

THYÊGO NUNES ALVES BARRETO

**AVALIAÇÃO DE MODELOS E MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS PARA
ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM ÁREA DE CAATINGA**

**RECIFE – PE
2017**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS



**AVALIAÇÃO DE MODELOS E MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS PARA
ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM ÁREA DE CAATINGA**

Thyêgo Nunes Alves Barreto

**RECIFE – PE
2017**

THYÊGO NUNES ALVES BARRETO

**AVALIAÇÃO DE MODELOS E MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS PARA A
ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM ÁREA DE CAATINGA**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, como parte das exigências à obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. José Antônio Aleixo da Silva

CO-ORIENTADOR:

Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira

"O aprendizado é algo único, verdadeiro e eterno para aqueles que buscam à verdadeira ciência, à sabedoria". (Thyêgo Nunes)

THYÊGO NUNES ALVES BARRETO

AVALIAÇÃO DE MODELOS E MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS PARA A
ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM ÁREA DE CAATINGA

Data da aprovação: 23/02/2017

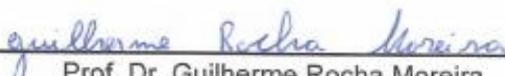
Banca examinadora:



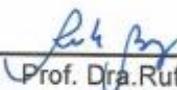
Prof. Dr. Wellington Jorge Cavalcanti Lundgren
(Departamento de Agronomia/UFRPE/UAST)



Prof. Dr. Otacilio Antunes Santana
(Departamento de Biofísica e Radiobiologia/UFPE)



Prof. Dr. Guilherme Rocha Moreira
(Departamento de Estatística e Informática/UFRPE)



Prof. Dra. Rute Berger
(Departamento de Ciência Florestal/UFRPE)



Prof. Dr. José Antônio Aleixo da Silva
(Orientador - Departamento de Ciência Florestal/UFRPE)

RECIFE – PE
2017

*Dedico esta Tese especialmente
a Deus, minha esposa Cleuma e
a minha família que sempre
estiveram presentes.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me orientar em todas as ações e tortuosidades em que me deparei neste processo, me fortificando e amparando em todas as decisões e empecilhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco pela oportunidade de realizar o doutorado.

A Fundação de Amparo à Ciência e a Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos. A Agrimex S. A. por ceder a área de estudo.

Um imenso obrigado, ao meu orientador Prof. Dr. José Antônio Aleixo da Silva e ao meu co-orientador Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira pela parceria e disponibilidade, além da oportunidade de aprimorar meus conhecimentos.

Sou imensamente grato aos meus pais Rosângela e Nunes por me darem amparo nos momentos mais difíceis.

Minha irmã Héryka pelo carinho e preocupação.

A minha amada esposa Cleuma Christir pela compreensão, apoio, carinho, companheirismo e trabalho em todos os momentos.

Obrigado aos mateiros Demi, Luís e Marcelo pela imensa ajuda nas incursões a campo.

Aos amigos que conquistei durante o doutorado, essenciais na concretização desta etapa.

A todos que de alguma forma me apoiaram na condução dessa jornada.

BARRETO, THYÊGO NUNES ALVES. Avaliação de modelos e métodos geoestatísticos para a estimativa de biomassa em área de Caatinga. 2017. Orientador: José Antônio Aleixo da Silva; Co-orientador: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira

RESUMO

Após a crise de 1974 a Caatinga vem sofrendo severas intervenções, principalmente quanto a supressão florestal para o abastecimento energético de indústrias e da população local, negligenciando a disponibilidade dos estoques de fitomassa nas distintas fitofisionomias de Caatinga, principalmente em regiões mais desfavorecidas em precipitação, onde o porte das árvores é menos desenvolvido. Diante desta problemática a pesquisa vem com objetivo de ajustar modelos matemáticos a fitomassa aérea total e aos compartimentos de plantas lenhosas na Caatinga, além de verificar a aplicabilidade de técnicas geoestatísticas para a estimativa espacial da biomassa nestas regiões. A pesquisa foi realizada em área de Caatinga arbustivo-arbórea, no município de Floresta - PE. Para o inventário florestal foram instaladas 35 unidades amostrais de 20mx20m distadas entre si 80m e das bordas 50m, onde todas as plantas com Diâmetro a altura do peito (DAP \geq 1,9cm) foram mensuradas e submetidas a análises florísticas e fitossociológicas apenas para identificar as cinco espécies de maior VI, em sequência as mesmas foram distribuídas em cinco classes diamétricas, sendo escolhidos oito indivíduos por classe, totalizando 200 exemplares arbustivo-arbóreos para coleta de biomassa pelo método destrutivo, de posse desses dados foi possível quantificar as proporções de biomassa por classes e compartimentos, além de ajustar modelos matemáticos por parte da planta e para o total. Também foi verificada a dependência espacial da fitomassa arbórea e o ajuste de modelos geoestatísticos com base nas técnicas de krigagem e cokrigagem ordinária, utilizado análise semivariográfica e de validação cruzada. Os resultados apresentaram uma proporção para as partes igual a fuste(43,2%)>galho grosso (26,6%)>galho fino (25,9%)>folhas (4,3%), dentre os compartimentos as folhas apresentaram o pior ajuste com $R^2 = 0,55$, já o Fuste, Total, Galho grosso e Galho fino expressaram valores de $R^2 = 0,89; 0,86; 0,71$ e $0,72$ nesta ordem, com erros percentuais para as equações $S(xy)\% = 22,3; 26,0; 0,54$ e $0,35$, os modelos que melhor se ajustaram foram os de Schumacher–Hall e Gompertz. Para modelagem geoestatística a técnica de krigagem ordinária detectou dependência espacial moderada com alcance de 17,6 metros para biomassa seca pelo modelo esférico com valores de $R^2 = 0,61$ para validação cruzada, já a cokrigagem mostrou valores de $R^2 = 0,83$ para o modelo exponencial com forte dependência espacial para biomassa seca (kg), com alcance de 10 metros. Conclui-se que as proporções de biomassa por compartimento seguem um padrão de distribuição harmonioso, sendo possível gerar equações confiáveis para as partes da planta a exceção da folha e galhos finos para a espécie *Commiphora leptophloeos*. As técnicas geoestatísticas empregadas capturaram forte dependência espacial da biomassa e DAP (cm), com boa precisão nas estimativas realizadas em áreas de Caatinga.

Palavras-chave: Equações alométricas. Krigagem. Cokrigagem. Floresta Seca

BARRETO, THYGO NUNES ALVES. Evaluation of geostatistical models and methods for the estimation of biomass in the Caatinga area. 2017. Advisor: José Antônio Aleixo da Silva; Co-adviser: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira

ABSTRACT

After a crisis of 1974 the Caatinga has suffered severe interventions, mainly as a forest suppression for the energetic supply of industries and the local population, neglecting an availability of the phytomass stocks in the diverse phytophysionomies of Caatinga, mainly in less favored regions in precipitation, where The size of trees is less developed. Faced with this problem, a research with the objective of adjusting mathematical models to aerial biomass and other compartments of woody plants in the Caatinga, besides verifying an application of geostatistical techniques for a spatial estimation of the biomass in these regions. The research was carried out in Caatinga arbustivo-arbórea, in the municipality of Floresta - PE. For the forest inventory, 35 units of 20mx20m were distributed 80m apart and 50m edges, where all plants with diameter at breast height ($DAP \geq 1.9\text{cm}$) were measured and submitted to floristic and phytosociological analysis only to identify 5 Species of size VI, in sequence as they were distributed in 5 diametric classes, being chosen 8 classes per class, totalizing 200 shrub-arboreal specimens for the collection of biomass by the destructive method, possession of the data to quantify possible as proportions of biomass by Classes And compartments, as well as mathematical models by the plant and for the total. It was also verified a spatial dependence of tree adaptation and an adjustment of geostatistical models with a base of management techniques and ordinary coordination, using semivariographic and cross validation analysis. (43.2%)> thick branch (26.6%)> fine branch (25.9%)> leaves (4.3%), among the compartments as leaves presented the worst fit with $R^2 = 0.55$, already The Fuste, Total, Thick Branch and Thin Branch express values of $R^2 = 0.89$; 0.86; 0.71 and 0.72 in order, with percentage errors for the equations $S(xy)\% = 22.3$; 26.0; 0.54 and 0.35, the models that best fit those of Schumacher-Hall and Gompertz. For the geostatistical modeling of a technique of detection of spatial dependence, with a range of 17.6 meters for dry biomass, for a spherical model with values of $R^2 = 0.61$ for cross validation, it has already been calculated for $R^2 = 0.83$ For the exponential model with strong spatial dependence for dry biomass (kg), with a range of 10 meters. It is concluded that as proportions of biomass per compartment follows a harmonious distribution pattern, it is possible to generate reliable equations for the parts of a leaf plant and thin branches for a species *Commiphora leptophloeos*. As geostatistical techniques employed, they captured a strong spatial dependence of biomass and DAP (cm), with good precision in the estimates made in Caatinga areas.

Keywords: Allometric equations. Kriging. Cokrigagem. Dry Forest

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
REVISÃO DE LITERATURA	13
SAVANA ESTÉPICA - CAATINGA	13
MODELAGEM MATEMÁTICA	17
GEOESTATÍSTICA	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
CAPÍTULO 1: AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS A FITOMASSA SECA DOS COMPARTIMENTOS DE PLANTAS LENHOSAS EM ÁREA DE CAATINGA	30
INTRODUÇÃO.....	30
MATERIAL E MÉTODOS	32
ÁREA DE ESTUDO.....	32
COLETA E ANÁLISE DADOS.....	33
PREPARAÇÃO PARA MODELAGEM MATEMÁTICA	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
FLORÍSTICA	39
ESTRUTURA	40
SUFICIÊNCIA AMOSTRAL	41
DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA SECA.....	42
AJUSTE DE MODELOS.....	46
CONCLUSÕES	56
CAPÍTULO 2: KRIGAGEM ORDINÁRIA E COKRIGAGEM NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA LENHOSA EM ÁREA DE CAATINGA	57
INTRODUÇÃO.....	57
MATERIAL E MÉTODOS	59
CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	59
COLETA DE DADOS.....	60
ANÁLISE DE DADOS	61
RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
ANÁLISE DESCRITIVA	66
PARÂMETROS SEMIVARIOGRÁFICOS E DE VALIDAÇÃO CRUZADA PARA KRIGAGEM.....	69
CORRELAÇÃO ENTRE A VARIÁVEL PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA.....	75
PARÂMETROS SEMIVARIOGRÁFICOS E DE VALIDAÇÃO CRUZADA PARA COKRIGAGEM.....	76
CONCLUSÃO	80
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
APENDICE.....	93

INTRODUÇÃO GERAL

No Nordeste brasileiro, após a crise do petróleo em 1974 muitas indústrias reduziram ou abandonaram o uso de óleo diesel, substituindo-o por lenha e carvão vegetal extraídos da Caatinga, conseqüentemente influenciando no desmatamento da vegetação nativa em busca de energia (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010).

Ao mesmo tempo, o aumento significativo da urbanização e a demanda por matérias primas para construção civil se intensificaram elevando ainda mais o consumo de madeira no início da década de 90, sendo que antes desse período 35% da energia primária da região Nordeste já era adquirida destas fontes e continuou crescendo, tanto que entre os anos de 2005 e 2008 apresentou um crescimento de 2,05% de toneladas equivalentes ao petróleo (BRASIL, 2011).

Com o consumo de lenha desenfreado e ilegal houve acentuada queda na formalização da atividade florestal no Nordeste, mesmo com a criação dos Planos de Manejo Florestal Sustentados (PMFS), como estratégia de políticas públicas (PERNAMBUCO, 2000), atendendo até o ano de 2006, apenas 5,8% da demanda total do fornecimento exclusivo de lenha (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010).

A partir da aprovação da Lei Federal Nº 11.284/2006, as atividades de exploração florestal passaram a ser de responsabilidade estadual. Em Pernambuco, a Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) passou a autorizar a atividade florestal por meio da Instrução Normativa Nº 007/2006, que estabelece o ciclo de exploração mínimo de 15 anos, podendo, em alguns casos, ser autorizado para um prazo inferior, desde que estudos científicos comprovem que a regeneração da vegetação se dá em tempo menor (CPRH, 2006).

Diante desta problemática, os Planos de Manejo Florestal Sustentáveis até o presente momento são as ferramentas institucionais mais eficazes na tentativa de legalizar e minimizar os impactos causados pela extração madeireira na Caatinga, porém os mesmos necessitam de melhorias acerca de estimativas mais precisas e inovadoras a ponto de identificar, fornecer e complementar informações sobre a produtividade e produção da biomassa lenhosa, retirada nas áreas dos talhões de corte.

Nesse contexto a modelagem matemática vem sendo bastante utilizada nestas estimativas, se tornando uma ferramenta bastante eficaz no fornecimento de respostas mais incisivas as tomadas de decisão no manejo florestal, principalmente

na geração de equações matemáticas que proporcionem estimar regional e localmente a produção de matéria prima lenhosa para energia em áreas exploradas.

No entanto, em razão das dificuldades logísticas, as experiências com modelagem matemática envolvendo espécies florestais nativas têm-se restringido aos modelos de volume (SANQUETTA; ZILLOTTO, 2004).

Outra dificuldade que se tem em estimar a biomassa acima do solo é que outros fatores podem influenciar as suas quantidades em florestas tropicais, tais como: topografia, hidrologia, características edáficas, disponibilidade de nutrientes no solo, etc. (CUMMINGS et al., 2002).

Além do mais, este tipo de modelagem sustenta a hipótese de que as amostras são independentes entre si e que não apresentam nenhuma dependência associada, baseando-se unicamente em medidas de posição (média) e dispersão (variância), não considerando a influência de amostras circunvizinhas, desprezando a dependência espacial existente.

Partindo deste princípio, a geoestatística veio com o propósito de compreender, estudar e tratar de dados de área e processos pontuais em função do espaço (FONSECA, 2008). Sendo capaz de identificar a variabilidade espacial e a estimativa não tendenciosa da variância mínima em locais não amostrados, permitindo mensurar e visualizar as relações espaciais dos fatores que limitam a produção e a produtividade dos povoamentos florestais, predizendo valores em locais não amostrados (PELISSARI et al., 2014a).

Vários trabalhos tem demonstrado seu potencial na descrição do comportamento espacial de variáveis dendrométricas em espécies florestais, evidenciando que a estrutura espacial é uma característica marcante nessas variáveis, não sendo detectada na estatística clássica, ocasionando perda de informação (AMARAL et al., 2010; PELISSARI et al., 2014b; TERRA et al., 2015; PELISSARI et al., 2015; SCOLFORO et al., 2016).

Neste contexto a análise da dependência espacial é capaz de complementar os métodos de modelagem matemática aprimorando as estimativas de biomassa, levando muitos trabalhos à silvicultura e o manejo florestal de precisão possibilitando melhores intervenções para diferentes tipologias florestais, talhões, povoamentos, etc.

Em suma, o objetivo deste trabalho foi de ajustar modelos matemáticos e geoestatísticos para biomassa em função das variáveis dendrométricas, proporcionando gerar equações e mapas de interpolação que melhor representem sua distribuição e quantificação, identificando e analisando seu grau de dependência espacial em área de Manejo Florestal da Caatinga.

REVISÃO DE LITERATURA

Savana Estépica - Caatinga

As regiões tropicais e subtropicais da Terra eram ocupadas por aproximadamente 40% de florestas abertas ou fechadas, sendo 42% de Florestas Secas, que cobriam a América Latina com quase 22% (MURPHY; LUGO, 1986).

No Brasil, a Floresta Seca é representada por dois biomas, o Cerrado, classificado como Savana, e a Caatinga, como Savana estépica. Com sua maior abrangência na região Nordeste, indo além dos campos de Roraima, Pantanal mato-grossense e uma pequena ocorrência no extremo oeste do Rio Grande do Sul (IBGE, 2016). Seu nome é de etimologia indígena, utilizado para dar nome a mata aberta e clara, empregado para nomear áreas com vegetação xerófila (FERNANDES, 1998; SAMPAIO, 2002).

Segundo Rodal et al. (2008), este tipo de vegetação é composta pelos mais diversificados conjuntos florísticos e fisionomias, pelo fato de ser amplamente distribuída e de acordo com as suas características climáticas, edáficas e geológicas únicas resultando em ambientes ecológicos peculiares.

Atualmente, a vegetação nativa da Caatinga cobre cerca de 40% da área original no semiárido nordestino (CALIXTO JÚNIOR; DRUMOND, 2014). Caracterizando-se como um mosaico de arbustos espinhosos e florestas sazonalmente secas cobrindo a maior parte dos estados do Ceará (100%), Piauí (63%), Rio Grande do Norte (95%), Paraíba (92%), Pernambuco (83%), Alagoas (48%), Sergipe (49%), Bahia (54%), Maranhão (1%) e nordeste de Minas Gerais (2%), no vale do Jequitinhonha. Estende-se por cerca de 844.453 km², correspondendo a 9,92 % do território brasileiro (LEAL et al., 2005; IBGE, 2016).

A Precipitação média nessas regiões pode variar de 240 mm a 1.500 mm. Na metade da região a precipitação é menor que 750 mm e valores entre 50 % a 70 %

da precipitação anual estão concentradas em apenas três meses consecutivos no ano (SAMPAIO, 1995; PRADO, 2003).

Quanto a divisão geológica, Jacomine (1996), dividiu em três tipos a julgar pelo material de formação edáfico: a) áreas por cima do escudo cristalino; b) áreas onde o escudo cristalino é coberto com material arenoso; e c) áreas de depósitos sedimentares. Com a predominância de Latossolos, Argissolos, Planossolos, Luvisolos e Neossolos. E em menores proporções os Nitossolos, Chernossolos, Cambissolos, Vertissolos, e Plintossolos (JACOMINE, 1996; OLIVEIRA et al., 1992; ARAÚJO FILHO et al., 2000).

A maioria dos solos encontrados nessas áreas são solos rasos, que tendem a se saturar na chuva e ressecar facilmente nos períodos de estiagem, com elevados índices de evapotranspiração (TAVARES FILHO et al., 2006).

Além das fragilidades ambientais que a Caatinga enfrenta, a extração de lenha como fonte de energia, tanto para uso domiciliar, quanto industrial, prejudicam intensivamente a sua resiliência e a sustentabilidade (CALIXTO JÚNIOR; DRUMOND, 2014).

Biomassa lenhosa na Caatinga

O termo biomassa representa a matéria orgânica armazenada em um determinado ecossistema, pois especifica o valor numérico de seus componentes presentes, sendo de fundamental importância nos estudos de ciclagem de nutrientes, conversão de energia, absorção e armazenamento de energia solar (GOLLEY et al., 1978).

Numa visão mais ampla também pode ser definida como todo material orgânico, não fossilizado, composto por energia química, abrangendo as vegetações aquáticas e terrestres, além de lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais. De modo a fornecer energia primária, encontrada no estado natural da biomassa, como: madeira e resíduos agrícolas, ou na forma secundária, carvão vegetal e eletricidade (VIDAL; HORA, 2011).

Já a biomassa florestal é apresentada como massa do material vegetal disponível na floresta, caracterizado como biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e inclui todos os seus componentes: tronco, ramos, folhas, casca e raízes, além de arbustos e da biomassa morta acima do solo, composta de

serapilheira e troncos caídos, sendo totalizada pela soma de seus componentes (MARTINELLI et al., 1994).

Para Sanquetta e Ziliotto (2004) significa toda a biomassa existente na floresta ou apenas na sua fração arbórea, e, em se tratando de biomassa de origem vegetal, vem sendo empregado o termo fitomassa florestal ou fitomassa arbórea.

A matéria seca que a constitui é composta por carbono e nutrientes minerais com concentrações variando intra e interespecificamente, de acordo com o desenvolvimento, estado nutricional, condições edafoclimáticas e com as partes do vegetal (LARCHER, 1986). Segundo Krapfenbauer e Andrade (1982), nas árvores, seus teores médios são 50% de carbono, 43% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 1% de elementos minerais.

A obtenção do peso individual de árvores, para fazer as estimativas da retirada de nutrientes devido à colheita florestal, é de total importância para estimar a necessidade de reposição de nutrientes retirados e para a orientação no manejo florestal, visando à sustentabilidade da produção (SILVA et al., 2004).

Sua estimativa está diretamente ligada a uma série de tomadas de decisão no manejo florestal, uma vez que essa informação é obtida por meio do inventário florestal, empregando equações para estimar a biomassa em função de variáveis dendrométricas viabilizando baixo custo, porém, necessitando na maioria das vezes aplicar uma amostragem destrutiva para estimativas mais coesas em pesquisas voltadas ao uso dos recursos naturais madeireiros nas áreas sujeitas a exploração florestal (MAESTRI et al., 2004; SOMOGYI et al., 2007; SILVEIRA et al., 2008; URBANO et al., 2008).

No semiárido brasileiro pesquisas iniciais foram de suma importância para a quantificação e estimativa da fitomassa florestal na busca de informações mais precisas sobre as suas distintas fitofisionomias encontradas (CARVALHO et al., 1979; CARVALHO; OLIVEIRA, 1993; CARVALHO; ZÁKIA, 1993; SILVA, 1994; SILVA, 1998; SAMPAIO; SILVA, 2005).

Outros trabalhos, como os de Kauffman et al. (1993) e Silva (1998) quantificaram a biomassa arbórea em áreas de Caatinga no estados de Pernambuco e Bahia, com valores de 74 t ha⁻¹ em Serra Talhada (PE) e de 35 a 156 t.ha⁻¹ em Santa Luz (BA) e Petrolina (PE). (Silva, 1998) ainda estimou biomassa total para 112 áreas de caatinga, e observou uma grande amplitude variando de 2 a 156 t.ha⁻¹, sendo que mais de 60% dessas áreas não ultrapassaram 20 t.ha⁻¹.

Amorim et al. (2005), mensuraram 25,1 t ha⁻¹, na Estação Ecológica do Seridó. Drumond et al. (2008) ao avaliar a biomassa aérea de cinco espécies da caatinga, encontraram valores médios de 12 t ha⁻¹.

Alguns desses valores puderam ser observados no censo agropecuário de 2006, realizado pelo IBGE (IBGE, 2012), estimando uma produção média de biomassa florestal em torno de 38 t.ha⁻¹ levando em consideração o ciclo de regeneração natural de 100% da Caatinga com treze anos em diversas áreas de mata nativa por município.

Em pesquisas mais recentes a biomassa na maior parte da Caatinga possui valores entre 20 t.ha⁻¹ e 80 t.ha⁻¹. Devido às condições climáticas menos favoráveis e pelo elevado grau de antropização que eleva a exploração madeireira limitando as alturas máximas das árvores que pouco ultrapassam os 10m (Ministério do Meio Ambiente, 2010).

Noutros estudos também foram encontrados valores dentro desta margem variando de 1,2 t ha⁻¹ a 29,6 t ha⁻¹ em áreas de Caatinga nos municípios de Ibimirim (PE), (ALVES, 2011) e Caicó (RN) em estágios de regeneração natural e preservada (SANTOS et al., 2016).

As flutuações nas quantidades de biomassa encontrados na Caatinga conduzem a uma maior e melhor investigação, pois influem diretamente nos estoques de carbono da vegetação e do solo, por conta da peculiaridade e das formas de manejo em cada área (LAURENCE et al., 1999; KAUFFMAN et al., 2009; DON et al., 2011).

De acordo com Sampaio e Costa (2011), as áreas cobertas com vegetação nativa de Caatinga arbustiva e arbórea têm um estoque de biomassa vegetal maior do que as áreas cobertas por vegetação herbácea, assim como as áreas com pastagens abertas que possuem um maior estoque de biomassa e carbono em relação as áreas plantadas com culturas de ciclo curto. O estoque de C no solo segue padrão semelhante. Assim, é necessário estimar as proporções de biomassa nos diferentes usos do solo. Sendo estes usos inúmeros e variáveis no tempo e espaço.

Modelagem Matemática

Os modelos podem ser definidos como sendo a representação simplificada de algum aspecto real, e no contexto estatístico o modelo é nada mais que uma demonstração formal da teoria que envolve uma expressão matemática entre variáveis, a fim de gerar uma equação preditiva e precisa (BARRETT; FRIED, 2004).

Segundo Silva (2008) a modelagem matemática é baseada em hipóteses que tentam representar fenômenos físicos ou biológicos, com a finalidade de gerar uma equação que possa estimar quantitativamente tal(is) fenômeno(s) a um determinado nível de probabilidade.

Os modelos encontrados na literatura são divididos em dois grupos: os dos modelos lineares e modelos não lineares intrinsecamente lineares que podem ser ajustados pelos métodos dos mínimos quadrados e os não lineares, que são ajustados por métodos matemáticos de interação como os de Marquardt, Gauss-Newton e o Gradiente (SCOLFORO, 2005). Já os modelos intrinsecamente lineares podem ser linearizados e ajustados usando o método dos mínimos quadrados (BATISTA; COUTO, 1986; GOMES; VARRIALE, 2004).

A aplicabilidade de modelos matemáticos em florestas nativas ou plantadas se baseia por muitas vezes em modelos biométricos e processuais, sendo o primeiro geralmente aplicado na prognose da produção florestal e o segundo em processos fisiológicos e de crescimento estimando a produção por meio do funcionamento da planta (SCOLFORO, 2005).

Na área florestal a modelagem matemática é em geral realizada com variáveis que possuem fortes relações alométricas, sendo esta uma técnica muito utilizada para diversas finalidades, visando obter variáveis de difícil mensuração (biomassa e volume) por meio de variáveis independentes de fácil obtenção (DAP e altura) como nos trabalhos realizados em áreas de Caatinga (ARAÚJO et al., 2004; SILVA; SAMPAIO, 2008; MENDONÇA et al., 2013; ASSIS et al., 2015; GONZALEZ, 2015; SILVA et al., 2016).

Essas relações são obtidas por meio da análise de regressão, na qual um modelo linear quase sempre é preferido, dada a sua simplicidade. O ajuste desse modelo aos dados é feito na maioria dos casos pelo método dos mínimos quadrados ordinários, por minimizar a soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e estimados (KIRCHNER, 1988). Vários são os modelos lineares propostos na

literatura florestal, muitos deles já convencionais pelo uso ou eficiência. Uma lista ampla pode ser encontrada nos trabalhos realizados por (PÉLLICO NETTO, 1980; SCOLFORO et al., 2004; SCHNEIDER, 2008).

Geoestatística

O estudo da análise espacial é uma ferramenta bastante útil, pois tem como proposta quantificar as propriedades e relações por meio da localização espacial de um dado fenômeno em estudo permitindo estudá-lo, explorá-lo e modelá-lo diante de procedimentos que possibilitem selecionar um modelo matemático que considere de maneira prática as interdependências espaciais atuantes no mesmo (DRUCK et al., 2004). Podendo ser captada por meio de técnicas geoestatísticas como: correlograma, semivariograma, covariograma, fractal, krigagem, cokrigagem, etc.

A geoestatística para Matheron (1963) era tratada como a ciência que estudava a variabilidade de uma quantidade, por meio de um modelo probabilístico, associado à posição relativa das observações no espaço e suas possíveis correlações em função das distâncias entre si. Já em abordagens mais atuais vem sendo empregada como a metodologia que trata de dados de área e processos pontuais (FONSECA, 2008).

A mesma tem por objetivo a modelagem do fenômeno espacial em estudo, ou seja, determinar a distribuição e variabilidade espacial da variável de interesse num dado local por meio da geração de mapas (PIRES, 2002).

Tal metodologia é bastante eficaz no estudo das denominadas variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis que sofrem influência espacial, essas variáveis têm um comportamento espacial condizente com as características intermediárias existentes entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas (LANDIM, 2003).

As variáveis regionalizadas na teoria pressupõem que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes: a primeira com característica estrutural, associada a uma média constante ou a uma tendência; a segunda é denominada de componente aleatória, espacialmente correlacionada; e a terceira e última está associada a um ruído aleatório ou erro residual (BURROUGH et al., 1994).

Na detecção da correlação espacial para componente aleatória existe uma ferramenta, denominada semivariograma. Essa ferramenta é usada para investigar a magnitude da correlação entre as amostras pertencentes a “n” variáveis e sua similaridade ou não com a distância (ZIMBACK, 2001).

