploração	Log-normal	5	т 1	83.1	12	656 A
Exploração	Exponencial	5	3	83.5	0	656 8
Exploração	Exponencial	6	כ ד	85 1	0	658 /
Exploração	Log normal	4	6	05,1 85,6	12	658.0
Exploração	Log-normal	4	0	83,0 96 1	12	650.4
Exploração	Log-normal	4		80,1 86,2	12	650.6
Exploração	Log-normal	4	4	80,3	12	039,0
Exploração	Exponencial	6	2	86,4	9	659,7
Exploração	Log-normal	2	-	89,5	9	662,8
Exploração	Exponencial	6	5	89,8	9	663,1
Exploração	Log-normal	5	5	90,3	12	663,6
Exploração	Exponencial	4	5	92,3	9	665,6
Exploração	Exponencial	3	-	92,4	6	665,7
Exploração	Exponencial	5	7	92,5	9	665,8
Exploração	Log-normal	5	6	94,1	12	667,4
Exploração	Log-normal	5	2	94,7	12	668,0
Exploração	Exponencial	6	4	95	9	668,3
Exploração	Log-normal	5	4	95,4	12	668,7
Exploração	Exponencial	1	-	95,6	6	668,9
Exploração	Exponencial	6	6	96,1	9	669,4
Exploração	Exponencial	4	4	98,6	9	671,9
Exploração	Exponencial	5	5	99,4	9	672,7
Exploração	Exponencial	5	2	99,5	9	672,8
Exploração	Exponencial	4	6	99.7	9	673.0
Exploração	Exponencial	2	-	102.7	6	676.0
Exploração	Exponencial	5	4	105.3	9	678.6
Exploração	Exponencial	5	6	106.3	9	679.6
Geral	Log-normal	6	3 3	184 3	4	757.6
Geral	Log-normal	5	3	190.1	4	763.4
Geral	Exponencial	5	3	203.7	3	777 0
Geral	Exponencial	6	2	203,7	2	7780
Geral	Log normal	6	5	204,9	Л	770,2
Geral	Log normal	6	כ ד	203,1	4 1	7026
Caral	Log-normal	0	/	209,3	4	102,0
Geral	Log-normal	5	5	211	4	/84,3
Geral	Log-normal	4	5	212,2	4	/85,5
Geral	Log-normal	5	7	212,2	4	785,5
Geral	Log-normal	6	6	212,5	4	785,8
G 1	Τ	6	1	2126	1	705 0

Tabela 8 – Continuação Tabela 7.

Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Geral	Log-normal	4	6	218,6	4	791,9
Geral	Log-normal	4	4	219,4	4	792,7
Geral	Log-normal	6	1	220,2	4	793,5
Geral	Log-normal	4	1	220,9	4	794,2
Geral	Exponencial	6	5	221	3	794,3
Geral	Log-normal	5	4	221,6	4	794,9
Geral	Log-normal	5	6	221,8	4	795,1
Geral	Log-normal	3	-	222,4	3	795,7
Geral	Log-normal	6	2	223,4	4	796,7
Geral	Exponencial	4	1	224,8	3	798,1
Geral	Log-normal	5	1	227,6	4	800,9
Geral	Exponencial	4	5	228	3	801,3
Geral	Exponencial	5	5	228,2	3	801,5
Geral	Log-normal	1	-	228.7	3	802.0
Geral	Exponencial	6	1	229.9	3	803.2
Geral	Log-normal	4	2	230.2	4	803.5
Geral	Log-normal	2	-	231.5	3	804.8
Geral	Log-normal	5	2	232.2	4	805.5
Geral	Exponencial	6	7	237.7	3	811.0
Geral	Exponencial	5	1	239.8	3	813.1
Geral	Exponencial	5	7	241.6	3	814.9
Geral	Exponencial	6	4	242.1	3	815.4
Geral	Exponencial	3	_	242.7	2	816.0
Geral	Exponencial	6	6	243.9	3	817.2
Geral	Exponencial	4	4	246.8	3	820.1
Geral	Exponencial	4	6	248.9	3	822.2
Geral	Exponencial	6	2	249.3	3	822.6
Geral	Exponencial	4	2	250.5	3	823.8
Geral	Exponencial	5	4	252,5	3	825.8
Geral	Exponencial	5	6	254.8	3	828.1
Geral	Exponencial	1	-	259.3	2	832.6
Geral	Exponencial	2	_	259,3	2	832.6
Geral	Exponencial	5	2	255,5	3	834 3
Grupo sucessional	Normal	5	3	4930 1	24	5503.4
Grupo sucessional	Normal	4	3	4937.6	$\frac{24}{24}$	5510.9
Grupo sucessional	Normal	5	5	4951.1	24	5524.4
Grupo sucessional	Normal	4	5	4957.4	24	5530.7
Grupo sucessional	Normal	5	4	4957.9	$\frac{24}{24}$	5531.2
Grupo sucessional	Normal	6	5	4959 5	24	5532.8
Grupo sucessional	Normal	5	6	4960.4	24	55337
Grupo sucessional	Normal	5 4	2	4960.8	$\frac{24}{24}$	5534 1
Grupo sucessional	Normal	5	7	4961.0	$\frac{24}{24}$	5535.2
Grupo sucessional	Normal	4	1	4962.5	24	5535.8
Grupo sucessional	Normal	4	4	4963.8	$\frac{24}{24}$	55371
Grupo sucessional	Normal	4	6	4965.2	$\frac{24}{24}$	5538 5
Grupo sucessional	Normal	5	2	4965 3	24 24	5538.6
Grupo sucessional	Normal	6	4	4965 4	$\frac{24}{24}$	55387
Grupo successional	Normal	1	-T -	4967 2	18	5540 5
Grupo successional	Normal	6	1	4967 5	24	5540.8
Grupo successional	Normal	6	6	4967.6	2 4 24	5540.0
Grupo successional	Normal	4	7	4968 2	2 4 24	5541 5
Grupo successional	Normal	3	1	4970.6	2 4 18	5543.0
Grupo successional	ronnal	5	-	т/10,0	10	5545,9

