

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E AMBIENTAIS

**SELETIVIDADE AMBIENTAL DE CASTANHEIRAS (*Bertholletia excelsa* Bonpl.)
NO ESTADO DO AMAZONAS**

LUCIANA JEFERSON DE MORAES

MANAUS - AM
2021

LUCIANA JEFERSON DE MORAES

**SELETIVIDADE AMBIENTAL DE CASTANHEIRAS (*Bertholletia excelsa* Bonpl.)
NO ESTADO DO AMAZONAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPGCIFA), da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

ORIENTADOR: Dr. Santiago Linorio Ferreyra Ramos, UFAM
COORIENTADOR: Dr. Gerson Rodrigues, UFV
COORIENTADORA: Dra. Kátia Emídio da Silva, EMBRAPA

MANAUS - AM
2021

Ficha catalográfica

(Catalogação gerada automaticamente pelo sistema de bibliotecas da UFAM)

M827s Moraes, Luciana Jeferson de
Seletividade ambiental de castanheiras (*Bertholletia excelsa*
Bonpl.) no estado do Amazonas / Luciana Jeferson de Moraes .
2021
71 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Santiago Linorio Ferreyra Ramos
Coorientador: Gerson Rodrigues
Coorientadora: Kátia Emídio da Silva
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Castanheira-da-amazônia. 2. Solo . 3. Aprendizagem de
máquina. 4. Geoestatística. 5. Atributos. I. Ramos, Santiago Linorio
Ferreyra. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais

LUCIANA JEFERSON DE MORAES

SELETIVIDADE AMBIENTAL DE CASTANHEIRAS (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) NO ESTADO DO AMAZONAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais, área de concentração em Ciências Florestais e Ambientais.

Aprovada em 23 de agosto de 2021.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Santiago Linório Ferreyra Ramos
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Cosme de Oliveira Ramos
Embrapa Amazônia Oriental

Prof. Dr. Marcelino Carneiro Guedes
Embrapa Amapá



Documento assinado eletronicamente por **Santiago Linório Ferreyra Ramos, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2021, às 11:19, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raimundo Cosme de Oliveira Junior, Usuário Externo**, em 23/08/2021, às 16:41, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelino Carneiro Guedes, Usuário Externo**, em 03/09/2021, às 19:11, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0658843** e o código CRC **E8AE6A3C**.

Av. General Rodrigo Octávio, 6200 - Bairro Coroado I Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Sul, Bloco FCA/ICB (Pós-Graduação), 2º andar
- Telefone: (92) (92) 99128-6254

CEP 69080-900 Manaus/AM - ppgcifa@ufam.edu.br

03/09/2021

SEI/UFAM - 0658843 - Declaração

Referência: Processo nº 23105.027657/2021-84

SEI nº 0658843

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e por sempre estar comigo em todos os momentos bons e difíceis.

Aos meus pais Zely Jefferson de Moraes e Raimundo Parente de Moraes por sempre me incentivarem e encorajar perante as dificuldades.

Ao meu marido Luiz Rocha Maciel e minha filha Layra Laís por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos, pelo amor, apoio, incentivo, compreensão e sacrifícios nesta caminhada.

Ao meu orientador Dr. Santiago Ramos pela oportunidade, pelas orientações, pelos ensinamentos e disponibilidade.

A minha coorientadora Dra Kátia Emídio por viabilizar o presente estudo, pela oportunidade dada, por todas as orientações prestadas, paciência disponibilizada e por ter me acolhido nos momentos em que precisei. Pela confiança e dedicação.

A Universidade Federal de Viçosa, na pessoa do meu coorientador Dr. Gerson Rodrigues e do Amigo M.Sc Jandresson Pires, pelos ensinamentos e pelas orientações, tempo dedicado, apoio fundamental.

À Embrapa Amazônia Ocidental, por disponibilizar suas instalações, laboratórios, equipamentos, veículos e equipe técnica para a realização desse trabalho.

Aos moradores da Comunidade do Lago das Pedras e à Resex do Rio Unini em Barcelos e à Comunidade Jatuarana em Manicoré e à Propriedade Jutica em Tefé, pelo consentimento para a realização do estudo.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Ao coordenador do programa, Dr. Manuel de Jesus Lima, aos professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais - PPGCIFA.

A todos os meus queridos colegas de curso, pela convivência e conhecimentos compartilhados. De maneira especial, Amanda Soledade pelos momentos divertidos e pelas trocas de conhecimentos durante o curso.

Meu muito obrigada!

RESUMO

O estudo teve o objetivo de analisar a relação entre os atributos físicos e químicos do solo de castanhais nativos no Amazonas, afim de contribuir para ampliação do conhecimento sobre os ambientes naturais de ocorrência de castanheiras. As amostras de solo foram coletadas na Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM e Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM. Em cada área do experimento foram coletas amostras de solo na camada superficial de 0-20 cm de uma parcela permanente (300 x 300 m), obedecendo as distâncias de 50 m entre linhas e 30 m entre pontos, totalizando 60 amostras. Em cada uma das parcelas das áreas em estudo também foi realizado inventário de todas as castanheiras com DAP ≥ 10 cm. Os dados de solo foram avaliados por estatística descritiva, seguido pela análise Geoestatística, utilizando a Krigagem ordinária para análise dos dados da Comunidade Lago das Pedras e Propriedade do Jutica e interpolação por IDW para análise dos dados da Comunidade Jatuarana; no estudo univariado do DAP foi utilizado por meio da Krigagem Indicativa um fatiamento do DAP ≥ 50 cm e DAP < 50 cm para os dados da Comunidade Lago das Pedras e Propriedade do Jutica e para os dados de DAP da Comunidade Jatuarana, seguimos o critério de fatiamento dos dados utilizando a mediana com DAP $< 145,4$ e DAP $\geq 145,4$. Posteriormente foi realizado o processo multivariado de regressão espacial empregando a Aprendizagem de máquina, através do Algoritmo *Random Forest* (RF) para as predições espaciais. Os resultados apontaram que a maioria dos atributos estudados apresentam moderado grau de heterogeneidade. A predição RF gerou mapas de probabilidade de ocorrências de castanheiras que contribui para caracterizar e compreender a distribuição espacial das castanheiras com DAP ≥ 50 cm e DAP < 50 cm nas áreas. O modelo RF indicou os principais atributos do solo nas regiões em estudos, gerando mapas das variáveis mais importantes nas áreas, onde segundo o modelo criado RF os atributos mais relevantes nas três regiões são a areia total e o sódio.

Palavras-chave: castanheira-da-amazônia, solo, aprendizagem de máquina.

ABSTRAT

The study aimed to analyze the relationship between physical and chemical soil attributes of native Brazil nut trees in Amazonas, in order to contribute to the expansion of knowledge about the natural environments in which Brazil nut trees occur. Soil samples were collected at Lago das Pedras Community – Barcelos/AM, Jutica Property – Tefé/AM and Jatuarana Community – Manicoré/AM. In each area of the experiment, soil samples were collected in the 0-20 cm surface layer of a permanent plot (300 x 300 m), obeying the distances of 50 m between lines and 30 m between points, totaling 60 samples. In each of the plots of the areas under study, an inventory of all Brazil nut trees with DBH \geq 10 cm was also carried out. Soil data were evaluated by descriptive statistics, followed by Geostatistical analysis, using ordinary Kriging to analyze the data from the Lago das Pedras Community and Jutica Property and interpolation by IDW to analyze the data from the Jatuarana Community; in the univariate study of the DAP, a slicing DAP \geq 50cm and DAP $<$ 50cm was used by means of Indicative Kriging for the data from the Lago das Pedras Community and Jutica Property and for the DAP data from the Jatuarana Community, we followed the slicing criterion of the data using the median with DBH $<$ 145.4 and DBH \geq 145.4. Subsequently, the multivariate process of spatial regression was carried out using Machine Learning, through the Random Forest (RF) Algorithm for spatial predictions. The results showed that most of the attributes studied have a moderate degree of heterogeneity. The RF prediction generated maps of probability of occurrence of Brazil nut trees that contribute to characterize and understand the spatial distribution of Brazil nut trees with DBH \geq 50cm and DBH $<$ 50 cm in the areas. The RF model indicated the main attributes of the soil in the regions under study, generating maps of the most important variables in the areas, where, according to the RF model created, the most relevant attributes in the three regions are total sand and sodium.