Os Semivariogramas podem ser definidos em três tipos: o observado ou experimental (obtido a partir das amostras obtidas no campo), o verdadeiro (real, mas desconhecido) e o teórico (de referência, utilizado para o ajuste do modelo) e dentre os inúmeros modelos teóricos os que mais se sobressaem são os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear (GUERRA, 1988).

Após os ajustes dos modelos teóricos, havendo a dependência espacial entre as amostras, pode-se interpolar valores em qualquer localização na área de pesquisa, sem tendência e com variação mínima, utilizando inúmeros métodos de interpolação univariados e multivariados, com diversos níveis de complexidade (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

No caso de observações bi ou multivariadas os modelos e procedimentos são estendidos de diferentes formas visando modelar as covariâncias simples e cruzadas espaciais entre as variáveis envolvidas (WACKERNAGEL, 2003).

Dentre os métodos de interpolação para observações univariadas, um dos mais difundidos é a krigagem. Segundo Delfiner e Delhomme (1975), este termo é derivado do nome Daniel G. Krige, responsável por introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração.

Segundo Oliver e Webster (2007), a krigagem reuni um conjunto de métodos de estimação, são estes: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, Cokrigagem, krigagem disjuntiva, etc.

Dentre as metodologias de estimação para observações multi ou bivariadas a Cokrigagem é a mais indicada. De acordo com Isaaks e Srivastava (1989) este método é capaz de estimar uma variável secundária em função da estimativa de uma variável primária em locais não amostrados, com base nas covariâncias simples e cruzadas das (n) observações para (X, Y, ... n) variáveis no espaço.

É uma metodologia bastante útil na área ambiental, principalmente nas ciências agrárias, pois possibilita ao pesquisador identificar, explorar e compreender os fenômenos naturais em função de sua distribuição no espaço. No entanto, estima-se que menos de 20% das publicações na literatura ecológica levam em consideração a estrutura de dependência espacial (DORMANN, 2007).

Todo havia no setor florestal existem alguns trabalhos que já utilizaram a geoestatística como metodologia para predição e análise do comportamento de algumas variáveis ambientais imprescindíveis ao manejo de florestas plantadas e nativas.

Como no estudo realizado por Mello (2004) que teve como objetivo avaliar o uso da geoestatística aplicada ao inventário florestal diante da estrutura de continuidade espacial de quatro características dendrométricas: (volume, diâmetro médio quadrático, área basal e altura média dominante) em um povoamento de 987 hectares de *Eucalyptus grandis*, com sete anos de idade, localizado no município de Itapetininga, São Paulo, pertencente à Votorantim Celulose e Papel (VCP). O mesmo observou que os métodos de ajuste e seleção de modelos geoestatísticos para predição do volume e da dependência espacial das variáveis foram eficazes e precisos devendo ser considerados antes da realização do inventário florestal, propondo uma redução de custos quanto ao esforço amostral.

Em outro estudo realizado por Amaral et al. (2010) num fragmento de Floresta Ombrófila Mista, localizada em General Carneiro, sudoeste do Estado do Paraná, no qual se teve como proposta analisar a distribuição de biomassa e carbono acima do solo, foi utilizada a técnica geoestatística de Krigagem ordinária. Foi observado que as variáveis resposta apresentaram forte dependência espacial e que o uso da técnica geoestatística foi satisfatório e preciso, proporcionando a geração de mapas temáticos permitindo a observação do comportamento destas variáveis no espaço.

Guedes et al. (2012) também obteve resultados positivos ao analisar a dependência espacial para a definição de estratos em povoamentos florestais em clones de *Eucalyptus* sp., da empresa Vallorec & Mannesman Florestal, localizados nos municípios de Curvelo, João Pinheiro e Montes Claros, em Minas Gerais.

Vários outros veem verificando e analisando o comportamento espacial de variáveis dendrométricas em espécies florestais, apresentando a estrutura espacial como uma característica marcante nessas variáveis (PELLISSARI et al., 2014; TERRA et al., 2015; PELLISSARI et al., 2015; SCOLFORO et al., 2016).

Os trabalhos supracitados, denotam a vantagem de se utilizar a metodologia geoestatística, pois a mesma possibilita a captação da influência de um dado local sobre determinada variável ou fenômeno, sendo esta influência denominada de dependência espacial, essencial para verificar como os planos de manejo florestal podem ser mais sustentáveis e lucrativos reduzindo os impactos da exploração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES; A. R. **Quantificação de biomassa e ciclagem de nutrientes em áreas de vegetação de caatinga no município de Floresta, Pernambuco**. 2011. 116f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2011.

AMARAL, L. P.; et al. Análise da distribuição espacial de biomassa e carbono arbóreo acima do solo em floresta ombrófila mista. **Ambiência Guarapuava**, Paraná, v.6, p.103 – 114, 2010.

AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, E. L. Flora e estrutura da vegetação arbustiva-arborea de uma área de caatinga do Sériido, RN, Brasil. **Acta Botânica Brasílica**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 615-623, 2005.

ARAÚJO FILHO, J. C.; et al. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos - UEP Recife; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 252 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 11). 1 CD-ROM.

ARAÚJO, L. V. C.; LEITE, J. A. N.; PAES, J. B. Estimativa da produção de biomassa de um povoamento de jurema-preta (*mimosa tenuiflora* (willd.) Poiret. Com Cinco anos de idade. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 347-352, 2004.

ASSIS, J. P. et al. Estimação da área foliar da “jitirana” (*Merremia aegyptia* (L.) Urban), através de modelos de regressão para Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 75-81, 2015.

BARALOTO, C. et al. Disentangling stand and environmental correlates of aboveground biomass in Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 17, n. 8, p. 2677–2688, 2011.

BARRETT, T. M.; FRIED, J. S. Modeling. In: **Encyclopedia of Forest Sciences**, p. 426-433. 2004.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. Escolha de modelos matemáticos para a construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus sp.* no Estado de São Paulo. **IPEF**. n. 32, p.33-42, 1986.

BRASIL. **Subsídios para a elaboração do plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Caatinga**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011. 128 p.

BURROUGH, P. A.; BOUMA, J.; YATES, S. R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, n.1/3, p.311-326, 1994.

CALIXTO JÚNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estudo comparativo da estrutura fitossociológica de dois fragmentos de Caatinga em níveis diferentes de conservação. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 345–355, 2014.

CARVALHO, A. J. E.; OLIVEIRA, C. R. **Avaliação do estoque lenhoso - inventário florestal do estado do Ceará**. Fortaleza, Projeto PNUD / FAO / IBAMA / SDU / SEMACE, (Documento de Campo 26). p. 61, 1993.

CARVALHO, A. J. E.; ZÁKIA, M. J. B. **Avaliação do estoque madeireiro: etapa final - inventário florestal do estado do Rio Grande do Norte**. Natal, PNUD / FAO / IBAMA / Governo do Rio Grande do Norte, (Documento de Campo 13), p. 85, 1993.

CARVALHO, G. H. et al. **Contribuição para a determinação da potencialidade madeireira da bacia do São Francisco: estado da Bahia**. Recife, SUDENE, p.85, 1979.

CPRH Instrução Normativa CPRH Nº 007/2006 Disciplina os procedimentos da CPRH referentes à aprovação da localização da Reserva Legal em propriedades e posses rurais; à autorização para supressão de vegetação e intervenção em Áreas de Preservação Permanente e à autorização para o desenvolvimento das atividades florestais no Estado de Pernambuco. Disponível em:<http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/IN%20007%202006;140606;20100420.pdf> Acesso em: 25 set. 2015.

CUMMINGS, D. L.; et al. Aboveground biomass and structure of rainforests in the southwestern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.163, p.293–307, 2002.

DELFINER, P.; DELHOMME, J. P. **Optimum interpolation by kriging**. 26p.1975.

DORMANN, C. F. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data. **Global Ecology and biogeography**, Oxford, v. 16, n.2, p.129-138, 2007.

DRUCK, S.; et al. **Análise espacial de dados geográficos**. EMBRAPA, p. 230, 2004.

DRUMOND, M. A.; et al. Produção e distribuição de biomassa de espécies arbóreas no semiárido brasileiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.4, p.665-669, 2008.

FERNANDES, A. **Fitogeografia brasileira**. Fortaleza: Multigraf. 1998, 339 p.

FONSECA, B. H. F. **Um estudo sobre estimação e predição em modelos geoestatísticos bivariados**. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. São Paulo, Piracicaba, p.74, 2008.

GOMES, A. G; VARRIALE, M. C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução**. 2.Ed. Santa Maria - RS: Editora UFSM, 2004.

GONZALEZ, C. R. Modelagem dos estoques e fluxos de carbono no sistema solo-planta em áreas de caatinga densa do semiárido pernambucano. **Dissertação de Mestrado** (Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife. p.39, 2015.

GUEDES, I. C. L.; et al. Técnicas Geoestatísticas e Interpoladores Espaciais na Estratificação de Povoamentos de *Eucalyptus sp*. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 541-550, 2012.

- GUERRA, P. A. G. Geoestatística Operacional. Brasília: DNPM, p.145, 1988.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em: 06/2016.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, p.600, 1989.
- JACOMINE, P. K.T. Solos sob caatinga: características e uso agrícola. **O solo nos grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. SBSCS/UFV, Viçosa, p. 95-111, 1996.
- KAUFFMAN, J. B.; et al. Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. **Ecology**, v.5, n. 2, p.140-151, 1993.
- KAUFFMAN, J. B.; HUGHES, R.F.; HEIDER, C. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics. **Ecological Applications**, v.19, n.5, p.1211-1222, 2009.
- KIRCHNER, F. F. Análise dos mínimos quadrados. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 18, n.1, p. 12-35, 1988.
- KRAPFENBAUER, A.; ANDRAE, F. Pesquisas Áustro-Brasileiras 1973-1982 sobre *Araucaria angustifolia*, *Podocarpus lambertii* e *Eucalyptus saligna*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1982. p. 16-29.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2ª. Edição, São Paulo: Editora Unesp, 2003, 253p.
- LEAL, I. R. et al. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 139-146, 2005.
- MAESTRI, R. et al. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o sequestro de carbono. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 347-360, 2004.

MARTINELLI, L. A. et al. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. Seminário Emissão X Sequestro de CO² – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, Rio De Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CURD, p. 197-221, 1994.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**. v. 58, n.8, p.1246-1266. 1963.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Tese (doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, p.111, 2004.

MENDONÇA, A. V. R. et al. Estimação de biomassa aérea da caatinga do norte da Bahia. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 33, n. 76, p. 355-368, 2013.

MURPHY, P.G.; LUGO. A.E. Ecology of tropical dry forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 17, p. 67– 88, 1986.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information System**, v. 4, n. 3, p. 313-332, 2007.

PELISSARI, A. L. et al. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do mato grosso. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 32, n. 3, p. 430–444, 2014a.

PELISSARI, A. L. et al. Geostatistic Applied to Spatial Modeling of Hypsometric Relationships in Forest Stands. **American International Journal of Contemporary Research**, v. 4, n. 7, p. 67–76, 2014b.

PELISSARI, A. L. et al. Propostas de mapeamentos da capacidade produtiva de sítios florestais por meio de análises geoestatísticas. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 601–608, 2015.

PÉLLICO NETTO, S. Estimativas volumétricas de árvores individuais: síntese teórica. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 63- 73, 1980.

PERNAMBUCO **Plano de desenvolvimento florestal e da conservação da biodiversidade de Pernambuco**. Recife: Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, 2000.

PIRES, C. A. F. **Modelagem e avaliação de dados geofísicos e geoquímicos aplicada a pesquisa de metais básicos no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, Brasil)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas Matérias e Metalurgia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.208, 2002.

POGGIANI, F. et al. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. **Série Técnica IPEF**, v. 12, n. 31, p. 33–43, 1998.

PRADO, D. As caatingas da América do Sul, p. 3–73. In: I. R. Leal & M. Tabarelli & J. M. C. Silva (eds). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2003. 804p.

RIEGELHAUPT, E. M; PAREYN, F. G. C. A questão energética e o manejo florestal da Caatinga. In: GARIGLIO, M. A; SAMPAIO, E. V. S. A; CESTARO, L. A; KAGEYAMA, P. Y. (Org.). **Uso Sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**, Brasília. p.65-75, 2010.

RODAL, M. J. N.; MARTINS. F. R.; SAMPAIO. E. V. S. B. Levantamento quantitativo das plantas lenhosas em trechos de vegetação de caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 192-205, 2008.

SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian Caatinga. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. Seasonally dry tropical forests. Cambridge: Cambridge University, 1995. p. 35-63.

SAMPAIO, E. V. S. B. Uso das plantas da caatinga. In: SAMPAIO, E.V.S.B.; GIULIETTI, A.M.; VIRGÍLIO, J.; GAMARRA-ROJAS, C.F.L. (Eds.). **Vegetação e flora da caatinga**. Recife: APNE & CNIP, 2002. p. 49-68.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 4, p. 937-945, 2005.

SAMPAIO, E. V. S. B. Características e potencialidades. In: GARIGLIO, M. A; SAMPAIO, E. V. S. A; CESTARO, L. A; KAGEYAMA, P. Y. (Org.). **Uso Sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**, Brasília. p.29-48, 2010.

SAMPAIO, E. V. S. B.; COSTA, T. L. Estoques e Fluxos de Carbono no Semiárido Nordeste: Estimativas Preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.4, n.6, p.1275-1291, 2011.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F. DE; NEVES, J. C. L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, n. 56, p. 155–169, 1999.

SANTOS, R. C. et al. Estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 1-7, 2016.

SANQUETTA, C. R.; ZILIO, M. A. B. **Carbono: ciência e mercado global**. Curitiba: UFPR / ECOPLAN, p.240-265, 2004.

SCHNEIDER, P. R. **Planejamento da produção florestal**. Santa Maria-RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 501p.

SCOLFORO, J. R. et al. Estimativas de volume, peso seco, peso de óleo e quantidade de moirões para a candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish). **Revista Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 87-102, 2004.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal**: Parte I: Modelos de regressão linear e não linear; Parte II: Modelos de relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

SILVA, G. C. **Relações alométricas de dez espécies vegetais e estimativas de biomassas aéreas da caatinga**. Tese (Doutorado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. p.163, 1998.

SILVEIRA, P.; et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Revista Floresta**, v. 38, n. 1, p.185-206, 2008.

SOMOGYI, Z. et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n.2, p. 197-207, 2007.

SILVA, G, C; SAMPAIO, V, S, B, S. Biomassas de partes aéreas em plantas da Caatinga, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p-567-575, 2008.

SILVA, J. W. L.; SILVA, T. G. F.; BARBOSA, M. L. Espécies *Caesalpinia pyramidalis* Tul. e *Prosopis juliflora* Sw (DC.) sob Diferentes Regimes Hídricos: Crescimento e Ajuste de Modelos Matemáticos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1692-1710, 2016.

SILVA, H. D.; et al. Alocação da biomassa e ajuste de equações para a estimativa da biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de pesquisas florestais Colombo**. n.49, p.83-95. 2004.

SILVA, P. S., SOLANGE, E., PAREYN, F. **Consumo de energéticos florestais do setor domiciliar no Estado de Pernambuco**. Recife: PNUD/FAO/IBAMA/GOVERNO DE PERNAMBUCO. (Documento de Campo FAO, 14). p.48, 1998.

URBANO, E.; et al. Modelagem da biomassa aérea em bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p.361-372. 2008.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, n. 33, p. 261-314, 2011.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WACKERNAGEL, Hans. **Multivariate Geostatistics**, 387p. 2003.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solo para fins de mapeamento de fertilidade do solo**. Botucatu. Tese (Livre Docência na Disciplina de Levantamentos de Solos e Fotopedologia), Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, p.114, 2001.

CAPÍTULO 1: AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS A FITOMASSA SECA DOS COMPARTIMENTOS DE PLANTAS LENHOSAS EM ÁREA DE CAATINGA

INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é considerado a região árida mais habitada do mundo, contudo, a pressão antrópica sobre esse bioma vem se intensificando ao longo dos anos, acarretando a ampliação de áreas em diversos estágios de sucessão secundária, decorrentes de vários tipos e intensidades de manejo provocados por intervenções passadas, a partir do corte indiscriminado de espécies arbóreas nativas como fonte de energia (CASTELLETTI et al., 2004; DRUMOND et al., 2008).

A aceleração da degradação ambiental no bioma Caatinga ocorre desenfreadamente, tendo em vista que 50% de suas áreas já foram alteradas pela ação humana e simplesmente 1% tem a proteção da Lei que rege o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) – Lei Nº 9.985 – em 18 de junho de 2000 (CAVALCANTI; ARAÚJO, 2008).

Cerca de 25% da demanda energética da indústria, comércio e uso doméstico da população na região nordeste são extraídas diretamente das áreas de Caatinga, muitas vezes limitadas em produtividade, apresentando regiões com maior abundância em arvoretas esgalhadas e arbustos que pouco ultrapassam os 10m de altura, apresentando valores de biomassa aérea entre 20t.ha⁻¹ e 80t.ha⁻¹ (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010).

Nesse sentido, manejar adequadamente a biomassa florestal favorece a sua condição como fonte de energia renovável e proporciona o aproveitamento de resíduos de sua exploração para o provimento produtivo da floresta, com base no conhecimento sobre o material lenhoso, cascas, folhas, flores, frutos, raízes, dentre outros, preocupando-se com seu reestabelecimento após a extração.

Para que o manejo seja feito de maneira mais eficiente, informações sobre as quantidades de fitomassa arbórea por compartimento de plantas e para o total devem ser coletadas por abordagens destrutivas, desbastando, separando e pesando seus compartimentos individualmente, porém este método é bastante oneroso e demanda tempo para sua concretização, além de gerar um elevado dano ambiental, salvo em áreas de manejo predispostas ao corte.

Por outro lado, os métodos indiretos também podem ser indicados, pois

baseiam-se no ajuste de modelos matemáticos a uma base de dados pré-disponibilizada pelo método destrutivo realizado em levantamentos anteriores. Sua vantagem está em fazer estimativas de biomassa baseado em dados obtidos de outros levantamentos apoiado nas relações alométricas entre a variável biomassa, de difícil obtenção, com variáveis facilmente coletadas em campo, como diâmetro e altura.

Trabalhos em áreas de Caatinga que abordaram o método não destrutivo foram poucos, principalmente os que trataram das quantidades de massa por compartimentos da planta (ZÁKIA et al., 1992; LIMA et al., 1996; SILVA; SAMPAIO; SILVA, 2005; SAMPAIO; SILVA, 2008; DRUMOND, 2008; ABREU, 2012).

Neste contexto, estimar a biomassa florestal da região, relacionando-a com variáveis dendrométricas é uma forma de fornecer informações que ajudem a traçar estratégias de desenvolvimento sustentável para o semiárido, auxiliando na compreensão dos arranjos produtivos locais e regionais.

Deste modo, a presente pesquisa visa determinar as proporções de diferentes partes das plantas em relação à biomassa total da parte aérea e ajustar modelos matemáticos aos dados de biomassa aérea seca por compartimento das árvores e para o total em função do DAP e altura em área de caatinga, afim de gerar equações gerais de modo a facilitar as estimativas de biomassa por compartimento na região.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A pesquisa foi realizada na fazenda Itapemirim, pertencente à Empresa Agrimex S.A do Grupo João Santos, no município de Floresta, em uma área com cerca de 50 ha, localizada nas proximidades das coordenadas geográficas 8°30'37" S e 37°59'07" W. correspondente ao primeiro talhão de corte da área submetida ao Plano de Manejo Florestal, Figura 1.

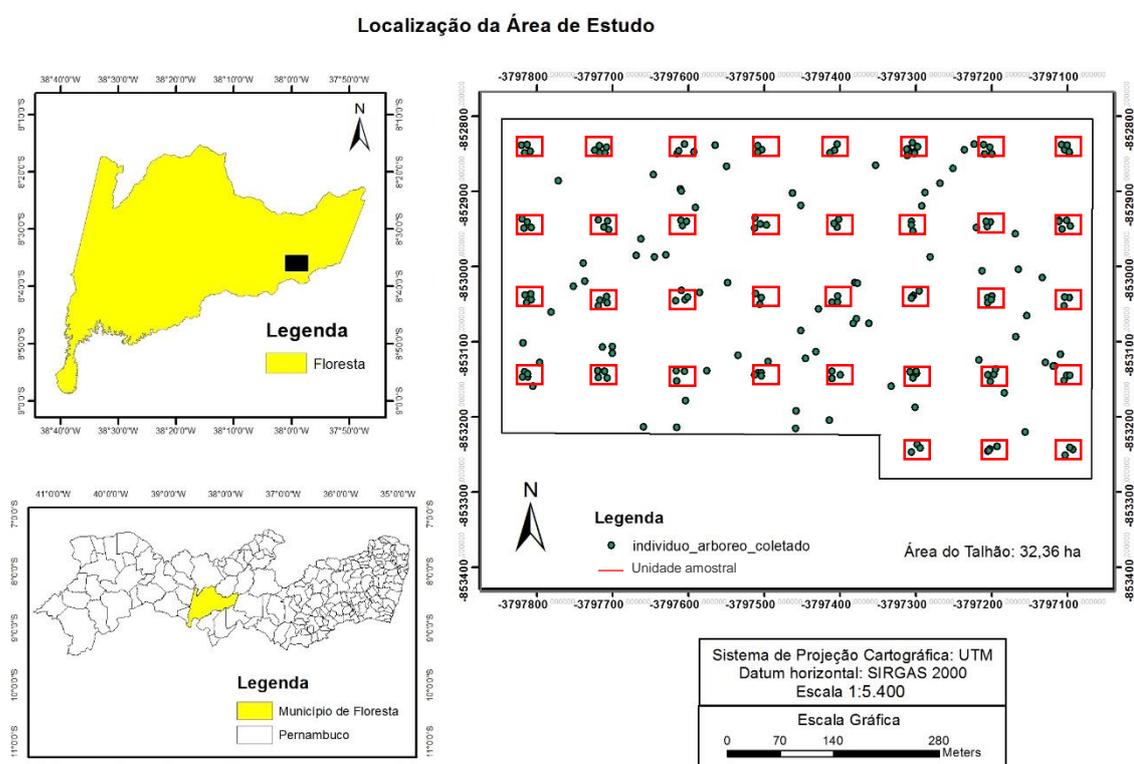


Figura 1. Esquema e mapa de localização da área de pesquisa na da Fazenda Itapemirim, Floresta (PE).

O município está inserido na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, caracterizada por uma superfície bastante monótona, relevo predominantemente suave-ondulado, cortada por vales estreitos e vertentes dissecadas (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, 2005). Quanto ao solo da região este é classificado como Luvisolo Crômico pouco profundo com textura superficial arenosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2001).

A vegetação é basicamente composta por Caatinga Hiperxerófila com trechos de Floresta Caducifólia. O clima segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSh, Tropical Semiárido com chuvas de verão. O período chuvoso se inicia em novembro com término em abril, com precipitação média anual é de 432 mm e temperatura média anual de 26 °C (CPRM, 2005).

A área em estudo está inserida na Microrregião de Itaparica (IBGE, 2012), situada no sudoeste do Sertão Pernambucano, com uma área de 9.589,8 km², que corresponde a 9,69% do território estadual, sendo constituída por sete municípios: Belém do São Francisco, Carnaubeira da Penha, Floresta, Ibimirim, Itacuruba, Jatobá, Tacaratu e Petrolândia.

Coleta e Análise dados

Inicialmente foi realizado um sistema de amostragem sistemático composto de 35 parcelas com 400 m² (20 m X 20 m) cada, sendo distadas entre si 80 m e das bordas do talhão 50 m e georeferenciadas com um GPS (Timber navigation). Nessas parcelas foram mensurados todos os indivíduos arbóreos, bem como suas bifurcações, com circunferência medida a 1,30 m do solo (DAP \geq 1,9cm), conforme as especificações do Comitê Técnico Científico da Rede de Manejo Florestal da Caatinga (2005).

Em seguida, foram realizados os levantamentos florísticos e as estimativas dos parâmetros fitossociológicos da distribuição horizontal, com o objetivo de reconhecer apenas as 5 espécies com maior Valor de Importância na área de pesquisa, conforme as fórmulas de Braun Blanquet (1932) e Mueller–Dombois e Ellenberg (1974).

Após as análises Florísticas e Fitossociológicas foram selecionadas as cinco espécies com os maiores valores de VI, logo em seguida para a coleta da biomassa verde em campo foram selecionados oito indivíduos arbóreos para cada uma das espécies em cada uma das cinco classes diamétricas estabelecidas de acordo com os valores de diâmetro a altura à 1,30 m do solo (DAP (cm)) para as cinco espécies, contabilizando 40 indivíduos para cada uma num total de 200 indivíduos amostrados, Tabela 1.

Tabela 1. Número de classes de diâmetro e suas amplitudes utilizadas para coleta de indivíduos arbóreos na área de estudo no município de Floresta-PE.

Classes	Amplitude de Classe DAP (cm)
1	1,9 3,5
2	3,5 5,1
3	5,1 6,7
4	6,7 8,3
5	> 8,3

A escolha dos indivíduos de cada uma das cinco espécies de maior VI foi feita de forma aleatória dentro das unidades amostrais e próximo as mesmas, evitando-se plantas parcialmente cortadas, queimadas ou tombadas de forma a cobrir as classes de diâmetro previstas para cada espécie.

O processo de determinação da biomassa verde em campo foi realizado pelo método destrutivo separando os compartimentos da planta em: Fuste, Galho grosso (diâmetro na base do galho $\geq 1,9$ cm), Galho fino (diâmetro nas duas bases do galho $\leq 1,9$ cm) e Folhas em campo para cada árvore-amostra, sendo respectivamente pesados em uma balança digital com capacidade de 200Kg.

Para a determinação do peso seco, pequenas amostras de 100 a 300g de cada compartimento em campo foram extraídas e armazenadas em sacos plásticos, sendo anotados seus pesos verdes, logo em seguida as mesmas foram conduzidas a uma estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 70°C até a estabilização de seus respectivos pesos secos.

$$Bs = \frac{Pu(c).Ps(a)}{Pu(a)}$$

Em que: Bs= Biomassa seca total por compartimento (Kg), Pu(c)= peso úmido total no campo por compartimento (Kg), Ps(a)=peso seco da amostra por compartimento (kg), Pu(a) peso úmido da amostra por compartimento (Kg).

Por fim foi quantificada a biomassa seca total em (Kg) por indivíduo, somando os valores de biomassa seca por compartimento. Proporcionando analisar quantitativamente as quantidades de biomassa seca para os compartimentos da planta e para o total, em função das classes diamétricas por espécies de maior VI.

Preparação para modelagem matemática

Os dados de biomassa seca para todos os compartimentos das plantas foram submetidos a transformação de Box-Cox, (BOX; COX, 1964).

$$W_{(\lambda)} = \frac{y^{(\lambda)} - 1}{\lambda}$$

Encontrado o valor adequado de λ foi feita a transformação dos dados e na sequência verificou-se a normalidade dos mesmos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo expresso por: $D = \frac{d_{max.}}{N}$

Sendo: D = valor estatístico do teste de Kolmogorov-Smirnov; $d_{max.}$ = máxima diferença absoluta entre as frequências observadas e esperadas; N = número de observações.

Após a verificação normalidade dos dados procedeu-se a Análise de Variância (ANOVA) fator único para verificar se houve diferença significativa entre as espécies em função das quantidades de biomassa seca por compartimentos e para o total. De forma complementar foi utilizado o pós-teste de Tukey (5%) de probabilidade, para a verificação da distinção de grupos dentro dos compartimentos e do total de biomassa seca (Kg) por espécies.

Também foi testada a correlação de Pearson, com o objetivo de verificar a correlação existente entre as variáveis dependentes; biomassa seca (kg) para o total, fuste, galhos grossos (diâmetro na base $\geq 1,9$ cm), galhos finos (diâmetro nas duas bases $\leq 1,9$ cm), folhas e galhos finos (diâmetro nas duas bases $\leq 1,9$ cm) + folhas, com as variáveis independentes; circunferência à altura do peito (1,3 m) e altura total da árvore (Ht) de cada um dos 200 indivíduos amostrados.

Após essa etapa houve o ajuste de modelos matemáticos aos dados que geraram equações para estimar a biomassa seca (Kg), por compartimentos e para o total.

