



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO PROF^a CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**



LAILLA SABRINA QUEIROZ NAZARENO

**ESTRATÉGIAS DE ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA
EM ÁREA DE TRANSIÇÃO CAATINGA/CERRADO**

Bom Jesus – PI

2019

LAILLA SABRINA QUEIROZ NAZARENO

**ESTRATÉGIAS DE ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA EM ÁREA DE
TRANSIÇÃO CAATINGA/CERRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Piauí, Campus Profª Cinobelina Elvas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia/Fitotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho

Coorientadora: Profª. Drª. Andressa Ribeiro

Bom Jesus - PI

2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial de Bom Jesus
Serviço de Processamento Técnico

N335e Nazareno, Lailla Sabrina Queiroz.
Estratégias de estimativa de volume de madeira em área
de transição caatinga/cerrado. /Lailla Sabrina Queiroz
Nazareno-2019.
61 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) –
Universidade Federal do Piauí, Campus Professora
Cinobelina Elvas, Bom Jesus - PI, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho

1. Floresta nativa. 2. Bioma. 3. Caatinga-cerrado.
I. Título

CDD 577.54

LAILLA SABRINA QUEIROZ NAZARENO

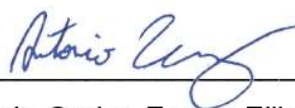
**ESTRATÉGIAS DE ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA EM ÁREA DE
TRANSIÇÃO CAATINGA/CERRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Piauí, Campus Profª Cinobelina Elvas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia/Fitotecnia.

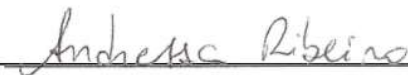
Área de Concentração: Produção Vegetal

Aprovada em: 01/07/2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho (Orientador)
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Profª. Drª. Andressa Ribeiro (Coorientadora)
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Dr. Luciano Teixeira de Oliveira
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Prof. Dr. Emanuel José Gomes de Araújo
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRF

Bom Jesus – PI

2019

A minha querida Clara,

dedico.

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer à Deus e a Nossa Senhora pelo dom da vida. Por Vossa infinita bondade e sabedoria, por não me desamparar e sempre permitir realizar meus sonhos.

À minha família, por todo apoio incondicional. Especialmente minha avó Quinca, minha mãe Marillac, minha irmã Leilla, meus padrinhos/tios Luzinete e Eunifran e meus primos/irmãos Andréa, Bárbara e Cássio, meus maiores incentivadores.

À Clara, por ser uma filha paciente, amorosa e compreensiva. Obrigada por iluminar minha vida e me ajudar a se tornar cada dia mais uma pessoa melhor.

À Universidade Federal do Piauí, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias - PPGCA/UFPI, pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao professor Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho, pela orientação, ensinamentos, paciência e disposição em sempre ajudar.

À professora Dr^a. Andressa Ribeiro, pela coorientação, disponibilidade e contribuição durante todo o desenvolvimento do projeto.

À Mylla Vyctória Coutinho de Sousa, não só por sua imensa contribuição com as coletas de dados, mas também por sua disponibilidade e paciência.

Aos funcionários e proprietários da Fazenda Aracajú pela disponibilidade da área para o projeto ser desenvolvido.

Aos professores, funcionários e colegas da UFPI, que durante esse período contribuíram e fizeram parte da minha formação.

Aos amigos de Bom Jesus que me receberam de braços abertos, sempre me incentivando e apoiando. Obrigada pelas conversas, conselhos, amizade, cumplicidade e risadas.

Aos amigos do Ceará, agradeço a amizade, apoio e incentivo. Independente da distância, sempre estiveram presentes, dispostos a ajudar.

Por fim, agradeço a todos que diretamente e indiretamente contribuíram na realização desse projeto.

RESUMO

As regiões que contêm características de mais de um bioma são denominadas por zonas de transição. O estado do Piauí, além de ser constituído pelos biomas Caatinga e Cerrado, também é formado pela presença de áreas de transição desses dois biomas, caracterizando-se por apresentar uma mistura de vegetações. A necessidade em melhor utilizar os recursos florestais impulsionou o homem a procurar novos métodos para quantificação e avaliação desses recursos. Entre as principais formas de estimativa de volume de madeira em árvores, o fator de forma e os modelos de regressão se destacam por serem mais usuais. Contudo, a determinação de um fator de forma ou de parâmetros de modelos volumétricos para florestas de áreas de transições são escassos. Diante da necessidade em se estimar volume de árvores com maior exatidão, o objetivo do presente trabalho é avaliar estratégias para estimativa do volume de madeira em áreas de transição nos biomas Caatinga e Cerrado, na Região Sul do Piauí. Foram cubadas 351 árvores de forma destrutiva e não destrutiva na microrregião piauiense do Alto Médio Gurguéia. Em cada árvore foram mensuradas as variáveis altura total, diâmetro a 1,3 m do solo, volume do fuste, volume total e identificação botânica da espécie. Afim de avaliar possíveis diferenças nas estimativas de volume, foram avaliados as estratégias: E1 - Fator de forma médio; E2 - Fator de forma por espécie; E3 - Fator de forma por classe diamétrica; E4 - Fator de forma baseado em mínimos quadrados (regressão linear); E5 e E6 - Fator de forma da literatura para Caatinga e Cerrado; E7 - Modelo volumétrico de Schumacher e Hall; E8 a E21 - Modelo volumétrico ajustado por técnicas mistas (considerando espécie ou classe diamétrica como efeito aleatório, testando todas combinações de efeitos aleatórios nos parâmetros fixos dos modelos); E22 e E23 - Modelo volumétrico obtido de literatura para Caatinga e Cerrado. Entre todas as estratégias, a utilização de modelos mistos com parâmetros específicos da espécie obteve o melhor desempenho, apresentando um menor erro percentual absoluto médio (15,31%). Porém, o uso dos parâmetros fixos do modelo misto tendo como fator aleatório a classe de diâmetro também oferece uma boa estratégia de ajuste (erro percentual absoluto médio =15,39%) e possui uma melhor aplicabilidade.

Palavras-chave: Equações de volume. Fator de forma. Floresta nativa. Inventário florestal.

ABSTRACT

Regions that contain characteristics of more than one biome are referred to as transition zones. The state of Piauí, besides being formed by the Caatinga and Cerrado biomes, is also formed by the presence of transition areas between these two biomes, characterized by a mixture of vegetation. The need to make better use of forest resources has prompted society to seek new methods for quantifying and evaluating these resources. Among the main ways of estimating wood volume in trees, the form factor and regression models stand out for being more usual. However, determining a form factor or volumetric model parameters for forests in transitional areas is scarce. Given the need to estimate tree volume more accurately, the objective of this paper is to evaluate strategies for estimating wood volume in transition areas in the Caatinga and Cerrado biomes in the southern region of Piauí. 351 trees were destructively and non-destructively scaled in the Piauí micro region of the Upper Middle Guruguéia. In each tree, the variables total height, diameter at 1.3 m from the soil, stem volume, total volume and botanical identification of the species were measured. In order to evaluate possible differences in volume estimates, the following treatments were evaluated: T1 - Mean form factor; T2 - Form factor by species; T3 - Form factor by diameter class; T4 - Least squares form factor (linear regression); T5 and T6 - Literature form factor for Caatinga and Cerrado; T7 - Schumacher and Hall volumetric model; T8 to T21 - Volumetric model adjusted by mixed techniques (considering species or diameter class as a random effect, testing all combinations of random effects on the fixed parameters of the models); T22 and T23 - Volumetric model obtained from literature for Caatinga and Cerrado. Among all strategies, the use of mixed models with species-specific parameters obtained the best performance, presenting the lowest mean absolute percentage error (15.31%). However, the use of fixed parameters of the mixed model taking the diameter class as a random factor also offers a good fit strategy (mean absolute percentage error = 15.39%) and has a better applicability.

Keywords: Volume equations. Form factor. Native forest. Forest Inventory.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLD	Classe diamétrica em centímetros
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPE	Erro percentual absoluto médio (<i>mean absolute percent error</i>)
MFS	Manejo Florestal Sustentável
SFB	Serviço Florestal Brasileiro

LISTA DE SÍMBOLOS

b_{ij}	Termo aleatório adicionando aos parâmetros fixos
dp	Desvio padrão
f	Fator de forma
g	Área seccional
h	Altura total da árvore
L	Comprimento da tora
\ln	Logaritmo neperiano
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
Mo	Valor observado
Mp	Valor estimado
n	Número de observações
v	Volume
v_a	Volume de galhos
v_b	Volume do fuste
v_p	Volume da ponta
v_r	Volume real
v_t	Volume do toco
β_i	Parâmetros fixos de regressão
ε	Erro aleatório
d	Diâmetro medido a 1,3 m de altura do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	12
CAPÍTULO 1	14
2 VEGETAÇÕES SAVÂNICAS	14
2.1 Caatinga.....	15
2.2 Cerrado	16
2.3 Zona de Transição	17
3 MANEJO FLORESTAL DE MATAS NATIVAS	19
4 VOLUMETRIA	21
4.1 Fator de Forma	22
4.2 Modelagem volumétrica	23
REFERÊNCIAS	26
CAPÍTULO 2	34
Estratégias de estimativa de volume de madeira para árvores de área de transição Caatinga/Cerrado	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60

1 INTRODUÇÃO GERAL

As regiões que contêm características de mais de um bioma são denominadas por zonas de transição. Essas regiões possuem alta heterogeneidade, com características que fazem com que a vegetação seja mais diversificada (Pereira et al., 2011). O estado do Piauí, além de ser constituído pelos biomas Caatinga (63%) e Cerrado (37%), também é formado pela presença de áreas de transição entre esses dois biomas (IBGE, 2004; Rodrigues & Prudente, 2011). A vegetação dessas regiões de transições entre biomas caracteriza-se por apresentar uma mistura de vegetação de porte arbóreo, arbustivo-arbóreo ou arbustivo, com densidades variadas, semelhantes as regiões de Caatinga, com florestas de árvores de folhas secas e solos mais ressecados em períodos sem chuva, como os de Cerrado (Oliveira et al., 2012).

O consumo de lenha para produção energética é relevante no Brasil, principalmente na região Nordeste. Destaca-se que 7,8% da energia produzida no Brasil em 2016 foi oriunda da queima de lenha e carvão vegetal, totalizando uma produção de 74,5 mil toneladas de lenha (Brasil, 2017), ao qual estima-se que 62% da produção nacional no Brasil seja proveniente da região Nordeste (IBGE, 2018).

O aumento das áreas de exploração da vegetação lenhosa, muitas vezes de forma ilegal, é justificado pelo surgimento de indústrias e, conseqüentemente, pelo crescimento populacional na região do semiárido, sendo necessário a adoção de técnicas que viabilizam a exploração da vegetação florestal nativa de forma legal, estabelecendo o equilíbrio entre os recursos florestais e a sua disponibilidade (Santos et al., 2017). A necessidade em melhor utilizar os recursos florestais impulsionou o homem a procurar novos métodos para quantificação e avaliação desses recursos, de forma que o permitisse compreender a dinâmica da floresta (Amaro et al., 2013).

O Manejo Florestal Sustentável (MFS) é uma alternativa viável que permite a exploração da vegetação florestal nativa, atendendo as necessidades da população, conseguindo estabelecer equilíbrio entre os recursos florestais e a sua disponibilidade (Gariglio et al., 2010). Ele contribui não só com a proteção ambiental do bioma, mas também com o desenvolvimento socioeconômico local através da oferta de matéria-prima energética de forma legal (Santos et al., 2017).

Para garantir que o MFS seja executado de forma adequada, é fundamental a quantificação correta do principal produto, o volume de madeira. Entre as principais formas de estimativa de volume de madeira em árvores, o fator de forma e os modelos estatísticos de regressão se destacam por serem mais usuais (Silva & Santana, 2014), e buscam alcançar cada vez mais precisão, principalmente com o uso de modelos volumétricos específicos por local, região e formação vegetal (Souza et al., 2016). Contudo, a determinação de um fator de forma e de parâmetros para o ajuste de modelos volumétricos para áreas de transições entre esses biomas ainda são inexistentes na literatura.

Nas áreas de transições não há referências relativas à modelagem do volume de madeira, sendo necessário modelos estatísticos aplicados ao manejo de florestas naturais, a fim de auxiliar na quantificação precisa desse produto madeireiro, melhorando o planejamento, e consequentemente reduzindo as atividades de exploração de madeira ilegal.

Diante da necessidade em se estimar o volume de árvores com menos erros, o presente trabalho objetiva avaliar estratégias que estimem o volume comparando o uso de fatores de forma e aplicação de equações volumétricas, a partir de diferentes metodologias de ajuste para uma área de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado, no sul do Piauí.

CAPÍTULO 1 REVISÃO DE LITERATURA

2 VEGETAÇÕES SAVÂNICAS

O território brasileiro é composto por uma diversidade de paisagens que compõe um mosaico de ecossistemas tropicais. Essa diversidade representa uma herança resultante de processos antigos, remodelados e modificados (Ab'Saber, 2003). Os biomas possuem fitofisionomias predominantes, em que muitas vezes são condicionadas pelo clima, mas também podem ser associadas às características físicas e químicas do solo, a topografia, ou outros eventos temporais (Ribeiro & Walter, 2008).