Tabela 9 – Continuação Tabela 8.

linuação Tabela (
Agrupamento	Distribuição	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
Grupo sucessional	Normal	6	7	4973,5	24	5546,8
Grupo sucessional	Normal	6	3	5047,2	24	5620,5
Exploração	Normal	6	1	5149,6	12	5722,9
Exploração	Normal	4	1	5149,7	12	5723,0
Exploração	Normal	5	1	5153,4	12	5726,7
Exploração	Normal	5	3	5162,5	12	5735,8
Exploração	Normal	4	3	5162,9	12	5736.2
Exploração	Normal	4	2	5168,2	12	5741.5
Exploração	Normal	6	2	5170,2	12	5743.
Exploração	Normal	6	3	5170.7	12	5744.0
Exploração	Normal	1	_	5170.9	9	5744.2
Exploração	Normal	3	_	5172.5	9	5745 8
Exploração	Normal	4	5	5172,8	12	5746
Exploração	Normal	2	-	5172,0	0	5746
Exploração	Normal	2	7	5173,2	12	5740,
Exploração	Normal	4	1	5173,7	12	5747
Exploração	Normal	4 6	+ 5	5174 0	12 12	5747
Exploração	Normal	5	5	5174,2	12	5747,
Exploração	Normal	5 1	с С	5174,0	12	5741,5
Exploração	Normal	4	0	5174,7	12	5740,0
Exploração	Normal	0	4	5174,8	12	5748,
Exploração	Normal	5	4	5175,3	12	5748,0
Exploração	Normal	5	1	5175,4	12	5748,
Exploração	Normal	6	6	5175,8	12	5749,
Exploração	Normal	6	7	5176,1	12	5749,4
Exploração	Normal	5	6	5176,4	12	5749,
Exploração	Normal	5	2	5176,8	12	5750,
Geral	Normal	4	3	5341,8	4	5915,
Geral	Normal	6	3	5351,9	4	5925,2
Geral	Normal	6	5	5354,2	4	5927,
Geral	Normal	4	5	5356,1	4	5929,4
Geral	Normal	4	1	5358,6	4	5931,
Geral	Normal	6	1	5363,2	4	5936,
Geral	Normal	4	4	5367	4	5940,3
Geral	Normal	6	4	5368,1	4	5941,4
Geral	Normal	4	6	5368,2	4	5941,
Geral	Normal	5	7	5368,2	4	5941,
Geral	Normal	4	7	5368,3	4	5941,
Geral	Normal	5	1	5368,3	4	5941,0
Geral	Normal	6	6	5369	4	5942,
Geral	Normal	5	6	5369.7	4	5943.
Geral	Normal	6	7	5370,3	4	5943.0
Geral	Normal	4	2	5371.4	4	5944
Geral	Normal	6	2	5371.7	4	5945 (
Geral	Normal	1	-	5372.8	3	5946
Geral	Normal	2	_	5372.8	3	5946
Geral	Normal	3	_	5372.9	3	5946
Grupo successional	Normal	2	_	5457.8	18	6031
Grupo successional	Normal	5	1	5461 6	24	6034 0
Geral	Normal	5	1 /	6001.0	∠ - + ∕I	7565
Geral	Normal	5	+ 2	7/02 2	+ 1	7001
Geral	Normal	5 5	5	7400,3	4 1	7001,0
Ociai	INOTHIAL	5	5	7400,3	4	7901,0
C 1		_			/	
APÊNDICE C



Figura 19 – Perfil de log-verossimilhança negativa dos parâmetros estimados do modelo de probabilidade de sobrevivência selecionado.