Os modelos matemáticos não lineares e intrinsecamente lineares foram ajustados, por intermédio do algoritmo de Levenberg-Marquardt que utilizou o Método dos Mínimos Quadrados Não Lineares (SILVA et al., 2009). Estes modelos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos matemáticos não lineares: intrinsecamente lineares e não lineares ajustados aos dados de fitomassa seca do fuste (kg), galho grosso (galhos com diâmetro na base $\geq 1,9$ cm) (kg), galho fino (galhos com diâmetro na base $\leq 1,9$ cm), folha (kg), em função do diâmetro a altura do peito DAP(cm) e altura total Ht(m).

	Modelos	Autores
1	$Ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(DAP_i) + \beta_2 \cdot Ln(H_i) + \varepsilon_i$	Schumacher e Hall (Linearizado)
2	$Ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(DAP_i^2 \cdot H_i) + \varepsilon_i$	Spurr (Linearizado)
3	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP_i + \beta_2 \cdot H_i^2 + \varepsilon_i$	Hohenald-Krenn
4	$Y_i = \beta_0 \cdot DAP_i^{\beta_1} \cdot H_i^{\beta_2} \cdot \varepsilon_i$	Schumacher e Hall
5	$Y_i = \beta_0 \cdot e^{(-e^{(\beta_1 - \beta_2 \cdot DAP_i)})} + \varepsilon_i$	Gompertz

Em que: Y_i = variáveis dependentes; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ = parâmetros dos modelos; $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}$ = variáveis independentes; ε_i = erro aleatório.

A seleção das melhores equações para as estimativas da biomassa total e por compartimentos foi realizada com base nos seguintes critérios estatísticos;

Erro Padrão das Estimativas

Utilizado para expressar o erro padrão dos resíduos ou desvios em relação ao valor real obtido em campo.

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

Em que: S_{xy} = erro padrão da estimativa; Y_i = Valor observado (real); \hat{Y}_i = Valor estimado pela equação de regressão; n= número de observações; p = número de parâmetros do modelo.

Serve para expressar o erro percentual das estimativas em porcentagem da equação gerada.

$$S_{xy}(\%) = \frac{S_{xy}}{\bar{Y}} \cdot 100$$

Em que: $S_{xy}(\%)$ = erro padrão da estimativa em porcentagem; S_{xy} = erro padrão da estimativa; \bar{Y} = média das variáveis dependentes.

Índice de Furnival

Utilizado na comparação entre modelos logarítmicos e não logaritizados corrigindo o erro padrão da estimativa para escala original da variável dependente (SILVA; BAILEY, 1991):

$$IF = f'(V)^{-1} \cdot \exp\left(\frac{n \cdot p}{2n}\right) \cdot S_{xy}$$

Em que: $f'(V)^{-1}$ = derivada da variável dependente em relação ao volume dos indivíduos; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; S_{yx} = erro padrão da estimativa.

Expresso percentualmente por:

$$IF\% = \frac{IF}{\bar{Y}} \cdot 100$$

Em que: $IF\%$ = Índice de Furnival em percentagem; \bar{Y} = média das variáveis dependentes.

Sua forma percentual para equações logarítmicas deve ser comparado com o coeficiente de variação de equações aritméticas.

Coeficiente de determinação ajustado

Foi desenvolvido e adequado para os modelos lineares, não lineares e intrinsecamente lineares, utilizado para compará-los principalmente entre modelos com diferentes números de parâmetros, expresso por:

$$R^2_{aj} = R^2 - \left[\frac{K - 1}{N - K} \right] \cdot (1 - R^2)$$

Em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; K = número de variáveis independentes da equação; N = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação.

Distribuição dos Resíduos

Bastante utilizado para verificar a dispersão percentual dos valores estimados pela equação gerada com os valores observados, expresso pela equação:

$$\hat{e}_{(\%) } = \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right) . 100$$

Em que: $\hat{e}_{(\%)}$ = Resíduo percentual; y_i = Valor observado (real); \hat{y}_i = Valor estimado pela equação de regressão.

Nessa etapa de análise também foi utilizado o Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e o gráfico dos resíduos em função da ordem de observação dos dados para verificar as suposições de normalidade e independência dos erros apenas para as equações com os melhores ajustes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Florística

Os resultados apresentados na Tabela 3 são referentes ao componente arbustivo-arbóreo amostrado em 1,4ha, onde foi observada a ocorrência de 19 espécies, distribuídas por 7 famílias com destaque para Fabaceae e Euphorbiaceae com seis espécies cada, seguidas de Anacardeaceae com três e Capparaceae, Combretaceae, Apocynaceae e Burseraceae, com apenas uma espécie representante.

Tabela 3. Listagem florística das espécies arbustivo-arbóreas encontradas no talhão da área de manejo da Fazenda Itapemirim- Floresta.

Família/Espécies	Nome comum
Fabaceae	
<i>Poincianella bracteosa</i> (Tul.) L.P.Queiroz	Catingueira
<i>Mimosa ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	Jurema de Imbira
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Jurema Preta
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul	Angico de caroço
<i>Bauhinia cheilanta</i> (Bong). Steud.	Mororó
<i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke	Jurema branca
Capparaceae	
<i>Capparis flexuosa</i> L.	Feijão bravo
Combretaceae	
<i>Thiloa glaucocarpa</i> (Mart.) Eichl	Sipauba
Euphorbiaceae	
<i>Euphorbia phosphorea</i> Mart.	Burra leiteira
<i>Sapium lanceolatum</i> Huber	Pau de leite
<i>Jatropha mollissima</i> Muell. Arg.	Pinhão bravo
<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i> (Mull. Arg.) Pax & K. Hoffm.	Faveleira
<i>Croton rhamnifolius</i> Kunth.	Quebra faca
<i>Manihot glaziovii</i> Muell. Arg.	Maniçoba
Anacardiaceae	
<i>Myracrodruon urundeuva</i> (Engl.) Fr. All.	Aroeira
<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	Baraúna
<i>Spondias tuberosa</i> Arr. Câm.	Umbuzeiro
Apocynaceae	
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart.	Pereiro
Burseraceae	
<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J. B. Gillett	Imburana de cambão

Outros trabalhos realizados na Caatinga similarmente listaram as famílias Fabaceae e Euphorbiaceae por apresentarem maior número de espécies (ALVES JUNIOR et al., 2013; LIMA; COELHO, 2015; LUCENA; et al., 2016).

Estrutura

Foram observados 1941 ($N \cdot ha^{-1}$) e uma dominância absoluta de 4,75 ($m^2 \cdot ha^{-1}$) para comunidade, e as espécies que juntas perfizeram 67% de VI foram em ordem decrescente; *Poincianella bracteosa* (29,08%), *Commiphora leptophloeos* (13,58%), *Aspidosperma pyriforme* (10,22%), *Mimosa tenuiflora* (7,12%) e *Mimosa ophthalmocentra* (6,96%), expostos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros da distribuição horizontal das espécies arbustivo-arbóreas encontradas no talhão da área de manejo da Fazenda Itapemirim- Floresta.

Espécies	DA	DR	FA	FR	DoA	DoR	VI (%)
<i>Poincianella bracteosa</i>	807	41,6	91,4	11,94	1,604	33,7	29,08
<i>Commiphora leptophloeos</i>	80	4,1	77,1	10,07	1,262	26,5	13,58
<i>Aspidosperma pyriforme</i>	239	12,3	74,3	9,7	0,412	8,7	10,22
<i>Mimosa tenuiflora</i>	130	6,7	68,6	8,96	0,271	5,7	7,12
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	215	11,1	51,4	6,72	0,147	3,1	6,96
<i>Jatropha mollissima</i>	62	3,2	51,4	6,72	0,058	1,2	3,71
<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i>	41	2,1	51,4	6,72	0,196	4,1	4,32
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	34	1,7	51,4	6,72	0,236	5	4,47
<i>Croton rhamnifolius</i>	98	5	45,7	5,97	0,04	0,8	3,95
<i>Euphorbia phosphorea</i>	38	1,9	37,1	4,85	0,112	2,4	3,05
<i>Piptadenia stipulacea</i>	65	3,3	37,1	4,85	0,046	1	3,06
<i>Manihot glaziovii</i>	30	1,5	37,1	4,85	0,024	0,5	2,3
<i>Spondias tuberosa</i>	19	1	25,7	3,36	0,268	5,6	3,32
<i>Bauhinia cheilanta</i>	31	1,6	22,9	2,99	0,013	0,3	1,63
<i>Anadenanthera colubrina</i>	14	0,7	20	2,61	0,032	0,7	1,34
<i>Thiloua glaucocarpa</i>	10	0,5	8,6	1,12	0,009	0,2	0,61
<i>Sapium lanceolatum</i>	24	1,2	5,7	0,75	0,01	0,2	0,72
<i>Capparis flexuosa</i>	4	0,2	5,7	0,75	0,006	0,1	0,35
<i>Schinopsis brasiliensis</i>	1	0,1	2,9	0,37	0,01	0,2	0,22
Total Geral	1941	100	765,7	100	4,755	100	100

Em que: DA= Densidade absoluta($N \cdot ha^{-1}$); DR=Densidade relativa (%); FA= Frequência absoluta; FR= Frequência relativa (%); DoA= Dominância absoluta ($m^2 \cdot ha^{-1}$); DoR= Dominância relativa (%) e VI=Valor de importância (%).

Suficiência amostral

Os resultados obtidos pelos parâmetros estatísticos do processo amostral aleatório realizado na coleta de biomassa por indivíduos arbóreos para validação da pesquisa, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros estatísticos amostrais para biomassa total seca (Kg) dos 200 indivíduos arbóreos coletados na área da pesquisa.

Estatísticas	Parâmetros
Média	10,6
Desvio padrão	7,5
Variância da amostra	55,6
Coefficiente de variação (%)	70,5
Número de amostras	200
Erro amostral	1,04
Erro amostral (%)	9,8
Intervalo de confiança (95%)	$9,5 \leq 10,6 \leq 11,6$
Nº ótimo de amostradas	193
Erro admissível (%)	10,0
Total (Kg)	2115,0

Diante dos parâmetros apresentados pôde-se observar que a amostragem realizada foi suficiente para a validação de estimativas da biomassa seca (Kg) na área de pesquisa, mesmo com um coeficiente de variação de 70,5%.

A espécie *Poincianella bracteosa* se destacou das demais por apresentar superioridade em todos os parâmetros da estrutura horizontal. Algumas pesquisas alegam que a predominância desse táxon é bastante acentuado nas áreas em que a Caatinga encontra-se no estágio de sucessão secundária intermediária (FABRICANTE et al., 2009; CABRAL et al., 2013).

Esta espécie também foi predominante nos trabalhos realizados por Alves Júnior (2010), Marangon et al. (2013) e Ferraz et al. (2014), no mesmo município da atual pesquisa em áreas sem histórico de perturbação por mais de 50 anos com 34,90%, 19,94% e 18,89% do VI respectivamente.

Outra espécie que mereceu destaque foi a *Commiphora leptophloeos*, de acordo com os dados apresentados a mesma atingiu a segunda colocação em importância estrutural por apresentar quase 77% de frequência na área, aliados a

uma dominância de 1,2 m².ha⁻¹ perdendo apenas para *Poincianella bracteosa*.

Outras pesquisas também apresentaram a presença de *Commiphora leptophloeos* entre as espécies de maior importância estrutural e concluíram que esse comportamento é um indicativo de áreas em processo de sucessão secundária intermediária (CALIXTO JÚNIOR; DRUMOND, 2011; COELHO et al., 2012; ARAÚJO et al., 2012; CABRAL et al., 2013).

Diante dos resultados apresentados pela estrutura horizontal às cinco espécies selecionadas puderam representar bem a comunidade arbórea não só em relação ao VI, como também em densidade e dominância com (75,8%) e (77,7%) do total, além apresentarem uma ocorrência em 91,4% das 35 unidades amostrais para *Poincianella bracteosa*, 77,1% para *Commiphora leptophloeos*, 74,3% para *Aspidosperma pyrifolium*, 68,6% para *Mimosa tenuiflora* e 51,4% para *Mimosa ophthalmocentra*, justificando a escolha das mesmas para a coleta da fitomassa (Kg) na área da pesquisa.

Distribuição da biomassa seca

O montante de biomassa seca acumulada para os 200 indivíduos amostrados entre as 5 espécies de maior VI nas 5 classes diamétricas correspondeu a 2115,0 (Kg). Os resultados apresentados mostraram que a biomassa seca está alocada em maiores quantidades e proporções em ordem decrescente da seguinte maneira: fuste (914,2(Kg) e 43,2%)>galho grosso (563,2(Kg) e 26,6%)>galho fino (547,5(Kg) e 25,9%)>folhas (90,1(Kg) e 4,3%) respectivamente, como pôde ser observado na Tabela 6.

Tabela 6. Distribuição do acúmulo de biomassa seca (Kg) e percentagem (%) nas espécies de maior VI por compartimentos da planta.

Espécies/compartimentos	Fuste (Kg)	GG (Kg)	GF (Kg)	Folha (Kg)	Total (Kg)
<i>Poincianella bracteosa</i>	198,9(45,1%)	138,1(31,3%)	85,0(19,3%)	18,7(4,2%)	440,6
<i>Commiphora leptophloeos</i>	157,8(42,0%)	70,7(18,8%)	134,1(35,7%)	13,5(3,6%)	376,1
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	185,1(40,7%)	136,8(30,1%)	114,6(25,2%)	18,3(4,0%)	454,8
<i>Mimosa tenuiflora</i>	196,1(43,5%)	117,8(26,1%)	115,9(25,7%)	21,2(4,7%)	451,1
<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	176,4(44,9%)	99,8(25,4%)	97,8(24,9%)	18,5(4,7%)	392,5
Total (Kg)	914,2(43,2%)	563,2(26,6%)	547,5(25,9%)	90,1(4,3%)	2115,0

Em que: GG= galhos grossos (diâmetro na base ≥ 1,9 cm); GF= galhos finos (diâmetro nas duas bases ≤ 1,9 cm).

As concentrações de massa no fuste e nos galhos representaram mais de 95% da biomassa seca total, com pouco menos de 5% para as folhas. Corroborando com os trabalhos de (BROWN et al., 1995; REGINA, 2000; SOARES e OLIVEIRA, 2002; SALIS et al., 2006; SILVA; SAMPAIO, 2008).

Para as quantidades absolutas de biomassa acumulada por espécie a *Commiphora leptophloeos* foi a que apresentou menor quantidade com 376,1 (kg), seguida da *Aspidosperma pyriformium* com 392,5 (Kg) e as demais tiveram valores muito próximos com 440,6 (Kg) para *Poincianella bracteosa*, 454,8 (Kg) para *Mimosa ophthalmocentra* e 451,1 (Kg) para *Mimosa tenuiflora*.

O fato da *Commiphora leptophloeos* e *Aspidosperma pyriformium* apresentarem menores valores de biomassa seca acumulada, pode ser explicado pelos seus valores de densidade básica que em média são de 0,49 g/dm³ e 0,64 g/dm³ respectivamente, sendo inferiores aos da *Poincianella bracteosa* (0,82 g/dm³), *Mimosa ophthalmocentra* (1,06 g/dm³) e *Mimosa tenuiflora* (1,03 g/dm³) conforme os trabalhos realizados por (SILVA et al., 2011; ALBUQUERQUE, 2015).

Nota-se também que *C. leptophloeos* possui um padrão percentual de concentração de fitomassa diferente das demais espécimes, concentrando uma maior proporção de galhos finos (35,7%) e menor de galhos grossos (18,8%). Esta característica pode ser explicada pelo fato da mesma possuir menos ramificações no fuste se comparada as demais espécimes, como observado nas incursões a campo.

A biomassa seca total (Kg) apresentou um aumento de 7,2 vezes comparando o acumulado da primeira classe com o da última. Já entre as classes sucessivamente esta razão foi de 1,7 vezes em média, conforme à Tabela 7.

Tabela 7. Distribuição do acúmulo de biomassa seca (Kg) nas classes diamétricas por compartimentos da planta.

Classes/compartimentos	Fuste (Kg)	GG (Kg)	GF (Kg)	Folha (Kg)	Total (Kg)
1,9 3,5	52,4	21,5	42,1	6,5	122,5
3,5 5,1	95,8	54,7	71,4	14,8	236,7
5,1 6,7	148,4	61,4	91,1	11,2	312,1
6,7 8,3	244,7	155,4	144,3	18,6	563,0
> 8,3	372,9	270,2	198,6	39,0	880,8
Total (Kg)	914,2	563,2	547,5	90,1	2115,0

Em que: GG= galhos grossos (diâmetro na base ≥ 1,9 cm); GF= galhos finos (diâmetro nas duas bases ≤ 1,9 cm).

O acúmulo de biomassa seca (Kg) para os compartimentos em detrimento das classes diamétricas apresentou um aumento médio de 1,6 vezes para o fuste(Kg), 2 vezes para o galhos grossos (Kg), 1,5 para o galho fino e 1,7 para as folhas, indicando um crescimento harmônico das partes da planta entre as classes diamétricas.

De acordo com King (2005) isso pode ser um indicativo de que as partes das plantas vão se desenvolvendo de forma mais ou menos proporcional.

Para os percentuais de fitomassa por compartimentos em relação ao total acumulado por classe. As duas primeiras classes apresentaram um acúmulo de biomassa maior em galhos finos com 34,4% e 30,2% e folhas com 5,3% e 6,2% contra valores de 29,2%, 25,6% e 22,5% para os galhos finos e 3,6%, 3,3% e 4,4% para as folhas nas demais classes consecutivas, já para os galhos grossos com percentuais de 17,6% e 23,1%, ambas as classes apresentaram valores percentuais inferiores quando comparadas com as demais, Figura 2.

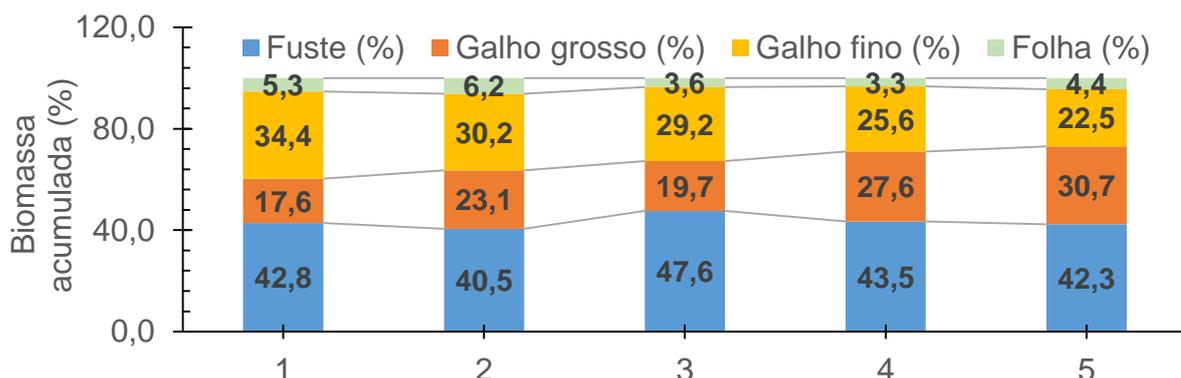


Figura 2. Gráfico com valores percentuais de biomassa seca dos compartimentos da planta por classes diamétricas. Onde 1 corresponde à amplitude (1,9 - 3,5 cm), 2 (3,5 - 5,1 cm), 3 (5,1 - 6,7 cm), 4 (6,7 - 8,3 cm) e 5 (\geq 8,3 cm).

Este comportamento pode estar relacionado a capacidade de adaptação das plantas ao ambiente, principalmente nas fases iniciais de estabelecimento, procurando investir mais em partes que forneçam o aumento da sua área fotossintética como as folhas e os galhos finos. De modo a alocarem biomassa para o seu crescimento e estabelecimento, influenciados pela ação da gravidade, vento e competição com as plantas vizinhas (NIKLAS,1994; O'BRIEN et al., 1995; SALES et al., 2014).

Os resultados apresentados pela análise de variância para as 5 espécies amostradas em função dos compartimentos da planta (Kg) apresentaram diferenças

significativas apenas para a biomassa seca dos Galhos grossos e Galhos finos, Tabela 8.

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) para todas as espécies em função dos compartimentos da planta (Kg).

Compartimentos	F.V	SQ	GL	QM	F(calc)	(p-valor)
Fuste	Tratamento	27,6	4	6,9	0,70	0,59 ^{n.s}
	Resíduo	1911,7	195	9,8		
	Total	1939,3	199			
Galho ≥ 6cm	Tratamento	79,8	4	19,9	2,52	0,02*
	Resíduo	1542,4	195	7,9		
	Total	1622,2	199			
Galho ≤ 6cm	Tratamento	35,1	4	8,8	2,82	0,04*
	Resíduo	607,6	195	3,1		
	Total	642,7	199			
Galho ≤ 6cm + Folha	Tratamento	30,7	4	7,7	1,75	0,14 ^{n.s}
	Resíduo	854,7	195	4,4		
	Total	885,3	199			

Onde: F.V=fonte de variação; SQ=soma dos quadrados; GL=grau de liberdade; QM=quadrado médio; F(calc)=valor calculado de “F”; (p-valor) = valor de significância do teste, (p-valor)>0,05, aceita-se à hipótese nula; * (p < 0,05), rejeita-se; n.s não significativo.

O pós teste de Tukey a (5%) de probabilidade apresentou diferença significativa para a *Commiphora leptophloeos* com valores de médias para o Galho grosso 1,8(kg) e Galho fino 3,3(kg), diferentes estatisticamente das médias apresentadas pelas demais espécies nos mesmos compartimentos, Tabela 9.

Tabela 9. Resultado de teste de Tukey a (5%) probabilidade para a média da biomassa seca dos componentes GG, GF (Kg) por espécies.

Espécies	GG	GF
<i>Poincianella bracteosa</i>	3,5a	2,1b
<i>Commiphora leptophloeos</i>	1,8b	3,3a
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	3,4a	2,9b
<i>Mimosa tenuiflora</i>	2,9a	2,9b
<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	2,5a	2,5b
Número de grupos/comp	2	2

Em que: GG=galhos grossos (diâmetro na base ≥ 1,9 cm); GF= galhos finos (diâmetro nas duas bases ≤ 1,9 cm). Médias com a mesma letra não diferem significativamente.

O teste de Tukey identificou a formação de quatro grupos, sendo dois formados por; Galho grosso e Galho fino para *Commiphora leptophloeos*, cada um composto por 40 amostras e os outros dois formados por Galho grosso e Galho fino para as quatro espécies restantes com 160 amostras ambos, sendo ajustados aos modelos matemáticos juntamente com a biomassa total, fuste, galho fino + folha e folha.

Ajuste de Modelos

Dentre todos os compartimentos, o Fuste (kg) e o Total (kg) foram as variáveis em que os modelos propostos melhor se ajustaram, gerando equações com 0,89 e 0,86 de R^2_{aj} e erros percentuais de 22% e 26% respectivamente.

Em estudos relacionados a modelagem de biomassa verde em áreas próximas a da atual pesquisa, Alves Júnior (2010) obteve como resultado equações para todas as espécies superiores a 0,90 de R^2_{aj} para biomassa total, com erros percentuais variando de 39% a 152%, maiores do que os encontrados nesse trabalho.

O mesmo ocorreu noutro estudo na mesma região ao ajustar modelos aos dados de biomassa verde para a comunidade arbórea, realizado por Abreu (2012), onde encontrou valores de R^2_{aj} para biomassa verde total igual a 0,78 e $S_{xy}(\%)=29,67\%$, com a equação gerada pelo modelo de Schumacher-Hall.

Modelo este que similarmente se destacou neste trabalho juntamente com as equações geradas pelo modelo de Gompertz (modelo de crescimento) representado pela equação 5. Seus coeficientes mostraram que a biomassa total cresce de forma simultânea a biomassa do fuste pelo fato do coeficiente b_2 em ambas as variáveis apresentarem o mesmo valor de 0,17. Para o coeficiente b_0 foi observado que o valor de biomassa seca total tende a estacionariedade aos 61,85 (kg) e para o fuste o mesmo ocorreu aos 24,85 (kg), sendo teoricamente o ponto assintótico da biomassa seca das plantas para as duas variáveis em função do DAP(cm), perante os parâmetros estatísticos descritos na Tabela 10 e análise gráfica dos resíduos nas Figuras (3 e 4).

Tabela 10. Estimativas dos coeficientes e parâmetros estatísticos calculados para todas as equações ajustadas aos compartimentos Total(kg) e Fuste(kg).

Variáveis (kg)	Equações	b ₀	b ₁	b ₂	S _{xy} (%)	R ² _(aj)
Total	Gompertz (5)	61,85*	1,62*	0,17*	26,0	0,86
	Schumacher - Hall (4)	0,38*	1,73*	0,11 ^{n.s}	26,2	0,86
	Hohenald-Krenn (3)	-0,41 ^{n.s}	0,58 ^{n.s}	0,19*	26,3	0,86
	Schumacher e Hall (Linear)(1)	-0,94*	1,71*	0,08 ^{n.s}	29,4	0,86
	Spurr (Linear) (2)	-1,35*	0,72*		32,8	0,82
Fuste	Schumacher - Hall (4)	0,15*	1,65*	0,27*	22,3	0,89
	Gompertz (5)	24,85*	1,61*	0,17*	22,3	0,89
	Hohenald-Krenn (3)	-0,44*	0,36*	0,07*	22,6	0,89
	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-2,11*	1,60*	0,46*	25,0	0,88
	Spurr (Linear) (2)	-2,29*	0,74*		26,7	0,87

Em que: b₀, b₁, b₂= coeficientes da equação, S_{xy}(%)= erro padrão da estimativa em porcentagem corrigido pelo Índice de Furnival; R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado; * (p < 0,05); n.s não significativo.

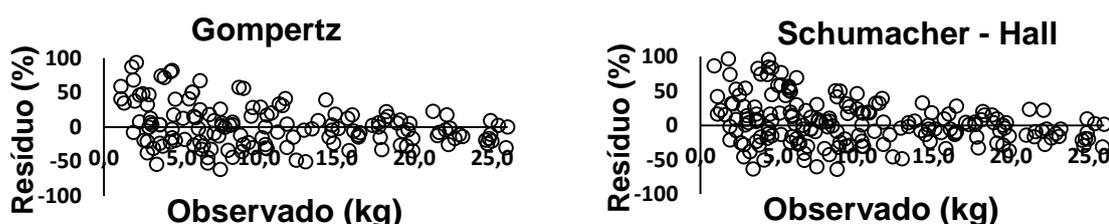


Figura 3. Gráfico dos resíduos para a biomassa seca total (Kg), apresentado pelas equações 4 e 5. Resíduos das demais equações no apêndice.

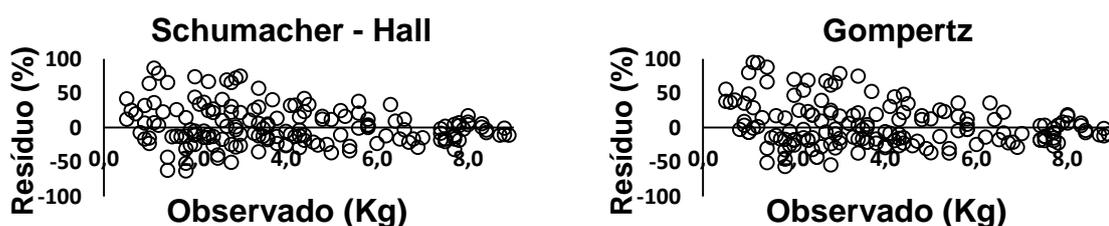


Figura 4. Gráfico dos resíduos para a biomassa seca do fuste (Kg), apresentado pelas equações 4 e 5. Resíduo das demais equações no apêndice.

Os resíduos apresentados pelos compartimentos Total e Fuste revelaram breve superestimação e indício de heterocedasticidade até valores próximos aos 15 Kg de biomassa seca total e 5kg de biomassa seca do fuste. Devido a elevada variabilidade de biomassa nas primeiras classes de diâmetro em florestas nativas. Comportamento característico em algumas áreas de caatinga que tendem a apresentar um número

muito elevado de indivíduos com diâmetros pequenos em áreas onde o estágio de sucessão secundária predomina (AMORIM et al.,2005; SANTANA; SOUTO, 2006).

De acordo com Rezende et al. (2006) essa variabilidade tende a aumentar, à medida que árvores de maior diâmetro são incluídas, mesmo aumentando a intensidade amostral.