As savanas são ambientes extremamente dinâmicos e heterogêneos, com vegetações herbáceas contínuas e um dossel descontínuo de arbustos e árvores. Presente em um quarto da superfície do globo terrestre, em diversos países, elas se apresentam com características em comum: padrão de distribuição das chuvas, alternância de períodos chuvosos e secos durante todo o ano e períodos de seca diretamente relacionados aos índices pluviométricos (Goedert et al., 2000).

O sistema de classificação de Dansereau (1949) determinou que os biomas Cerrado e Caatinga fossem parte das formações savânicas. Contudo, segundo o IBGE (2012) o termo savana vem sendo substituído por outros termos, tornando-se assim savana como termo prioritário e Cerrado como sinônimo regionalista, enquanto Caatinga é empregado exclusivamente em vegetações do interior nordestino e extremo norte de Minas Gerais.

As savanas tropicais fazem parte dos sistemas mais afetados pela transformação da paisagem (Lehmann et al., 2009). As regiões de transições que existem entre esses biomas, conhecidas por apresentarem grande biodiversidade, estão cada vez mais ameaçadas, tornando-se preocupante, devido sua importância. Por exemplo, o bioma Cerrado, destaca-se por seu papel fundamental no processo de distribuição dos recursos hídricos (Lima, 2011), conhecido mundialmente como “berço das águas” (WWF Brasil, 2019a).

2.1 Caatinga

A palavra “Caatinga” tem origem indígena, no tupi-guarani significa “mata-branca”, e se refere as características apresentadas pelas árvores durante a queda de suas folhas no período de escassez de água (Loiola et al., 2012). Segundo a caracterização do Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2019a), a Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro, ocupa uma área de cerca de 844.453 quilômetros quadrados, o equivalente a 11% do território nacional. O bioma está presente nos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e norte de Minas Gerais.

A Caatinga tem um imenso potencial para a conservação de serviços ambientais, uso sustentável e bioprospecção, que se bem explorado, será decisivo para o desenvolvimento da região e do país. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004), a porcentagem da vegetação original da Caatinga alterada por atividades antrópicas é superior aos 28%. Nos últimos anos, o bioma tem sido desmatado cada vez mais rápido, devido a exploração ilegal da lenha nativa, chegando a registrar 46% de desmatamento da área do bioma (Brasil, 2019a).

O estado do Piauí possui 54 áreas de proteção integral, correspondente a 1,8% do bioma Caatinga da região. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2019a) apenas 8,8% do bioma do estado se encontra monitorado em unidades de conservações, sendo elas não só áreas de proteções integrais, mas também áreas de uso sustentável.

A biodiversidade da Caatinga ampara diversas atividades econômicas voltadas para fins agrosilvipastoris e industriais, especialmente nos ramos energéticos, farmacêuticos, cosméticos, químicos e alimentícios. O bioma possui um importante número de espécies endêmicas, que ainda assim indica carência de conhecimento zoológico e botânico na região (Giulietti et al., 2003).

O estado do Piauí apresenta uma elevada heterogeneidade espacial e ambiental, pois sua área está localizada na zona de transição entre vegetações dos biomas Caatinga e Cerrado (Sampaio & Batista, 2004). A vegetação do tipo xerófila é a que predomina no estado do Piauí, principalmente em baixas altitudes, apresentando variações fisionômicas e florísticas (Sampaio et al., 1981). Já na microrregião do Alto Médio Gurguéia a vegetação que predomina é a Caatinga

hipoxerófila, que de acordo com Brasil (1972), é caracterizada por possuir três diferentes estratos de vegetação: herbáceo, arbustivo e arbóreo e elementos de outros biomas. Nesse tipo de vegetação as árvores e arbustos predominantemente são adaptados à escassez hídrica, perdendo suas folhas durante a estação seca (Galvêncio et al., 2016).

2.2 Cerrado

O Cerrado é considerado o segundo maior bioma da América do Sul, possuindo uma área de 2,04 milhões de quilômetros quadrados, o equivalente a 22% do território nacional (Klink & Machado, 2005). Segundo a caracterização do Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2019b), o bioma se estende sobre os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal, além de enclaves no Amapá, Roraima e Amazonas.

O Cerrado brasileiro é reconhecido como um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade, que além de abrigar nos diversos ecossistemas uma flora com 11.627 espécies de plantas nativas catalogadas, das quais 4.400 são endêmicas, possui uma rica avifauna, compreendendo cerca de 837 espécies. Essas regiões são reconhecidas pelo endemismo de biodiversidade relevante para o planeta (Myers et al., 2000).

Aproximadamente 8,33% da área do bioma é protegida por unidades de conservação federais, estaduais e municipais. Apenas 2,87% do Cerrado é protegido sob unidades de conservação de proteção integral, através dos parques nacionais (Brasil, 2011), o restante é composto por atividades com uso sustentável.

O bioma passou a ser conhecido como “celeiro do Brasil” na década de 1960, em decorrência da expansão agrícola, rodoviária e demográfica iniciada nessa mesma época (Aguiar et al., 2016). Sua área vem diminuindo ao passar dos anos, conforme os investimentos na expansão do agronegócio e pecuária aumentam (Sano, 2010). A extensão de área urbana e o aumento da massa populacional humana também são responsáveis por novas aberturas de áreas, de acordo com as necessidades básicas da população, e a conseqüente redução da área coberto por vegetação nativa no bioma (Silva & Sano, 2016).

2.3 Zona de Transição

As zonas de transições são áreas com características específicas, existente entre os principais biomas brasileiros. A região de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado é a terceira maior do Brasil, podendo ocorrer tanto de forma gradual como também em formato de complexos mosaicos. No estado do Piauí essa transição corresponde a uma faixa de cerca de 150 km de largura, sendo uma área profundamente gradual, impossibilitando a identificação do início e/ou fim de cada bioma (Eiten, 1972).

O Piauí apresenta algumas formações florestais na qual se destaca a Caatinga, em que ocupa 63% do território, ocorrendo de leste ao sudoeste do estado; sendo caracterizada por apresentar porte arbóreo, arbustivo-arbóreo ou arbustivo com densidades variadas. O bioma Cerrado está presente em 37% do território piauiense, destacando-o como o quarto estado de maior representatividade por ocupação desta vegetação e o primeiro em relação a região Nordeste (Castro, 2000; Rodrigues & Prudente, 2011).

No Brasil, a área de transição que compreende os biomas Caatinga e Cerrado corresponde a 115.108 quilômetros quadrados (Figura 1), estendendo-se na porção centro-norte do estado do Piauí, passando pelo norte da Bahia até o nordeste de Minas Gerais (WWF Brasil, 2019b).

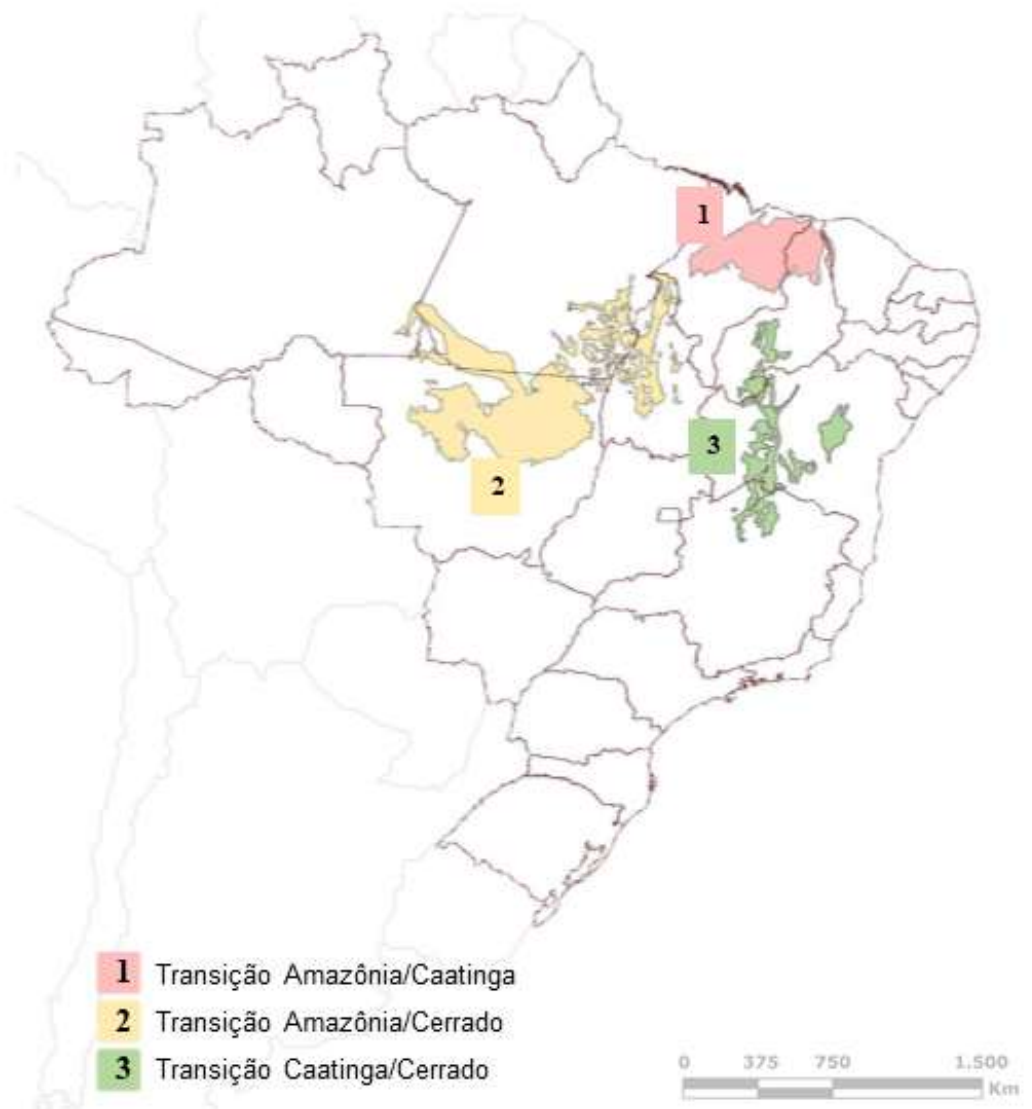


Figura 1 – Mapa das zonas de transições dos biomas brasileiros.
 Fonte: Adaptado de WWF Brasil (2019)

Na área de transição entre esses biomas a vegetação é mais rica que a da Caatinga, com florestas decíduas. Naturalmente, o clima é mais seco que o do Cerrado, com solo mais ressecados e períodos mais profundos sem chuva. A maior parte desta área está na fronteira do Cerrado com o sertão, no interior de estados nordestinos (WWF Brasil, 2019b).

As áreas de transições entre biomas Caatinga e Cerrado correspondem a 19% do território piauiense (Almeida et al., 2014). Entretanto, apesar de possuir características diferentes, se comparado a presença dos biomas de forma isolada em

outras regiões, estudos ainda são incipientes sobre as florestas nativas dessas regiões.

3 MANEJO FLORESTAL DE MATAS NATIVAS

O Brasil é o país com a maior área de florestas naturais tropicais do mundo, que além de elaborar leis rígidas, também vem desenvolvendo pesquisas sobre administração florestal. As florestas nativas possuem ambientes socioeconômicos e históricos diferentes. A proximidade dessas florestas de propriedades familiares tem possibilitado o uso de seus recursos (Andrae et al., 2018).

A produção de madeira para lenha no Brasil foi de cerca de 77 milhões de m³ em 2017, sendo 28% oriundo de florestas nativas, enquanto para carvão vegetal a produção nacional deste mesmo ano alcançou 5,3 milhões de toneladas, sendo 8% de origem do extrativismo brasileiro (IBGE, 2017). E com o aumento desse consumo de lenha para uso caseiro e industrial, surgiu-se a necessidade em se manejar essas florestas naturais.

Na década de 60, começou a surgir a preocupação com essas florestas por meio da criação da Lei Federal nº 4.771 que proíbe a exploração empírica das florestas nativas (Andrade et al., 2019). Atualmente, o decreto nº 5.975 (Brasil, 2006) define o Manejo Florestal Sustentável (MFS) como a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, em que se respeita os mecanismos de sustentação do ecossistema, considerando cumulativa ou alternativamente, a utilização de variadas espécies madeireiras, assim como múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, além da utilização de outros bens e serviços de natureza florestal.

O MFS é uma atividade que envolve a combinação de inúmeros fatores e atividades, que vão desde a escolha da área, escolha e caracterização das espécies, valor do produto, disponibilidade de equipamentos, demanda do mercado, até entre outros fatores que fazem dele uma atividade de significativo grau de complexidade (Amaro et al., 2013).

A instrução normativa nº 3, de 04 de maio 2001, estabelece quatro modalidades de manejo, sendo eles: para fins madeireiros, de uso múltiplo, uso

simplificado e comunitário, atendendo o uso de associações e comunidades tradicionais da região Nordeste (Brasil, 2001).