Tabela 10 – Critério de Seleção de Akaike de todos os modelos de probabilidade de sobrevivência testados. Sendo que, o *Agrupamento* indica o nível de divisão dos grupos no qual os modelos foram ajustados; *Equação* indica a função selecionada para o ajuste; I_C é o índice de competição utilizado; *AIC* é o valor do Critério de Informação de Akaike; k é o número de parâmetros; e ΔAIC indica a diferença de AIC entre o modelo indicado e o melhor modelo.

\sim			mom		LU.	
	Agrupamento	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC
	Exploração*	1	_	-524,9	6	0,1
	Exploração	1	6	-520,7	12	4,2
	Exploração	1	_	-520,5	9	4,4
	Exploração	1	4	-520,5	12	4,4
	Exploração	1	5	-520,2	12	4,7
	Exploração	1	1	-519,4	12	5,5
	Período	1	4	-515,0	24	9,9
	Período	1	6	-513,0	24	11,9
	Exploração	3	6	-509,5	12	15,4
	Exploração	3	5	-509,3	12	15,6
	Exploração	3	4	-509,2	12	15,7
	Exploração	3	_	-508,0	9	16,9
	Período	3	4	-507,9	24	17,0
	Período	3	6	-507,0	24	17,9
	Exploração	3	1	-506,2	12	18,7
	Período	2	5	-503,7	24	21,2
	Período	2	4	-501,5	24	23,4
	Período	2	6	-499,0	24	25,9
	Exploração	2	6	-492,6	12	32,3
	Exploração	2	4	-492,5	12	32,4
	Exploração	2	-	-492,0	9	32,9
	Exploração	2	5	-491,8	12	33,1
	Exploração	2	1	-487,6	12	37,3
	Período	3	5	-486,2	24	38,7
	Período	1	5	-480,1	24	44,8
	Período	1	1	-446,5	24	78,4
	Período	1	-	-445,0	18	79,9
	Exploração	3	3	-444,8	12	80,1
	Exploração	3	2	-443,9	12	81,0
	Geral	1	6	-443,7	4	81,2
	Geral	1	4	-440,6	4	84,3

*Considerando a EIR e EC com o mesmo comportamento para a probabilidade de mortalidade

Agrupamento	Equação	I_C	AIC	k	ΔAIC			
Período	1	3	-438,3	24	86,6			
Geral	3	6	-437,2	4	87,7			
Geral	1	3	-437,0	4	87,9			
Período	1	7	-436,8	24	88,1			
Período	3	_	-433,9	18	91,0			
Geral	3	4	-433,7	4	91,2			
Geral	1	6	-433,2	4	91,7			
Geral	1	5	-433,0	4	91,9			
Período	3	7	-429,2	24	95,7			
Geral	3	5	-427,2	4	97,7			
Período	2	7	-426,8	24	98,1			
Geral	2	6	-424,2	4	100,7			
Geral	2	5	-424,0	4	100,9			
Geral	2	4	-421,0	4	103,9			
Período	2	_	-421,0	18	103,9			
Geral	1	1	-417,2	4	107,7			
Período	2	1	-417,2	24	107,7			
Geral	1	2	-415,3	4	109,6			
Geral	1	_	-412,9	3	112,0			
Geral	1	7	-411,0	4	113,9			
Período	2	2	-409,5	24	115,4			
Período	3	3	-409,3	24	115,6			
Geral	3	1	-408,5	4	116,4			
Período	3	2	-406,5	24	118,4			
Período	1	2	-406,0	24	118,9			
Geral	3	3	-404,6	4	120,3			
Geral	3	_	-403,6	3	121,3			
Geral	3	2	-401,8	4	123,1			
Geral	3	7	-401,6	4	123,3			
Período	2	3	-400,2	24	124,7			
Geral	2	2	-398,9	4	126,0			
Geral	2	_	-391,0	3	133,9			
Geral	2	1	-390,6	4	134,3			
Geral	2	7	-389,3	4	135,6			
Geral	2	3	-389,3	4	135,6			
Exploração*	1	4	-381.8	8	143.1			

Tabela 11 – Continuação da Tabela 10.

Exploração*14-381,88143,1*Considerando a EIR e EC com o mesmo comportamento
para a probabilidade de mortalidade