No entanto, os resultados apresentados pelo teste de normalidade e análise gráfica dos resíduos na detecção de autocorrelação dos erros, demonstraram que as equações geradas pelos modelos de Schumacher-Hall e Gompertz foram capazes de realizar estimativas sem tendência e com variância constante na maior parte dos dados, produzindo estimativas confiáveis da biomassa seca para o total e o fuste apresentados nas Figuras (5 e 6).

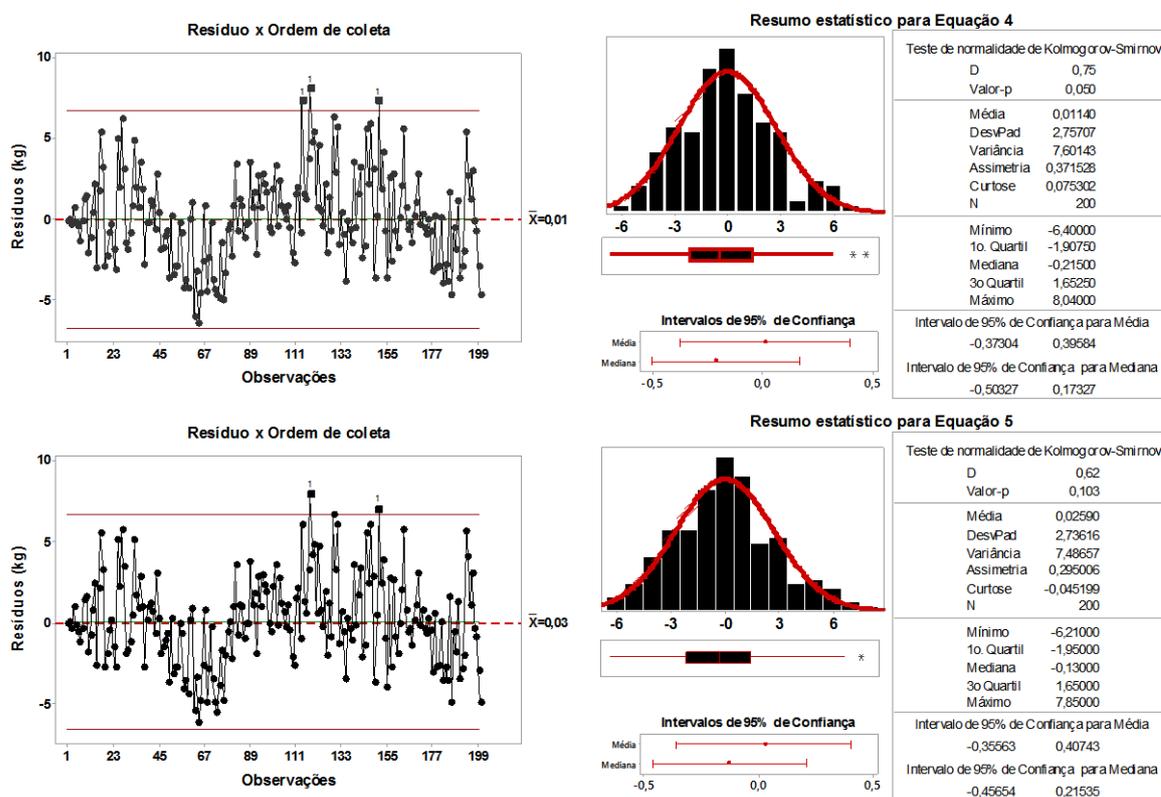


Figura 5. Ilustração do gráfico de resíduos x ordem de coleta, histograma dos resíduos com ajuste de curva normal e sumário estatístico contendo o valor-p para o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov da biomassa total seca para as equações 4 e 5.

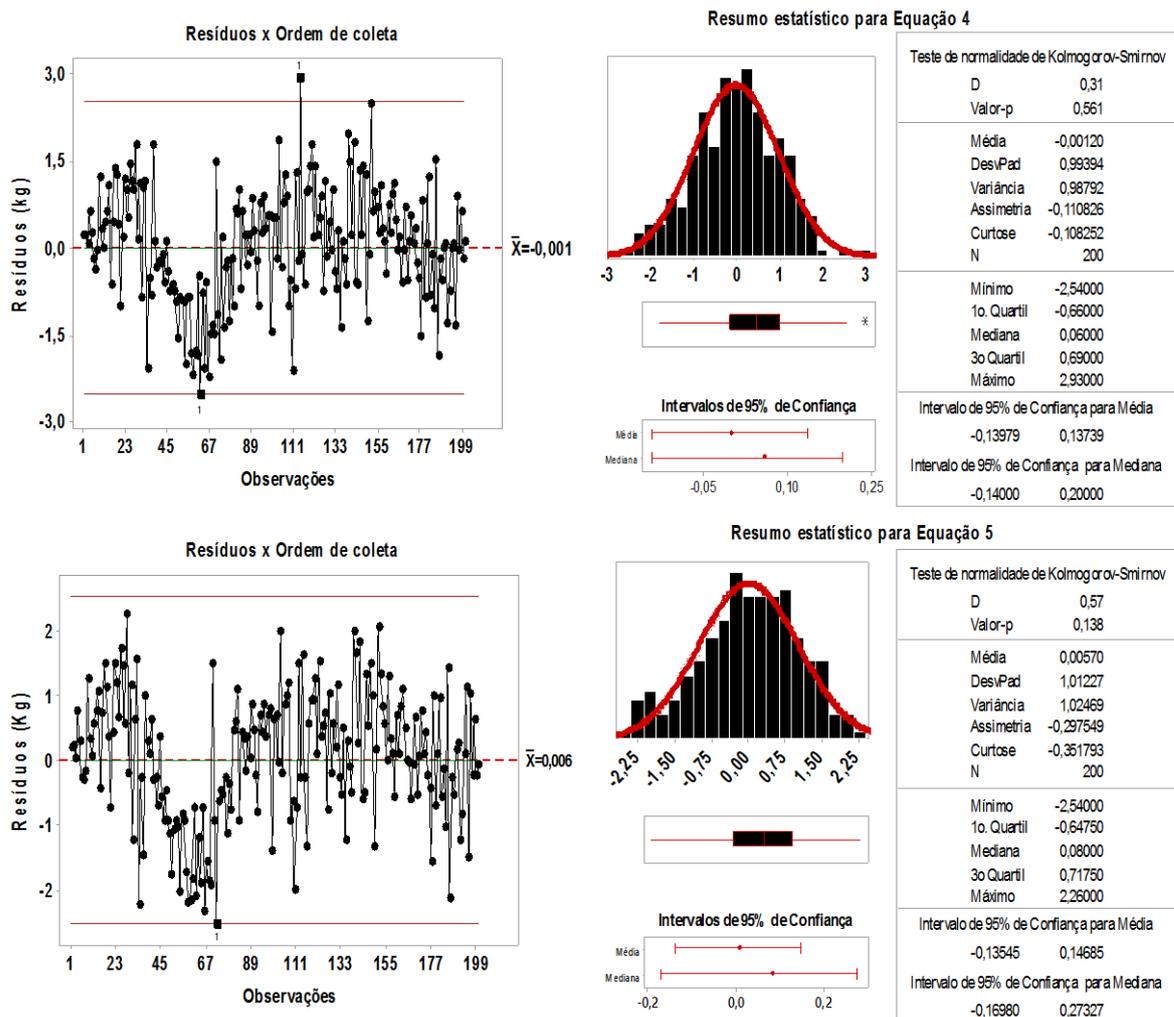


Figura 6. Ilustração do gráfico de resíduos x ordem de coleta, histograma dos resíduos com ajuste de curva normal e sumário estatístico contendo o valor-p para o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov da biomassa seca do fuste das equações 4 e 5.

Para os compartimentos, Galho fino + Folhas (kg), Galho fino sem *Commiphora leptophloeos* (kg) e Galho grosso sem *C. leptophloeos* (kg) todos os modelos se ajustaram com valores de R^2_{aj} acima de 0,7, destaque para os de Schumacher-Hall, Spurr e Schumacher-Hall linearizado, porém erros percentuais de estimação para estas variáveis foram maiores que os apresentados para a biomassa total e para o fuste, acima de 35%, encontrados na Tabela 11.

Tabela 11. Estimativas dos coeficientes e parâmetros estatísticos calculados para todas as equações ajustadas aos compartimentos: Galho fino + Folhas (kg), Galho grosso sem *C. leptophloeos* (kg) e Galho fino sem *Commiphora leptophloeos* (kg).

Variáveis (kg)	Equações	b ₀	b ₁	b ₂	S _{xy} (%)	R ² _(aj)
Galho fino + Folhas	Schumacher - Hall (4)	0,18*	1,52*	0,08 ^{n.s}	35,1	0,71
	Gompertz (5)	76,64 ^{n.s}	1,63*	0,07*	35,6	0,72
	Hohenald-Krenn (3)	0,89 ^{n.s}	-0,04 ^{n.s}	0,06*	35,6	0,72
	Spurr (Linear) (2)	-2,02*	0,61*	-	42,6	0,70
	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-1,32*	1,68*	-0,46*	43,0	0,71
Galho grosso sem <i>C.</i> <i>leptophloeos</i>	Schumacher - Hall (4)	0,11*	2,35*	-0,69*	54,0	0,72
	Gompertz (5)	16,54*	2,00*	0,24*	55,3	0,71
	Hohenald-Krenn (3)	0,26 ^{n.s}	-0,19 ^{n.s}	0,10*	55,8	0,71
	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-2,56*	2,11*	-0,25 ^{n.s}	60,1	0,70
	Spurr (Linear) (2)	-3,37*	0,84*	-	69,3	0,70
Galho fino sem <i>C. leptophloeos</i>	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-1,88*	1,86*	-0,43 ^{n.s}	36,4	0,72
	Spurr (Linear) (2)	-2,71*	0,70*	-	37,8	0,71
	Schumacher - Hall (4)	0,15*	1,47*	0,12	38,7	0,70
	Hohenald-Krenn (3)	0,01 ^{n.s}	0,22*	0,03*	41,5	0,71
	Gompertz (5)	30,12 ^{n.s}	1,51*	0,12 ^{n.s}	43,5	0,70

Em que: b₀, b₁, b₂= coeficientes da equação, S_{xy}(%)= erro padrão da estimativa em percentagem corrigido pelo Índice de Furnival; R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado; * (p < 0,05); n.s não significativo.

De acordo com a análise gráfica dos resíduos, a equação 4 selecionada para estimativa das variáveis Galho fino + Folhas (kg) e Galho grosso sem *C. leptophloeos* (kg), apresentou homogeneidade dos resíduos melhor para o primeiro compartimento se comparado ao segundo. Já para o Galho fino sem *C. leptophloeos* as equações 1 e 2 apresentaram uma boa distribuição percentual dos resíduos, com erros aceitáveis para a Caatinga, uma vez que poucos estudos detalharam os resíduos gerados pelo ajuste de modelos de biomassa nessa região, principalmente averiguando a normalidade e autocorrelação dos mesmos, conforme às Figuras (7 e 8).

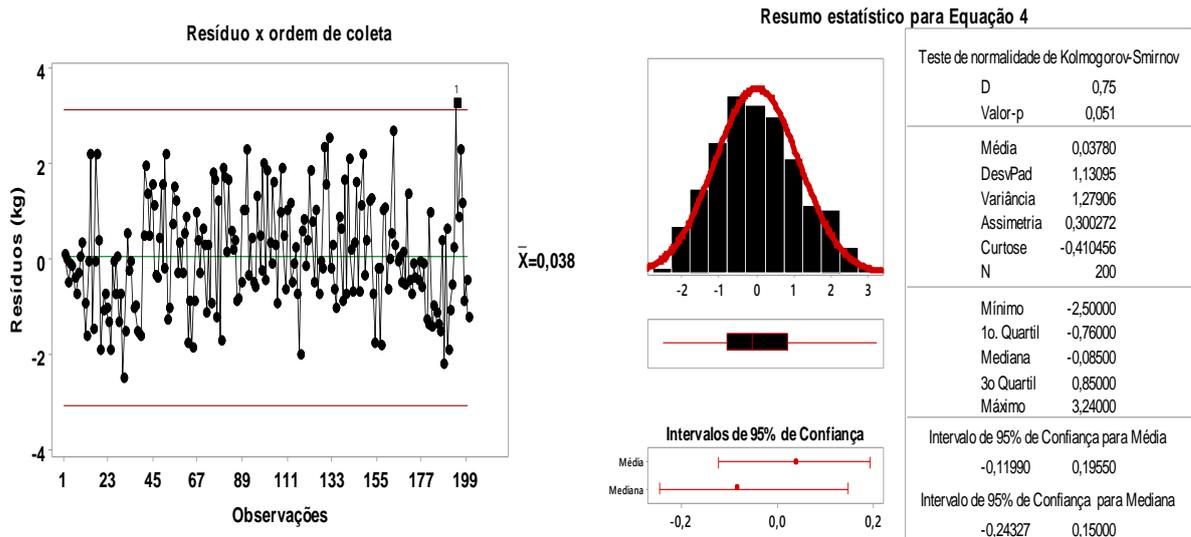
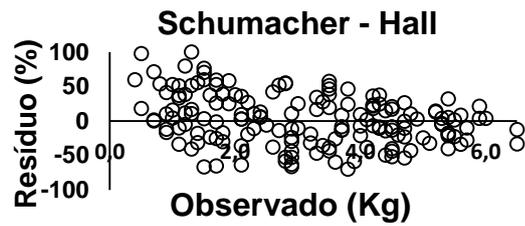


Figura 7. Ilustração gráfica dos resíduos em porcentagem; resíduos x ordem de coleta; histograma dos resíduos com ajuste de curva normal e sumário estatístico contendo o valor-p para o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov da biomassa seca do Galho fino + Folhas (kg) para a equação 4. Resíduos em porcentagem das demais equações no apêndice.

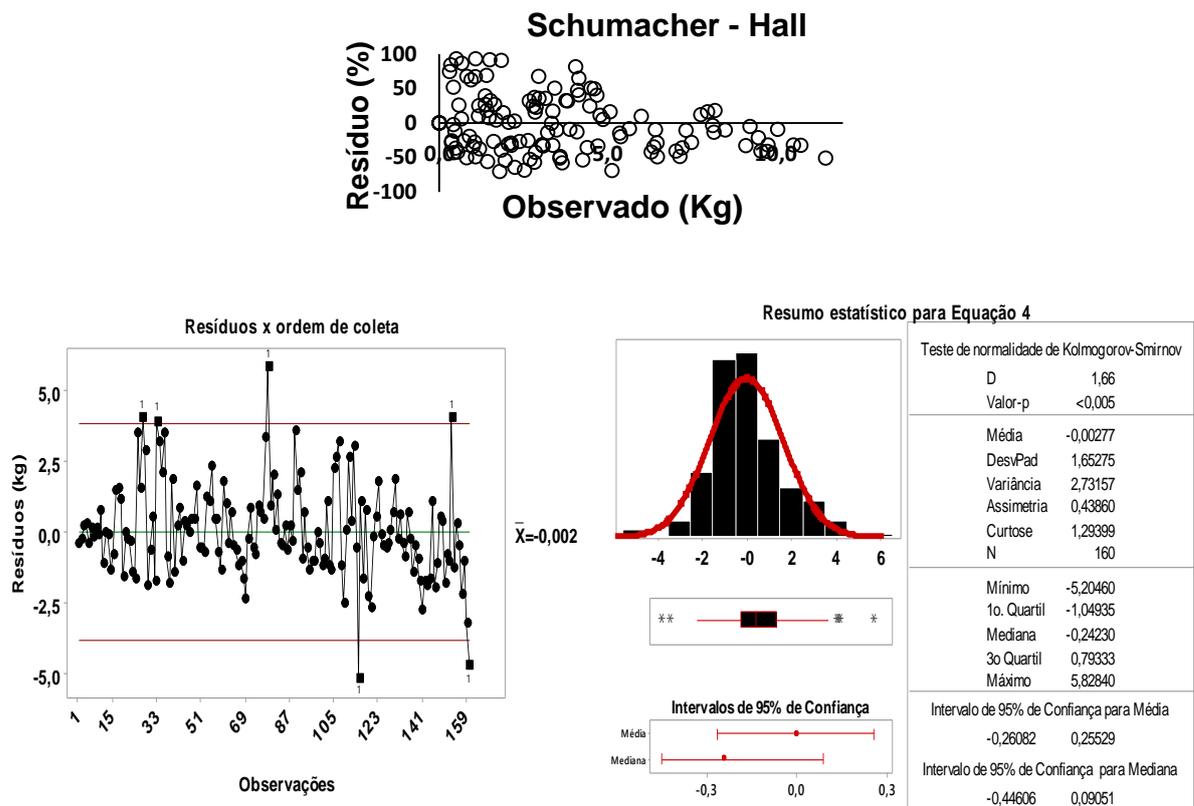


Figura 8. Ilustração gráfica dos resíduos em porcentagem; resíduos x ordem de coleta; histograma dos resíduos com ajuste de curva normal e sumário estatístico contendo o valor-p para o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov da biomassa seca do Galho grosso sem *C. leptophloeos* (kg) para a equação 4. Resíduos em porcentagem das demais equações no apêndice.

O resíduo de ambas as variáveis não apresentaram autocorrelação, entretanto a variável Galho grosso sem *C. leptophloeos* (kg) não apresentou normalidade, possivelmente pelo valor de erro percentual igual a 54% para a mesma, além da ausência de valores de biomassa desse componente nas duas primeiras classes diamétricas, por conta da fase inicial de crescimento em que muitos indivíduos amostrados se encontravam apresentando seus galhos abaixo do limite mínimo de inclusão $\geq 1,9\text{cm}$, considerado Galho grosso. No entanto, para o compartimento Galhos finos sem *C. leptophloeos* (Kg) as estimativas foram muito melhores com erros percentuais em torno dos 36% para as equações 1 e 2, além de resíduos bem mais uniformes distribuídos de forma normal e sem evidências de autocorrelação residual, apresentados na figura 9.

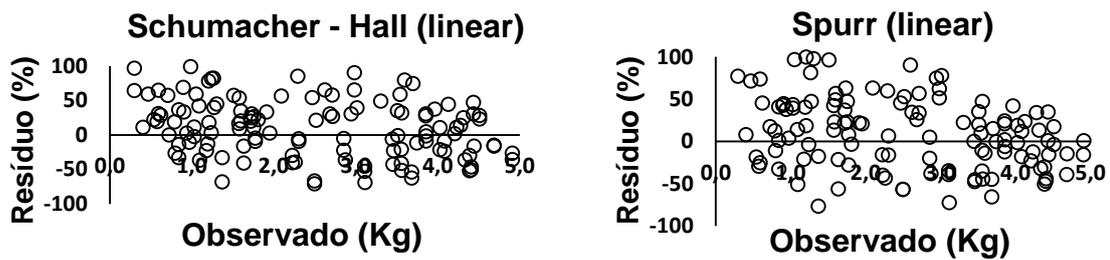


Figura 9. Gráfico dos resíduos para a biomassa seca dos Galhos finos sem *C. leptophloeos* (Kg), apresentado pelas equações 1 e 2. Resíduos das demais equações no apêndice.

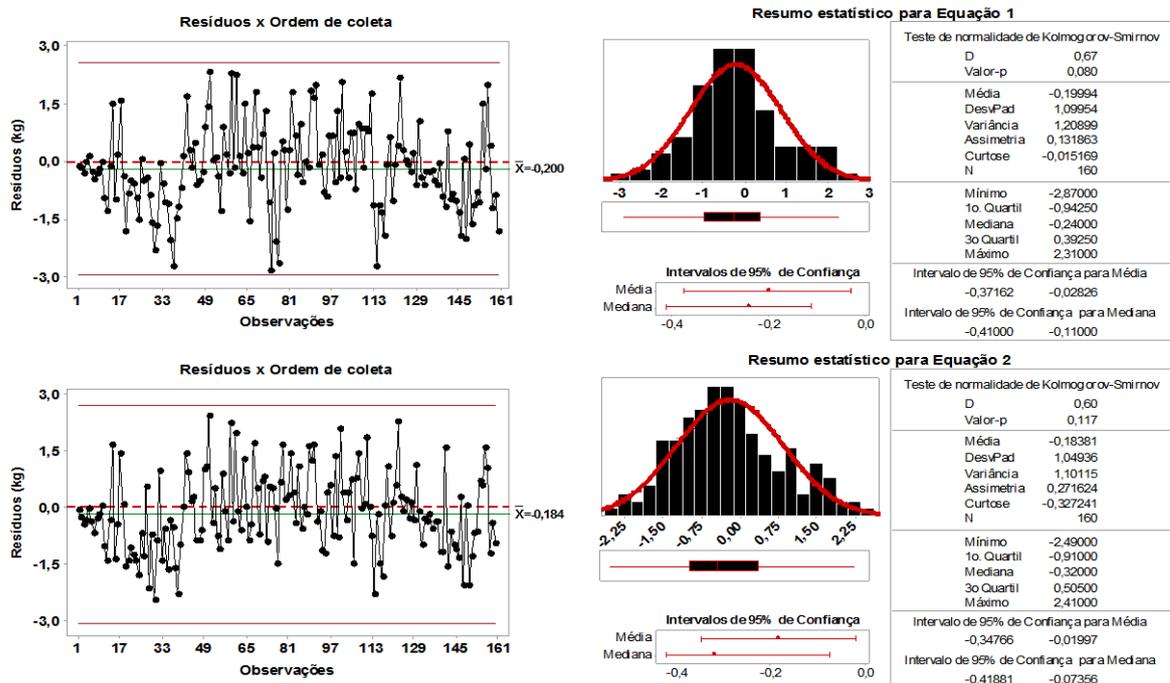


Figura 10. Ilustração do gráfico de resíduos x ordem de coleta, histograma dos resíduos com ajuste de curva normal e sumário estatístico contendo o valor-p para o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov dos Galhos finos sem *C. leptophloeos* (Kg) para as equações 1 e 2.

As equações para estimar a biomassa seca dos Galhos grossos e Galhos finos da *Commiphora leptophloeos* e para as Folhas, exibiram valores de $R^2_{(aj)}$ menores que 0,7, e erros percentuais para as estimativas acima 40%, desse modo equações para estimar estes componentes não foram consideradas, conforme exposto na Tabela 12, com análise gráfica dos resíduos em porcentagem encontradas no apêndice.

Tabela 12. Estimativas dos coeficientes e parâmetros estatísticos calculados para todas as equações ajustadas aos compartimentos Galhos grossos e Galhos finos da *Commiphora leptophloeos* e biomassa seca para Folhas.

Variáveis (kg)	Equações	b ₀	b ₁	b ₂	S _{xy} (%)	R ² _(aj)
Folhas	Hohenald-Krenn (3)	0,63*	-0,20*	0,03*	63,5	0,51
	Gompertz (5)	56,09 ^{n.s}	1,98*	0,06 ^{n.s}	64,5	0,50
	Schumacher - Hall (4)	0,00*	2,10*	0,65*	65,9	0,49
	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-3,26*	1,06*	0,26 ^{n.s}	79,9	0,25
	Spurr (Linear) (2)	-3,41*	0,48*		80,3	0,24
Galhos grossos <i>C. leptophloeos</i>	Hohenald-Krenn (3)	0,23 ^{n.s}	-0,26 ^{n.s}	0,07*	76,1	0,65
	Schumacher - Hall (4)	0,01 ^{n.s}	2,66*	-0,11 ^{n.s}	76,2	0,65
	Gompertz (5)	22,85 ^{n.s}	2,04*	0,16 ^{n.s}	76,4	0,66
	Spurr (Linear) (2)	-3,98*	0,81*		42,3	0,41
	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-3,69*	2,04*	0,00 ^{n.s}	41,1	0,41
Galhos finos <i>C. leptophloeos</i>	Hohenald-Krenn (3)	0,72*	0,26*	0,02 ^{n.s}	72,8	0,66
	Gompertz (5)	20,15 ^{n.s}	1,20*	0,10 ^{n.s}	52,8	0,66
	Schumacher - Hall (4)	0,40*	1,08*	0,12 ^{n.s}	62,9	0,65
	Schumacher e Hall (Linear) (1)	-0,64*	1,05*	-0,09 ^{n.s}	66,3	0,63
	Spurr (Linear) (2)	-0,74*	0,38*		57,0	0,57

Em que: b₀, b₁, b₂= coeficientes da equação, S_{xy}(%)= erro padrão da estimativa em percentagem corrigido pelo Índice de Furnival; R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado; * (p < 0,05); n.s não significativo.

A falta de ajuste para biomassa das folhas se deu pela variabilidade intra e interespecífica desse componente nos indivíduos coletados em campo. Além da deciduidade predominante na região do estudo, diferenças nas densidades das plantas e no sombreamento sobre as mesmas, aumentando consideravelmente a variância desse compartimento (SALIS et al., 2006; BALBOA-MURIAS et al., 2006).

Com relação aos Galhos grossos e finos para *C. leptophloeos* a falta de ajuste foi consequência da morfologia da espécie que apresentou poucas ramificações na sua copa e ao longo do fuste.

Ao final foi possível gerar equações para a biomassa total, fuste, Galhos finos sem a presença da *C. leptophloeos* e Galhos finos + folhas para todas as espécies representantes na área da pesquisa, expressas na Tabela 13.

Tabela 13. Equações geradas para estimar biomassa seca por compartimentos em área de caatinga, Floresta-PE, em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{xy}(\%)$ = erro padrão; DAP=diâmetro a altura do peito; Ht=altura total.

Variáveis (kg)	Equações	$S_{xy}(\%)$	$R^2_{(aj)}$
Total	$\widehat{BS}_i = 61,85 * e^{(-e^{(1,62-0,17*Dap)})}$	26,0	0,86
	$\widehat{BS}_i = 0,38 * dap^{1,73} * Ht^{0,11}$	26,2	0,86
Fuste	$\widehat{BS}_i = 0,15 * dap^{1,65} * Ht^{0,27}$	22,3	0,89
	$\widehat{BS}_i = 21,85 * e^{(-e^{(1,61-0,17*Dap)})}$	22,3	0,89
GF	$Ln(\widehat{BS}_i) = -1,88 + 1,86.Ln(dap) - 0,43.Ln(Ht)$	36,4	0,72
GF	$Ln(\widehat{BS}_i) = -2,71 + 0,70.Ln(dap^2 Ht)$	37,8	0,71
GF+Folha	$\widehat{BS}_i = 74,64 * e^{(-e^{(1,63-0,07*Dap)})}$	35,1	0,71

Em que: BS= biomassa seca; GF= galhos finos (diâmetro nas duas bases $\leq 1,9$ cm).

Considerando todas as partes da planta, os melhores ajustes foram para a biomassa total e por fuste e os piores ajustes foram nas estimativas de folhas corroborando com outros trabalhos realizados em florestas secas (VEGA et al., 2004; SALIS et al., 2006; BALBOA-MURIAS et al., 2006; PEICHL; ARAIN, 2007; SILVA; SAMPAIO, 2008).

Os valores de $S_{xy}(\%)$ entre 22,3 e 37,8% encontrados na presente pesquisa podem ter sido influenciados pelos baixos valores de densidade básica da *C. leptophloeos* (0,49 g/dm³) inferiores aos das demais espécies como; *P. bracteosa* (0,82 g/dm³), *M. ophthalmocentra* (1,06 g/dm³) e *M. tenuiflora* (1,03 g/dm³) (SILVA et al., 2011; ALBUQUERQUE, 2015).

Entretanto, estes valores foram bastante razoáveis, de acordo com Rezende et al. (2006) ao afirmar que a maioria dos erros encontrados nas equações selecionadas para estimar biomassa em florestas nativas estão na ordem de 25 a 40,7%. Muitas vezes por conta de características típicas das espécies nativas perante a arquitetura dos fustes (SANTOS et al.,2009).

Sobretudo, algumas pesquisa ressaltaram que erros desta magnitude exprimem a verdadeira variação da biomassa na natureza (BASUKI et al., 2009; IMAÑA-ENCINAS et al., 2009; RUFINI et al., 2010; MIRANDA; MELO; SANQUETTA, 2011; RIBEIRO et al., 2011).

CONCLUSÕES

Foi possível gerar equações para predição da biomassa seca por compartimento e para o total por planta, à exceção do compartimento folhas e dos galhos finos e grossos para *C. leptophloeos*.