Além da possibilidade do uso de recursos florestais de forma sustentável, o MFS permite a geração de trabalho e renda para as pessoas que vivem de atividades de extração predatória e ilegal de produtos não madeireiros. De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2017), a conservação dos recursos disponíveis nas florestas nativas se dá através do uso racional.

Mais tarde, com a criação do novo Código Florestal Brasileiro, a extração de produtos florestais não madeireiros passou a ser incluído no MFS, desde que a atividade não descaracterize a cobertura vegetal nativa existente, nem prejudique a função ambiental da área (Brasil, 2012).

A exploração florestal na região Nordeste torna-se preocupante no que diz respeito à questão ambiental, devido a demanda da produção energética, principalmente, de forma ilegal (Ndagijimana et al., 2015).

No bioma Caatinga, os recursos florestais assumem principal papel na economia regional com a produção de lenha (Sampaio, 2010), destacando-se como a segunda maior produção, destinada em casas, comércios e indústrias como fonte energética (Pareyn, 2010). Em 2017, a lenha foi o produto do extrativismo vegetal com maior valor de produção, com valor total de R\$ 254.455.000 (28% do valor total do extrativismo da região nordeste), enquanto o estado do Piauí arrecadou R\$ 198.834 (IBGE, 2017).

Desde 2010 os órgãos estaduais do meio ambiente passaram a serem responsáveis pela atividade de exploração florestal. O estado do Piauí possui a Resolução nº 13, de 07 outubro de 2010, que dispõe sobre todas as diretrizes de elaboração e execução de planos de MFS. O estado conta com 141 planos de manejo cadastrados, em que atualmente quatro estão cancelados, 21 suspensos, 17 em análise e 99 autorizados. Desses autorizados, o sudoeste do Piauí além de englobar a maior área manejada aprovada, também possui grande volume anual com 1.998.986,19 st (Andrade et al., 2019).

4 VOLUMETRIA

O volume é uma expressão usada para quantificar o espaço ocupado por uma ou mais árvores em um povoamento, parcela ou talhão (SFB, 2018). Na maioria dos casos, o volume é a principal variável de um inventário florestal.

O volume observado da árvore pode ser obtido pela cubagem rigorosa, que consiste em quantificar volume de partes do tronco medindo-se diâmetros a diferentes alturas para em seguida obter o volume total da árvore a partir da soma dos volumes das seções. O volume de cada seção é obtido por fórmulas aproximativas tais como: Smalian, Newton, Huber e FAO (Campos & Leite, 2017).

A quantificação do volume de madeira é de suma importância no controle do estoque e crescimento, planejamento da produção, elaboração de plano de manejo, comercialização, transporte e adequação dos equipamentos processadores de madeira (Barros et al., 2008). Sua determinação direta é dispendiosa, exigindo cubagem rigorosa por métodos destrutivos, ou mesmo, procedimentos que demandam tempo e recursos (Sanquetta et al., 2014).

A quantificação da madeira assume papel importante tanto para os produtores, como também para os consumidores, pois além de garantir o controle da sustentabilidade, o conhecimento da dimensão volumétrica permite um pagamento justo de determinada produção (Barros et al., 2008).

Em florestas nativas há uma diferença significativa nas estimativas volumétricas, podendo ser influenciado por inúmeros fatores, como por exemplo, a disponibilidade de recursos limitantes ao crescimento, causando diferenças até mesmo entre árvores da mesma espécie (Nogueira et al., 2008).

A floresta nativa se caracteriza por ser uma área sem planejamento em seus talhões, pois não recebe fortes influências antrópicas (Soares & Mota, 2017), apresentando uma vegetação heterogênea, com irregularidade na conformação de seus fustes, além da incidência de bifurcações e diâmetros irregulares na mesma espécie (Thaines et al., 2010). Essa heterogeneidade muitas vezes interfere nos resultados de estimativas de volume de madeira, sendo necessário a adoção de metodologias mais acurados.

O uso de equações de volume é geral e indispensável para o planejamento e a execução do manejo florestal, em que muitas vezes se faz necessário obter bases

de dados específicas para proceder ajustes, a fim de contemplar diferentes espécies, regiões e tipos fisionômicos (Tonini & Borges, 2015). O ajuste de modelos volumétricos desenvolvidos especificamente para as áreas de cada plano de manejo florestal garante um resultado mais eficiente, econômico e preciso para a quantificação do volume de determinada floresta (Barros & Silva Junior, 2009).

Outro método usual na estimativa do volume é o fator de forma, que considera a conicidade das árvores, estabelecendo a relação entre o volume de madeira e o volume cilíndrico. No entanto, é um método que pode gerar inconsistências na estimativa volumétrica em florestas nativas, visto fatores como a presença de sapopemas (principalmente em florestas de grande porte) e variação do diâmetro ao longo do fuste ocorrerem com maior frequência.

4.1 Fator de Forma

O fator de forma (f) garante a redução do volume cilíndrico para uma estimativa do volume real da árvore (Finger, 1992). Este fator só pode ser conhecido após a determinação do volume real da árvore, podendo-se empregar para isto qualquer método de cubagem, fornecendo estimativas confiáveis, desde que se controle a tipologia florestal, espécie e classe diamétrica (Figueiredo et al., 2009).

O fator de forma é o método de se estimar volume mais usual na região Nordeste do país (Thaines et al., 2010). De acordo com alguns estudos que utilizaram o fator de forma para estimativa volumétrica, a Caatinga apresenta o valor de 0,9, enquanto o Cerrado apresenta na sua maioria 0,7 (Tabela 1). Não há trabalhos que fornecem informações técnicas dessa natureza para árvores de florestas localizadas em áreas de transição, levando em consideração espécies e classes diamétricas locais.

Um dos entraves ao se trabalhar com regiões com poucos estudos é a utilização do fator de forma correto por região, que em alguns casos, chegam até mesmo a utilizar um único fator para diferentes regiões (Colpini et al., 2009).

Tabela 1 – Valores de Fator de Forma (*f*) encontrados da literatura.

Bioma	Área de Estudo	<i>f</i>	Autores
Caatinga	Rio Grande do Norte	0,9	Zakia et al. (1988)
Caatinga	Nordeste	0,9	Pareyn et al. (2015)
Caatinga	Paraíba	0,9	Santos et al. (2017)
Cerrado	Mato Grosso	0,7	Colpini et al. (2009)
Cerrado	Pará	0,7	Francez et al. (2010)
Cerrado	Santa Catarina	0,8	Correia et al. (2017)

4.2 Modelagem volumétrica

Modelos matemáticos são empregados amplamente no meio florestal e estudos sobre o assunto são realizados a mais de 200 anos, atingindo grandes progressos referentes à análise quantitativa do crescimento e estoque florestal desde meados do século passado, principalmente nas últimas décadas (Kanga & Kanga, 2004).

Os modelos matemáticos correspondentes às equações volumétricas sempre serão selecionados hierarquicamente, pelo maior valor apresentado do coeficiente de determinação ajustado e menor erro padrão da estimativa (Imaña-Encinas et al., 2009). Essas estimativas são mais precisas quando utilizados modelos volumétricos ajustados por local, região e formação vegetal (Silva et al., 2000).

As análises volumétricas são ferramentas de suma importância para o entendimento de aspectos da ecologia regional (Souza et al., 2016). A quantificação e qualificação do estoque madeireiro das florestas nativas requer métodos eficientes de estimativa do volume comercial, levando-se em consideração a vitalidade, qualidade do fuste e a posição no dossel (Thaines et al., 2010).

Na área das ciências florestais, a estimativa de parâmetros para equações volumétricas sempre foi alvo de estudos, principalmente pela praticidade em se obter dados, gerenciar recursos e reduzir os altos custos com inventários (Canavesi et al., 2010).

A estimativa de volume por meio de equações desenvolvidas diretamente para determinadas regiões mostra-se mais eficazes que equações gerais, permitido uma quantificação de volume de madeira com menores erros. Na Tabela 2 estão presentes alguns modelos volumétricos utilizados em estudo nas regiões de Caatinga e Cerrado (Rezende et al., 2006; Imaña-Encinas et al., 2009; Azevedo et al., 2011; Souza et al., 2016)

Tabela 2 – Modelos volumétricos utilizados para a estimativa do volume.

Modelo	Estrutura matemática	Bioma
1	$v = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$	Cerrado
2	$v = \beta_0 d^{\beta_1} + \varepsilon$	Cerrado
3	$v = \beta_0 (d^2 h) \beta_1 + \varepsilon$	Cerrado
4	$v = \beta_1 * d^2 + \beta_2 * d^{2*} h + \varepsilon$	Cerrado
5	$v = \beta_0 + \beta_1 (d^{2*} h) + \varepsilon$	Cerrado
6	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(d_{0,3m}) + \beta_2 * \ln(h) + \varepsilon$	Caatinga
7	$v = \beta_0 + (d_{0,3m}^{\beta_1}) * (h^{\beta_2}) + \varepsilon$	Caatinga
8	$\ln v_i = \pi + \beta \ln d_{1,70} + \dots + \varepsilon_n \ln d_{1,7} + \varepsilon$	Caatinga
9	$v = \beta_0 + \beta_1 * d^2 + \varepsilon$	Caatinga
10	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(d^{2*} h) + \varepsilon$	Caatinga
11	$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(d) + \beta_2 \ln(h) + \varepsilon$	Caatinga e Cerrado

Em que: v = volume (m^3); d = diâmetro medido a 1,3 m do solo (m); h = altura total da árvore (m); β_i = parâmetro de regressão a serem estimados; \ln = logaritmo neperiano; $d_{1,7}$ = diâmetro medido a 1,7 m do solo (m); ε = erro (m^3).

Em estudo realizado no Cerrado de Goiás, Imanã-Encinas et al. (2009) realizaram um levantamento dos principais modelos, aos quais submeteram a ajustes a fim de compreender qual modelo apresentaria estimativas mais precisas. No final dos ajustes, esses mesmos autores concluíram que o modelo melhor ajustado foi o proposto por Rezende (modelo 4 da Tabela 2), por apresentarem maior R^2_{aj} e menor desvio padrão da estimativa.

Em região de Caatinga, no estado da Paraíba, Souza et al. (2016) trabalhou com alguns modelos volumétricos, classificando-os quanto ao coeficiente de determinação ajustado, erro padrão residual da estimativa e análise gráfica dos resíduos em porcentagem. Ao final, concluíram que os modelos de Schumacher & Hall e Spurr, na forma logaritimizada (modelo 11 da Tabela 2), mostraram-se melhores, apresentando boas estimativas de volume de fustes da caatinga.

O modelo de Schumacher & Hall também se destaca como melhor ao ser ajustado outras regiões, assim como em outras vegetações (Silva et al., 2009; Araújo et al., 2016; Ferrari et al., 2017). Este modelo possui boa capacidade de estimativa de

volumes de árvores devido ao fato que a equação é oriunda da relação matemática natural entre o volume e as dimensões da árvore. A relação matemática em questão é a mesma usada para estimar o volume de uma árvore por meio do fator de forma, no entanto o expoente do diâmetro da árvore igual a 2 é substituído pelo parâmetro β_1 , o expoente da altura igual a 1 é substituído pelo parâmetro β_2 e o fator de forma (e qualquer transformação entre as unidades usadas) é substituído pelo parâmetro β_0 (Schumacher & Hall, 1933).

Outra metodologia aplicada ao uso de equações volumétricas é a modelagem mista, a qual é uma técnica caracterizada quando o modelo apresenta tanto efeitos aleatórios como fixo, e que dependendo do objetivo, a aplicação pode ser linear ou não linear (Searle, 1987). Os modelos mistos permitem trabalhar com os dados originais sem transformar variáveis para atender as pressuposições básicas corriqueiras nas análises de regressão: independência entre as observações, distribuição aleatória, normal e idêntica dos resíduos com média zero e variância constante (Carvalho, 2013). Esses modelos carregam parâmetros de efeitos fixos comuns a todas as árvores da amostra, enquanto os parâmetros de efeitos aleatórios são específicos para cada árvore individual (Cao & Wang, 2011).

A aplicação de modelagem mistas é relativamente recente na área florestal, ainda sendo possível encontrar trabalhos como os de: Chaves & Carvalho et al. (2014), Gouveia et al. (2015) e Silva et al. (2016). Esses estudos de forma geral, demonstraram a utilização dessa técnica nas interações das variáveis mensuradas nas seções da mesma árvore e entre às árvores do conjunto, a fim de se obter resultado de volumes cada vez mais precisos.