Keywords: brazil nut, soil, machine learning.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis físicas: Argila, silte, areia total, densidade do solo, VTP, microporosidade, macroporosidade, na profundidade de 0-20 cm do solo da Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM e Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM.....38

Tabela 2. Estatística descritiva para as variáveis químicas: pH, Matéria Orgânica (MO), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Sódio (Na), Magnésio (Mg), Hidrogênio + Alumínio (H+Al), Percentagem de Saturação de Alumínio (m%), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cobre (Cu), na profundidade de 0-20 cm do solo da Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM e Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM.....40

Tabela 3. Resultados da Análise Geoestatística para os principais atributos físicos e químicos de solo e do Diâmetro à Altura do Peito (DAP) da Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM.....42

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Parâmetros do Variograma..... | 24 |
| Figura 2. Mapa de localização das áreas de estudo: Castanhal I – Comunidade Lago da Pedras em Barcelos/AM; Castanhal II – Comunidade Jatuarana em Manicoré/AM; Castanhal III – Propriedade do Jutica em Tefé/AM..... | 29 |
| Figura 3. Amostragem Sistemática das coletas de solo..... | 32 |
| Figura 4. Coleta da amostra de solo com auxílio do trado..... | 33 |
| Figura 5. Exemplo de uma Árvore de Decisão que complementa uma Floresta Aleatória (<i>Random Forest</i>)..... | 36 |
| Figura 6. Mapa de probabilidade de ocorrência de $DAP < 50$ cm e $DAP \geq 50$ cm nos dados de Lago das Pedras - Barcelos/AM, gerado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - <i>Random Forest</i> | 44 |
| Figura 7. Mapa de probabilidade de ocorrência de $DAP < 50$ cm e $DAP \geq 50$ cm nos dados do Jutica - Tefé/AM, gerado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - <i>Random Forest</i> | 46 |
| Figura 8. Mapa de probabilidade de ocorrência de $DAP < 145,4$ e $DAP \geq 145,4$ nos dados de Jatuarana - Manicoré/AM, gerado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - <i>Random Forest</i> | 47 |
| Figuras 9 (a, b, c, d, e, f). Mapas das variáveis mais importantes para os dados de Lago das Pedras – Barcelos/ AM, indicado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - <i>Random Forest</i> junto com DAP..... | 49 |
| Figuras 10 (a, b, c, d, e, f). Mapas das variáveis mais importantes para os dados do Jutica – Tefé/ AM, indicado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - <i>Random Forest</i> junto com DAP. | 51 |
| Figuras 11 (a, b, c, d, e, f). Mapas das variáveis mais importantes para os dados de Jatuarana-Manicoré/AM., indicados pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina – <i>Random Forest</i> junto com DAP (mediana). | 52 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DAP – Diâmetro à altura do peito

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FBR – Funções de Base Radial

GPS – Global Position System

IA – Inteligência Artificial

IDW – Inverse Distance Weighting

PFNMs – Produtos Florestais Não Madeireiros

RF – *Random Forest*

MSE – Mean Squared Error

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. HIPÓTESES | 14 |
| 3. OBJETIVO GERAL | 15 |
| 3.1 Objetivos Específicos | 15 |
| 4. REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 4.1 Produto Florestal não Madeireiro: castanheira-da-amazônia (<i>Bertholletia excelsa</i> , Bonp.) | 16 |
| 4.2 Solos | 18 |
| 4.3 Geoestatística | 22 |
| 4.4 Métodos de interpolação determinístico..... | 26 |
| 4.5 Machine Learning: <i>Random Forest</i> | 26 |
| 5. MATERIAL E MÉTODOS | 28 |
| 5.1 Caracterização das áreas de estudo | 28 |
| 5.1.1 Castanhal da Comunidade Lago das Pedras em Barcelos/AM | 29 |
| 5.1.2 Castanhal da Propriedade do Jutica – Tefé/AM..... | 30 |
| 5.1.3 Castanhal da Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM | 30 |
| 5.2 Coleta e análise das amostras de solo e medições do DAP..... | 31 |
| 5.2.1 Análise dos dados..... | 34 |
| 5.2.1.1 Variáveis de solos..... | 34 |
| 5.2.1.2 Ocorrência das castanheiras | 35 |
| 5.2.1.3 Machine Learning – <i>Random Forest</i> | 36 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 6.1 Análise descritiva das variáveis de solo | 37 |
| 6.2 Análise Geoestatística | 42 |
| 6.3 Predição realizada pelo <i>Random Forest</i> | 43 |
| 7. CONCLUSÃO | 53 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |
| 9. APÊNDICES | 66 |

1. INTRODUÇÃO

A utilização da floresta tropical de forma sustentável tem sido abordada como alternativas de suma importância para a conservação dos ambientes naturais na Amazônia (WADT et al., 2017). O uso sustentável dos Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNMs) vem sendo preconizado como fundamentais para a manutenção dessas florestas, constituindo fonte de renda e alimentação para sobrevivência de inúmeras famílias (SFB, 2014).

Entre os produtos florestais não madeireiros, temos as amêndoas da castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*, Bonp.), também conhecida como castanha-do-brasil, castanha-da-amazônia e castanha-do-pará (WADT E KAINER, 2009), representando um dos principais produtos florestais extrativistas da região amazônica de relevante interesse, sendo um dos produtos mais apreciados e com alto teor nutricional (TONINI E BALDONI, 2019; WADT et al., 2005). A castanha é valorizada no mercado nacional e internacional (PACHECO E SCUSSEL, 2007).

A castanheira-da-amazônia é classificada como a única espécie do gênero *Bertholletia*, pertencente à família *Lecythidaceae* (MORI e PRANCE, 1990). Denominada como uma árvore símbolo da Amazônia, representante das florestas tropicais, não somente pelo seu grande porte e exuberância, mas devido a sua importância social, econômica e como uma espécie florestal fundamental para a conservação das florestas (WADT e KAINER, 2009; WADT et al., 2019). Encontrada em florestas de terras firmes de matas altas e em determinados ambientes, formam os chamados castanhais, ocorrendo associada a outras espécies florestais pertencentes ao mesmo ambiente (BRASIL, 2017).

As populações de castanhais nativos ocorrem em solos argilosos ou argilo-arenosos (MÜLLER et al., 1995). Encontra-se também em solos de baixa fertilidade, bem estruturados e drenados, não sendo presente em áreas com drenagem deficiente nem em solos excessivamente compactados (SPERA et al., 2019).

Os solos exercem uma função de dependência com as florestas, pois disponibilizam substrato para as plantas garantirem a fixação e os nutrientes necessários para seu crescimento, e a vegetação garante para o solo a qualidade nutricional, físicas e biológica (HIGUCHI e HIGUCHI, 2012). Porém, uma floresta exuberante nem sempre representa um solo de alta fertilidade, como acontece na floresta amazônica, que em sua maioria, apresenta solos naturalmente ácidos, de baixos níveis de fertilidade (WADT et al., 2017).

As informações sobre o solo e a comunidade florestal auxiliam no desenvolvimento e aperfeiçoamento das medidas de preservação, conservação, técnicas silviculturais e de manejo, visando suas atividades operacionais e sustentáveis. No entanto, muitos desses estudos são realizados sem considerar a dependência espacial que existe para as variáveis de um ecossistema, ou ainda, sem se preocupar com a sua representação no espaço (AMARAL, 2010). A necessidade de novas pesquisas é mais latente quando se pondera que os atributos edáficos apresentam variação espacial em poucos metros, o que gera a necessidade de usar técnicas mais modernas nas abordagens (GUERREIRO, 2017).