Os melhores modelos ajustados foram os de Schumacher-Hall e Gompertz, fornecendo equações para estimativa da biomassa seca total e dos compartimentos; fuste, galhos finos sem *C. leptophloeos* e galhos finos + folhas, com estimativas confiáveis e sem viés, mesmo apresentando erros entre 22 e 38%, tendo em vista a enorme variabilidade natural existente na vegetação de Caatinga.

CAPÍTULO 2: KRIGAGEM ORDINÁRIA E COKRIGAGEM NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA LENHOSA EM ÁREA DE CAATINGA

INTRODUÇÃO

No Nordeste brasileiro, após a crise do petróleo em 1974 muitas indústrias foram reduzindo ou abandonando o uso de óleo diesel, substituindo por lenha e carvão vegetal extraídos da Caatinga, aumentando drasticamente o desmatamento em busca de energia (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010).

Ao mesmo tempo houve um significativo aumento da urbanização e a demanda por matérias primas para construção civil, que se intensificaram elevando ainda mais o consumo de madeira no início da década de 90, sendo que antes desse período 35% da energia primária da região Nordeste já era adquirida destas fontes e continuou crescendo, tanto que entre os anos de 2005 e 2008 apresentou um crescimento de 2,05% de toneladas equivalentes ao petróleo (CAMPELLO et. al.,1999; BRASIL, 2009).

Diante desta problemática, os Planos de Manejos Florestais Sustentados até o presente momento são as ferramentas mais eficazes na tentativa de minimizar os impactos causados pela extração de madeira na Caatinga, porém os mesmos precisam cada vez mais serem implementados por novas técnicas e informações a respeito da comunidade florestal, com o propósito de melhoria das estimativas de produção, principalmente acerca da biomassa retirada nas áreas dos talhões de corte em áreas de Caatinga.

Alguns trabalhos foram realizados abordando a modelagem matemática na tentativa de ajustar equações para predição de biomassa (SAMPAIO; SILVA, 2005; SAMPAIO; SILVA, 2008; ALVES JÚNIOR, 2010; ABREU, 2012).

Porém este tipo de modelagem sustenta a hipótese de que as amostras são independentes entre si, não apresentando dependências ou associações, se baseando apenas em medidas de centralidade (média) e dispersão (variância), não considerando a influência de amostras vizinhas, abrindo mão da dependência espacial existente.

A modelagem geoestatística permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial e a estimativa não tendenciosa em locais não amostrados, sendo possível também mensurar e identificar as relações espaciais dos fatores que limitam a

produção e a produtividade dos povoamentos florestais, predizendo valores em locais não amostrados (PELISSARI et al., 2014a).

Vários trabalhos tem demonstrado seu potencial na descrição do comportamento espacial de variáveis dendrométricas em formações florestais, principalmente biomassa, evidenciando que a estrutura espacial é uma característica marcante nessas variáveis, a qual não é detectada na estatística clássica, ocasionando perda de informação (AMARAL et al., 2010; PELISSARI et al., 2014b; CASTRO et al., 2015; PELISSARI et al., 2015; SCOLFORO et al., 2016).

Com o conhecimento sobre a relação de dependência espacial acerca dessas variáveis em florestas nativas e plantadas é possível aprimorar as técnicas de silvicultura, inventário e manejo florestal em diferentes tipologias, talhões, povoamentos, etc.

Contudo, o objetivo deste trabalho foi de identificar a dependência espacial da biomassa aérea seca e do diâmetro a altura do peito (DAP) em área de Caatinga, com uso das técnicas variográficas e dos estimadores de krigagem ordinária e cokrigagem. Além de verificar se estes estimadores são válidos para estimar valores individuais de biomassa aérea seca por meio dos critérios de validação cruzada e estatística clássica.

MATERIAL E MÉTODOS

Características da área de estudo

A área de estudo está situada na fazenda Itapemirim, pertencente à Empresa Agrimex S.A do Grupo João Santos, no município de Floresta (PE), em uma área com cerca de 33 ha, localizada nas proximidades das coordenadas geográficas 8°53'36" S e 37°97'10" W. correspondente ao primeiro talhão de corte em área submetida ao Plano de Manejo Florestal, Figura 11.

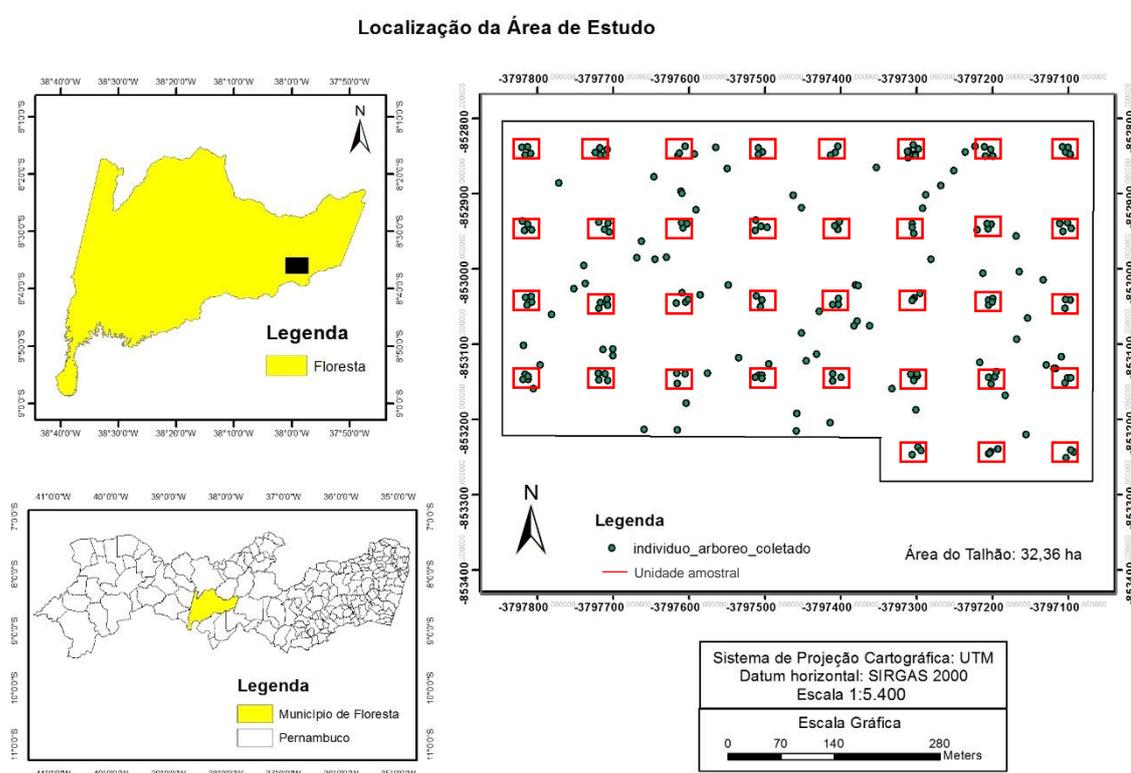


Figura 11. Esquema e mapa de localização da área de pesquisa na da Fazenda Itapemirim, Floresta (PE).

A vegetação é basicamente composta por Caatinga Hiperxerófila com trechos de Floresta Caducifólia. O clima segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSh, Tropical Semiárido com chuvas de verão. O período chuvoso se inicia em novembro com término em abril, com precipitação média anual de 432 mm e temperatura média anual de 26 °C (CPRM, 2005). O solo da região este é classificado como Luvissole Crômico pouco profundo com textura superficial arenosa (EMBRAPA, 2007).

Coleta de dados

Inicialmente foi realizado um inventário florestal, conforme o Protocolo da Rede de Manejo Florestal da Caatinga (2005), onde foram lançadas 35 unidades amostrais de 20x20m distadas entre si 80m e da borda do fragmento 50m. Nessas parcelas foram mensurados todos os indivíduos arbóreos, bem como suas bifurcações, com diâmetro medido a 1,30 m do solo (DAP) maior ou igual a 1,9 cm e altura (Ht) em metros e foram submetidos as análises florísticas e fitossociológicas apenas para determinar as cinco espécies de maior valor de importância (VI) na área, as quais foram; *Poincianella bracteosa* (Tul.) L.P.Queiroz (Caatingueira), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B.Gillett (Imburana de Cambão), *Mimosa ophthalmocentra* Mart. ex Benth (Jurema de Imbira), *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Jurema Preta) e *Aspidosperma pyriformium* Mart. (Pereiro), conforme Tabela 14.

Tabela 14. Parâmetros da distribuição horizontal das espécies arbustivo-arbóreas de maior VI, inventariadas no talhão da área de manejo florestal na Fazenda Itapemirim-Floresta-PE.

Espécies	DA	DR	FA	FR	DoA	DoR	VI (%)
<i>Poincianella bracteosa</i>	807	41,6	91,4	11,94	1,604	33,7	29,08
<i>Commiphora leptophloeos</i>	80	4,1	77,1	10,07	1,262	26,5	13,58
<i>Aspidosperma pyriformium</i>	239	12,3	74,3	9,7	0,412	8,7	10,22
<i>Mimosa tenuiflora</i>	130	6,7	68,6	8,96	0,271	5,7	7,12
<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	215	11,1	51,4	6,72	0,147	3,1	6,96

DA = Densidade absoluta ($N.ha^{-1}$); DR = Densidade relativa (%); FA = Frequência absoluta; FR = Frequência relativa (%); DoA = Dominância absoluta ($m^2.ha^{-1}$); DoR = Dominância relativa (%) e VI = Valor de importância (%).

De posse desses dados foi realizada a distribuição de frequência dos diâmetros em cinco classes, com o objetivo de cobrir toda a comunidade arbórea. Logo após, foram selecionados 8 indivíduos de forma aleatória dentro e próximo das unidades amostrais, para cada uma das cinco espécies de maior VI, de modo a representar as cinco classes de diâmetro adotadas, totalizando 200 indivíduos, os quais foram georreferenciados e desbastados quantificando-se suas biomassas verdes em campo pelo método destrutivo, separando os compartimentos da planta em: fuste, galhos e folhas, com auxílio de uma balança digital com capacidade de 200Kg.

Para a determinação do peso seco, pequenas amostras de 100 a 300g de cada compartimento em campo foram extraídas e armazenadas em sacos plásticos, sendo anotados seus pesos verdes, logo em seguida as mesmas foram conduzidas a uma estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 70°C até a estabilização de seus respectivos pesos secos.

$$Bs = \frac{Pu(c).Ps(a)}{Pu(a)}$$

Em que: Bs = Biomassa seca total por compartimento (Kg), Pu(c) = peso úmido total no campo por compartimento (Kg), Ps(a) = peso seco da amostra por compartimento (kg), Pu(a) = peso úmido da amostra por compartimento (Kg).

Por fim foi quantificada a biomassa seca total (Kg) por indivíduo, somando os valores de biomassa seca por compartimento e estes valores foram computados juntamente com as suas respectivas coordenadas geográficas (UTM) em uma planilha eletrônica e logo em seguida importada para um SIG (Sistema de Informação Geográfica), dando andamento ao processo analítico dos dados.

Análise de dados

Primeiramente foi realizada uma estatística descritiva, contendo: média, mediana, moda, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose. Em sequência foi realizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov nas variáveis primária (biomassa) e secundária (DAP), não havendo normalidade estas foram submetidas a transformação de Box-Cox, (BOX; COX, 1964) para as etapas posteriores.

No seguimento foi realizada uma análise de tendência para verificar se fatores externos influenciaram no agrupamento dos dados coletados na área de estudo em quaisquer direções, devido aos possíveis efeitos gerados pela borda no fragmento florestal. Para a configuração desta análise foi confeccionado um gráfico de dispersão entre X (longitude) e Y (latitude) em função dos atributos Z (biomassa seca e DAP).

Após esta etapa foram construídos os semivariogramas nas direções 0°, 45°, 90° e 135° com tolerância angular de 45°, no intuito de verificar a presença de anisotropia e selecionar o semivariograma experimental para as variáveis biomassa seca e DAP, conforme a fórmula do semivariograma e semivariograma cruzado

proposta por (MATHERON, 1963):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

$$\gamma(h_{1,2}) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)][Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)] \quad (2)$$

Em que: $\gamma(h)$ é a semivariância; $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os pares de valores medidos separados por um vetor h , $N(h)$ é o número de pares de valores $Z(x_i) - Z(x_i + h)$ separados por um vetor distância h , informando quão diferentes se tornam os valores em função da distância e z_1 variável primária (biomassa total seca) e z_2 variável secundária (DAP).

Em sequência foi selecionado apenas um semivariograma experimental de maior alcance ou isotrópico para cada uma das variáveis e logo após foi dado início ao ajuste dos semivariogramas teóricos, ilustrado na Figura 12.

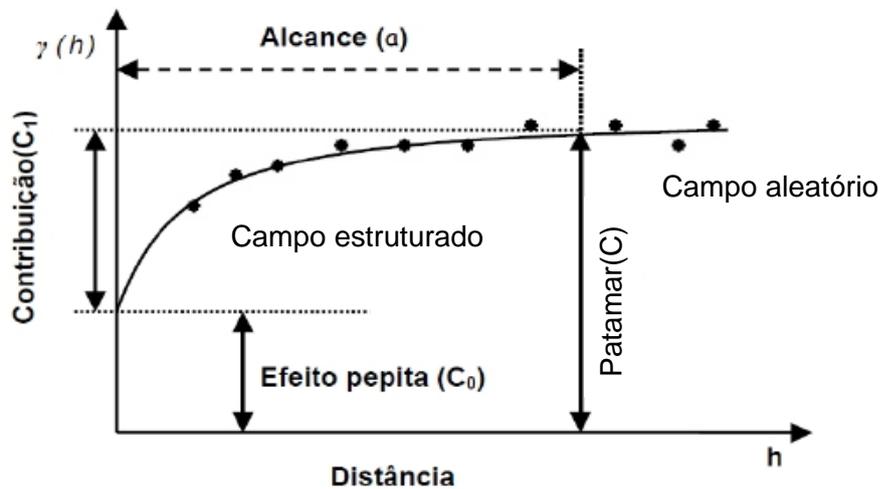


Figura 12. Gráfico esquemático de um semivariograma teórico ajustado ao semivariograma experimental (pontos de dispersão), onde: $\gamma(h)$ = semivariância; C_0 =efeito pepita; a = alcance; C_1 = contribuição espacial; C = soleira ou patamar e h = distância em metros.

Os modelos teóricos de semivariogramas testados estão listados na Tabela 15. Tabela 15. Modelos geoestatísticos empregados.

Modelos	
Esférico	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 * \left[1,5 \left(\frac{h}{\beta_2} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{\beta_2} \right)^3 \right] \text{ para } h < a$ $\gamma(h) = [\beta_0 + \beta_1] \text{ para } h \geq a$
Exponencial	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 * \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{\beta_2} \right) \right]$
Gaussiano	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 * \left[1 - \exp \left(-3 * \left(\frac{h}{\beta_2} \right)^2 \right) \right]$

Em que: $\gamma(h)$ = semivariância; β_0 =efeito pepita; β_1 = Patamar; β_2 = alcance; h = distância entre os pontos amostrados.

Após o ajuste dos modelos teóricos foram obtidos os coeficientes do efeito pepita (C_0) que corresponde a variabilidade, aleatoriedade e erro probabilístico dos modelos de semivariograma teórico ajustado sobre o semivariograma experimental do atributo analisado, o patamar ($C_0 + C_1$), e o alcance da dependência espacial (a), sendo estes submetidos a análise da dependência espacial, por meio do Avaliador da Dependência Espacial (ADE), conforme Zimback (2001):

$$ADE = \frac{C - C_0}{C} \times 100$$

Em que: C_0 =efeito pepita; C = variância espacial; valores de ADE = (0,00) é tida como dependência espacial nula, fraca quando ($ADE < 0,25$), moderada entre (0,25 – 0,75) e forte ($> 0,75$);

Após o ajuste dos modelos teóricos de semivariograma para a representatividade de estrutura de correlação espacial para biomassa. Foram realizadas as etapas de krigagem e cokrigagem com base nos seus estimadores representados pelas Equações 1 e 2 respectivamente:

$$\hat{Z}_{x_0} = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} Z_{1i}(x_i) \quad (3)$$

$$\hat{Z}_{x_0} = \sum_{i=1}^{n1} \lambda_{1i} Z_{1i}(x_{1i}) \sum_{i=1}^{n2} \lambda_{2i} Z_{2i}(x_{2i}) \quad (4)$$

Em que: \hat{Z}_{x_0} é a estimativa do valor na posição X_0 ; n é o número de pontos amostrais

vizinhos utilizados para a predição do valor não amostrado \hat{Z}_{x_0} (vizinhança da krigagem); λ_{1i} e λ_{2i} são os i -ésimos pesos atribuídos a cada i -ésima observação das variáveis Z_{1i} (variável observada) e Z_{2i} (co-variável observada).

Logo em seguida foi feita a validação cruzada, onde cada ponto medido em campo foi excluído e seu valor foi estimado com os valores dos pontos amostrais vizinhos de acordo com (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Repetindo este processo para todos os 200 pontos amostrais no caso do presente estudo.

Como complemento a etapa de validação foram levadas em consideração as seguintes estatísticas:

Média dos erros de predição padronizados (Mean Standardized Error, MS), utilizada para corrigir a média por conta dos efeitos da escala.

$$MS = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{[(\hat{Z}_{ni} - Z_{ni})]}{\sigma_i}}{n}$$

Em que: \hat{Z}_{ni} = valor estimado pela validação cruzada; Z_{ni} = valor real; σ_{ni} = desvio padrão; n = número de observações.

Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças entre os Valores Estimados e o Verdadeiro (Root-Mean-Square, RMS);

$$RMS = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n [\hat{Z}_{ni} - Z_{ni}])^2}{n}}$$

Em que: \hat{Z}_{ni} = valor estimado pela validação cruzada; Z_{ni} = valor real; n = número de observações.

Raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro padronizado (Root-Mean-Square-Standardized, RMSS)

$$RMSS = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{[(\hat{Z}_{ni} - Z_{ni})]}{\sigma_i}\right)^2}{n}}$$

Em que: \hat{Z}_{ni} = valor estimado pela validação cruzada; Z_{ni} = valor real; σ_{ni} = desvio padrão; n = número de observações.

Erro padrão da média do erro de predição (Average Standard Error, ASE)

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \widehat{\sigma}_{ni}}{n}}$$

Em que: σ_{ni} = desvio padrão; n = número de observações.

Por fim, foram adicionadas os gráficos dos valores observados x estimados o coeficiente de determinação $R^2_{(aj)}$.

$$R^2_{aj} = R^2 - \left[\frac{n-1}{n-K} \right] \cdot (1 - R^2)$$

Sendo: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; K = número de variáveis independentes da equação; n = número de observações; R^2 = coeficiente de determinação.

Valor Ponderado de Escores Estatísticos

O valor ponderado de escores estatísticos atribui valores ou pesos às estatísticas calculadas, sendo as mesmas ordenadas de acordo com sua eficiência, atribuindo peso 1 para equação mais eficiente e pesos crescentes para as demais equações, em casos de empate os escores se repetem e o escore seguinte leva o valor correspondente a ordem subsequente desconsiderando o valor anterior determinado pelo empate, por fim a melhor equação foi aquela que apresentou a menor soma de escores dentre todas as estatísticas calculadas (THIERSCH,1997).

As melhores estatísticas foram as que apresentaram valores de MS e RMS mais próximos à zero, ASE mais próximo de RMS e RMSS e R^2 mais próximos a um.

Por fim, foram elaborados mapas de interpolação para a biomassa (kg) pela krigagem e cokrigagem ordinária, de acordo com o modelo selecionado pelos melhores resultados encontrados na validação cruzada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise descritiva

Como resultados foram obtidos os parâmetros estatísticos descritivos relacionados as medidas de centralidade (média e mediana), dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação) e por fim as medidas relacionadas a forma (assimetria e curtose), Tabela 16.

Tabela 16. Estatística descritiva para biomassa seca (kg) e o DAP (cm).

Variáveis	Média	Mediana	Desvio padrão	Variância	CV (%)	Ct	As	Normal
BS (kg)	10,9	9,0	6,8	46,8	62,0	-0,8	0,6	N
DAP (cm)	7,8	7,6	2,8	7,8	33	-0,3	0,4	N

Em que: BS=biomassa seca; Diâmetro à altura do peito (DAP); CV=Coeficiente de Variação; Ct= Curtose; As= Assimetria; N=Não.

Com relação as estatísticas descritivas apresentadas pôde-se observar que ambas as variáveis não apresentaram uma distribuição normal. No entanto, esta condição não compromete as análises geoestatísticas, porém elas são importantes para estimativas mais coesas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Para as formas de distribuição dos dados, foi observado que a curva de distribuição das variáveis apresentaram uma leve assimetria positiva, com valores entre (0 e 1) indicando assimetria fraca, ou seja, sem anomalias que prejudiquem a normalidade dos dados, além do mais a variância pode ter influenciado no grau de achatamento da curva de distribuição, com forma platicúrtica para biomassa seca (kg), mais achatada e com os dados mais dispersos em relação à média. Já o DAP apresentou uma forma mesocúrtica, concentrando os dados mais próximos à média muito próximos a normalidade, na Figura 13.

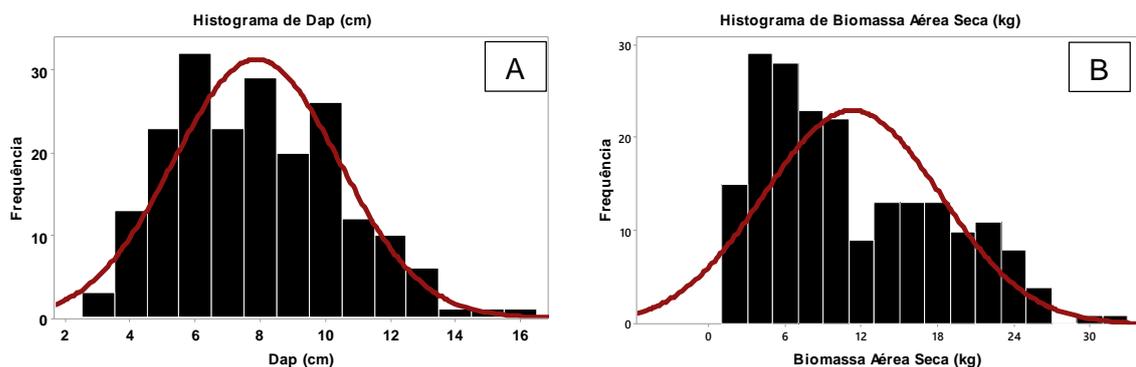


Figura 13. Histograma para o DAP (cm) (A) e Biomassa seca (kg) (B).

Análise de tendência

A análise gráfica para tendência demonstrou que os dados de biomassa e DAP não apresentaram tendência em nenhuma das direções nem no sentido latitudinal da área, como tampouco no longitudinal, com valores de R^2 menores que 0,1, indicando que as variáveis não estão sofrendo influências externas, distribuindo-se uniformemente na área da atual pesquisa, ilustrado na Figura 14.

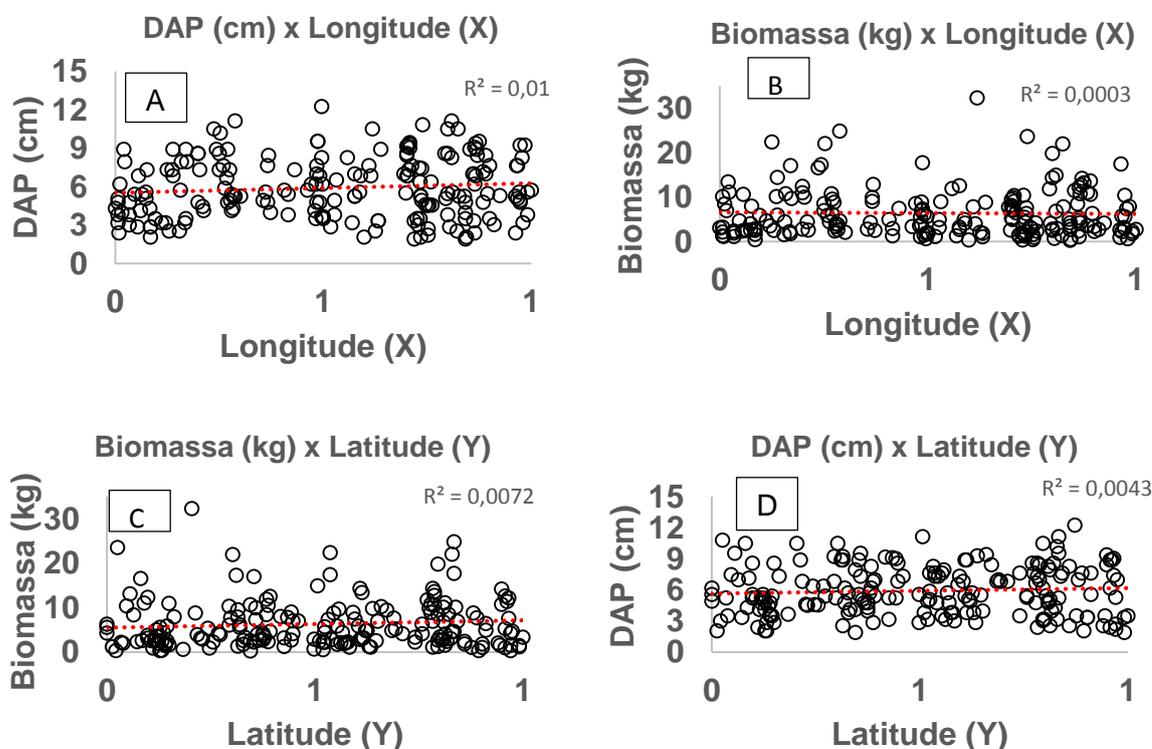


Figura 14. Gráficos apresentando a tendência de dispersão dos dados de DAP (cm) e Biomassa seca (kg) na área de coleta, para os sentidos (Leste-Oeste), figuras (A e B) e (Norte-Sul), (C e D).

Os resultados apresentados pela construção dos semivariogramas direcionais não evidenciaram a presença de anisotropia que aliados aos resultados encontrados na análise de tendências, proporcionaram uma condição excelente para a modelagem espacial das variáveis em estudo, indicando que a biomassa seca e o DAP possuem uma distribuição condicionada apenas a distância entre as amostras, sem a concentração de valores em determinadas direções ou sentidos, sendo estes atributos influenciados apenas pelo espaço e não por fatores externos, como declividade, ondulação, rios, lagos, altitude, efeito de borda, práticas de manejo na área do talhão, etc., ilustrados nas Figuras (15 e 16).

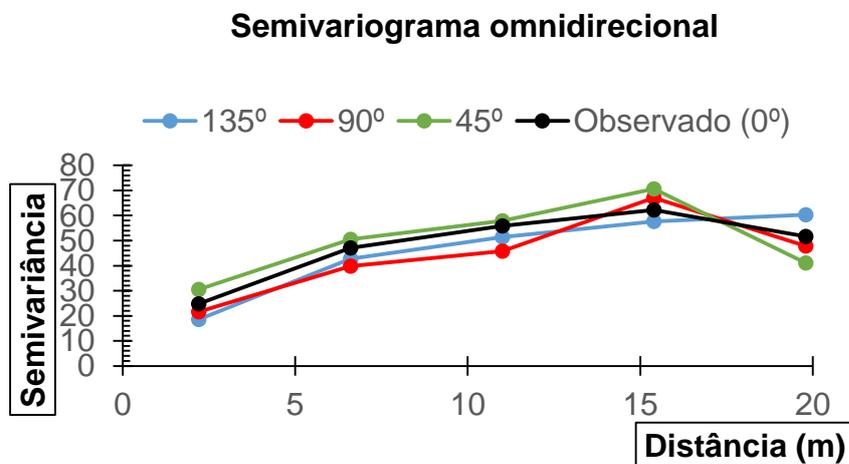


Figura 15. Gráfico dos semivariogramas nas direções 0°, 45°, 90° e 135° com tolerância angular de 45° para o DAP (cm).