REFERÊNCIAS

- Ab'saber AN. *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. Ateliê Editorial, São Paulo, Brasil, 2003. 160p.
- Aguiar S, Santos IS, Arêdes N, Silva S. Redes-bioma: informação e comunicação para ação sociopolítica em ecorregiões. *Ambiente & Sociedade*, 19:233-252, 2016.
- Almeida AQ, Mello AA, Dória Neto A, Ferraz RC. Relações empíricas entre características dendrométricas da Caatinga brasileira e dados TM Landsat 5. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 49:306-315, 2014.
- Amaro MA, Soares CPB, Souza AL, Leite HG, Silva GF. Estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma floresta estacional semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, 37:02-14, 2013.
- Andrade FN, Lopes JB, Barros RFM, Lopes CGR. Caracterização dos planos de manejo florestal no estado do Piauí. *Ciência Florestal*, 29:243-254, 2019.
- Andrae FH, Schneider PR, Durlo MA. Importância do manejo de florestas nativas para a renda da propriedade e abastecimento do mercado madeireiro. *Ciência florestal*, 28:1293-1302, 2018.
- Araújo TA, Mota FCM, Pereira RS, Miguel EP, Lustosa Júnior IM. Técnicas de modelagem florestal empregadas na estimativa volumétrica de eucalipto. *Enciclopédia Biosfera*, 13:1011-1026, 2016.
- Azevedo GB, Sousa GTO, Barreto PAB, Conceição Júnior V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhada no sudoeste da Bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31:309-318, 2011.
- Barros MV, Finger CAG, Schneider PR, Santini ELL. Fator de Cubicação para torretes de *Eucalyptus grandis* e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente. *Ciência Florestal*, 18:109-119, 2008.
- Barros PLC, Silva Júnior AT. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapu, Oeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental. *Revista de Ciências Agrárias*, 51:115-126, 2009.
- Brasil. Constituição da República Federativa do Brasil. *Decreto nº 5.975, de 30 de novembro de 2006*. Diário Oficial, Brasília, Brasil, 30 de novembro de 2006.

- Brasil. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Instrução Normativa nº 03 de 04 de maio de 2001*. Diário Oficial, Brasília, Brasil, 03 de maio de 2001. Disponível em: <http://www.mp.gov.br/nat_sucroalcooleiro/Documentos/legislacao/Geral/florestas/flo6.pdf>. Acesso em 23 de junho de 2019.
- Brasil. *Lei nº Lei 12.651 de 25 de maio de 2012*. Diário Oficial, Brasília, Brasil, 25 de maio de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm>. Acesso em 24 de junho de 2019.
- Brasil. Ministério da Agricultura. *Levantamento exploratório/reconhecimento de solos do Estado da Paraíba*. SUDENE/DRN, Rio de Janeiro, Brasil, 1972. 689 p.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. *Balanço energético nacional - BEN*. MME, Brasília, Brasil, 2017. 296 p.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Caatinga*. 2019a. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>>. Acesso em 19 de junho de 2019.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Cerrado*. 2019b. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>>. Acesso em 19 de junho de 2019.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA – Monitoramento do bioma Cerrado 2008-2009*. MMA, Brasília, Brasil, 2011. 65 p.
- Campos JCC, Leite HG. (5 ed.) *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. UFV, Viçosa, Brasil, 2017. 636 p.
- Canavesi V, Ponzoni FJ, Valeriano MM. Estimativa de volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. *Revista Árvore*, 34:539-549, 2010.
- Cao QV, Wang J. Calibrating fixed and mixed effects taper equations. *Forest Ecology and Management*, 262:671-673, 2011.
- Carvalho & Chaves SP, Rodriguez LCE, Calegario N, Savian TV, Lima MF, Silva CA, Mendonça AR, Nicoletti MF. Modelagem não linear mista para descrever o afilamento de árvores clonais de *Eucalyptus* sp. *Scientia Forestalis*, 42:605-614, 2014.

- Carvalho SPC. *Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de Eucalyptus sp.* 104f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- Castro AAJF. Cerrados do Brasil e do Nordeste: produção, hoje, deve também incluir manutenção da biodiversidade. In: Benjamin AH, Sícoli JMC. *Agricultura e Meio ambiente*. IMESP, São Paulo, Brasil, 2000. p.79-87.
- Colpini C, Travagini DP, Soares TS, Silva VSM. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem, de casca de árvores individuais em uma floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. *Acta Amazônica*, 39:97-104, 2009.
- Correia J, Fantini A, Piazza G. Equações Volumétricas e Fator de Forma e de Casca para Florestas Secundárias do Litoral de Santa Catarina. *Floresta e Ambiente*, 24:2-12, 2017.
- Dansereau P. Introdução à biogeografia. *Revista Brasileira de Geografia*, 11:3-92, 1949.
- Eiten G. The cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review*, 38:201-341, 1972.
- Ferrari LS, Nakajima N, Silva AS, Ansolin RD, Moreira D, Ciarnoschi L, Kasprzak LFF. Equações de volume para condução da regeneração natural de *Pinus elliottii* Engelm. *Revista Espacios*, 38:19-30, 2017.
- Figueiredo EO, Schroeder R, Papa DA. *Fatores de forma para 20 espécies florestais comerciais da Amazônia*. EMBRAPA, Rio Branco, Brasil, 2009. 4 p.
- Finger CAG. *Fundamentos de Biometria Florestal*. UFSM/CEPEF, Santa Maria, Brasil, 1992. 269 p.
- Francez LMB, Souza DV, Takehana CLI, Barros PLC. *Manual para análise de inventário florestal e equações de volume em projetos de manejo florestal sustentável – PMFS*. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Belém, Brasil, 2010. 66 p.
- Galvncio JD, Badarau MS, Barbosa VV, Freire FJ, Freire MBGS, Souza WM. Avaliação do estágio de regeneração do bioma caatinga na microrregião do Araripe, com sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9:985-996, 2016.

- Gariglio MA, Sampaio EVSB, Cestaro LA, Kageyama PY. *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga*. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, Brasil, 2010. 368 p.
- Giulietti AM, Bocage Neta AL, Castro AAJF, Virgínio JF, Sampaio EVSB, Gamarra-Rojas CFL, Queiroz LP, Figueiredo MA, Rodal MJN, Barbosa MRV, Harley RM. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga – Parte II. In: Silva JMC, Tabarelli M, Fonseca MT, Lins LV. *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para conservação*. Ministério do Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasília, Brasil, 2003. p.48-131.
- Goedert WJ, Wagner E, Barcellos AO. Savanas tropicais: dimensão, histórico e perspectivas. In: Guillén RF, Camarasa JM. (3 ed.) *Encyclopedia of the Biosphere*. Gale Group, Detroit, Estados Unidos, 2000. p. 48-77.
- Gouveia JF, Silva JAA, Ferreira RLC, Gadelha FHL, Lima Filho LMA. Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no polo gesseiro do Araripe, Pernambuco. *Floresta*, 45:587-598, 2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2 ed.) *Manual técnico da vegetação brasileira*. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil, 2012. 271 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Biomas do Brasil*. 2004. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/vegetacao.html>>. Acesso em 14 de setembro de 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura-PEVS. In: IBGE. (3 ed.) *Pesquisas agropecuárias*. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil, 2018. p. 35-43.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura*. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>>. Acesso em 19 de agosto de 2019.
- Imaña-Encinas J, Santana OA, Paula JE, Imaña CR. Equações de volume de madeira para o Cerrado de Planaltina de Goiás. *Floresta*, 39:107-116, 2009.

- Kanga A, Kanga J. Yield Tables, Forecasting, Modeling and Simulation. In: Burley J, Evans J, Youngquest JA. *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier, Spain, 2004. p. 580-586.
- Klink CA, Machado RB. A conservação do Cerrado brasileiro. *Megadiversidade*, 1:148-155, 2005.
- Lehmann CER, Ratnam J, Hutley LB. Which of these continents is not like the other? comparisons of tropical savanna systems: key questions and challenges. *New Phytologist*, 181:508-511, 2009.
- Lima JEFW. Situação e perspectivas sobre as águas do Cerrado. *Ciência e Cultura*, 63:27-29, 2011.
- Loiola MIB, Roque AA, Oliveira AC. Caatinga: Vegetação do semiárido brasileiro. *Ecologia*, 4:14-19, 2012.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GAB, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403:853-858, 2000.
- Ndagijimana C, Pareyn FGC, Riegelhaupt E. Uso do solo e desmatamento da caatinga: um estudo de caso na Paraíba e no Ceará-Brasil. In: Pareyn F, Vieira JL, Gariglio MA. (2 ed.) *Estatística Florestal da Caatinga*. Associação Plantas do Nordeste, Recife, Brasil, 2015. p. 18-29.
- Nogueira EM, Fearnside PM, Nelson BW, Barbosa RI, Keizer EWH. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, 256:1853-1867, 2008.
- Oliveira TM, Alves AR, Amaral GC, Almeida KNS, Souza KB, Aguiar AS, Araújo EF, Farias SGG. Análise da estrutura vegetacional em uma área de transição Cerrado-Caatinga no município de Bom Jesus-PI. *Scientia Plena*, 8:1-5, 2012.
- Pareyn FGC, Pereira WE, Salcedo IH, Riegelhaupt EM, Gomes EC, Cruz-Filho JLV. A influência da precipitação sobre o crescimento e os ciclos de corte da caatinga manejada – uma primeira aproximação. *Estatística Florestal da Caatinga*, 2:30-39, 2015.
- Pareyn FGC. Os recursos florestais nativos e a sua gestão no estado de Pernambuco – o papel do manejo florestal sustentável. In: Gariglio MA, Sampaio EVSB, Cestaro

- LA, Kageyama PY. *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga*. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, Brasil, 2010. p. 99-112.
- Pereira BAS, Venturoli F, Carvalho FA. Florestas estacionais no cerrado: uma visão geral. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41:446-455, 2011.
- Rezende AV, Vale AT, Sanquetta CR, Figueiredo Filho A, Felfili JM. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. *Scientia Forestalis*, 71:65-76, 2006.
- Ribeiro JF, Walter BMT. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF. *Cerrado: ecologia e flora*. Embrapa Cerrados, Planaltina, Brasil, 2008. p.151 -212.
- Rodrigues FS, Prudente ALC. The snake assemblage (Squamata: Serpentes) of a Cerrado-Caatinga transition área in Castelo do Piauí, state of Piauí, Brazil. *Zoologia*, 28:440-448, 2011.
- Sampaio EVS, Características e potencialidades. In: GARIGLIO MA, et al. (Orgs.) *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga*. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 29:42, 2010.
- Sampaio EVSB, Andrade-Lima D, Gomes MAF. O gradiente vegetacional das Caatingas e áreas anexas. *Revista Brasileira de Botânica*, 4:27-30, 1981.
- Sampaio Y, Batista, JEM. Desenvolvimento regional e pressões antrópicas no bioma Caatinga. In: Silva JMC, Tabarelli M, Fonseca MT, Lins LV. *Desenvolvimento regional e pressões antrópicas no bioma caatinga e sua biodiversidade: áreas e ações prioritárias para a conservação*. MMA/UFPE, Brasília, Brasil, 2004. p. 124-311.
- Sano EE, Rosa R, Brito JL, Ferreira GL. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166:113-114, 2010.
- Sanquetta CR, Watzlawick LF, Côrte APD. *Inventários Florestais: Planejamento e Execução*. Ed. 3, Mult-graphic, Curitiba, Brasil, 2014. 270 p.
- Santos WS, Henriques IGN, Santos WS, Ramos GG, Vasconcelos GS, Vasconcelo ADM. Análise florística-fitosociológica e potencial madeireiro em área de caatinga submetida a manejo florestal. *Agropecuária Científica no Semiárido*, 13:203-211, 2017.

- Schumacher FX, Hall FS. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47: 719-734, 1993.
- Searle, SR. *Linear models for unbalanced data*. New York: John Wiley, 1987. 536p.
- SFB. Serviço Florestal Brasileiro. *Estoque das florestas*. 2018. Disponível em: <<http://snif.florestal.gov.br/pt-br/estoques-das-florestas>>. Acesso em 20 de junho de 2019.
- SFB. Serviço Florestal Brasileiro. *Perguntas sobre o manejo comunitário*. 2017. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/component/content/article/68-fomento-florestal/475-perguntas-frequentes-sobre-o-manejo-florestal-comunitario?Itemid=>>>. Acesso em 23 de junho de 2019.
- Silva EM, Santana AC. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. *Revista Ceres*, 61:631-636, 2014.
- Silva JAA, Machado SA, Meunier IMJ, Ferreira RLC. Modelagem volumétrica de *Pinus elliottii* Engelm., no Planalto do estado de Santa Catarina. *Revista Árvore*, 24:91-96, 2000.
- Silva JAA, Rocha KD, Ferreira RLC, Tevares JA. Modelagem do crescimento volumétrico de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) no polo gesseiro do Araripe-PE. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, Recife, vols. 13/14, p.173-190, 2016/2017.
- Silva LF, Ferreira GL, Santos ACA, Leite HG, Silva MP. Equações hipsométricas volumétricas e de crescimento para *Khaya ivorensis* plantada em Pirapora. *Revista Floresta e Ambiente*, 23:362-368, 2016.
- Silva LR, Sano EE. Análise das imagens do satélite RapidEye para discriminação da cobertura vegetal do bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68:1269-1283, 2016.
- Silva MLM, Binoti DHB, Gleriani JM, Leite HG. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvore de eucalipto. *Revista Árvore*, 33:1133-1139, 2009.
- Soares MVG, Mota AA. mapeamento do risco à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no município Chapecó (SC). *Águas Subterrâneas*, 31:299-309, 2017.