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) representa uma das espécies florestais da Amazônia de grande relevância para a região. No entanto, ainda há muito a esclarecer a respeito da ocorrência de castanhais nativos no Estado do Amazonas e sua relação com as variáveis ambientais, em especial atributos de solo. Desta forma, é essencial compreender como as castanheiras nativas da região se distribuem em relação à seletividade ambiental das características edáficas, pois os atributos do solo, associados a outros fatores, podem influenciar a ocorrência e estrutura geral dos castanhais nativos. Através dessas informações, será possível conhecer as propriedades físicas desses solos e as faixas de valores de nutrientes desses ambientes de castanhais, para assim propor melhorias em sua estrutura que auxiliará nas práticas futuras de manejo da castanheira, dando subsídios a alternativas de conservação desses ambientes e/ou ampliação da produtividade destas áreas, além de servir de base para futuros programas de recuperação/reflorestamento de áreas alteradas.

2. HIPÓTESES

As principais hipóteses para o desenvolvimento da presente pesquisa são:

os atributos físicos e químicos dos solos variam espacialmente nos castanhais estudados;

os atributos físicos e químicos dos solos explicam a ocorrência de castanheiras nas diversas regiões produtoras de castanha do Estado do Amazonas.

3. OBJETIVO GERAL

Analisar a relação entre os atributos físicos e químicos do solo de castanhais nativos no Amazonas, afim de contribuir para ampliação do conhecimento sobre os ambientes naturais de ocorrência de castanheiras no Amazonas.

3.1 Objetivos Específicos

- a) Descrever os atributos físicos e químicos do solo das regiões de estudo.
- b) Avaliar a aplicabilidade do uso de métodos de análise espacial, no contexto da estrutura de distribuição espacial de indivíduos de castanheiras no Amazonas.
- c) Analisar as relações específicas entre atributos de solos e distribuição espacial de indivíduos de castanheiras.
- d) Identificar as variáveis do solo mais associadas à ocorrência de castanheiras.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Produto Florestal não Madeireiro: castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*, Bonp.)

Os Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNMs) e seus usos sustentáveis trazem benefícios às comunidades extrativistas da região Amazônica e aos consumidores em geral, além de ser uma alternativa de grande relevância para a manutenção da floresta (WADT et al., 2017). De acordo com Machado (2008), os PFMNs são produtos da floresta que não sejam madeira, entre eles: folhas, frutos, sementes, palmitos, raízes, óleos essenciais, látex, cipós, entre outros produtos de grande importância para muitas famílias que vivem nas florestas ou em seu entorno. São bastante utilizados na alimentação, produção de medicamentos, uso em cosméticos, construção de moradias, tecnologias tradicionais, produção de utensílios e em inúmeros outros usos (PEDROSO E PEREIRA, 2018).

A castanheira-da-amazônia apresenta relevante destaque na comercialização de suas amêndoas para fins alimentícios (SFB, 2014). Popularmente é conhecida como castanha-do-pará ou castanha-da-brasil, e internacionalmente conhecida como brazil nut (BRASIL, 2017).

A *Bertholletia excelsa* Bonpl. da família Lecythidaceae, representa a única espécie existente do gênero *Bertholletia* (MORI E PRANCE, 1990). É uma árvore de grande porte, chegando a 50 metros de altura e 2 metros de diâmetro (WADT et al., 2005). Está presente em praticamente toda a região amazônica e em países de fronteira, principalmente no Brasil, Bolívia e Peru (PINTO et al., 2010). É encontrada no Brasil, na maioria dos estados da Amazônia Legal, onde os maiores produtores de castanhas são os estados do Amazonas (12.182 ton.), Acre (7.297 ton.), Pará (6.977 ton.), Mato Grosso (2.226 ton.), Roraima (1.940 ton.) e Rondônia (1.878 ton.) (IBGE, 2019). A grande maioria (cerca de 90%) da produção é proveniente de florestas naturais (WADT, 2014). A espécie desenvolve-se bem em regiões de clima quente e úmido, com maiores concentrações em regiões climáticas tropicais chuvosas com a ocorrência de período seco, além das populações de castanhais nativos ocorrerem em solos argilosos ou argilo-arenosos (MÜLLER et al., 1995).

É considerada uma espécie semidecídua e heliófita, com preferência a ambientes de terra firme (FONSECA et al., 2019). É reconhecida como uma planta social, ocorrendo com grande frequência em determinadas áreas junto a outras espécies de grande porte, formando os castanhais (MAPA, 2014). A castanheira-da-amazônia ocorre geralmente em densidade de 1 a 5 árvores/hectare; porém, no geral em média, encontra-se 1 árvore em idade reprodutiva/ha

(WADT et al., 2005). Tonini e Baldoni (2019) notaram que a densidade das castanheiras (DAP \geq 10cm) em Roraima e Mato Grosso varia entre 6 a 15 indivíduos/ha. Já na FLONA de Caxiuanã, no Pará, a densidade média de castanheiras com DAP \geq 10 cm é muito alta, com 25 indivíduos/ha (SOUSA et al., 2014).

A sua floração ocorre entre o final da estação seca e durante toda a estação chuvosa, ou seja, entre os meses de outubro a janeiro, levando entre 12 a 15 meses até se transformar em ouriço, sendo variável de região para região. Na Amazônia brasileira o pico de queda dos frutos ocorre nos meses de dezembro a fevereiro (MAPA, 2014). Segundo Pinto et al. (2010), no Amazonas, o período de safra da castanheira-da-amazônia varia de dezembro a abril.

A produção de frutos varia devido inúmeros fatores, entre eles estão: o ano, a região, o DAP (diâmetro à altura padrão), condições climáticas, característica genética da árvore e entre outros (WADT et al., 2005). De acordo com Zuidema e Boot (2002), as castanheiras em florestas maduras não produzem frutos antes de 30 a 40cm de diâmetro. Uma castanheira nova (DAP de 50 a 100 cm) produz de 20-40 frutos por ano, enquanto aquelas em plena fase produtiva (DAP de 100 a 150 cm) produzem em média 100-200 frutos; já as com DAP maior que 150cm apresentaram uma queda no número de frutos (WADT et al., 2005). Na floresta do Amapá, a maior produção total de frutos está concentrada nas classes diamétricas de 73,6 a 185,4cm de diâmetro e a partir de 186cm de DAP, há uma drástica redução na produção (GUEDES et al., 2014).

O fruto da castanheira (ouriço) é uma cápsula indeiscente de mais ou menos 15cm de diâmetro. Ele pesa de 200 g a 1,5 kg, contendo de 15 a 25 castanhas com casca bastante dura e rugosa, forma triangular e comprimento de 4 - 7cm (MÜLLER et al., 1995).

A exploração da madeira da castanheira passou a ser proibida pelo Governo Federal através do Decreto 1.282/1994 (PINTO et al., 2010). Em 2006, foi revogado pelo Decreto 5.975 (Art. 29), mantendo a proibição da exploração para fins madeireiros da castanheira (*Bertholletia excelsa*) em florestas naturais, primitivas ou regeneradas; já as árvores provenientes de cultivo de reflorestamento, previamente cadastrado no órgão ambiental competente, são passíveis de corte para fins madeireiros (Lei 12.651/ 2012), e sua exploração deve ser declarada para o controle de origem (MAPA, 2014). Hoje, a espécie consta também na Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção, na categoria vulnerável, sendo de extrema importância o uso de boas práticas de extrativismo sustentável para conservar castanheiras nativas produtivas nas áreas de ocorrência (BRASIL, 2017).

A espécie possui múltiplos usos, atendendo os critérios do manejo florestal não madeireiro, gerando vários produtos e subprodutos (PINTO et al., 2010). Suas castanhas podem ser consumidas in natura ou beneficiada, a qual também fornece um óleo de alta qualidade, usado na culinária e na indústria de cosméticos. Seus ouriços são utilizados para produção de utensílios artesanais e como combustíveis, especialmente no processo de defumação da borracha (MAPA, 2014).