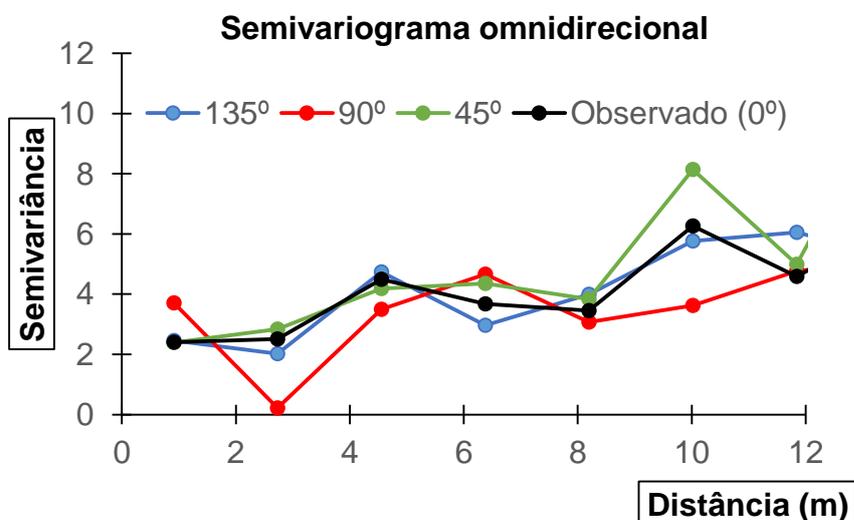


Figura 16. Gráfico dos semivariogramas nas direções 0°, 45°, 90° e 135° com tolerância angular de 45° para Biomassa seca (kg).

Em áreas onde os semivariogramas direcionais não apresentam diferença nas direções 0°, 45°, 90° e 135° os semivariogramas podem ser considerados isotrópicos (CARVALHO; ASSAD, 2005). Sendo esta condição preferível pelo simples fato de facilitar a modelagem geoestatística.

Outro fator que pode ter influenciado na identificação de um padrão anisotrópico foi a forma de coleta dos dados, a qual foi realizada de maneira aleatória retratando a realidade do posicionamento das plantas, muitas vezes em distâncias menores que 2m, dentro e fora das unidades amostrais previamente instaladas em campo. Pois na prática a estimativa dos semivariogramas experimentais é mais precisa em pequenas distâncias (CARVALHO et al., 2009).

Parâmetros semivariográficos e de validação cruzada para Krigagem

Os parâmetros variográficos apresentaram valores de patamar inferiores aos da variância para o DAP (7,8) e superiores para a biomassa (47,8). O ideal seria que estes valores ficassem próximos aos valores encontrados para variância, evitando uma sub ou superestimação da variabilidade espacial dos atributos na área, como pode ser visto em todos os modelos de semivariogramas teóricos ajustados, listados na Tabela 17.

Tabela 17. Parâmetros semivariográficos para o DAP (cm) e biomassa seca (kg).

Variáveis	Modelo	C ₀	C ₁	C	A(m)	ADE	Dependência espacial
DAP (cm)	Esférico	1,8	4,2	6,1	18,1	0,70	Moderada
	Exponencial	1,3	4,9	6,3	21,9	0,79	Forte
	Gaussiano	2,5	3,7	6,2	16,2	0,60	Moderada
Biomassa (kg)	Esférico	29,8	28,6	58,4	17,6	0,49	Moderada
	Exponencial	26,4	34,3	60,7	22,5	0,56	Moderada
	Gaussiano	34,9	25,2	60,1	16,7	0,42	Moderada

Em que: C₀ = Efeito pepita; C₁ = Contribuição espacial; C=Patamar; A= Alcance da dependência espacial; ADE= Analisador da Dependência Espacial.

Mesmo diante desse problema, os semivariogramas teóricos se ajustaram bem ao semivariograma experimental isotrópico para as duas variáveis, porém com uma leve superioridade para o DAP que mostrou uma dependência espacial maior do que a biomassa, conforme apresentado pelo modelo exponencial.

Várias pesquisas apontaram o modelo exponencial com forte ou moderada dependência espacial quando ajustado ao semivariograma experimental para o DAP

e outras variáveis dendrométricas (NANOS; MONTERO, 2002; NANOS et al., 2004; RUFINO et al., 2006; LEAL et al., 2014). Semelhantemente encontrado no atual trabalho, ilustrado pelas Figuras (17 e 18).

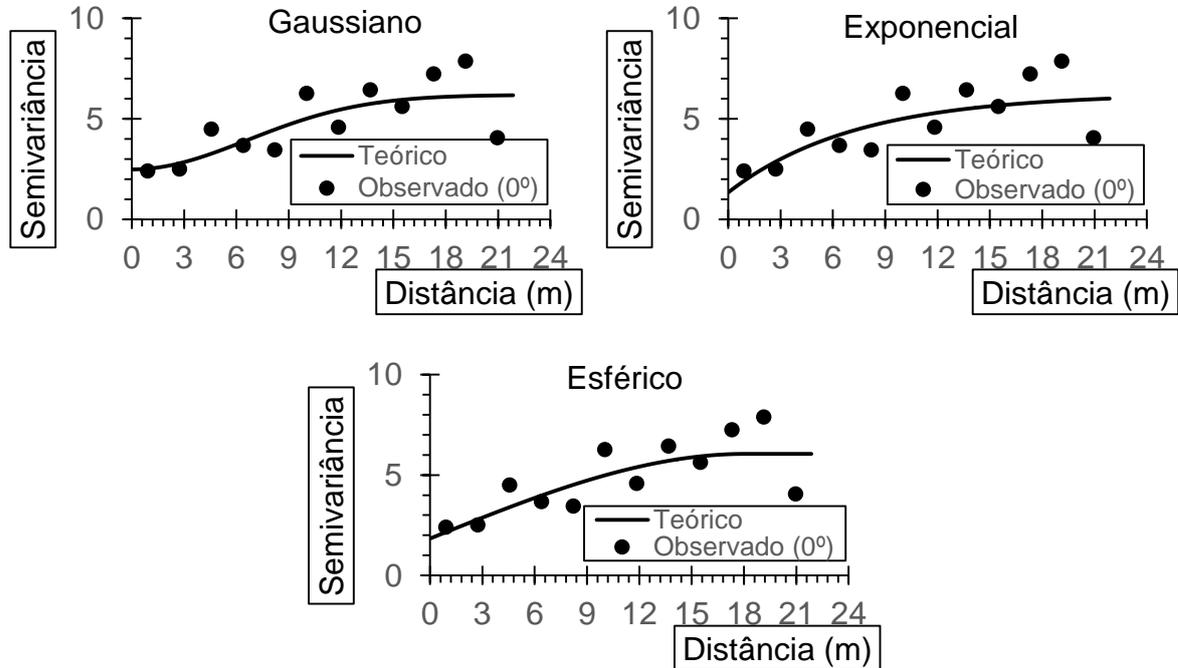


Figura 17. Gráficos representando o ajuste dos semivariogramas teóricos; gaussiano, exponencial e esférico ao semivariograma experimental para DAP (cm).

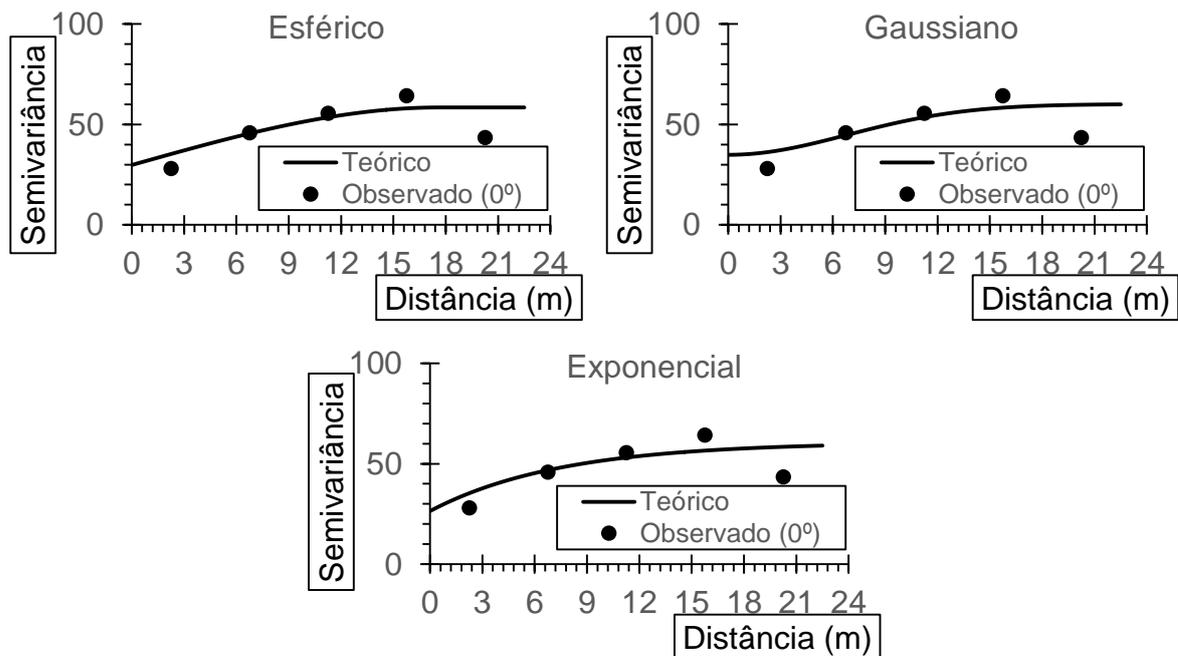


Figura 18. Gráficos representando o ajuste dos semivariogramas teóricos; esférico, gaussiano e exponencial ao semivariograma experimental para biomassa seca (kg).

Todos os semivariogramas teóricos mostraram comportamento crescente até determinada distância, denominada de alcance (A), se estabilizando após a mesma. Corroborando com os trabalhos de Rufino et al. (2006), Mello et al. (2009) e Rosa Filho et al. (2011) ao verificarem em plantios de eucalipto variáveis, como: número de fustes, circunferência à altura do peito, volume, altura dominante, área basal, biomassa, etc, a maioria delas com dependência espacial.

Os modelos de semivariograma teórico ajustados apresentaram dependência espacial moderada para a biomassa em campo, sendo estruturada até 22,5 metros de cada ponto ou indivíduo arbóreo amostrado em qualquer sentido na área para o modelo exponencial, 17,6 metros para o esférico e 16,7 metros para o gaussiano. Para pontos amostrais posicionados a uma distância superior as supracitadas a dependência espacial deixa de existir, passando a ser um processo meramente estocástico, ou seja, sem dependência espacial.

Deste modo, indivíduos amostrados e não amostrados dentro da margem máxima gerada pelo alcance (A), podem apresentar maior correlação uns com os outros, e a partir de valores acima desta distância as amostras passam a ser independentes entre si não sofrendo mais influência do espaço (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Já com relação a validação dos modelos teóricos de semivariograma na estimativa dos valores de biomassa e DAP coletados em campo, seus parâmetros estatísticos de validação cruzada estão na Tabela 18.

Tabela 18. Parâmetros de validação cruzada para biomassa seca (kg) e DAP (cm) na Fazenda Itapemirim, Floresta-PE.

Variáveis	Modelo	ASE	RMS	MS	RMSS	R ² _(aj)	VPE
Dap (cm)	Esférico	2,4(1)	2,4(2)	0,009(2)	0,98(1)	0,65(1)	7
	Exponencial	2,5(2)	2,4(3)	0,012(3)	0,98(2)	0,59(3)	11
	Gaussiano	2,4(3)	2,4(1)	0,006(1)	0,98(3)	0,62(2)	9
Biomassa (kg)	Esférico	7,8(3)	7,8(1)	0,00(1)	0,99(1)	0,61(1)	7
	Exponencial	7,9(1)	7,9(3)	0,01(3)	0,97(2)	0,53(3)	11
	Gaussiano	7,8(2)	7,8(2)	0,00(2)	0,95(3)	0,57(2)	11

Em que: Média dos erros de predição padronizados (MS); Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças entre os Valores Estimados e o Verdadeiro (RMS); Raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro padronizado (RMSS); Erro padrão da média do erro de predição (ASE); R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado; VPE= Valor Ponderado de Escores.

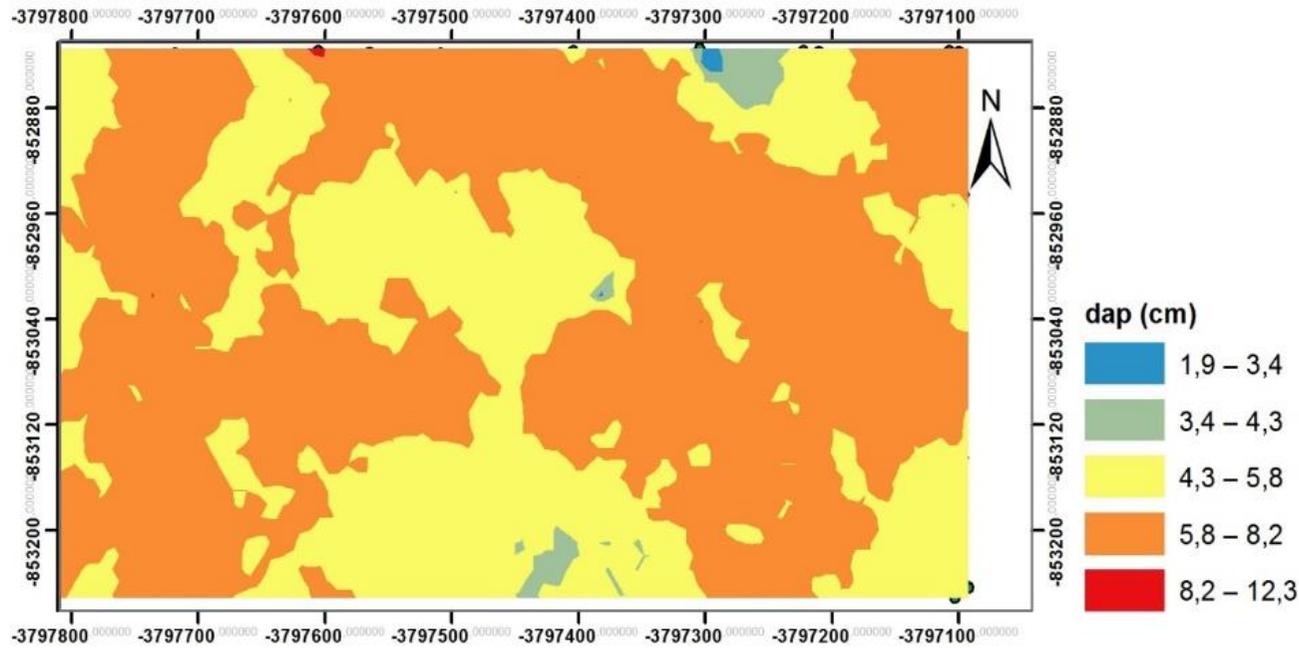
O VPE apresentou o modelo esférico como o melhor para representar a variabilidade espacial de ambos os atributos separadamente pela krigagem com valores de variância local mínima sem viés, representada por RMSS muito próximos a 1, porém com erros padronizados apresentados pela RMS muito distantes de zero, implicando em estimativas pouco precisas sob a base de dados observada, expressa pelos valores de $R^2_{(aj)}$, menores que 0,7, ou seja, o modelo foi capaz de identificar o padrão de distribuição espacial da biomassa seca e DAP na região de estudo, porém com baixa precisão nas estimativas geradas pela superfície krigada em relação aos valores observados da superfície real amostrada.

Alguns trabalhos também averiguaram a deficiência da krigagem em estimar valores reais de variáveis dendrométricas, como os de (SANTOS et al., 2014; LUNDGREN et al., 2015)

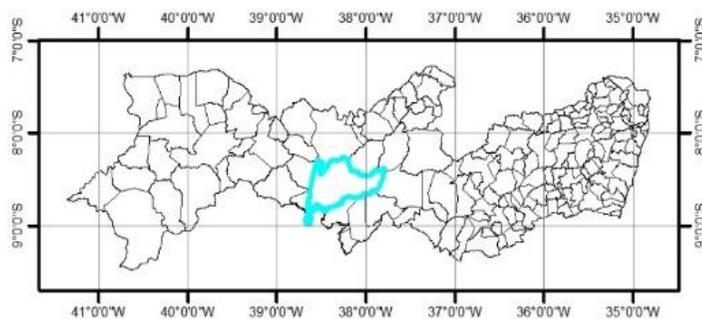
Os mapas de interpolação para ambos os atributos não apresentaram desestruturação da dependência espacial, não havendo perda do contato entre as árvores mediante o alcance gerado pelo modelo esférico, mesmo com a presença de abertura do dossel, afastamento entre as copas e áreas descontínuas (sem indivíduos arbóreos). Caso tais fatores fossem influentes, a técnica de krigagem apontaria uma baixa dependência espacial, ou então, um comportamento totalmente aleatório entre os indivíduos coletados em campo.

Os mapas gerados pela krigagem tanto para o DAP quanto para a biomassa seca foram capazes de fornecer informações prévias sob o mapeamento destas variáveis em campo, indicando que a maioria das árvores encontram-se com valores de DAP entre 4,5 à 5,8 representado pela legenda com cor amarela e 5,8 à 8,2 pela cor laranja, já para biomassa seca, estas classes estão compreendidas entre 6,1 e 17,1 kg, representadas pelas cores laranja e vermelho e valores inferiores pela coloração verde e azul. Conforme a ilustração do mapa de interpolação de krigagem para o DAP e biomassa seca pelo modelo esférico nas Figuras 19 e 20.

Mapa de Interpolação gerado pela Krigagem ordinária para o dap (cm)



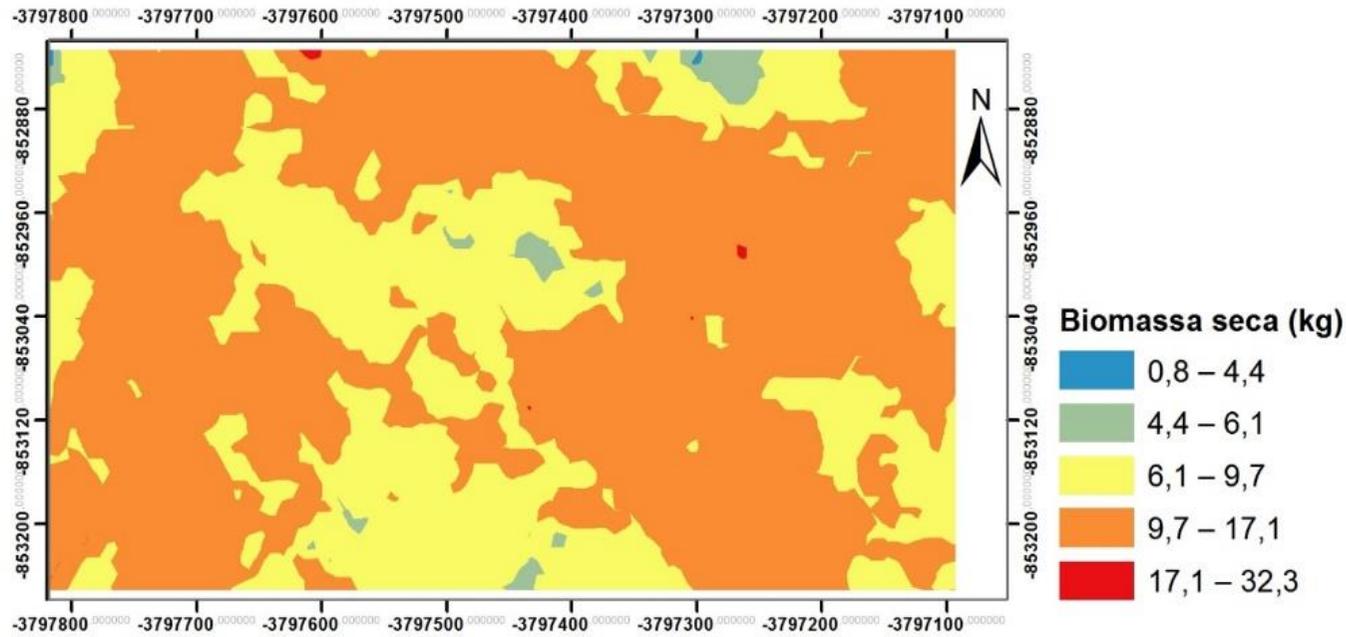
Localização da Área de Estudo



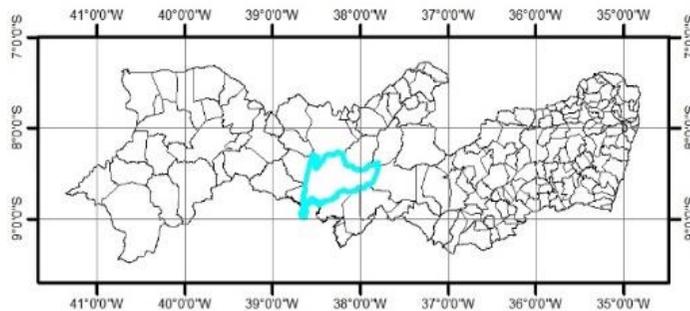
Krigagem: Modelo Esférico Município: Floresta-PE	Escala Gráfica do Mapa de Interpolação 0 55 110 220 Meters
Sistema de Projeção Cartográfica: UTM Datum horizontal: SIRGAS 2000 Escala 1:5.000	

Figura 19. Mapa de interpolação do DAP (cm) gerado com o modelo esférico pela krigagem ordinária na área da atual pesquisa.

Mapa de Interpolação gerado pela Krigagem ordinária para Biomassa seca (kg)



Localização da Área de Estudo



Cokrigagem: Modelo Esférico Município: Floresta-PE	Escala Gráfica do Mapa de Interpolação 0 55 110 220 Meters
Sistema de Projeção Cartográfica: UTM Datum horizontal: SIRGAS 2000 Escala 1:5.000	

Figura 20. Mapa de interpolação da biomassa seca (kg) gerado com o modelo esférico pela krigagem ordinária na área da atual pesquisa.

Correlação entre a variável primária e secundária

A correlação entre a variável primária e secundária é uma condição essencial para realização da cokrigagem, uma vez que para este processo se torne efetivo a correlação entre os atributos deve ser alta (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Como apresentado na atual pesquisa para a biomassa seca total e o DAP, na Figura 21.

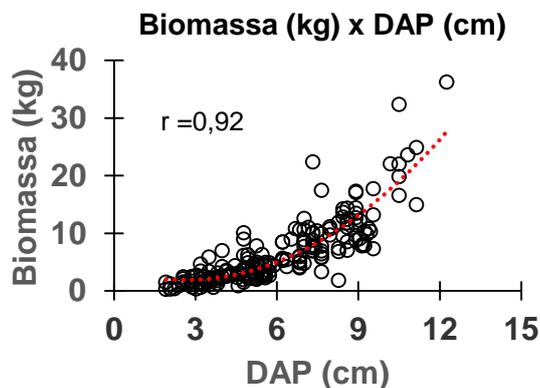


Figura 21. Gráfico de dispersão entre biomassa seca x DAP, com linha de tendência e correlação de Pearson.

A correlação entre a biomassa seca e o DAP são frequentemente encontradas em diversos trabalhos desenvolvidos no setor florestal

Além do mais, correlações acima de 0,85 são desejáveis para que se possa fazer estimativas de biomassa seca de forma contínua no espaço, visto que a biomassa é uma variável de difícil obtenção e com a técnica de Cokrigagem a mesma pode ser estimada em conjunto com o DAP como variável secundária, mesmo em áreas em que a biomassa não foi amostrada.

De acordo com Viola et al. (2010) para que se obtenham bons resultados com a cokrigagem, é necessário que alterações no comportamento da variável secundária possam explicar, ao menos parcialmente, alterações na variável primária, ou seja, que haja correlação entre elas.

Desta forma, estimar valores de biomassa de forma contínua no espaço pode ser bastante viável, haja visto que por meio do DAP das árvores é possível obter o valor de biomassa seca aérea total por planta em outras áreas de caatinga em condições similares a da atual pesquisa,

Parâmetros semivariográficos e de validação cruzada para Cokrigagem

Todos os modelos teóricos de semivariograma cruzados apresentaram grau de dependência espacial maiores que a krigagem para os dois atributos observados, conforme os parâmetros semivariográficos apresentados para a cokrigagem na Tabela 19.

Tabela 19. Parâmetros semivariográficos da Cokrigagem ordinária para biomassa seca (kg).

Modelo	C ₀	C ₁	C	A(m)	ADE	Dependência espacial
Esférico	0,0	56,7	56,7	4,4	1,00	Forte
Exponencial	1,4	56,8	58,2	10,4	0,98	Forte
Gaussiano	13,5	35,4	49,0	4,2	0,72	Moderado

Em que: C₀ = Efeito pepita; C₁ = Contribuição espacial; C=Patamar; A= Alcance da dependência espacial; ADE= Analisador da Dependência Espacial.

Os parâmetros semivariográficos dos modelos teóricos apresentaram uma dependência espacial forte com valores de alcance maior para o modelo exponencial representando a estrutura espacial da biomassa seca em um raio de até 10,4 metros para qualquer indivíduo arbóreo amostrado ou não dentro desse limite.

Já com relação ao patamar o modelo gaussiano mostrou valores mais próximos à variância da biomassa seca (kg) 47,8, sendo o único com elevado valor de efeito pepita se comparado aos modelos esférico e exponencial, por conta da variabilidade das quantidades de biomassa que não apresentaram uma distribuição normal.

Além do mais, altos valores de efeito pepita promovem imprecisões na geração de mapas de interpolação e podem estar relacionados a descontinuidades na vegetação, causados por intervenções antrópicas, herbivoria e manejos frequentes, dentre outros fenômenos naturais, como: chuvas, secas, incêndios florestais, inundações, etc.

Como pode ser observado em um estudo realizado por Akhavan et al. (2010), estudando a variabilidade espacial do crescimento do estoque florestal na região do mar cáspio. Como resultados foi observada baixa e fraca dependência espacial na área de estudo, além de elevados valores de efeito pepita, por conta de áreas descontínuas de vegetação, gerando um efeito de aleatoriedade, causadas por cortes seletivos na área a mais de 30 anos.

As estatísticas apresentadas pelos parâmetros de validação cruzada para cokrigagem estão na Tabela 20.

Tabela 20. Parâmetros de validação cruzada da Cokrigagem ordinária para Biomassa seca (kg).

Modelo	ASE	RMS	MS	RMSS	R ² _(aj)	VPE
Esférico	2,7(2)	3,2(2)	0,02(2)	1,18(3)	0,84(1)	10
Exponencial	3,1(1)	3,1(1)	0,02(3)	1,05(1)	0,83(2)	8
Gaussiano	4,6(3)	3,4(3)	0,01(1)	0,94(2)	0,80(3)	12

Em que: Média dos erros de predição padronizados (MS); Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças entre os Valores Estimados e o Verdadeiro (RMS); Raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro padronizado (RMSS); Erro padrão da média do erro de predição (ASE); R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado; AIC= Critério de Informação de AKAIKE; VPE= Valor Ponderado de Escores Estatísticos.

Perante os parâmetros de validação, todos os modelos teóricos se ajustaram bem diante dos gráficos de semivariogramas cruzados para cokrigagem, ilustrados na Figura 22. Sendo o exponencial o modelo selecionado para gerar o mapa de interpolação para o DAP e a biomassa seca na Figura 23.