- Souza PF, Silva JA, Lucena DS, Santos WS, Henriques IGN, Lucena MFA, Souza AD. Estudos fitossociológicos e dendrométricos em um fragmento de caatinga, São José de espinharas-PB. *Ciência Florestal*, 26:1317-1330, 2016
- Thaines F, Braz EM, Mattos PP, Thaines AAR. Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30:283-289, 2010.
- Tonini H, Borges RA. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35:111-117, 2015.
- WWF Brasil. *De pé o Cerrado vale mais: Salve o Cerrado*. 2019a. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/cerrado/salveocerrado/>. Acesso em 24 de junho de 2019.
- WWF Brasil. *Zonas de Transição*. 2019ba. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/biomas/bioma_transicao/>. Acesso em 21 de junho de 2019.
- Zakia MJB, Pareyn FGC, Riegelhaupt E. Equações de Peso e Volume para oito Espécies Lenhosas Nativas do Seridó-RN. In: *Plano de Manejo Florestal para a Região do Seridó-RN*. PNUD/FAO/IBAMA/, Natal, Brasil, 1982.

CAPÍTULO 2

Estratégias de estimativa de volume de madeira para árvores de área de transição Caatinga/Cerrado

Artigo segundo as normas do periódico *Anais da Academia Brasileira de Ciências*

ÁREA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Estratégias de estimativa de volume de madeira para árvores de área de transição Caatinga/Cerrado

Palavras-chave: Equações volumétricas; Fator de forma; Floresta nativa; Inventário florestal

Resumo: O trabalho objetivou avaliar estratégias de estimativas de volume de madeira de árvores por meio de fator de forma e aplicação de modelos volumétricos ajustados de forma tradicional e mista em área de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado. Foram cubadas de forma destrutiva e não destrutiva um total de 351 árvores na microrregião piauiense do Alto Médio Gurguéia. Em cada árvore foram mensurados dados de altura total, diâmetro a 1,3 m da altura do solo, volume do fuste, volume total e identificação da espécie botânica. Afim de avaliar possíveis diferenças nas estimativas de volume, foram aplicados as estratégias: E1 - fator de forma (f) médio; E2 - f por espécie; E3 - f por classe diamétrica; E4 - f baseado em mínimos quadrados (regressão linear); E5 e E6 - f da literatura para Caatinga e Cerrado; E7 - equação volumétrica de Schumacher e Hall; E8 a E21- equação volumétrica ajustada por técnicas mistas (considerando espécie e classe diamétrica como efeito aleatório, testando todas combinações de efeitos aleatórios nos parâmetros fixos dos modelos); E22 e E23 - equações volumétricas obtidas na literatura para Caatinga e Cerrado. Entre todas as estratégias, a

utilização da modelagem mista utilizando a espécie como fator aleatório em todos os parâmetros do modelo (E9) resultou num menor erro percentual absoluto médio (15,31%). Contudo, o uso dos parâmetros fixos do modelo misto, usando a classe diamétrica como efeito aleatório apenas no intercepto do modelo (E19) também oferece uma boa estratégia de ajuste, com baixo valor de erro percentual absoluto médio (15,39%), permitindo uma melhor aplicabilidade em outras bases de dados.

INTRODUÇÃO

O Piauí apresenta em seu território a transição dos biomas Caatinga e Cerrado. O primeiro bioma é exclusivamente brasileiro, enquanto o segundo é um dos *hotspots* mundiais para conservação da biodiversidade mundial (Myers et al. 2000). Segundo caracterização do Ministério do Meio Ambiente (Brasil 2019a, Brasil 2019b), o estado do Piauí é formado por 63% de bioma Caatinga e 37% de Cerrado, destacando-se por ser o estado nordestino com maior ocupação desta última vegetação. Além desses biomas e das áreas de transições, o estado também é formado por áreas de transições que sofrem domínio de outras vegetações, como o Amazônico e Planalto Central (Amaral et al. 2012).

A produção de madeira para lenha no Brasil foi de cerca de 77 milhões de m³ em 2017, sendo 28% oriundo de florestas nativas, enquanto para carvão vegetal a produção nacional deste mesmo ano alcançou 5,3 milhões de toneladas, sendo 8% de origem do extrativismo brasileiro (IBGE 2017). No Brasil, estima-se que aproximadamente 21% do valor arrecadado na produção nacional de lenha seja proveniente da região Nordeste (IBGE 2017), e o surgimento de indústrias, além do crescimento populacional nessas regiões, tem reduzido a biodiversidade dos biomas presentes na região devido ao aumento da exploração e comercialização ilegal da vegetação lenhosa (Santos et al. 2017).

A necessidade de empregar estratégias que garantam quantificações volumétricas confiáveis, permitindo que o manejo dos biomas ocorra de forma sustentável, colabora para o surgimento de pesquisas que visam a quantificação dessa matéria-prima nas regiões de Caatinga e Cerrado por meio de técnicas tradicionais, como a adoção de fator de forma, assim como a aplicação de modelos volumétricos ajustados para as regiões (Sampaio e Silva 2005, Santos et al. 2006, Thaines et al. 2010, Leite et al. 2015, Miranda et al. 2015, Pareyn et al. 2015, Tenzin et al. 2016, Santos et al. 2017, Pertille et al. 2018).

O conhecimento das características da floresta, não somente o porte, mas também as suas espécies botânicas e distribuição diamétrica, podem ser parâmetros que possibilitem a redução de erros nas estimativas volumétricas. Diante disso, o presente trabalho objetiva avaliar estratégias para estimativa do volume de madeira de árvores em uma área de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado, no sul do Piauí, comparando o uso de fator de forma ajustado calculado por diferentes metodologias e aplicação de equações volumétricas ajustadas pelo método tradicional e misto, bem como uso de fator de forma e equações provenientes da literatura.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

Os dados foram coletados em duas áreas localizadas na microrregião piauiense do Alto Médio Gurguéia (Figura 1). A primeira é a Fazenda Aracajú, que possui uma área de 5.248,80 hectares, localizada no município de Cristino Castro (08° 49' 04" S, 44° 13' 26" W e altitude 325 m). O local é destinado para extração de madeira para energia, seguindo um plano de manejo florestal sustentável. A segunda área de coleta foi em mata nativa localizada em torno do município de Eliseu Martins (08° 10' 55" S, 43° 47' 31" W e altitude 460 m).

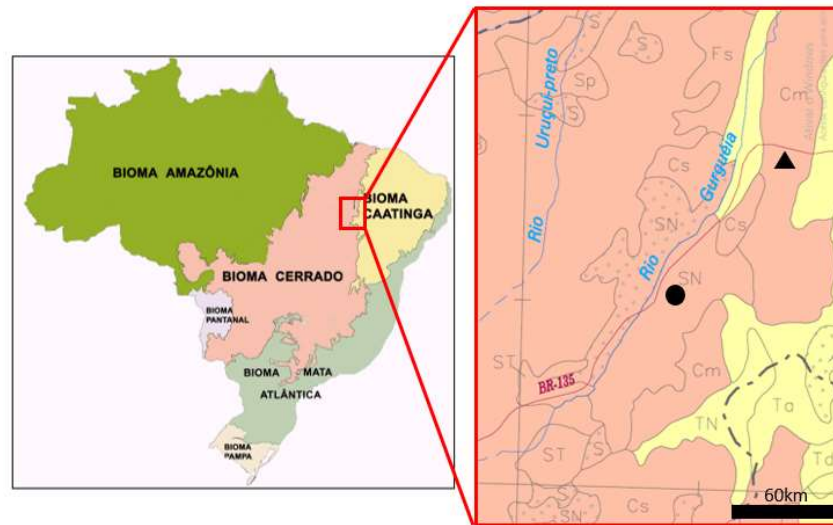


Figura 1- Localização dos biomas brasileiros (esquerda) e das áreas de estudo (direita), sendo a área de Cristino Castro representada por um círculo e Eliseu Martins por um triângulo.

Fonte: Adaptado de IBGE (2004).

As duas localidades possuem clima Aw - tropical com inverno seco (Alvares et al. 2013). De acordo com o mapa de biomas do IBGE (2004), a área de estudo localizada em Cristino Castro é composta pelo tipo de vegetação SN (Contato Savana/Floresta Estacional) e a área de Eliseu Martins é composta pelo tipo de vegetação Cm (Floresta Estacional Decidual Montana). Ambas as áreas estão localizadas no bioma Cerrado, porém margeadas pela Caatinga (Figura 1).

COLETA DE DADOS

Foram cubadas de forma destrutiva e não destrutiva um total de 351 árvores, sendo 158 árvores cubadas de forma destrutiva (direta) e 193 de forma não destrutiva (indireta). As árvores selecionadas para cubagem não destrutiva foram submetidas a uma cubagem rigorosa

com o auxílio do dendrômetro óptico Criterion RD 1000 acoplado ao hipsômetro TruPulse 200. A confiabilidade destes aparelhos na medição de diâmetros a diferentes alturas já foi comprovada em estudos anteriores, conforme apresentado por Oliveira et al. (2018).

Todas as árvores selecionadas para cubagem tiveram o diâmetro a 1,3 metros do solo (d) e altura total (h) mensurados. No caso da cubagem indireta os diâmetros localizados até 2 m de altura foram simultaneamente conferidos de forma direta com o uso de uma suta, no intuito de reduzir os erros ocorridos na medição com dendrômetro, medindo-se apenas o fuste principal, sem a medição dos galhos. Os diâmetros foram medidos em intervalos de aproximadamente 1 m entre si (com maior intensidade de medições na base da árvore), sendo que a distância entre medições foi flexibilizada em casos de falta de visibilidade.

Na cubagem destrutiva, após o corte da árvore, o fuste principal foi dividido em secções de 1 m de altura com uso de trena e os diâmetros do fuste principal foram medidos com uma suta realizando a medição direta. O fuste principal foi medido até o diâmetro mínimo de 3 cm, assim como a altura e o diâmetro do toco também foram medidos. Das 158 árvores cubadas destrutivamente, 29 árvores tiveram além do fuste principal todos seus galhos medidos (Tabela I), utilizando trena para obter seu comprimento e suta para medição dos diâmetros a cada um metro.

As árvores pertencem a diferentes espécies botânicas, portanto considerou descrever por espécie apenas aquelas que possuíam mais de dez indivíduos, sendo: *Aspidosperma pyrifolium* (10), *Brosimum gaudichaudii* (14), *Callisthene minor* (15), *Campomanesia xanthocarpa* (24), *Cenostigma macrophyllum* (22), *Combretum glaucocarpum* (29), *Diptychandra aurantiaca* (11), *Hymenaea martiana* (14), *Myrcia tomentosa* (14), *Pityrocarpa moniliformis* (45), *Swartzia psilonema* (11) e *Terminalia argentea* (13), as demais espécies (31 ao total) foram nominadas unicamente como miscelânea (127).

TABELA I

Análise descritiva da base de dados destrutiva, destrutiva com informação de galhos e não destrutiva, contendo informação de diâmetro medido a 1,3 m do solo (d), altura total (h), volume do fuste (v_f), fator de forma (f), volume de galhos (v_g) e desvio padrão (dp).

Variável	Destrutiva (n=129)	Destrutiva+Galhos (n=29)	Não destrutiva (n=193)
	Média ± dp Intervalo	Média ± dp Intervalo	Média ± dp Intervalo
d (cm)	7,70 ± 5,14 3,0 - 40,8	11,62 ± 4,27 3,9 - 18,3	8,44 ± 6,36 2,3 - 34,2
h (m)	6,75 ± 2,03 2,0 - 12,42	9,61 ± 2,50 5,2 - 12,8	5,56 ± 2,06 2,0 - 12,7
v_f (m ³)	0,03 ± 0,06 0,00 - 0,47	0,04 ± 0,03 0,00 - 0,12	0,04 ± 0,07 0,00 - 0,58
f	0,83 ± 0,21 0,40 - 1,49	0,58 ± 0,10 0,42 - 0,72	0,79 ± 0,21 0,34 - 1,61
v_g (m ³)	-	0,01 ± 0,01 0,00 - 0,04	-

As árvores cubadas foram selecionadas aleatoriamente na área em função da distribuição das classes de diâmetro (CLD) e classes de altura total, com amplitude das classes de 5 cm e 2 m, respectivamente (Tabela II).

TABELA II

Distribuição de frequência de árvores cubadas em área de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado nas diferentes classes de diâmetro (CLD) e altura.

CLD (cm)	Classe de altura (m)						Total
	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	
2-7	44	97	58	1	1	0	201
7-12	1	26	33	23	0	1	84

Continua...

TABELA II

Cont.