A castanheira é apontada como uma árvore importante para a estrutura e funcionamento do ecossistema amazônico, apresentando interações com diferentes tipos de animais, como as cutias (*Dasyprocta* spp.), que se alimentam das amêndoas, as quais são responsáveis por grande parte da dispersão de sementes, e ainda tem hábito de enterrar as sementes, favorecendo a regeneração natural das populações de castanheira (WADT et al., 2005). Já os principais agentes polinizadores são as abelhas robustas (dos gêneros *Xilocopa* e *Bombus*) (WADT e KAINER, 2009). Além dos animais, o ser humano atua como agente, tanto de predação, quanto da dispersão de frutos e sementes pela floresta (BRASIL, 2017).

O manejo dos castanhais nativos tem representado uma estratégia eficaz para conservação das florestas, além da importância social e econômica (FONSECA et al., 2018). O extrativismo da espécie no Acre tem demonstrado que com uma gestão organizada, é possível conciliar conservação da floresta, inclusão social e geração de renda, tornando a cadeia de valor da castanha-da-amazônia um exemplo a ser seguido (ROCHA E LIMA, 2017).

De acordo com Costa et al. (2009), a castanheira é promissora para a formação de sistemas agroflorestais e uma integrante considerável para a reabilitação de áreas abandonadas e degradadas na região da Amazônia. Herraiz (2016) informa que as florestas abertas com maior luminosidade promovem melhores condições para regeneração. A espécie plantada em áreas degradadas pela mineração, através de reflorestamentos heterogêneos, tem sua adaptabilidade comprovada e rápido crescimento (SALOMÃO et al., 2006).

4.2 Solos

Vários fatores influenciam o crescimento, desenvolvimento e produção das plantas, dentre eles: atributos do solo, característica genética do vegetal, idade, sistemas de manejo da espécie, fatores climáticos, características do terreno, entre outros (NOVAIS et al., 2007). Quando a intenção é o manejo racional e produtividade sustentável das florestas, o solo se torna

essencial para essas atividades; já a floresta desempenha uma função importante na qualidade nutricional e física de um solo (WOJCIECHOWSKI et al., 2009).

A floresta e o solo estão interligados, pois as plantas dependem de substrato para a sua sobrevivência e o solo também tem ligação com a vegetação, dependendo delas para garantir a qualidade de seus atributos físicos, químicas e biológicas. (HIGUCHI e HIGUCHI, 2012). Além disso, as alterações na vegetação afetam as propriedades do solo, assim como os impactos no solo provocam efeitos negativos no desenvolvimento da vegetação (MELO, 2004).

O solo é constituído de minerais originados a partir da desintegração das rochas, de partículas orgânicas formadas por restos de seres vivos, da água que dissolve e transporta os nutrientes do solo e do ar que ocupa os espaços entre as partículas, permitindo a respiração dos microrganismos e das raízes das plantas (OLIVEIRA, 2010).

Para ser considerado fértil, o solo deve apresentar boas propriedades físicas e fornecer às plantas os nutrientes necessários e com quantidades adequadas (MELLO et al., 1989). Já para Alfaia et al. (2018), o solo saudável dependerá de seus macros e micronutrientes disponíveis, da porosidade (ar) para conseguir reter boa parte da água, possuindo uma boa umidade e apresentar uma acidez do solo equilibrada (pH), contribuindo, assim, para a sua fertilidade. A análise de solos, de acordo com Cardoso et al. (2009), é importante para o pleno atendimento das exigências das plantas, visando o alcance do sucesso da produção.

As propriedades físicas dos solos possibilitam condições para que os processos de intensidade química e biológica possam acontecer (SILVA, CHAVES E LIMA, 2009). Com isso, o conhecimento dos atributos textura, densidade, porosidade, entre outros, podem contribuir na definição de melhores estratégias para o manejo sustentável do solo (SCHAFFRATH et al., 2008).

A porosidade do solo refere-se aos espaços vazios existentes no solo variando suas dimensões (macro e microporos), os macroporos são os de maiores diâmetros, responsáveis pelo fluxo de água em maior quantidade, onde o ar se move livremente, e os microporos, designando a função de armazenamento com baixa permeabilidade, pois a água flui mais lentamente (RAIJ, 1981).

Os atributos químicos do solo correspondem à disponibilidade de nutrientes que os vegetais necessitam, os chamados de macronutrientes que são absorvidos pelas plantas em maiores quantidades, tornando deficientes no solo antes dos demais e de micronutrientes que

são geralmente menos deficientes no solo, pois são usados em quantidades menores, porém ambos de grande importância para as plantas (ALFAIA et al., 2018).

Os macronutrientes primários: Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), e os macronutrientes secundários: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) fazem parte de moléculas essenciais, além de possuírem função estrutural nas plantas; já os micronutrientes, como: Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo) e o Zinco (Zn) são necessários em menor quantidade pelos vegetais e formam as enzimas (DIAS, 2012). Porém, as plantas precisam ainda de elementos não minerais que são fornecidos pelo ar e pela água como o Carbono (C), o Oxigênio (O) e o Hidrogênio (H) (POTAFOS, 1998).

O Nitrogênio (N) é um dos principais nutrientes que a planta absorve em maiores quantidades, indispensáveis para seu crescimento e produção, sendo crucial para a formação das proteínas (OLIVEIRA, 2010). Sua disponibilidade no solo limita a produtividade das plantas na maioria dos ecossistemas naturais, e sua deficiência rapidamente inibe o crescimento vegetal, além de a maioria das espécies apresentar clorose (folhas amareladas), sobretudo nas folhas mais velhas, próximas à base da planta (LINCOLN et al., 2017). Em solos tropicais, o N está relacionado, principalmente, aos componentes da matéria orgânica, correspondendo a cerca de 95% do total existente (TEIXEIRA et al., 2017). Segundo Mello et al. (1989), o N se perde do solo através dos processos: remoção pelas colheitas; lixiviação; erosão e volatilização.

O fósforo (P) é essencial para o crescimento das plantas (POTAFOS, 1998) auxiliando ciclo normal de produção do vegetal, contribuindo assim para a formação das sementes, desenvolvimento das raízes, formação e maturação dos frutos (OLIVEIRA, 2010). De acordo com Raij (1981), esse elemento apresenta pouca movimentação no solo, sendo poucas perdas por lixiviação.

Já o potássio (K) é importante para formação dos ramos e produção de frutos, assim, para aumentar os teores de K no solo visando a produção de algumas espécies, utiliza-se o uso da casca de frutos triturada e cinzas como adubo orgânico (ALFAIA et al., 2018), além de ser essencial na proteção de doença em plantas (OLIVEIRA, 2010).

O Cálcio (Ca) estimula o crescimento das raízes e folhas, e facilita na absorção de outros nutrientes, apresentando valores de pH baixos, além de que em solos argilosos, geralmente contêm mais cálcio do que os solos arenosos (POTAFOS, 1998). Os sintomas característicos da sua deficiência incluem a necrose de regiões meristemáticas jovens, sendo que nas folhas

jovens, também podem mostrar-se deformadas, e no sistema de raízes de uma planta deficiente, pode ser acastanhado, curto e muito ramificado (LINCOLN, 2017).

O Magnésio (Mg), na maioria dos solos, apresenta quantidades adequadas o suficiente para suportar o crescimento das plantas, ocorrendo deficiências, principalmente, nos solos arenosos e ácidos das regiões úmidas, além disso, altas quantidades de Ca e Mg contidas nas partes das plantas podem ser reincorporadas ao solo com os retornos dos restos culturais como cobertura morta. Assim como quantias consideráveis de Enxofre (S) são retiradas na matéria orgânica do solo, que representa uma importante fonte na maioria dos solos (ALFAIA et al., 2018).

Os micronutrientes incluem o Zinco (Zn), Cobre (Cu), Boro (B), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Molibdênio (Mo) e Cloro (Cl), considerados tão importantes para as plantas quanto os macros, suas deficiências, embora sejam bem mais raras, podem ter efeitos extremos sobre a produtividades (MALAVOLTA, 1980), apresentando-se com baixa mobilidade no solo (RAIJ, 1981).