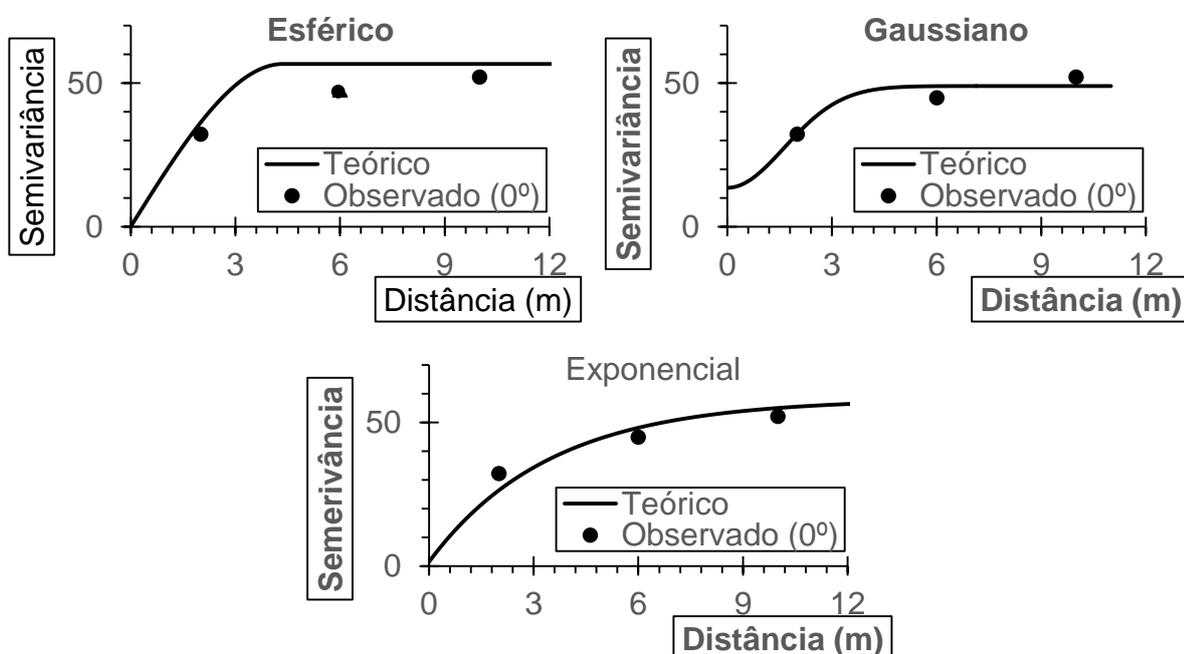
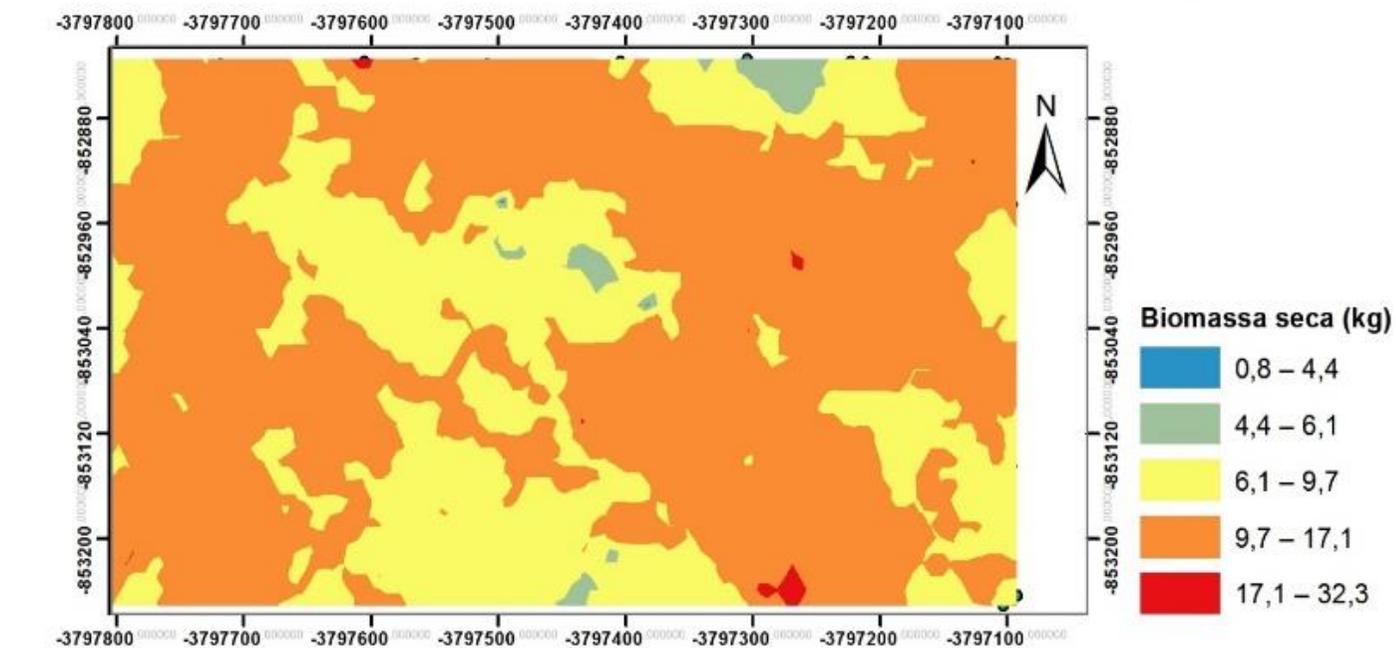
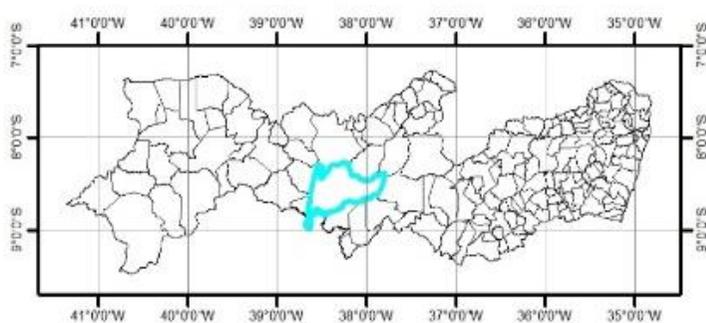


Figura 22. Gráficos representando o ajuste dos semivariogramas cruzados, para os modelos; esférico, gaussiano e exponencial.

Mapa de Interpolação gerado pela Cokrigagem ordinária para Biomassa seca (kg)



Localização da Área de Estudo



<p>Cokrigagem: Modelo Exponencial Município: Floresta-PE</p>	<p>Escala Gráfica do Mapa de Interpolação</p> <p>0 55 110 220 Meters</p>
<p>Sistema de Projeção Cartográfica: UTM Datum horizontal: SIRGAS 2000 Escala 1:5.000</p>	

Figura 23. Mapa de interpolação da Biomassa seca (kg) gerado com o modelo exponencial pela Cokrigagem ordinária na área da atual pesquisa.

As estatísticas apresentadas pela validação cruzada para cokrigagem foram capazes de predizer mais de 80% dos valores observados em campo, de acordo com os valores de R^2 (aj) maiores e iguais a 0,8 para todos os modelos teóricos de semivariograma cruzado testados. Destacando-se o modelo exponencial por apresentar menor viés (1,05) e erro quadrático (3,1), sendo o melhor modelo para representar a continuidade espacial. Como nos trabalhos de (PELLISSARI et al., 2014b; CARVALHO et al., 2015; LUNDGREN et al., 2015; LUNDGREN et al., 2016).

Segundo Carvalho et al. (2015) a técnica de cokrigagem ordinária é a mais indicada para explicar as variações espaciais de variáveis como volume e biomassa. Também mostrado na atual pesquisa.

A aplicação desta técnica também potencializou as estimativas dos estoques de carbono em áreas de Savana no estado de Minas Gerais num estudo realizado por Scolforo et al. (2016). Onde foi observado que a krigagem e a cokrigagem foram capazes de fornecer informações bastante precisas sob o estoque de carbono nestas áreas, sendo o resultado melhor apresentado para a técnica de cokrigagem de utilizou como varável secundária a precipitação, potencializando a estimativa do carbono.

Em outra pesquisa realizada por Correia et al. (2014) no município de Custódia-PE em área de Caatinga para identificar a distribuição de carbono do solo e a biomassa de herbáceas em sistema silvipastoril, observou-se que os modelos de semivariograma teórico representaram bem a estrutura espacial da biomassa de espécies herbáceas com alcances estruturados até 13,6 metros muito próximos aos encontrados no presente trabalho em área de vegetação nativa e de porte arbustivo-arbóreo, retratando o que o uso da geoestatística pode ser aplicada em áreas experimentais e nativas em áreas de Caatinga.

A malha amostral aleatória obtida em campo potencializou os resultados encontrados para a krigagem e a cokrigagem nos atributos de biomassa seca (kg) e DAP (cm), semelhante ao encontrado por Lundgren et al., (2016) comparando a amostragem aleatória com a sistemática em plantio de eucaliptos.

Porém, dependendo da escala amostral pré-selecionada sob circunstâncias de antropização ou impactos ambientais severos, a krigagem e a cokrigagem não são indicadas, pois a descontinuidade do maciço florestal causa a ineficiência na detecção de padrões para estrutura espacial, sendo sensíveis às alterações das florestas (AMARAL et al., 2013a; AMARAL et al., 2013b).

O uso destas técnicas também se faz bastante eficaz no mapeamento em estudos de diversidade florística e de distribuição espacial de espécies florestais nativas (HERNANDEZ-STEFANONI; PONCE-HERNANDEZ, 2006).

Abrindo uma enorme oportunidade para a utilização da variável espacial em estudos relacionados a estratégias de competição intra ou interespecífica, além de reduzir custos em inventários florestais, visto que é possível saber a distância máxima de influência entre as espécies ou indivíduos arbóreos na região, contudo torna-se necessária a complementação de informações acerca do tipo de influência sob a estrutura espacial da biomassa nessas áreas, com estudos mais específicos a níveis de relação solo, planta e água em termos dinâmicos no tempo e espaço.

CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que a biomassa seca e o DAP possuem dependência espacial em área de Caatinga.

A modelagem geoestatística foi capaz de estimar mais de 80% dos atributos coletados em campo com variância mínima e sem viés pela técnica da cokrigagem ordinária.

A técnica de krigagem ordinária não foi capaz de estimar 70% dos dados amostrados, porém foi capaz de detectar estrutura espacial sem viés para DAP e biomassa.

A cokrigagem foi mais indicada para geração do mapa de interpolação para a biomassa seca em área de Caatinga, por meio do modelo exponencial que melhor representou a estrutura espacial da biomassa seca na região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As porções de biomassa por compartimento apresentaram uma distribuição uniforme em relação a biomassa total, sendo diferente apenas para a espécie *Commiphora leptophloeos*, por conta de sua arquitetura e morfologia diferenciadas, que influenciou diretamente no ajuste de modelos matemáticos para os compartimentos GF e GG da mesma, inferiores aos das demais espécies.

Foi possível gerar equações confiáveis nas estimativas de biomassa seca por compartimento para indivíduos arbóreos, à exceção do compartimento folha. As equações ajustadas foram bastante eficazes podendo ser utilizadas em futuros inventários ou planos de manejo florestal na região, pois as espécies abordadas na presente pesquisa representam cerca de 70% da dominância e densidade nas áreas de caatinga arbustivo-arbórea em estágio de sucessão secundária intermediária, comumente encontradas no sertão de Pernambuco.

Também foi possível identificar que as variáveis dendrométricas DAP e biomassa seca possuem dependência espacial e estão correlacionadas com seus vizinhos mais próximos em qualquer sentido ou direção na área da pesquisa, não sendo puramente aleatórias, pois o componente espacial está presente na variância desses atributos na região.

Com relação ao emprego da krigagem ordinária, pôde-se observar grande potencial no mapeamento de variáveis como DAP e biomassa seca, mesmo estimando menos de 70% dos valores observados para cada indivíduo arbóreo em campo, possibilitando o zoneamento das mesmas de modo a facilitar na estratificação da área para o manejo florestal.

Já a cokrigagem se mostrou mais eficiente, não só sob o ponto de vista da estratificação, como também foi capaz de estimar valores de biomassa seca e DAP, com precisão acima dos 80%. Evidenciando que estes atributos possuem correlação espacial intra ou interespecíficos dentro de uma distância máxima de 10,4 metros, auxiliando nas estimativas de biomassa seca em áreas não amostradas com o uso do DAP como variável secundária.

Por fim torna-se necessário o desenvolvimento de mais estudos buscando compreender a dependência espacial em áreas de Caatinga, pois é uma informação fundamental para a elaboração de inventários florestais e planos de manejo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. C. **Modelagem de biomassa e de nutrientes de espécies da Caatinga no município de Floresta – PE**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

AKHAVAN, R.; ZAHEDI AMIRI, G.H.; ZOEBEIRI, M. Spatial variability of forest growing stock using geostatistics in the Caspian region of Iran. **Caspian Journal Environmental Science**, Guilan, v.8, n.1, p.43-53, 2010.

ALBUQUERQUE, C. S. **Densidade de madeira de espécies arbustivas-arbóreas em diferentes cotas altitudinais da Serra de Bodocongó, Semiárido Brasileiro**. 2015. 48 f. Monografia (Graduação em Ciência Biológicas) Universidade Estadual da Paraíba, João Pessoa, 2015.

ALVES JUNIOR, F. T. **Estrutura, biomassa e volumetria de uma área de Caatinga, Floresta-PE**. 2010. 151f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2010.

ALVES JUNIOR, F. T. et al. Regeneração natural de uma área de Caatinga no sertão Pernambucano, Nordeste do Brasil. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 229–235, 2013.

AMARAL, L. DE P. et al. Análise da distribuição espacial de biomassa e carbono arbóreo acima do solo em floresta ombrófila mista. **Ambiência**, v. 6, p. 103–114, 2010.

AMARAL, L. P. et al. Influência da floresta alterada na distribuição espacial de três espécies da floresta ombrófila mista avaliada pela geoestatística. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 491-501, 2013.

AMARAL, L.P. et al. Uso de geoestatística no estudo do Índice de Diversidade de Shannon-Wiener em Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.42, n.97, p.83-93, 2013.

AMORIM, A.M., JARDIM, J.G., CLIFTON, B.C., FIASCHI, P., THOMAS, W.W., CARVALHO, A.M.V. The vascular plants of a forest fragment in southern Bahia, Brazil. **Sida**, v.21, n.3, p.1726–1752, 2005.

ARAÚJO, B.A.; DANTAS NETO, J.; ALVES, A.S; ARAÚJO, P.A.A. Estrutura fitossociológica em uma Área de Caatinga no Seridó Paraibano. **Revista Educação Agrícola Superior**, Brasília, v. 27, n. 1, p. 25-29, 2012.

BALBOA-MURIAS, M. A.; RODRÍGUEZSOALLEIRO, R.; MERINO, R.; ÁLVAREZGONZÁLEZ, J .G. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. **Forest Ecology and Management**, v. 237, n.1-3, p. 29-38, 2006.

BASUKI, T.M. et al. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**. v.257, n.8, p.1684-1694, 2009.

BOX, G.E.P; COX, D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, p. 211-252, 1964.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2009**: ano base 2008. EPE: Rio de Janeiro, 2009.

BRAUN-BLANQUET, J. **Plant sociology**: the study of plant communities. New York: McGraw-Hill, p. 438, 1932.

BROWN, I. F.; MARTINELLI, L. A.; THOMAS, W. W.; MOREIRA, M. Z.; FERREIRA, C. A.; VICTORIA, R. A. 1995. Uncertainty in the biomass of Amazonia forests: an example from Rondônia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 75, n.1-3, p. 175-189, 1995.

CABRAL, G. A. DE L.; SAMPAIO, E. V. DE S. B.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. DE. Estrutura Espacial e Biomassa da Parte Aérea em Diferentes Estádios Sucessionais de Caatinga, em Santa Terezinha, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 3, p. 566–574, 2013.

CALIXTO JÚNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estrutura Fitossociológica de um Fragmento de Caatinga Sen- Su Stricto 30 anos após Corte Raso, Petrolina-PE, Brasil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 67–74, 2011.

CAMPELLO, F. B.; GARIGLIO, M. A.; SILVA, J. A.; LEAL, A. M. A. **Diagnóstico Florestal da Região Nordeste**. Projeto Desenvolvimento Florestal para o Nordeste do Brasil (Projeto IBAMA/PNUD/BRA/93/033). Brasília: IBAMA, 1999. (Boletim Técnico, n. 2).

CARVALHO, J.R.P. de; ASSAD, E.D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.377-384, 2005. DOI: 10.1590/S0100-69162005000200011.

CARVALHO, J.R.P. de; VIEIRA, S.R.; GREGO, C.R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.443-448, 2009. DOI: 10.1590/ S1415-43662009000400011.

CASTELLETTI, C. H. M.; CARDOSO, J. M. S.; TABARELLI, M.; MELO, A. M. S. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. In: TABARELLI, M.; CARDOSO, J. M. S. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Recife: MMA, UFPE, 2004. p. 91-100.

CASTRO, M. DE et al. Relação Espacial do Carbono da Vegetação e Matéria Orgânica do Solo na Serra da Mantiqueira. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 4, p. 446–455, 2015.

CAVALCANTI, E. R.; ARAÚJO. N. C. F. O uso da energia de biomassa no Bioma Caatinga. **V Semana do Meio Ambiente**. Recife. 2008. Disponível em:< http://www.fundaj.gov.br/geral/VSMA/VSMA2008_2302.pdf >. Acesso em: 15 mai. 2015.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London, Applied Science Publishers, 1979. 126p.

COELHO, M. S. et al. Floristic composition and structure of a tropical dry forest at different successional stages in the Espinhaço Mountains, southeastern Brazil. **Interciencia**, v. 37, n. 3, p. 190–196, 2012.

CORREIA, M. D.; MENEZES, R. S. C.; OLINDA, R. A. Modelagem geoestatística da distribuição de carbono do solo e biomassa de herbáceas em sistema silvopastoril na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Biomassa e Energia**, v. 31, n. 2, p. 116-129, 2014.

CPRH, **Instrução Normativa CPRH Nº 07/2006 de 29 de dezembro de 2006**. Recife: 2006. Disponível em: <http://www.cprh.pe.gov.br/legislacao/instrucoes_normativas/cprh_agencia_estadual_meio_ambiente_recursos_hidricos/39805%3B7.5610%3B140606%3B0%3B0.asp>. Acesso em: 07 set. 2015.

CPRM, **Diagnóstico do município de Floresta. Estado de Pernambuco**. Pernambuco: 2005. Disponível em:<<http://www.cprm.gov.br/rehi/atlas/pernambuco/relatorio/FLOR061.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2016.

DRUMOND, M. A.; PIRES, I. E.; OLIVEIRA, V. R.; OLIVEIRA, A. R. ALVAREZ, I. A. Produção e distribuição de biomassa de espécies arbóreas no semiárido brasileiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.4, p.665-669, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento agroecológico do estado de Pernambuco – ZAPE**. 2001. Disponível em:< <http://www.uep.cnps.embrapa.br/zape/cartas/Airi.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento agroecológico do estado de Pernambuco – ZAPE**, Pernambuco: 2007. Disponível em:<<http://www.uep.cnps.embrapa.br/zape>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

FABRICANTE, J. R. et al. Análise populacional de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae Lindl.) na caatinga da região do Seridó nordestino. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 7, n. 3, p. 285–290, 2009.

FERRAZ, J. S. F. et al. Estrutura do componente arbustivo-arbóreo da vegetação em duas Áreas de Caatinga, no Município de Floresta, Pernambuco, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1055–1064, 2014.

GIULIETTI, A. M.; et al. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**, p. 48-90, 2004.

HERNANDEZ-STEFANONI, J. L.; PONCE-HERNANDEZ, R. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: comparison of spatial interpolation methods. **Environmental monitoring and assessment**, v. 117, n. 1, p. 307-334, 2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE. 2012. Disponível em:<<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2015.

IMAÑA-ENCINAS, J. et al. Equações de volume de madeira para o cerrado de Planaltina de Goiás. **Revista Floresta**, v.39, n.1, p.107-116, 2009.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, New York. 1989. 561 p.

KING, D. A. Linking tree form, allocation and growth with an allometrically explicit model. **Ecological Modelling**, v. 185, n. 1, p.77-91, 2005.

LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; MIGUEL, E. P. GEOSTATISTICAL INTERPOLATOR TO ESTIMATE VOLUME IN A SETTLEMENT OF *Eucalyptus urophylla* LOCATED IN RIO VERDE/GOIÁS. **Nucleus**, v. 11, n. 1, p. 153–159, 2014.

LEAL, INARA R. et al. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 139-146, 2005.

LIMA, B. G. DE; COELHO, M. DE F. B. Estrutura do componente arbustivo-arbóreo de remanescente de Caatinga no Estado do Ceará, Brasil. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 665–672, 2015.

LIMA, P. C. F.; OLIVEIRA, E. B.; MACHADO, S. A. Equações para estimativa da biomassa de espécies de *Prosopis* no semi-árido brasileiro. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 32/33, n. 1, p. 67-79, 1996.

LUCENA, M. S. DE; ARCANJO, J.; ALVES, A. R. Regeneração natural do estrato arbustivo-arbóreo em área de Caatinga na Estação Ecológica do Seridó – RN, Brasil. **Revista Biotemas**, v. 29, n. 2, p. 17–31, 2016.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A. DA; FERREIRA, R. L. C. ESTIMAÇÃO DE VOLUME DE MADEIRA DE EUCALIPTO POR COKRIGAGEM, KRIGAGEM E REGRESSÃO. **CERNE**, v. 21, n. 2, p. 243–250, jun. 2015. 16

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A. DA; FERREIRA, R. L. C. Influência do Tipo de Amostragem na Estimativa de Volume de Madeira de Eucalipto por Krigagem
Sampling Type Influence in the Estimation of Eucalyptus Wood Volume by Kriging. **Floresta e Ambiente**, 2016.

MARANGON, G. P. et al. Estrutura e padrão espacial da vegetação em uma área de caatinga. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 83–92, 2013.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, p.1246-1266, 1963.

MIRANDA, D.L.C; MELO, A.C.G.; SANQUETTA, C.R. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamento de restauração. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.3, p.679-689, 2011.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLEMBERG. H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New york: John Wiley & Sons, 1974, 547p.

NANOS, N. et al. Geostatistical prediction of height/diameter models. **Forest Ecology and Management**, v. 195, n. 1-2, p. 221–235, 2004.

NANOS, N.; MONTERO, G. Spatial prediction of diameter distribution models. **Forest Ecology and Management**, v. 161, n. 1-3, p. 147–158, 2002.

NIKLAS, Karl J. The allometry of safety-factors for plant height. **American Journal of Botany**, p. 345-351, 1994.

O'BRIEN, S. T.; et al. Diameter, height, crown, and age relationship in eight neotropical tree species. **Ecology**, v. 76, n. 6, p. 1926-1939, 1995.

PEICHL, M.; ARAIN, M. A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. **Forest Ecology and Management**, v. 253, n.1-3, p. 68-80, 2007.

PELISSARI, A. L. et al. Geostatistic Applied to Spatial Modeling of Hypsometric Relationships in Forest Stands. **American International Journal of Contemporary Research**, v. 4, n. 7, p. 67–76, 2014b.

PELISSARI, A. L. et al. Propostas de mapeamentos da capacidade produtiva de sítios florestais por meio de análises geoestatísticas. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 601–608, 2015.

REGINA, I. S. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mounts, Salamanca, Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 132, n. 2-3, p. 127-141, 2000.

REIS, M. G. F.; et al. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, n.2, p.149-162, 1985.

REZENDE, A. V.; VALE, A. T.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FELFILI, J. M. 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**, Piracicaba, n. 71, p. 65-76, 2006.

RIBEIRO, S.C. et al. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v.262, n.3, p.491-499, 2011.

RIEGELHAUPT, E. M; PAREYN, F. G. C. **A questão energética e o manejo florestal da Caatinga**. In: GARIGLIO, M. A; SAMPAIO, E. V. S. A; CESTARO, L. A; KAGEYAMA, P. Y. (Org.). **Uso Sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**, Brasília. p.65-75, 2010.

RUFINI, A. L. et al. Equações volumétricas para o cerrado Sensu Stricto, em Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v.16, n.1, p.1-11, 2010.

SALIS, S. M.; ASSIS, M. A.; MATTOS, P. P.; PIÃO, A. C. S. Estimating the aboveground biomass and wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations. **Forest Ecology and Management**, v. 228, n. 1-3, p. 61-68, 2006.

SALLES, I. S.; et al. Alometria e arquitetura de árvores. **Revista da Biologia**, v. 12, n. 1, p. 17-20, 2014.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 4, p. 937-945, 2005.

SANTANA, J. A. S.; SOUTO, J. S. Diversidade e estrutura fitossociológica da caatinga na estação ecológica do Seridó, RN. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 232-242, 2006.

SANTOS, K. et al. Equações volumétricas por classe diamétrica para algumas espécies folhosas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná, Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 8, n. 1, p. 99-112, 2006.

SCHNEIDER. P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C.A.M.; **Planejamento da Produção Florestal**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2ª edição, RS, 501p. 2009,

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber volume. **Journal of Forestry**, v.37, n.9, p.719-734, 1939.

SCOLFORO, H. F. et al. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. **Forest Ecology and Management**, v. 376, p. 24–35, 2016.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Diagnóstico do município de Floresta, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 12p.

SILVA, G. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 567-575, 2008.

SILVA, J. A. A.; BAILEY, R. L. Considerações teóricas sobre o uso correto do índice de furnival na seleção de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 323-327, 1991.

SILVA, L. B.; et al. Comparative study of *Mimosa ophthalmocentra* Mart. ex Benth and *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Fabaceae-Mimosoideae) wood in the caatinga of Northeast Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 2, p. 301-314, 2011.

SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.33, no .6, p.1133-1139, 2009.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

THIERSCH, A. **A eficiência das distribuições diamétricas para prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis***. Lavras, 1997. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

VEGA, F. V. A.; BOVI, M. L. A.; SPIERING, S. H.; GODOY JÚNIOR, G. Relações alométricas para estimativa da fitomassa aérea da pupunheira. **Horticultura Brasileira**, v.22, n.1, p.104-108, 2004.

VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970–978, 2010.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2.ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 333p.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

ZÁKIA, M. J. B.; PAREYN, F. G.; RIEGELHAUPT, E. Equações de peso e de volume para oito espécies lenhosa nativas do Seridó, RN. In: IBAMA. **Plano de manejo florestal para a região do Seridó do Rio Grande do Norte**. Natal: PNUD / FAO /

IBAMA - Governo do Rio Grande do Norte, 1992. p. 1-92.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solo para fins de mapeamento de fertilidade do solo**. Botucatu. Tese (Livre Docência na Disciplina de Levantamentos de Solos e Fotopedologia), Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, p.114, 2001.

APENDICE

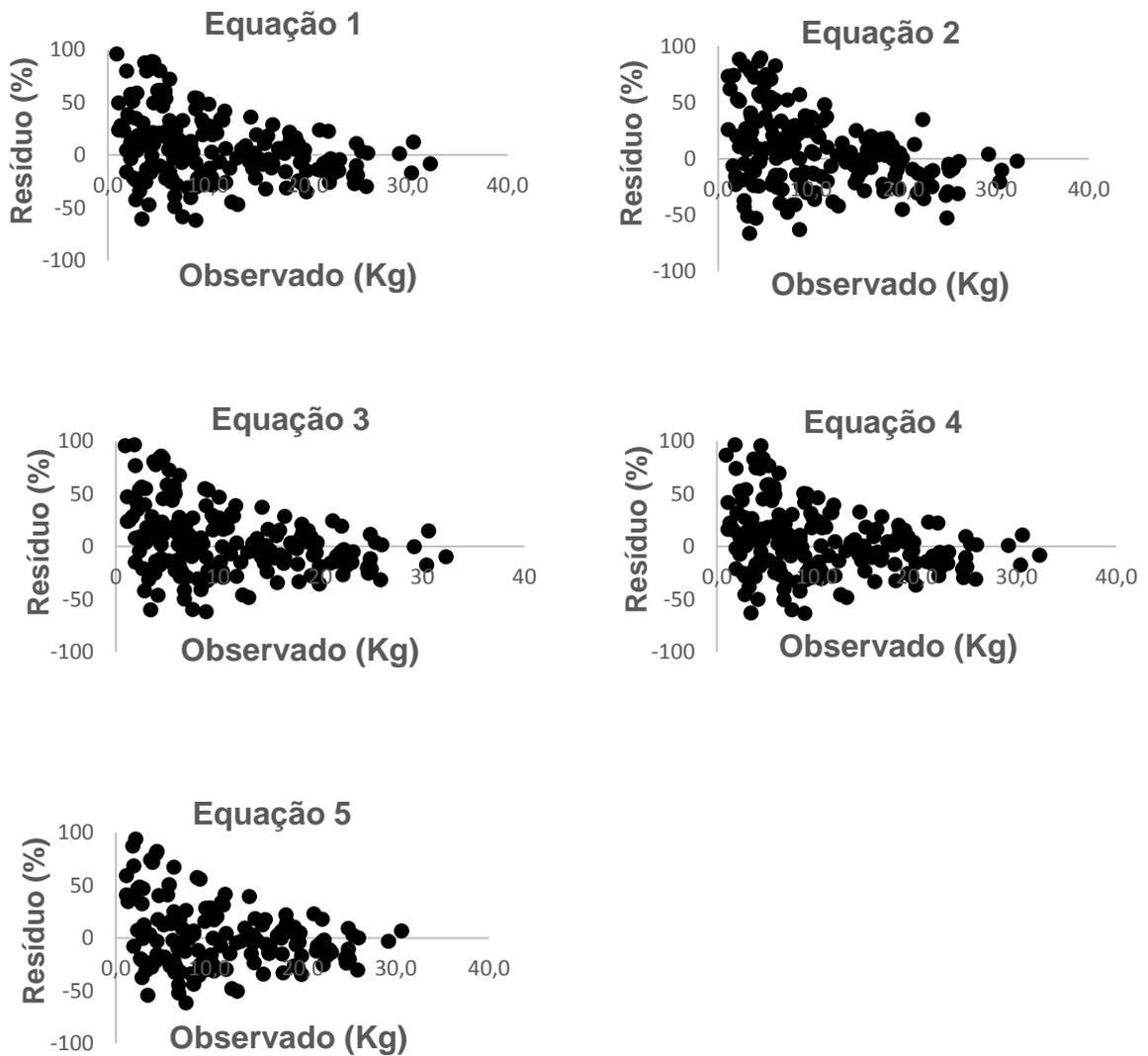


Figura 22. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Total.