CLD (cm)	Classe de altura (m)						Total
	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	
12-17	0	2	9	14	9	3	37
17-22	0	1	3	5	6	0	15
22-27	0	0	4	1	2	1	8
27-32	0	0	1	1	1	0	3
32-37	0	0	0	0	1	1	2
37-42	0	0	0	0	1	0	1
Total	45	126	108	45	21	6	351

QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE MADEIRA

O volume de fuste e galhos foram calculados seguindo a metodologia de Smalian (Equação 1). O volume da ponta (v_p) do fuste principal dos galhos foram obtidos pela fórmula do cone (Equação 2), enquanto o volume do toco (v_t) se deu pela multiplicação da área seccional da base pela altura do toco (Equação 3).

$$v = \frac{g_1 + g_2}{2} * l \quad (1)$$

$$v_p = g * l * \frac{1}{3} \quad (2)$$

$$v_t = g * l \quad (3)$$

Em que: v = volume da secção de madeira (m^3); g_1 = área seccional 1 (m^2); g_2 = área seccional 2 (m^2) e l = comprimento da tora (m).

A variável avaliada neste estudo foi o volume total de madeira acima do solo, considerando o somatório de volume do toco, fuste principal, galhos e ponta. Para estimar o volume total acima do solo (fuste principal + galhos + toco + ponta) utilizando a informação do volume do fuste, foi quantificado o percentual de galhos em relação ao volume do fuste principal usando a informação da base de dados galhos (Tabela I). Foi testada a possibilidade de estimar a variação do percentual do volume de galhos em relação ao fuste principal por meio do diâmetro e espécie das 29 árvores que tiveram cubagem completa.

ANÁLISE DE DADOS

Afim de testar as diferenças entre os métodos de estimar o volume das árvores, foram testados as seguintes estratégias de estimar volume: E1 - fator de forma médio; E2 - fator de forma por espécie; E3 – fator de forma por classe diamétrica; E4 - fator de forma ajustado por mínimos quadrados; E5 - fator de forma da literatura para Caatinga; E6 - fator de forma da literatura para Cerrado; E7 - equação volumétrica de Schumacher e Hall pelo método dos mínimos quadrados; E8 a E21 - equações volumétricas de Schumacher e Hall ajustadas por técnicas mistas (utilizando a espécie e classe diamétrica como efeito aleatório, testando diferentes configurações de inserção do efeito aleatório nos parâmetros fixos do modelo); E22 - equação volumétrica obtida na literatura para Caatinga e E23: equação volumétrica obtida na literatura para Cerrado.

O fator de forma médio (E1) foi calculado pela razão do volume real obtido por cubagem rigorosa pelo volume do cilindro (Equação 4).

$$f = \frac{vr}{\left(\frac{d^2 * \pi}{40000}\right) * h} \quad (4)$$

Em que: f = fator de forma; v_r = volume real (m^3); d = diâmetro medido a 1,3 m de altura do solo (cm) e h = altura total (m).

A partir da classificação botânica de cada árvore, foi atribuído um fator de forma específico para cada espécie (E2), e as espécies com menos de 10 árvores foram agrupadas e denominadas de miscelânea, com um fator de forma único.

O fator de forma por classe diamétrica (E3) foi determinado pela distribuição diamétrica das árvores amostradas, definindo quatro classes de diâmetro: classe 1 ($<2 \leq 12$ cm), classe 2 ($<12 \leq 22$ cm), classe 3 ($<22 \leq 32$ cm) e classe 4 ($<32 \leq 42$ cm). Metodologia semelhante foi adotada por Schröder et al. (2015), que separaram seu banco de dados em cinco classes diamétricas.

A estimativa do fator de forma baseado nos mínimos quadrados (E4) foi obtida do resultado do ajuste de uma regressão linear simples, partindo da origem, entre o volume cilíndrico e volume cubado, conforme sugerido por Magalhães e Mate (2018).

Também foram avaliados fatores de forma e equações volumétricas oriundos da literatura para estimar o volume das árvores. Devido a área de estudo estar situada em uma zona de transição entre dois biomas, foi testado valores recomendados tanto para o bioma Caatinga (E5) quanto para o Cerrado (E6). Vários autores determinaram ou aplicaram em seus estudos o fator de forma 0,9 para Caatinga (Zakia et al. 1988; Pareyn et al. 2015; Santos et al. 2017), enquanto para o Cerrado valores menores como o 0,7, foram empregados (Colpini et al. 2009; Miranda et al. 2015).

O E7 consistiu em ajustar o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) na sua forma linear, usando toda a base de dados, obtendo uma equação geral para estimativa de volume. O E8 a E21 utilizaram técnicas de modelagem mista para gerar as equações volumétricas testando duas fontes para os termos aleatórios: espécie (E8 a 14) e classe de

diâmetro (E15 a 21). Foram usadas as mesmas estratégias dos tratamentos E2 e E3 para o computo das espécies e das classes diamétricas para serem usadas como fatores aleatórios dos modelos mistos. Para selecionar quais parâmetros do modelo terão o efeito aleatório, foram realizados testes com o modelo completo (efeito aleatório nos 3 parâmetros, conforme demonstrado na Equação 5), combinações aleatórias em 2 parâmetros e efeito aleatório em apenas 1 parâmetro.

A descrição das estratégias 8 a 21 quanto a fontes do termo aleatório (espécie e CLD) e quais parâmetros receberam o efeito aleatório pode ser encontrado na Tabela IV. Para seleção dos parâmetros, foi utilizada a equação que apresentou menor erro percentual absoluto médio, diferenciado entre estimativas gerais e específicas, onde a primeira usa apenas os parâmetros fixos do ajuste e a segunda os parâmetros específicos dos fatores aleatórios (espécie ou classe diamétrica).

$$\ln(v_i) = (\beta_0 + b_{0j}) + (\beta_1 + b_{1j}) * \ln(d) + (\beta_2 + b_{2j}) * \ln(h) + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Em que: \ln = logaritmo neperiano; β_0 , β_1 , β_2 = parâmetros fixos do modelo; b_{0j} , b_{1j} e b_{2j} = termo aleatório adicionando aos parâmetros fixos; ε_{ij} = erro residual; i e j = subscrito para representar a árvore i dentro do efeito aleatório j ; b_{0j} , b_{1j} , b_{2j} e ε_{ij} = possuem distribuição normal, independentes, com média zero e variância constante.

Nas estratégias E22 e E23 a equação desenvolvida no modelo de Schumacher e Hall foi aplicada a estudos em regiões de Caatinga e Cerrado foram obtidas em Rufini et al. (2010), Souza et al. (2016), respectivamente.

A seleção da melhor estratégia se deu pelo menor valor do erro médio percentual modular (*MAPE-mean absolute percent error*), conforme sugerido por Sileshi (2014). O

MAPE (Equação 6) possui propriedades estatísticas conhecidas e vastamente utilizadas em previsões e comparações de modelos em ecologia e avaliação ambiental (Yao et al. 2013).

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\text{Mo} - \text{Mp}|}{\text{Mo}} \quad (6)$$

Em que: n = número de observações (351); Mo = valor observado e Mp = valor estimado.

Para confirmar que as diferentes metodologias de estimativa de volume não apresentaram tendências indesejadas nas estimativas, foi efetuado a análise gráfica dos resíduos, plotando os valores estimados pelos resíduos absolutos (m³).

Para análise dos dados, foi utilizado o pacote nlme do software estatístico R versão 3.4.3 (R Core Team 2019), com auxílio do software Microsoft Excel.

RESULTADOS

O volume dos galhos em relação ao volume do fuste principal não apresentou variação entre espécie, classe diamétrica, altura ou diâmetro. Foi verificado que o volume de galhos representa 18% do volume do fuste total nas 29 árvores amostradas. Sendo assim, multiplicou-se os valores de volume de fuste (base destrutiva e não destrutiva da Tabela I) por 1,18 para se obter o volume total de madeira acima do solo. Esse valor estimado de volume total foi utilizado na aplicação de todas as estratégias de estimativa de volume de indivíduos que não tiveram a porção galhos amostrados.

A Tabela III apresenta os resultados obtidos para as estratégias 1 a 6, utilizando os diferentes fatores de forma aplicados nas 351 árvores da base de dados, com seus respectivos valores de MAPE.

TABELA III

Estimativa do volume utilizando fatores de forma, com informações do desvio padrão (dp) e erro percentual absoluto médio (MAPE).

Estratégia	Variável	Fator de Forma \pm dp	MAPE (%)
E1 – Geral	-	0,80 \pm 0,21	22,26
	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	0,84 \pm 0,90	
	<i>Brosimum gaudichaudii</i>	0,80 \pm 0,19	
	<i>Callisthene minor</i>	0,94 \pm 0,27	
	<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	0,80 \pm 0,17	
	<i>Cenostigma macrophyllum</i>	0,82 \pm 0,28	
	<i>Combretum glaucocarpum</i>	0,80 \pm 0,21	
E2 – Espécie	<i>Diptychandra aurantiaca</i>	0,78 \pm 0,21	21,84
	<i>Hymenaea martiana</i>	0,83 \pm 0,23	
	<i>Myrcia tomentosa</i>	0,84 \pm 0,32	
	<i>Pityrocarpa moniliformis</i>	0,76 \pm 0,17	
	<i>Swartzia psilonema</i>	0,71 \pm 0,15	
	<i>Terminalia argentea</i>	0,73 \pm 0,28	
	Miscelânea	0,80 \pm 0,19	
	2 – 12 cm	0,84 \pm 0,20	
E3 – CLD	12 – 22 cm	0,62 \pm 0,13	18,95
	22 – 32 cm	0,56 \pm 0,13	
	32 – 42 cm	0,50 \pm 0,09	

Continua...

TABELA III

Cont...

Estratégia	Variável	Fator de Forma \pm dp	MAPE (%)
E4 – MQ	-	0,53	30,90
E5 – Caatinga	-	0,9	28,30
E6 – Cerrado	-	0,7	21,02

A Tabela IV apresenta os resultados das estratégias E7 a E23, utilizando os modelos volumétricos aplicado nas 351 árvores amostradas, com seus respectivos MAPE (geral e específico). Não foi possível realizar o ajuste da estratégia E16 devido a não convergência dos parâmetros do modelo (efeito aleatório das classes diamétricas nos parâmetros β_0 e β_1). Na Tabela V são apresentados os coeficientes específicos para as estratégias 9 e 15 que apresentaram menores valores de MAPE utilizando os parâmetros específicos aplicados na espécie e CLD (destacados em negrito na Tabela IV).

TABELA IV

Estimativa do volume utilizando fatores fixos nos modelos de mínimos quadrados (T7) e modelos mistos utilizando a classe de diâmetro (E8 a E14) e espécie (E15 a E21) como efeito aleatório nos diferentes parâmetros e valores de erro percentual absoluto médio (MAPE).

Estratégia	Variável	Parâmetros	β_0	β_1	β_2	MAPE	
						Geral (%)	Específico (%)
E7	-	-	-8,95456	1,8778	0,70582	15,96	-
E8	Espécie	$\beta_0+\beta_1+\beta_2$	-8,90118	1,86322	0,70337	16,58	15,34

Continua...

TABELA IV

Cont...

Estratégia	Variável	Parâmetros	β_0	β_1	β_2	MAPE Geral (%)	MAPE Específico (%)
E9		$\beta_0+\beta_1$	-8,89243	1,86678	0,69375	16,55	15,31
E10		$\beta_0+\beta_2$	-8,94685	1,87734	0,70367	16,05	18,93
E11	Espécie	$\beta_1+\beta_2$	-8,94476	1,86837	0,71810	16,33	15,73
E12		β_0	-8,94253	1,87643	0,70285	16,08	15,92
E13		β_1	-8,94687	1,87997	0,70052	16,03	15,92
E14		β_2	-8,94634	1,87714	0,70373	16,05	15,93
E15		$\beta_0+\beta_1+\beta_2$	-8,81244	1,81679	0,72329	18,23	15,79
E16		$\beta_0+\beta_1$	-	-	-	-	-
E17		$\beta_0+\beta_2$	-9,06031	1,91760	0,69847	15,39	15,85
E18	CLD	$\beta_1+\beta_2$	-9,01051	1,86256	0,75147	15,85	15,83
E19		β_0	-9,06013	1,91756	0,69846	15,39	15,85
E20		β_1	-9,01519	1,90434	0,69618	15,47	15,81
E21		β_2	-9,00196	1,90897	0,68430	15,49	15,86
E22	Caatinga	-	-9,59340	2,04417	0,94531	25,54	-
E23	Cerrado	-	-9,68370	2,40491	0,45559	26,75	-

TABELA V

Coeficientes aleatórios para as melhores estratégias de modelagem mista.

Estratégia	Variável	β_0+b_0	β_1+b_1	β_2+b_2
E9 – Espécie	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	-8,85133	1,84399	0,69375
	<i>Brosimum gaudichaudii</i>	-9,08043	1,94991	0,69375
	<i>Callisthene minor</i>	-8,93292	1,88403	0,69375
	<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	-8,94346	1,88618	0,69375
	<i>Cenostigma macrophyllum</i>	-8,74817	1,80978	0,69375
	<i>Combretum glaucocarpum</i>	-9,02749	1,93029	0,69375

Continua...

TABELA V
Cont...