A acidez é um dos fatores que restringe o uso dos solos na Amazônia, considerados ácidos, com baixos teores de Ca, Mg e K e altos teores de Al e H, comprometendo o desenvolvimento das raízes, diminuindo a capacidade das plantas para absorver água e nutrientes do solo e inibindo o desenvolvimento de microrganismo responsável pela decomposição da matéria orgânica e pela liberação de nitrogênio, fosforo e enxofre, (ALFAIA et al., 2018). Segundo Potafos (1998), o pH igual a 7 é neutro e valores abaixo são considerados ácidos, e acima são básicos. A faixa de pH que a maioria dos nutrientes se encontram disponíveis para as plantas na solução solo está por volta de 5,5 e 6,5 (MALAVOLTA, 1980).

A amostragem georreferenciada de solo é uma das ferramentas mais tradicionais utilizadas para caracterizar a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo (CHERUBIN et al., 2015). Segundo Mendes et al. (2018), a caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo depende de grades amostrais representativas e da escolha do melhor método para análise dos dados, que é o ponto chave para maior exatidão dos mapas de atributos a serem gerados.

Costa et al. (2017), estudando a relação dos atributos de solos de Roraima com a produção de castanha, observaram que a espécie é exigente em cálcio, afirmando a importância de técnicas de manejo visando a reposição do nutriente, e também notou que as árvores mais produtivas removem mais bases trocáveis, contribuindo para a acidificação e empobrecimento

do solo, exigindo cuidados no manejo tanto de castanhais naturais, onde se faz o extrativismo, como em castanhais plantados.

Moraes et al. (2017) notaram que a variação de carbono e nitrogênio entre os períodos sazonais é explicada pelo processo de decomposição que ocorre no período chuvoso, mas que é acumulado no período seco, o que justifica a maior concentração de nutrientes no período seco. Não havendo variação de pH entre os períodos.

Moreira e Fageira (2009) observaram que os atributos químicos P, K, Ca, Mg, Al e H + Al foram altamente variáveis nos solos do Amazonas, indicando que o solo da Amazônia brasileira precisa de calagem e nutrientes essenciais, como P, K, Ca e Mg para maximizar o rendimento das culturas.

Locatelli et al. (2003) notaram que a *Bertholletia excelsa* apresenta bom desenvolvimento em solos com pH ácido, baixos valores de saturação de bases, solo distrófico, baixa capacidade de troca de cátions e altos valores de saturação de alumínio e de compactação. Já Ivanov et al. (2018) informam que as árvores que crescem em solos rasos de textura argilosa produzem menos sementes quando comparadas a árvores que crescem em solos profundos de textura franco-argilosa e argilo-arenosa.

Spera et al. (2019) observaram que os solos das áreas de ocorrência de castanheira-da-amazônia em Mato Grosso são ácidos, de textura variando de arenosa a muito argilosa, de baixa fertilidade natural e, às vezes, com elevado teor de alumínio, indicando que o crescimento e desenvolvimento da espécie não são afetados por estes atributos químicos.

4.3 Geoestatística

O princípio da Geoestatística surgiu na década de 60, por meio de trabalhos com dados de concentração de ouro no ramo da engenharia de minas, localizado na África do Sul, em que Daniel G. Krige observou ganhos na precisão das estimativas com dados de concentração do mineral quando considerou as amostras vizinhas (KRIGE, 1951). Posteriormente, através desta metodologia, Matheron (1965) solucionou problemas de estimativa a partir da teoria das variáveis regionalizadas.

Diferentemente da estatística tradicional, a Geoestatística visa solucionar problemas referentes às variáveis regionalizadas, reconhecidas como variáveis que se caracterizam não apenas pelos valores apresentados, mas também pela sua posição no espaço (BERNARD et al., 2015), apresentando um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas (LANDIM, 2003).

A metodologia avalia a dependência espacial das amostras e utiliza a interpolação para estimar valores em locais não medidos, produzindo informações para construir mapas contínuos a partir da amostragem discreta (GREGO, OLIVEIRA E VIEIRA, 2014).

O método geoestatístico reúne inúmeras técnicas necessárias para entender a aleatoriedade dos dados, os quais apresentam, porém, uma possível estruturação espacial, estabelecendo, desse modo, uma função de correlação espacial (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

Existem duas ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos relacionados ao estudo do comportamento das variáveis regionalizadas: o semivariograma (criação de variogramas para a descrição e modelagem de padrões espaciais) e a krigagem (para obtenção de valores não amostrados) (LANDIM, 2003; ANDRIOTTI, 2002).

Segundo Oliveira, Grego e Brandão (2015), o variograma é a representação gráfica da dependência espacial obtida pela variância *versus* a distância. Para Landim (2003), isso demonstra o grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico e, para sua construção, são usadas simplesmente as diferenças ao quadrado dos valores obtidos.

Seguindo a hipótese de que se existir dependência espacial, haverá um crescimento na semivariância até uma determinada distância, a partir da qual o variograma se estabiliza; caso contrário, se o variograma não apresentar nenhum crescimento com a distância, as amostras são independentes e ocorre o efeito de aleatoriedade, comumente chamado de efeito pepita puro (OLIVEIRA, GREGO E BRANDÃO, 2015).

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a dependência espacial dos dados é dada:

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

onde: $\gamma(h)$ = é a semivariância estimada;

$N(h)$ = é o número de pares de valores da variável considerada em uma determinada direção;

$[Z(x_i), Z(x_i+h)]$ = são valores da variável em dois pontos distintos, separados por uma distância preestabelecida e constante em uma direção;

h = é o intervalo de distância preestabelecida;

$\frac{1}{2}$ = é a metade da média das diferenças quadráticas.

Os modelos teóricos de semivariograma mais utilizados, segundo Guerra (1988), são; o esférico (Sph), o exponencial (Exp) e o gaussiano (Gau). Já os parâmetros de um semivariograma, de acordo com Camargo (2001), são denominados como: alcance (a), que é a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, correspondendo ao conceito da zona de influência ou de dependência espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes; o patamar (C), sendo o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a), onde deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras; o efeito Pepita (C_0), idealmente, $\gamma(\mathbf{0}) = 0$. Entretanto, na prática, à medida que \mathbf{h} tende para 0 (zero), $\gamma(\mathbf{h})$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras; e a Contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0) (LANDIM, 2003) (Figura 1).

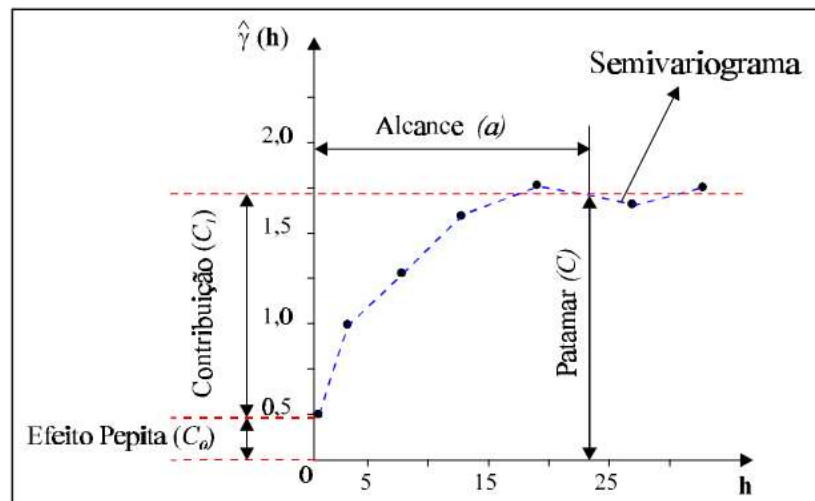


Figura 1: Parâmetros do Variograma
Fonte: (CAMARGO, 2001).

O método de interpolação geoestatístico, também chamada de krigagem, segundo Druck et al. (2004), compreende um conjunto de técnicas de estimação e de predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial. Contendo técnicas de análise de regressão que procura reduzir a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em consideração a dependência estocástica dos dados distribuídos no espaço georreferenciado (LUCAS et al., 2013).