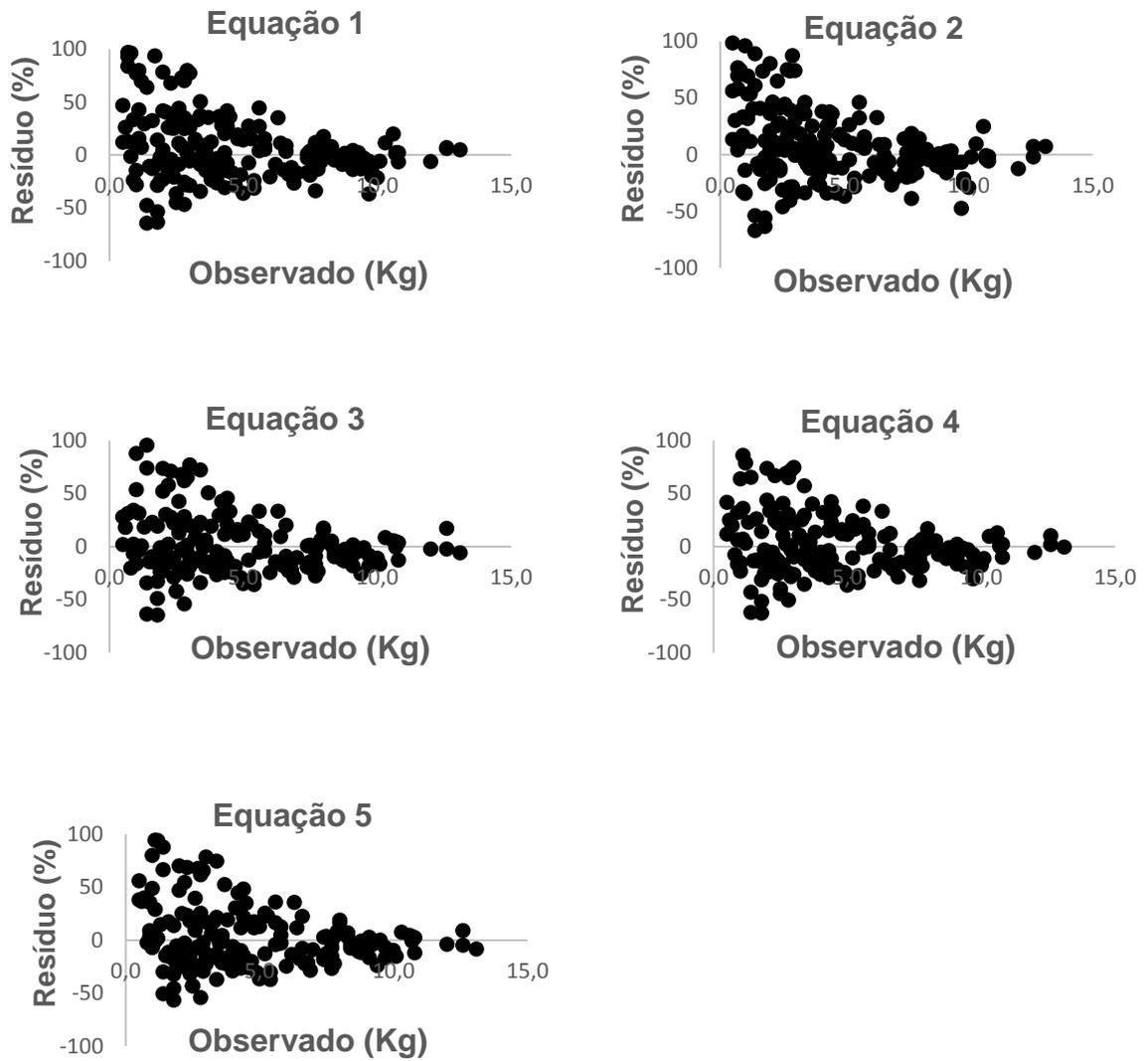


Figura 23. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Fuste.

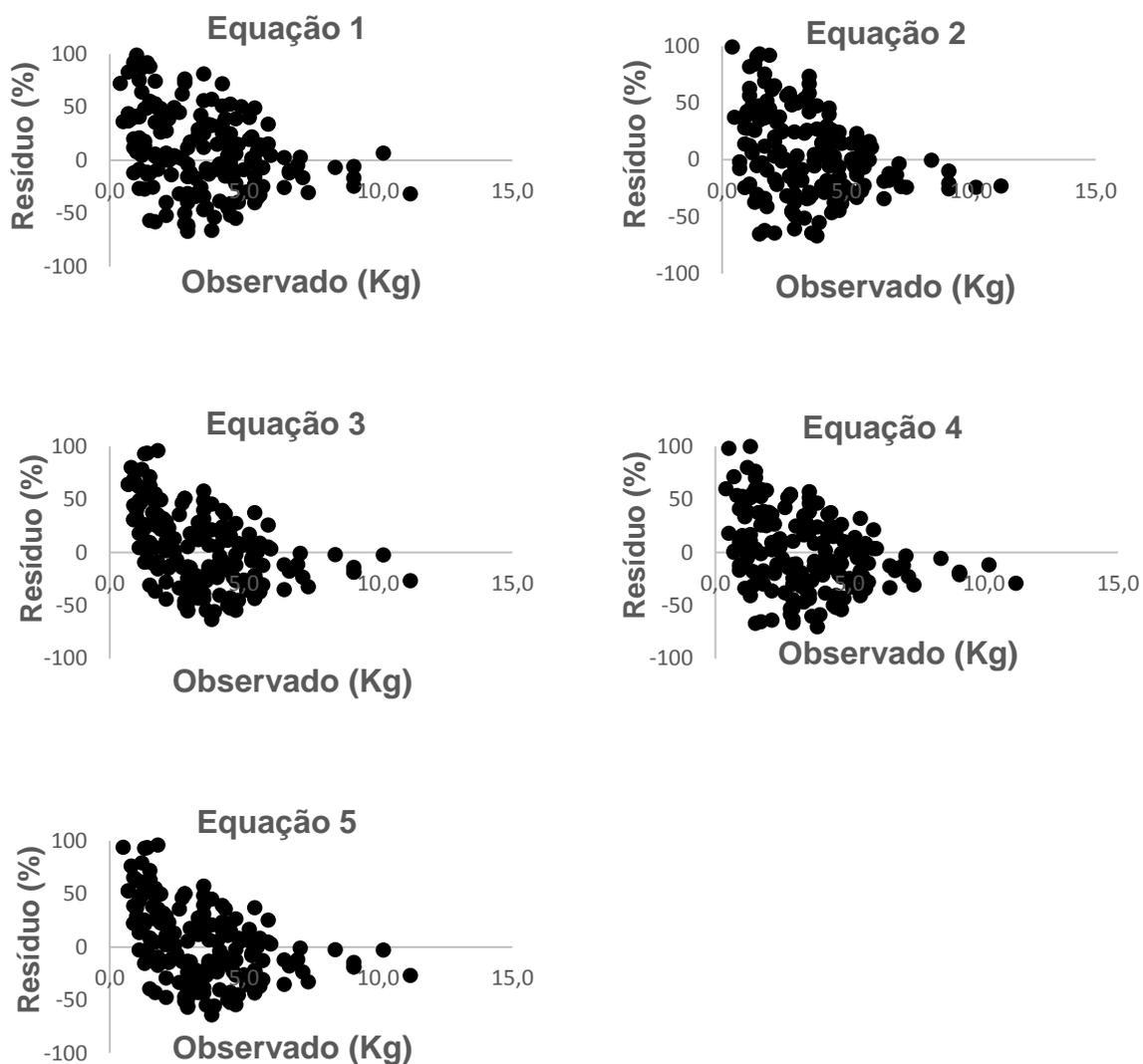


Figura 24. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Folha com Galho fino.

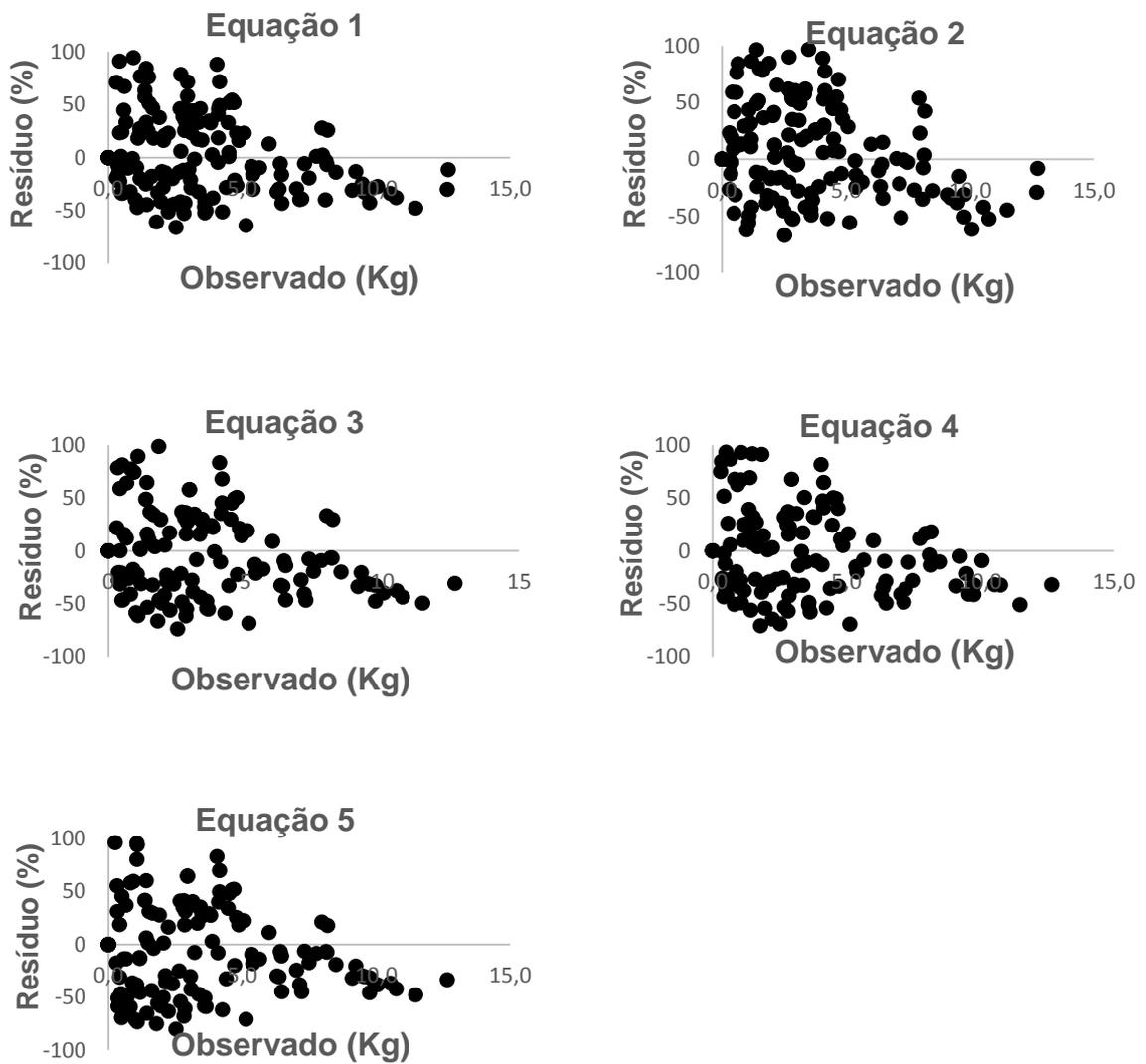


Figura 25. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Galho grosso sem *C. leptophloeos*.

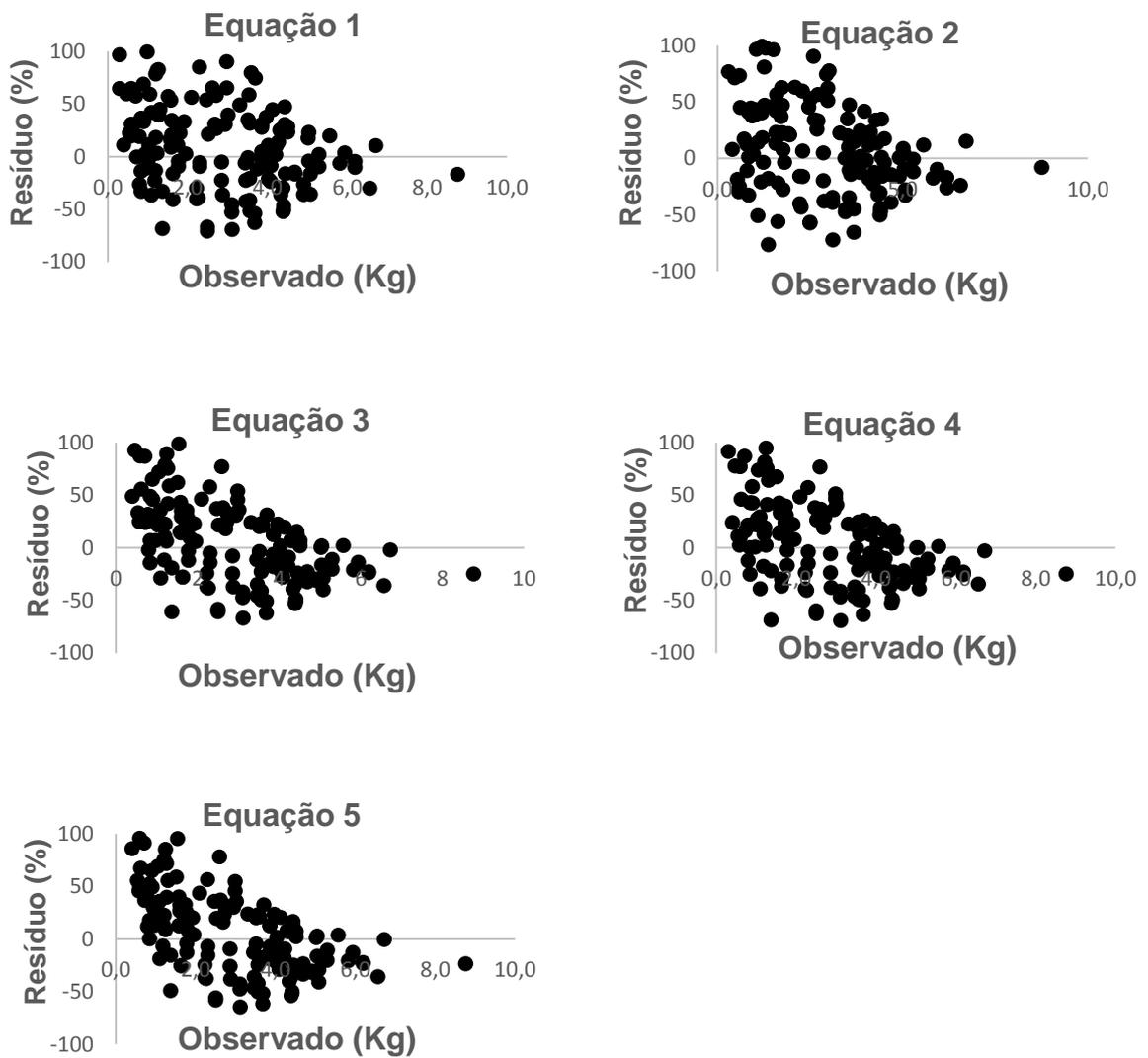


Figura 26. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Galho fino sem *C. leptophloeos*.

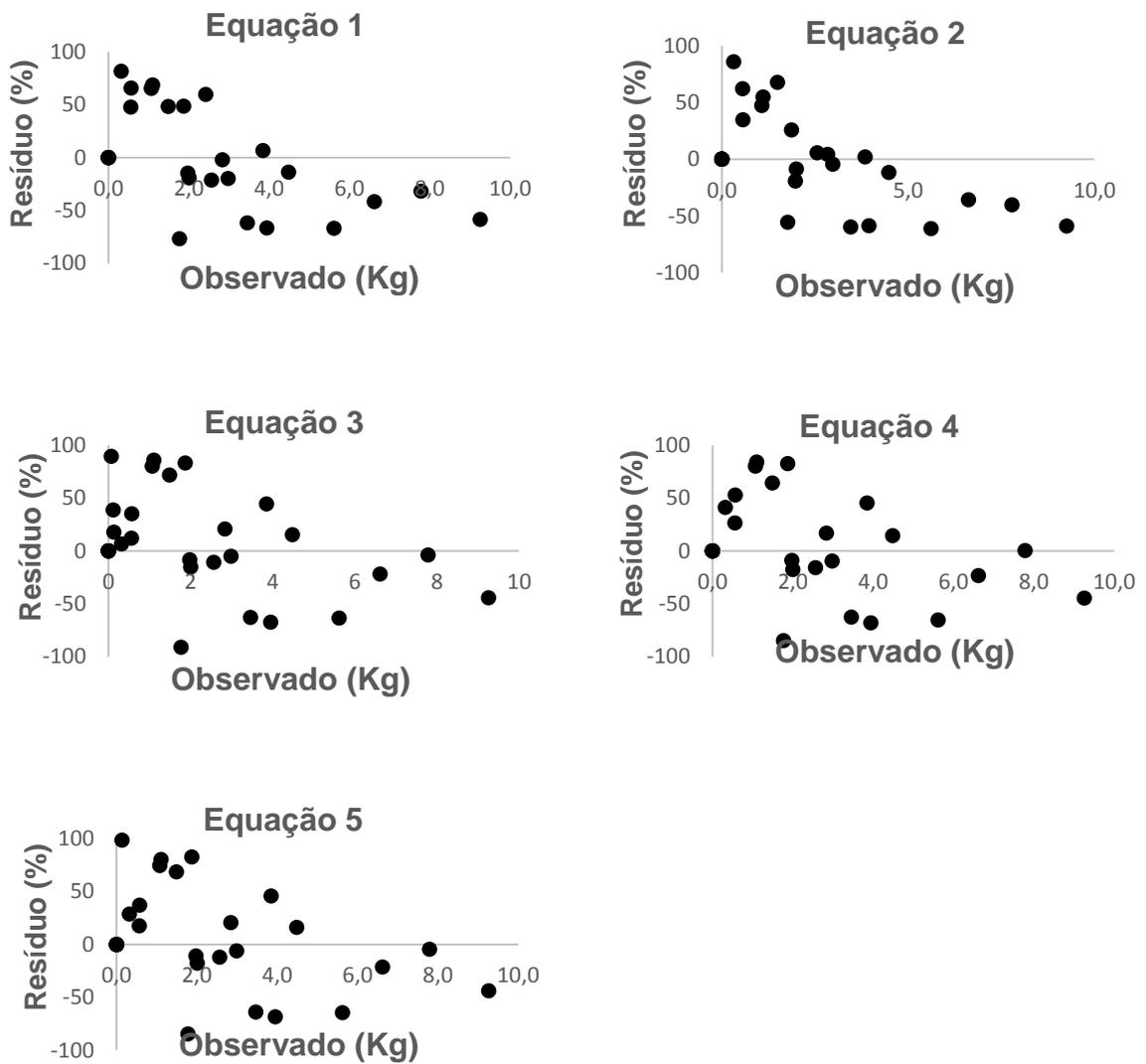


Figura 27. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Galho grosso com *C. leptophloeos*.

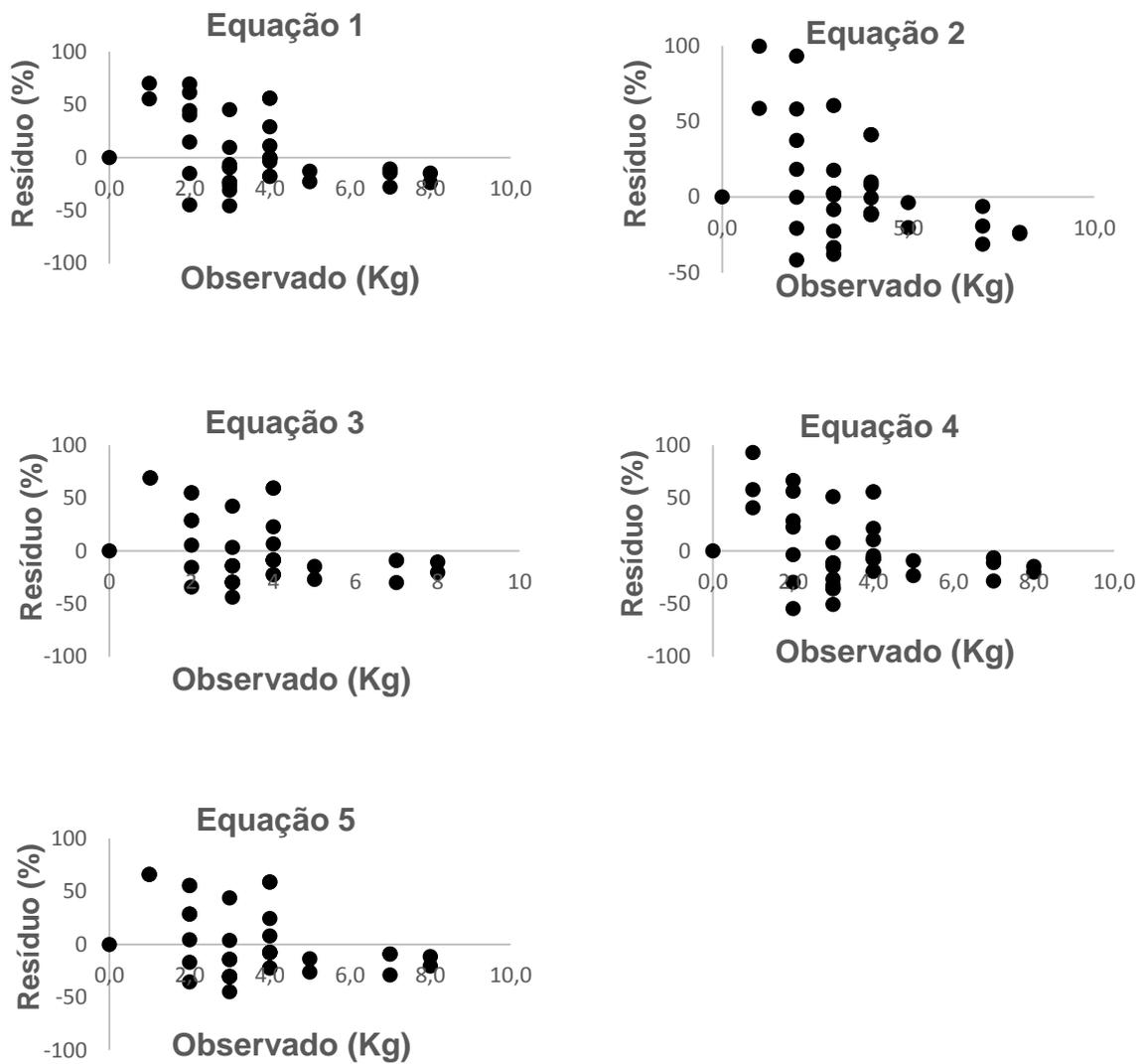


Figura 28. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Galho fino com *C. leptophloeos*.

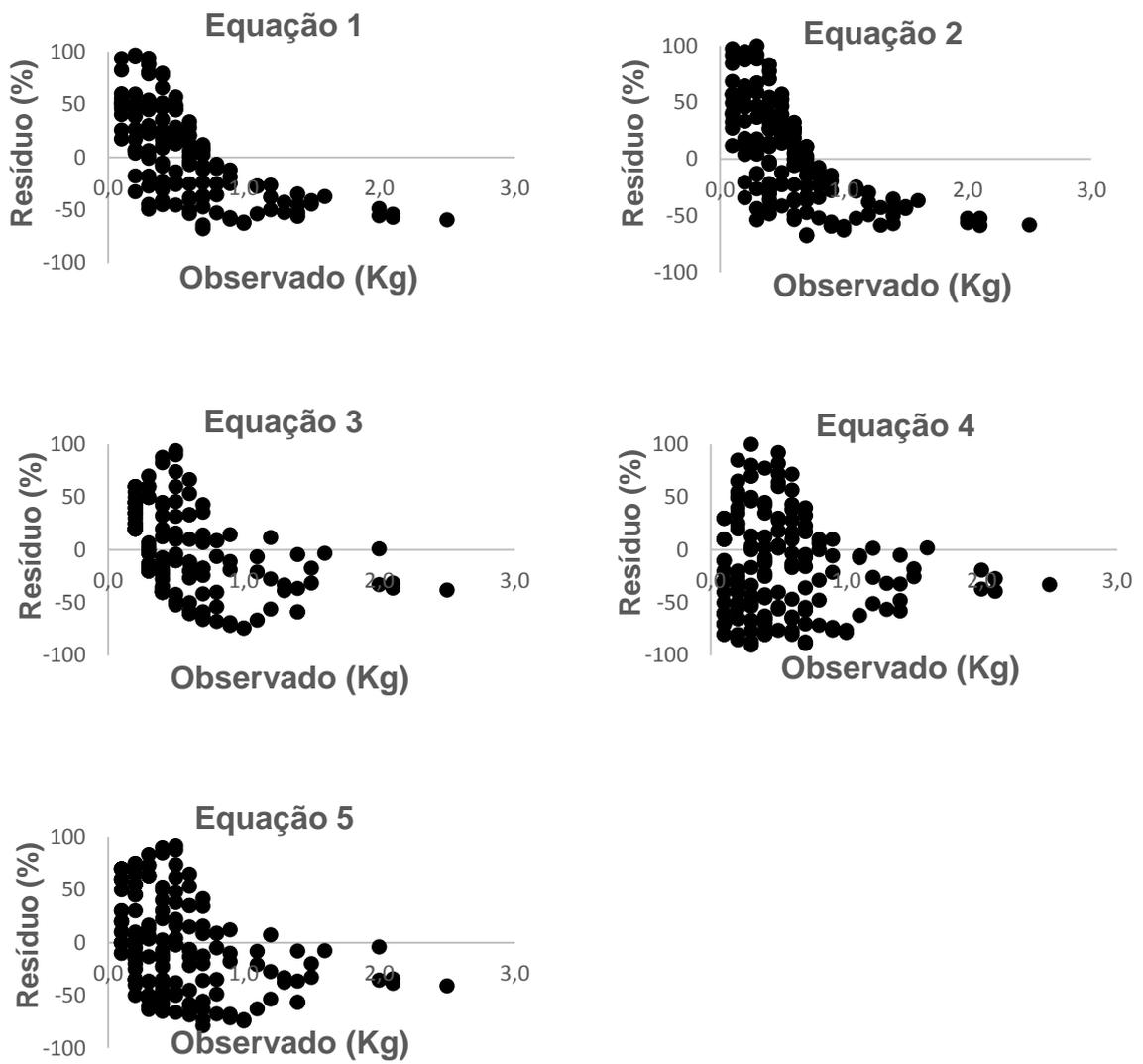


Figura 29. Gráfico dos resíduos para as equações 1, 2, 3, 4 e 5 ajustadas a biomassa seca (kg) do compartimento Folha.