Estratégia	Variável	β_0+b_0	β_1+b_1	β_2+b_2
	<i>Diptychandra aurantiaca</i>	-8,88510	1,87053	0,69375
	<i>Hymenaea martiana</i>	-8,82772	1,84072	0,69375
	<i>Myrcia tomentosa</i>	-8,63462	1,75176	0,69375
	<i>Pityrocarpa moniliformis</i>	-9,18639	2,00558	0,69375
	<i>Swartzia psilonema</i>	-9,02326	1,92327	0,69375
	<i>Terminalia argentea</i>	-8,48906	1,67930	0,69375
	Miscelânea	-8,97167	1,892763	0,69375
E15 – CLD	2 – 12 cm	-9,02195	1,94878	0,67620
	12 – 22 cm	-8,68593	1,73769	0,75111
	22 – 32 cm	-8,74961	1,77645	0,73794
	32 – 42 cm	-8,79228	1,80424	0,72792

A Figura 2 apresenta a distribuição de resíduos dos ajustes realizados utilizando fatores de forma (E1 a 6), enquanto na Figura 3 estão ilustrados a distribuição de resíduos das estratégias empregando equações volumétricas, sendo apresentado apenas as estratégias que resultaram nos menores erros (modelos mistos) (E7, 9, 13, 15, 19, 22 e 23).

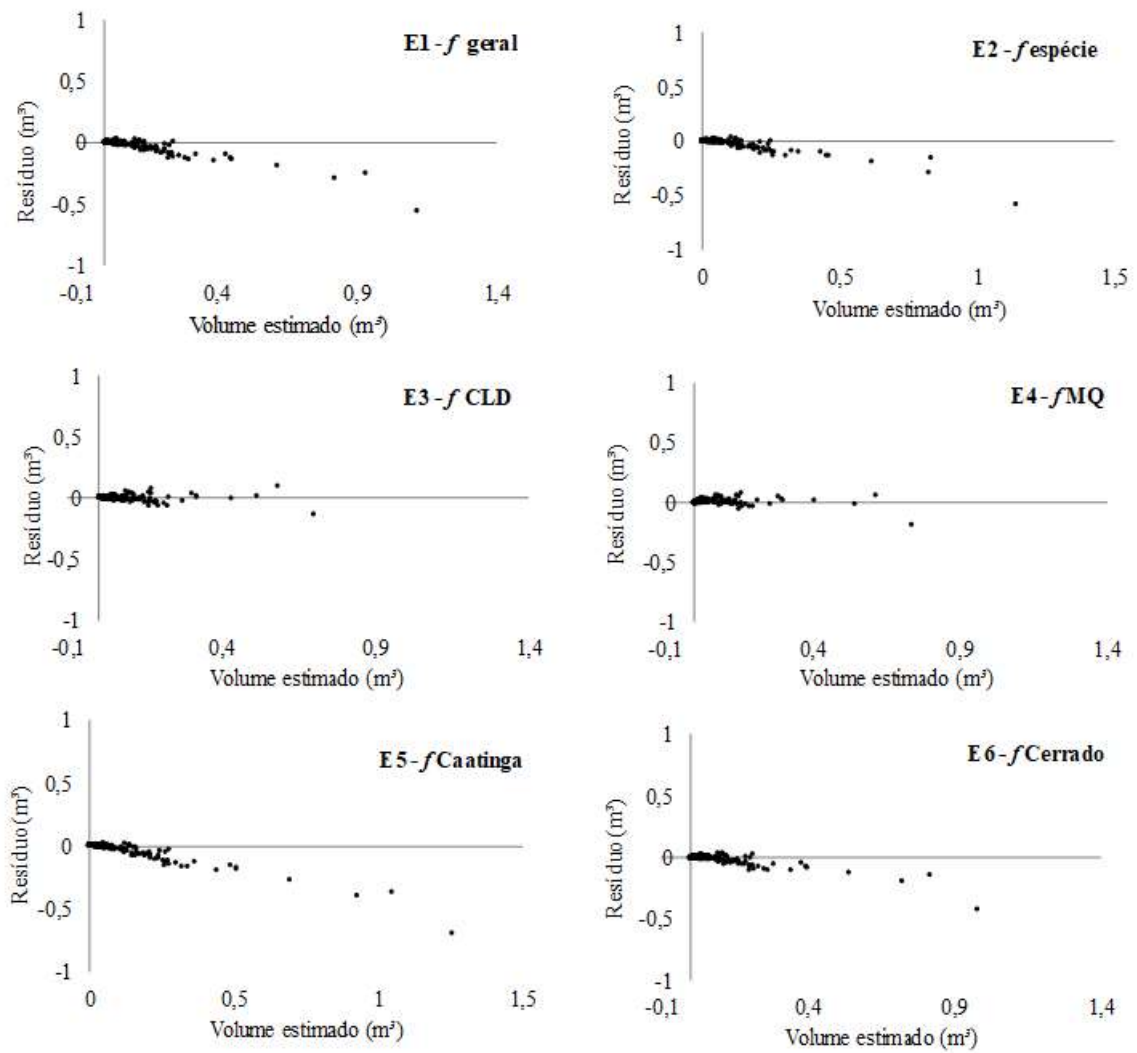


Figura 2 - Gráfico de resíduos para as diferentes estratégias de estimativa volumétrica utilizando fatores de forma para região de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado.

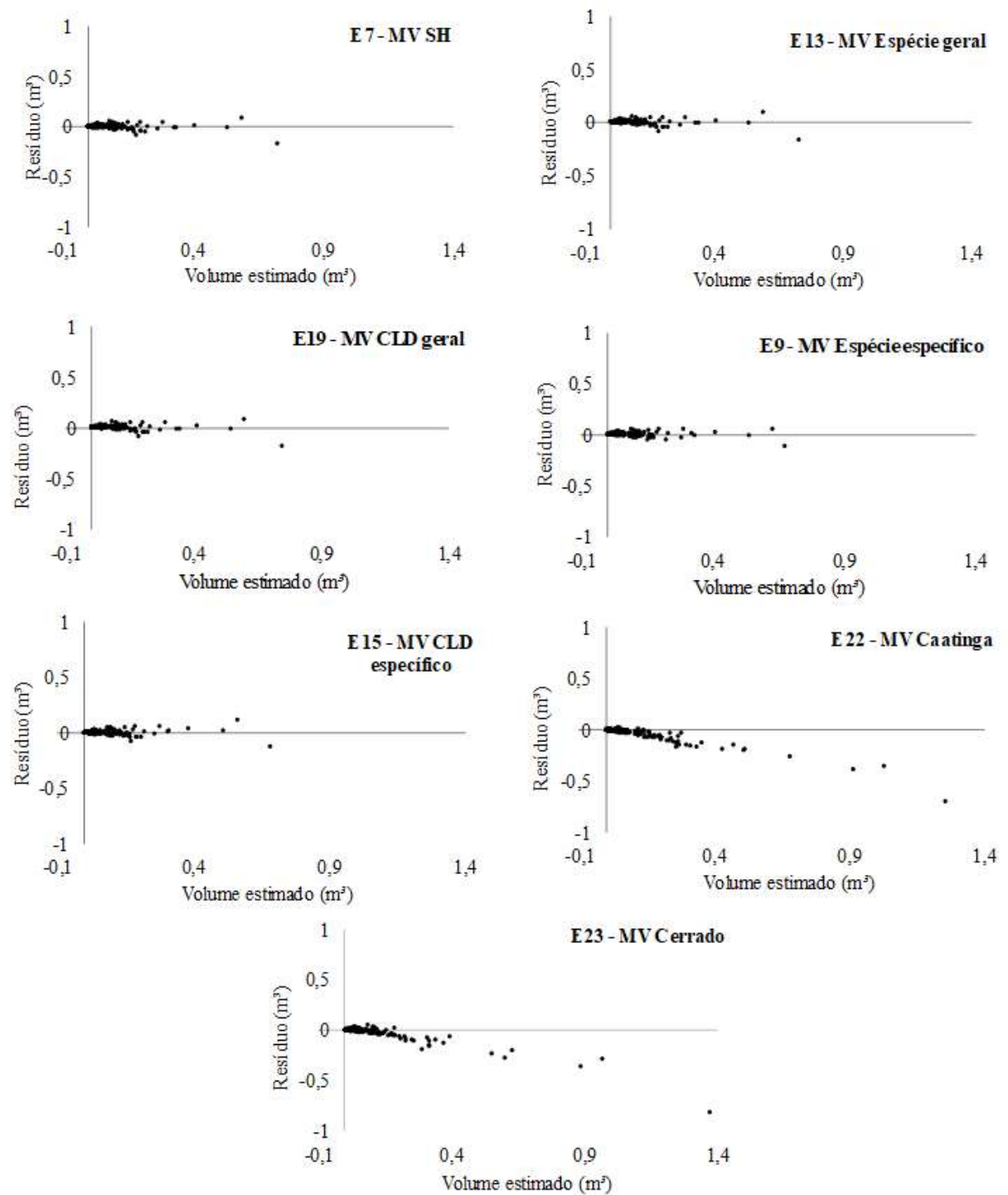


Figura 3 - Gráfico de resíduos para as diferentes estratégias de estimativa volumétrica empregando modelos volumétricos para região de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado.

DISCUSSÃO

Nesse trabalho foram utilizadas diferentes estratégias para estimar o volume de árvores de vegetação em área de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado. Pesquisas como essas são relevantes, tendo em vista que não há estudos em regiões que contemplem áreas de transições entre biomas, principalmente estes em questão. Contudo, o estudo tem suas limitações, pois foca apenas nas espécies mais ocorrentes em detrimento das outras, além de ter um número reduzido de árvores de maior porte na base de dados. O outro entrave para a execução do trabalho foi a cubagem destrutiva completa (fustes com galhos), que não foi realizada em todas as árvores, e assim não podemos afirmar se o valor de 18% é exato e representativo para todo o banco de dados. No entanto, consideramos importante tal informação, pois possibilita compatibilizar estimativas de volume oriundas de operações de cubagem destrutivas (onde é viável a quantificação do volume de galhos) e não destrutivas.

O fator de forma ainda é uma técnica comumente empregada em estudos com vegetações de Caatinga e Cerrado (Leite et al. 2015, Miranda et al. 2015, Pareyn et al. 2015, Tenzin et al. 2016, Santos et al. 2017, Pertille et al. 2018). Nessa pesquisa, o fator de forma geral ($T1=0,8$) apresentou-se de forma interessante, pois seu valor é intermediário entre os valores das estratégias 5 (0,9) e 6 (0,7), que representam valores disponíveis na literatura para vegetações de Caatinga e Cerrado, respectivamente, reforçando o caráter de transição da vegetação. O MAPE com aplicação do fator de forma disponível em literatura para Caatinga (E5) apresentou maior valor entre essas três metodologias, podendo ser justificado pela ausência de um número maior de árvores de grande porte na base de dados (6 árvores com $d > 27$ cm).

De acordo com os valores apresentados na Tabela III, o ajuste utilizando um fator de forma ajustado pelos mínimos quadrados (E4) apresentou o maior valor de MAPE (30,9%).

Este comportamento não era esperado, pois de acordo com Magalhães e Mate (2018), a estratégia de mínimos quadrados deve apresentar um menor erro quadrático de predição, possibilitando maior previsibilidade com erros extremamente baixos. Uma possível explicação para este comportamento é devido à intrínsecas da base de dados, que contém muitas árvores com diâmetro e altura menores e apenas alguns indivíduos de grande porte (Tabela II), acarretando numa alta variabilidade.

Em florestas nativas, tradicionalmente é utilizado o fator de forma geral (E1), contudo, a aplicação do fator de forma por espécie (E2) possibilitou obter um menor valor de MAPE nas estimativas. Outros trabalhos também avaliaram a variação da espécie para determinação do fator de forma (Leite et al. 2015, Tenzin et al. 2016, Santos et al. 2017), constatando ser uma opção mais acurada, contudo, resultando num processo mais dispendioso, pois exige a identificação botânica das árvores.

Entre todos os métodos para estimar volume utilizando fatores de forma, a diferenciação por classes de diâmetro (E3) obteve os melhores resultados entre todas as estratégias avaliadas, elucidando que o porte das árvores influencia mais que a espécie, além de ter uma aplicabilidade mais simples. A vantagem de se usar o fator de forma por CLD ao invés de espécie, justifica-se pela facilidade para ser replicado em outras estimativas de volume, uma vez que nem sempre a espécie é conhecida nos levantamentos florestais em nativas, mas o diâmetro na maioria das vezes é determinado.

As estratégias E1, E2, E5 e E6 apresentam distribuição de resíduos semelhantes, exibindo tendências de superestimativa para volumes (Figura 2). É possível verificar que para valores estimados acima de $0,2 \text{ m}^3$ o volume é superestimado, tornando-se mais crítico para as maiores árvores. O E4 (f por mínimos quadrados), apesar de apresentar maior MAPE, possuiu uma melhor distribuição residual, além de corrigir a tendência de superestimativa para as

maiores árvores. Vale destacar que no gráfico de resíduos esta estratégia estima melhor as maiores árvores, porém para menores árvores há maiores erros. O E3 (f por classe diamétrica) apresenta-se como o mais indicado, com menor MAPE e melhor distribuição entre todas as estratégias com uso de fator de forma.