De acordo com Landim (2006), a krigagem é considerada um método de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores próximos enquanto considerados interdependentes pelo semivariograma, em último caso, trata-se de um método de estimativa por médias móveis.

A maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras é o que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação, em que os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima (DRUCK et al., 2004).

Existem diversos tipos de krigagem (simples, ordinária, universal, indicativa), entre elas: a krigagem indicativa consiste basicamente na aplicação da krigagem ordinária para a variável transformada, ou seja, a variável resultante da aplicação da função não linear $f(z)=0$ ou 1 (BERNARD et al. 2015; LANDIM, 2003). Conhecida como um método de fácil compreensão em que as estimativas são baseadas em valores que se situem abaixo ou acima de um determinado nível de corte, que vai indicar a probabilidade de um fenômeno ocorrer ou não, em um local estudado (PAES et al., 2014; LANDIM, 2003).

O princípio da krigagem indicativa é transformar os dados originais em indicadores, transformando-os em valores que estão acima de um determinado nível de corte em 0 (zero) e os que estão abaixo em 1 (ou inverso), onde os maiores valores abaixo de nível de corte terão 100% de probabilidade de ocorrência e os maiores valores acima do nível de corte, 0% de probabilidade (LANDIM, 2003).

Guerreiro (2017) afirma que a Geoestatística permitiu o conhecimento da atual distribuição espacial dos atributos físico-químicos do solo na área estudada, a qual servirá como base de comparação para futuras avaliações no mesmo local, e também para ajudar a compreender aspectos ambientais em áreas com aglomerações de castanheiras-da-amazônia. Para Wojciechowski et al. (2009), essa ferramenta é valiosa para entender a variabilidade espacial dos elementos, informando indicadores fundamentais para o manejo do solo e dos demais recursos naturais presentes no ambiente.

Analisando a variabilidade espacial de atributos físicos de solo sob castanhal nativo da FLONA do Tapajós, Guerreiro et al. (2017), notaram que as variáveis que melhor apresentaram relação espacial com a distribuição das castanheiras foram o silte, a argila, a macroporosidade, o pH, o fósforo, o zinco e o cobre. Já Cavalcante et al. (2017), estudando propriedades do solo de dois castanhais nativos, observaram que no Pará os atributos que apresentaram maior

variabilidade foram o Mn, Cu e Ca, com teores de argila sofrendo menos variação, e no castanhal do Amapá, a maior heterogeneidade foi atribuída às variáveis Na, Al e Zn, com teores de areia total com menor variabilidade, com pH indicando simetria em ambos ambientes analisados.

Batista et al. (2016), observando a distribuição espacial do teor de carbono em solo sob floresta nativa com presença de castanheiras, no Amapá, verificaram que o teor de carbono presente no solo da RESEX Cajari – Amapá, apresenta estrutura de dependência na distribuição espacial. Já no ano seguinte, Batista et al. (2017), analisando na mesma área a distribuição espacial do magnésio, notaram que o teor de Mg no solo também apresenta dependência espacial (apresentam-se correlacionadas espacialmente) na floresta nativa com castanhais, variando na distribuição dos teores em partes distintas da área.

4.4 Métodos de interpolação determinístico

Métodos de interpolação são ferramentas empregadas para gerar superfícies distribuídas de uma determinada variável a partir de dados pontuais, contribuindo para compreensão espacial de atributos (RIGHI E BASSO, 2016). A interpolação espacial busca por meio de técnicas matemáticas representar em mapas, de forma espacialmente contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente (ANDRIOTTI, 2002).

Os interpoladores determinísticos são aplicados em porções da área mapeada e, sucessivamente, cobrem toda a região de interesse; na qual a retirada ou inclusão de dados irá afetar apenas os pontos a ele adjacentes e até uma determinada distância. São exemplos de interpoladores determinísticos: Inverso da Distância Ponderada, Funções de Base Radial, entre outras (LANDIM, 2003).

O Inverso da Distância Ponderada – IDW (Inverse Distance Weighting) é considerado um interpolador determinístico, conhecido como um método de interpolação mais simples, pois atribui peso maior ao ponto mais próximo, diminuindo esse peso com o aumento da distância e em função do coeficiente potência. (RIGHI E BASSO, 2016). No entanto, os métodos determinísticos não incorporam tais erros e somente fornecem estimativas, não fornecendo uma avaliação dos valores previstos (CAMARGO, 2001).

Esse método usará os valores amostrados à sua volta para predizer um valor em locais não medidos, na qual os valores das amostras próximas terão um maior peso do que os valores

mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta, dada segundo método e fórmula de Jakob e Yang (2006).

O IDW pode ser adequado para uma visualização ou interpretação preliminar da interpolação de uma superfície, porém, não é realizada uma avaliação da predição de erros (JAKOB E YANG, 2006).

O interpolador Funções Base Radial – FBR é um interpolador determinístico moderadamente rápido e exato, porém, em seu processo, não é realizada uma avaliação da predição de erros (ARAUJO et al., 2015). Este método também não permite que seja investigada a autocorrelação entre dados, sendo do mesmo modo menos flexível e mais automático que o método de krigagem (JAKOB e YANG, 2006).

O FBR apresenta um conjunto de métodos de interpolação exatos, onde a maioria dos métodos são derivações de *spline*, com características similares uns dos outros, onde cada função de base tem uma forma e resulta numa superfície de interpolação suavizada (LUCAS et al., 2013). O FBR é mais flexível que o IDW, mas exigem mais parâmetros de decisão. Este método também não permite que seja investigada a auto-correlação entre dados, sendo do mesmo modo menos flexível e mais automático que o método de krigagem (JAKOB e YANG, 2006).

4.5 Machine Learning: *Random Forest*

Recentemente, com o avanço da área da inteligência artificial, técnicas computacionais capazes de adquirir conhecimento de forma automática, denominada aprendizagem de máquina, surgiram como alternativas competitivas frente aos métodos clássicos de estatística (VIANA, 2019). O aprendizado de máquina explora o estudo e a construção de algoritmos para extrair regras e padrões a partir de entradas amostrais, a fim de fazer previsões sobre os dados (FACELI et al., 2011). Ele visa o desenvolvimento de programas de computador com a capacidade de aprender a executar uma dada tarefa com sua própria experiência, utilizando um conjunto de dados que representam experiências passadas (NORONHA, 2019).

Entre os vários algoritmos de aprendizado de máquina, o emergente algoritmo *Random Forest* (RF) descrito por Breiman (2001), foi considerado como um dos métodos de previsão mais exatos para regressão, pois pode modelar interações complexas entre variáveis de entrada, sendo robusto em relação a valores incomuns (BREIMAN, 2001).

O algoritmo RF é uma técnica não paramétrica; trata-se de uma combinação de várias árvores (preditoras) de decisão que combinam para obter uma predição com maior acurácia e mais

estável, em que cada árvore é gerada a partir de um vetor aleatório, mostrado de forma independente e com a mesma distribuição para todas as árvores na floresta (CARVALHO JUNIOR et al., 2016; BHERING et al., 2016). As subdivisões dentro de cada árvore são determinadas com base em um subconjunto de variáveis preditoras, escolhido aleatoriamente a partir do total de preditores existente. No caso de RF para regressão, o resultado final consiste da média dos resultados de todas as árvores (BREIMAN, 2001; CUTLER et al., 2007).

No emprego do RF, três parâmetros precisam ser determinados: o número de árvores na floresta (*ntree*), o número mínimo de dados em cada nó terminal (*nodesize*) e o número de variáveis utilizadas em cada árvore (*mtry*) (LIAW e WIENER, 2002).

Carvalho Junior et al. (2016) observaram que as covariáveis mais promissoras no método RF, para estimar densidade de solo de regiões tropicais montanhosas, foram carbono orgânico, areia fina e grossa, percentagem de saturação por bases e CTC total.

Na predição dos atributos do solo, Bhering et al. (2016) notaram que a abordagem RF apresenta potencial de utilização para estimar atributos do solo estudados (areia, argila e carbono orgânico).