Na Caatinga, tradicionalmente é utilizado o fator de forma em pesquisas sobre volumetria de florestas nativas. Contudo, essa técnica potencialmente carrega muitos erros. O uso de modelos volumétricos é a maneira mais confiável de estimar volume de árvores (Thaines et al. 2010). Todas as estratégias que ajustaram equações volumétricas foram superiores aos ajustes utilizando fatores de forma, apresentando menores valores de MAPE e melhor distribuição dos resíduos.

O modelo de Schumacher e Hall (E7) foi escolhido por ser um dos modelos mais tradicionais em pesquisas florestais, o qual frequentemente é escolhido como de melhor desempenho (Santos et al. 2006, Thaines et al. 2010, Miranda et al. 2015, Pertille et al. 2018).

As equações disponíveis na literatura para os biomas estudados (E22 e E23) apresentaram maiores valores de MAPE, se comparado ao ajuste de regressão do E7, confirmando que quando possível, é melhor ajustar o modelo de Schumacher e Hall com dados próprios do que utilizar equações disponíveis na literatura.

Em relação a Figura 3, visualmente a distribuição dos resíduos está parecida para todas as estratégias empregando equações volumétricas. Aparentemente sem tendências marcantes, com exceção das estratégias utilizando equações da literatura para os biomas, bem como para árvores de maior porte, que possuem superestimativa do volume.

Na Figura 4 estão ilustradas as estratégias mais importantes que resultaram nas melhores estimativas comparando-as as estratégias utilizando fatores de forma e equações volumétricas da literatura.

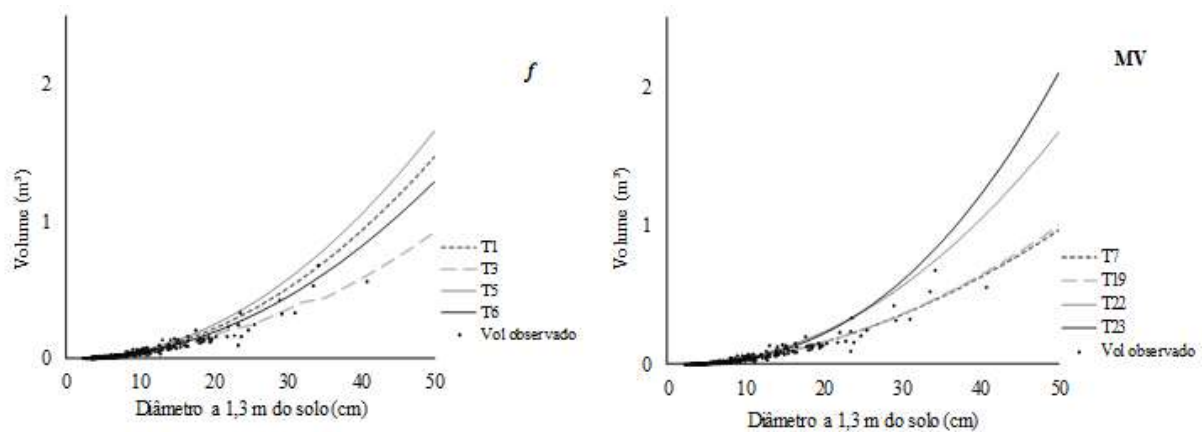


Figura 4 - Comparação entre as estratégias com uso de fator de forma médio (E1), fator de forma por classe diamétrica (E3), fator de forma da literatura para Caatinga (E5), fator de forma da literatura para Cerrado (E6), equação volumétrica de Schumacher e Hall (E7), equação ajustada pela modelagem mista com classe diamétrica no efeito aleatório (E19), equação da literatura para Caatinga (E22) e para Cerrado (E23).

É possível observar que tanto as estratégias com uso de fatores de forma, como as estratégias com o ajuste de modelos volumétricos, os valores estimados acompanham os valores reais até os 15 cm de diâmetro, após isso, o comportamento do volume é superestimado para maioria dos ajustes. A utilização de equações provenientes da literatura demonstra o que acontece quando utilizamos equações incompatíveis e que não se encaixam na base de dados de estudo, possivelmente acarretando erros nas estimativas de volume.

O uso da modelagem mista possibilita incorporar na estrutura do modelo variáveis como espécie e classe diamétrica, permitindo um ajuste mais consistente do modelo (Pinheiro e Bates 2000). Tais técnicas são usuais em literaturas florestais (Schröder et al. 2013, Gouveia et al. 2015). Quando optamos por utilizar técnicas de modelos mistos, temos a opção de usar apenas a parte fixa do modelo (nominada por “geral” na Tabela IV) ou os parâmetros

específicos na parte aleatória (denominado de “específicos” na Tabela V), e partindo dessa premissa, esse estudo testou as duas abordagens, sendo possível avaliar que o uso de parâmetros fixos sob a variável espécie (E8 a 14) não melhorou os valores de MAPE, sendo melhor a inserção do efeito aleatório (E9) no parâmetro β_1 associado ao diâmetro (E13).

Em relação a espécie, o uso de parâmetros específicos contribuiu na redução do MAPE, se comparado ao uso apenas do efeito fixo. Contudo, a dificuldade de aplicar os parâmetros, tendo em vista a necessidade em se catalogar as espécies botânicas é um entrave, tornando a estimativa volumétrica mais morosa.

Parâmetros específicos por classe diamétrica (E15 a E21) resultaram em estratégias que apresentaram menores valores de MAPE. Na estratégia 15 as árvores menores possuem inclinação mais acentuada, ou seja, aumento no DAP tem efeito mais pronunciado na estimativa do volume. Comportamento inverso para altura, é mais marcante para as árvores maiores.

O E19 foi a segunda melhor estratégia para estimar volume nesse estudo, com sua aplicabilidade mais fácil, pois os fatores fixos são únicos, tornando possível a replicação em outros estudos.

É importante destacar que a utilização de equações de literatura resultou os maiores erros para os dois biomas, devido à alta diversidade das florestas.

CONCLUSÃO

Entre todas as estratégias avaliadas para estimativa volumétrica, o emprego da modelagem mista utilizando a espécie como fator aleatório e os parâmetros específicos de cada espécie teve melhor desempenho, apresentando um menor erro percentual absoluto médio (15,31%). A adoção de técnica de modelos mistos com uso dos parâmetros fixos utilizando a

classe diamétrica como efeito aleatório oferece uma boa estratégia de ajuste, pois obteve baixo valor de erro mesmo com uso dos parâmetros gerais no modelo (15,39%), sendo a segunda melhor estratégia, dispensando a classificação botânica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento da bolsa para o primeiro autor, aos funcionários e proprietários da Fazenda Aracajú. À empresa TAESA pelo auxílio na coleta de dados durante a execução do Projeto P&D 044 “Faixa de Servidão” UFPI/TAESA/ANEEL.

REFERÊNCIAS

- ALVARES CA, STAPE JL, SENTELHAS PC, GONÇALVES JLM e SPAROVEK G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(4): 711–728.
- AMARAL GC, ALVES AR, OLIVEIRA TM, ALMEIDA KNS, FARIAS SGG e BOTREL RT. 2012. Estudo florístico e fitossociológico em uma área de transição Cerrado-Caatinga no município de Batalha-PI, *Scientia Plena*, 8(4):1-5.
- BRASIL. 2019a. Ministério do Meio Ambiente. Caatinga. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- BRASIL. 2019b. Ministério do Meio Ambiente. Cerrado. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- COLPINI C, TRAVAGINI DP, SOARES TS e SILVA VSM. 2009. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. *Acta Amazônica*, 9(1):97-104.

- GOUVEIA JF, SILVA JAA, FERREIRA RLC, GADELHA FHL e LIMA-FILHO LMA. 2015. Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no polo gesseiro do Araripe. *Floresta*, 45(3):587-598.
- IBGE. 2004. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de vegetação do Brasil. Brasília: IBGE. Disponível em: <www.ibge.gov.br/mapas> Acesso em: 20 jun. 2019.
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura-PEVS. Em: IBGE. (3 ed.) Pesquisas agropecuárias. Rio de Janeiro: IBGE, p. 35-43.
- IBGE. 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>>. Acesso em 19 de agosto de 2019.
- LEITE JAN, ARAÚJO LVC, ARRIEL EF, CHAVES LFC e NÓBREGA AMFN. 2015. Análise quantitativa da vegetação lenhosa da Caatinga em Teixeira, PB. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(82):89-100.
- MAGALHÃES TM e MATE RS. 2018. Least squares-based biomass conversion and expansion factors best estimate biomass than ratio-based ones: Statistical evidences based on tropical timber species. *MethodsX*, 5:30-38.
- MIRANDA DLC, BERNARDINO-JUNIOR V e GOUVEIA DM. 2015. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*, *Scientia Plena*, 11(13):1-8.
- MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, FONSECA GAB e KENT J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403:853-858.

- OLIVEIRA XM, RIBEIRO A, FERRAZ FILHO AC, MAYRINCK RC, LIMA RR e SCOLFORO JRS. 2018. Volume equations for *Khaya ivorensis* A. Chev. plantations in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(4): 3285-3298.
- PAREYN FGC, PEREIRA WE, SALCEDO IH, RIEGELHAUPT EM, GOMES EC e CRUZ-FILHO JLV. 2015. A influência da precipitação sobre o crescimento e os ciclos de corte da caatinga manejada – uma primeira aproximação. *Estatística Florestal da Caatinga*, 2: 30-39.
- PERTILLE CT, SANQUETTA CR, NICOLETTI MF e TOPANOTTI LR. 2018. Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. *Advances In Forestry Science*, 5(3): 431-436.
- PINHEIRO JC e BATES DM. 2000. *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer-Verlag, 528 p.
- R CORE TEAM. 2019. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RUFINI AL, SCOLFORO JRS, OLIVEIRA AD e MELLO JM. 2010. Equações volumétricas para o Cerrado *Sensu stricto*, em Minas Gerais. *Cerne*, 16(1): 1-11.
- SAMPAIO EVSB e SILVA GC. 2005. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. *Acta Botanica Brasilica*, 19(4):935-943.
- SANTOS K, SANQUETTA CR, EISFIELD RL, WATZLAWICK LF e ZILLOTTO MAB. 2006. Equações volumétricas por classe diamétrica para algumas espécies folhosas da floresta ombrófila mista no Paraná, Brasil. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 8(1): 1-14.
- SANTOS WSS, HENRIQUES IGN, SANTOS WS, RAMOS GG, VASCONCELOS GS e VASCONCELO ADM. 2017. Análise florística-fitosociológica e potencial madeireiro em área de caatinga submetida a manejo florestal. *Agropecuária Científica no Semiárido*, 13(13): 203-211.

- SCHRÖDER T, COSTA EA, VALÉRIO AF e LISBOA GS. 2015. Taper equations for *Pinus elliottii* Engelm in Southern Paraná, Brazil. *Forest Science*, 61(2): 311-319.
- SCHRÖDER T, PEREIRA LD e HOFICO NSA. 2013. Comparação de métodos de estimativa de volume total para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Floresta e Ambiente*, 20(4): 480-486.
- SCHUMACHER FX e HALL FS. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9): 719-734.
- SILESHI GW. 2014. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329: 237–254.
- SOUZA PF, SILVA JA, LUCENA DS, SANTOS WS, HENRIQUES IGN, LUCENA MFA e SOUZA AD. 2016. Estudos fitossociológicos e dendrométricos em um fragmento de caatinga, São José de Espinharas – PB. *Ciência Florestal*, 26(4): 1317-1330.
- TENZIN J, WANGCHUK T e HASENAUER H. 2017. Form factor functions for nine commercial tree species in Bhutan. *Forestry*, 90;359-366.
- THAINES F, BRAZ EM, MATTOS PP e THAINES AAR. 2010. Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(64): 283-289.
- YAO X, FU B, LU Y, SUN F, WANG S e LIU M. 2013. Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. *Plos One*, 8(1): e54660.
- ZAKIA MJB, PAREYN FGC e RIEGELHAUPT E. 1988. Equações de Peso e Volume para oito Espécies Lenhosas Nativas do Seridó-RN. In: Plano de Manejo Florestal para a Região do Seridó-RN, Natal: Projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram testadas estratégias de estimativa de volume de madeira de árvores com aplicação de fator de forma, assim como ajustando equações volumétricas ao banco de dados pertencente a regiões de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado.

Levando em consideração espécie, classe diamétrica, técnicas de modelo misto e mínimos quadrados, foi possível determinar quais as melhores estratégias de estimar volume de madeira, uma com menor erro (E9, usando os parâmetros específicos do modelo de Schumacher e Hall ajustado como um modelo misto com a espécie botânica como efeito aleatório em todos os parâmetros) e outra com melhor aplicabilidade (E19, usando os parâmetros gerais do modelo de Schumacher e Hall ajustado como um modelo misto com a classe diamétrica como efeito aleatório no intercepto).

Os valores advindos da literatura, seja por modelo de volume ou uso de fator de forma, apresentaram estimativas com maiores erros percentuais absolutos. Sendo importante ressaltar que o uso de modelagem volumétrica correta garante o uso sustentável dos recursos florestais.