Testando diferentes estratégias de modelagens para a identificação de habitats potenciais para ocorrência de castanheiras na Amazônia, Tourne (2018) utilizou variáveis preditivas espaciais organizadas em categorias climáticas, edáficas e geofísicas. As variáveis topográficas e do solo foram os preditores mais importantes encontrados e informou que o modelo preditivo indicou que 2.3 milhões km² (32%) da região amazônica são apropriados para o crescimento de *B.excelsa*.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização das áreas de estudo

Para a realização deste estudo foram obtidas amostras de solo de 3 regiões distintas de castanhais nativos do Estado do Amazonas: Comunidade Lago das Pedras, localizada na Reserva Extrativista do Rio Unini (município de Barcelos), Propriedade do Jutica (município de Tefé) e Comunidade Jatuarana (município de Manicoré), conforme Figura 2. Nestas localidades, as coletas das amostras de solo e o inventário florestal realizadas em uma parcela permanente de 300 m x 300 m, segundo metodologia proposta por WADT et al. (2017).

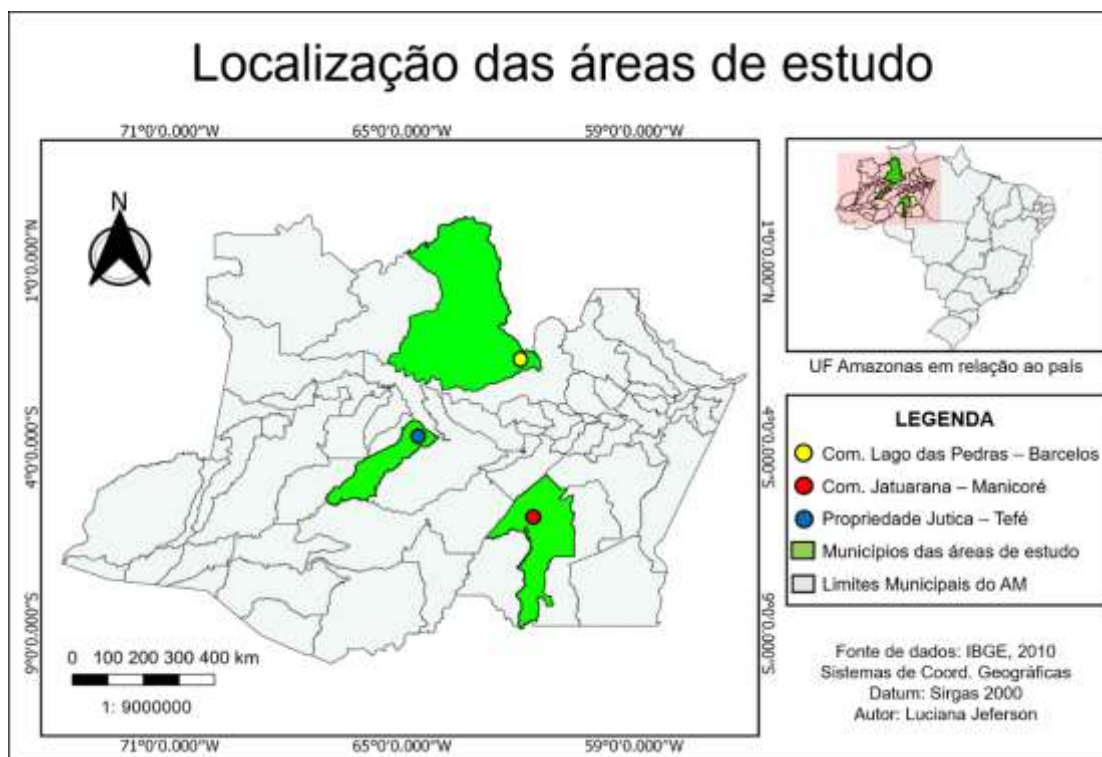


Figura 2. Mapa de localização das áreas de estudo: Castanhal da Comunidade Lago das Pedras em Barcelos/AM; Castanhal da Comunidade Jatuarana em Manicoré/AM; Castanhal da Propriedade do Jutica em Tefé/AM.

5.1.1 Castanhal da Comunidade Lago das Pedras em Barcelos/AM

O castanhal está situado na Comunidade Lago das Pedras em uma Unidade de Conservação Federal de Uso Sustentável denominada Reserva Extrativista do Rio UNINI – Barcelos/AM, entre as coordenadas $1^{\circ} 38' 34,802''$ S / $61^{\circ} 41' 27,179''$ W.

O clima da região é do tipo tropical chuvoso e úmido, apresentando maior incidência pluvial de fevereiro a julho. A bacia do rio Negro tem o clima mais chuvoso da Bacia Amazônica, com valores anuais médios de chuva entre 2.000 e 2.200 mm (ZEIDEMANN, 2001) e com temperatura máxima de $34,3^{\circ}\text{C}$, mínima de $19,3^{\circ}\text{C}$ e média de $26,3^{\circ}\text{C}$ (OLIVEIRA, 2013).

As principais tipologias vegetais predominantes na área são: florestas ombrófilas densas (53%), florestas de terra firme contato com campinarana (29%), florestas de igapó (11%), campinaranas (5%). A distribuição destes tipos de vegetação segue um gradiente que vai desde a beira dos rios e igarapés (florestas de igapó), áreas de cotas de terreno mais altas (florestas ombrófilas) e áreas mais interfluviais (campinaranas e florestas de contato terra firme/campinaranas) (MMA, 2014).

É essencialmente formado por solos de origem granítica, de textura ligeira (franco-arenosos, areno-francos, franco-limosos, etc.), e juntamente com as características físicas e as disponibilidades hídricas existentes, definem uma aptidão para a agricultura bastante elevada. (PLANO DIRETOR MUNICIPAL, 2014). Os Espodossolos é a classe de solo que perfazem mais de 7% da área do estado do Amazonas, predominando na região norte do Amazonas, principalmente no município de Barcelos, com solos predominantemente arenosos, com acúmulo de matéria orgânica e compostos de ferro e/ou alumínio em profundidade (MAIA, 2010).

5.1.2 Castanhal da Propriedade do Jutica – Tefé/AM

O castanhal pertence à Propriedade do Jutica – Tefé/AM, compreendendo as coordenadas 3° 38' 8,323" S / 64° 18' 42,648" W.

Região de clima equatorial que naturalmente apresenta condições de alta temperatura e umidade (CORTEZÃO, ALEIXO e NETO 2015). As temperaturas médias são altas anualmente e com umidade relativa do ar sempre elevadas, correspondendo os meses de maior umidade (84% a 90%) aos de maior incidência de chuvas (RADAMBRASIL, 1978).

A floresta da área da região classifica-se como Floresta Ombrófila Densa ligada aos fatores climáticos tropicais de altas temperaturas e alta precipitação bem distribuída durante o ano (VELOSO, 1992; ALVES et al., 2018).

O solo predominante na região de floresta densa da terra firme é das classes Podzólico Vermelho Amarelo Álico argila, bem drenado e na floresta densa mais plana o Podzólico Vermelho Amarelo Endoálico plítico, imperfeitamente drenado. O nível de fertilidade natural destes solos geralmente é baixo e o nível de acidez e teor de alumínio trocável são elevados (PLANO DE MANEJO DA FLORESTA NACIONAL DE TEFÉ, 2014).

5.1.3 Castanhal da Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM

O castanhal pertence à Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM, compreendendo as coordenadas 5° 44' 24,817" S / 61° 25' 57,173" W.

O clima da região segundo a classificação de Peel, Finlayson e McMahon, (2007) é do tipo tropical chuvoso úmido com uma curta estação seca (Am), com temperaturas médias anuais entre 24°C e 26°C, e umidade relativa do ar superior aos 80%. A precipitação média da região

é de 2.262 mm, com máxima de 3.449 mm e mínima de 582 mm, com chuvas concentradas no período de outubro a junho (RADAMBRASIL, 1978; SILVA et al., 2016).

As florestas ombrófilas densas de terras baixas em associação com outras fitounidades, em menor grau, são as mais representativas nos municípios de Manicoré, com aproximadamente 65,4% da vegetação natural existente (SILVA E PEREIRA, 2005).

Na região são predominantes os solos caracterizados como: Latossolos Amarelos e Latossolos Vermelho-Amarelo ácidos, onde são bem drenados, de textura média a argilosa, ocorrendo nos planaltos, somando 53 % da área total da região, onde são caracterizados por apresentarem boas propriedades físicas, porém, com restrições quanto a fertilidade natural (BRASIL, 1978). Gleissolos e Neossolos Flúvicos predominam nas planícies de inundações, com 9% dos solos do Amazonas, sendo em sua quase totalidade férteis quimicamente quando ocorrem nas margens dos rios da região. Ao longo do Rio Madeira ocorre uma faixa de Gleissolos háplicos, típicos das várzeas de rios de água barrenta (BRASIL, 1978; CAMPOS et al., 2011).

5.2 Coleta e análise das amostras de solo e medições do DAP

As amostras foram coletadas em 2016 (Lago das Pedras - Barcelos) e 2017 (Propriedade Jutica – Tefé e Comunidade Jatuarana - Manicoré), no âmbito do projeto MapCast (Mapeamento de castanhais nativos e caracterização socioambiental e econômica de sistemas de produção da castanha-do-brasil na Amazônia) financiados pela Embrapa.

Em cada área do experimento foram coletadas amostras em uma área de 9 ha (300 x 300 m), utilizando uma amostragem sistemática visando uma maior representação, onde foram adotados um grid de espaçamento regular, totalizando 60 pontos, obedecendo as distancias de 50 m entre linhas (totalizando seis linhas) e 30 m entre pontos (Figura 3).

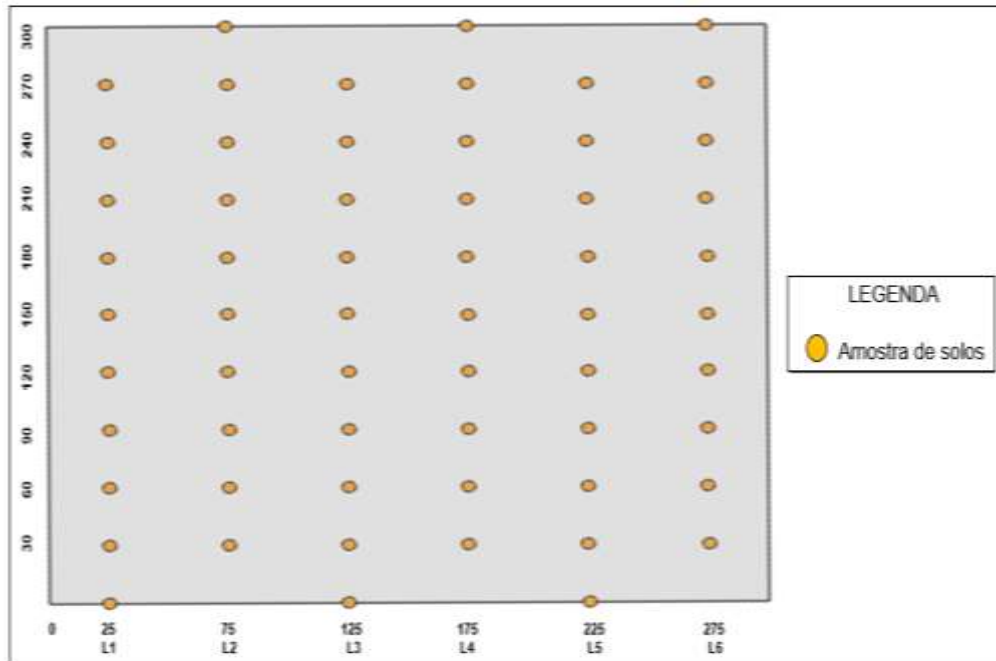


Figura 3. Amostragem Sistêmica das coletas de solo.

As amostras de solo foram coletadas com trado holandês na profundidade de 20 cm (Figura 4). A localização das amostras foram georreferenciadas em coordenadas UTM, Datum WGS84.



Figura 4. Coleta da amostra de solo com auxílio do trado.

Após as coletas, as amostras de solos foram armazenadas em sacos plásticos identificados, e posteriormente encaminhadas para o laboratório da Embrapa Amazônia Ocidental-Manaus/AM, onde foram analisadas e identificadas as características físicas e químicas do solo conforme EMBRAPA (2017).

As variáveis de solo utilizadas no trabalho foram:

Análises físicas: Areia Total, Silte, Argila, Classificação textural, densidade do solo, VTP%, microporosidade (%), macroporosidade (%).

Análises químicas: pH, MO, N, P, K, Na, Ca, Mg, Al, H + Al, H+Al, Fe, Zn, Mn, Cu.

Em cada uma das parcelas das áreas em estudo foi realizado o inventário de todas as castanheiras com diâmetro a altura do peito $DAP \geq 10$ cm segundo metodologia de Pacheco et al., 2018, possuindo as dimensões de 9 ha (300 x 300 m), em cada área de estudo.

5.2.1 Análise dos dados

5.2.1.1 Variáveis de solos

Foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados para verificar as medidas de tendência central e de dispersão, visando aperfeiçoar a eficiência da análise espacial, identificando valores discrepantes e possíveis *Outliers*. Foram considerados nas análises exploratórias as médias, mediana, máximo e mínimo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria, correlação linear e não-linear de todas as variáveis de solos medidas. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste estatístico Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5% (FERREIRA, 2015).

Para a obtenção de uma superfície contínua das variáveis de solos, foram feitas análises variográficas (geoestatísticas) e posterior interpolação das variáveis para as regiões de estudo. Neste sentido, caracterização da variabilidade espacial, foi feita a partir do ajuste de semivariogramas experimentais estimados pela equação (1) (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989).

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

Onde: $\gamma(h)$ = é a semivariância estimada;

$N(h)$ = é o número de pares de valores medidos $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$ separados por um vetor h .

Ao semivariograma experimental gerado foram ajustados o modelo matemático teóricos, fornecendo os parâmetros: Efeito pepita, Patamar e Alcance. Os modelos teóricos estatísticos ajustados para comparação foram o esférico, o exponencial e o gaussiano; dentre estes modelos foi avaliado o que melhor explicasse a dependência espacial dos atributos do solo (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000).

Detectada correlação espacial entre as amostras, e selecionado o melhor modelo foram realizadas a interpolação por Krigagem ordinária e posteriormente, elaborado mapas de todas as variáveis do solo (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989; YAMAMOTO E LANDIM, 2013; VIEIRA, 2002). Esta metodologia só pode ser aplicada para os dados das áreas da Comunidade do Lago das Pedras e Propriedade do Jutica, uma vez que para a Comunidade Jatuarana, o processo de Krigagem ordinária não se mostrou adequado, gerando efeito pepita puro para todas

as variáveis analisadas. Assim, para os dados desta área foram testados os métodos de interpolação Inverso da Distância Ponderada (IDW) e Função de Base Radial (FBR), conforme (JAKOB E YANG, 2006). Onde a interpolação pelo IDW é baseada na distância ponderada de um ponto amostral, em que a ponderação é atribuída a pontos amostrais através da utilização de um coeficiente de ponderação que controla como a influência da ponderação irá diminuir à medida que a distância a partir do ponto desconhecido aumenta, atribui pesos maiores para indivíduos mais próximos ao ponto onde se quer estimar (MITAS E MITASOVA, 1999). Já o método de Funções de Base Radiais (FBR) é aquele onde as soluções são combinações lineares de funções radialmente simétricas, em que uma função sobre números reais cujos valores dependem apenas da distância a partir da origem (OLIVEIRA, 2008).

5.2.1.2 Ocorrência das castanheiras

Para se avaliar a relação entre a distribuição das castanheiras com as variáveis de solos, com intuito de se conhecer a seletividade das mesmas, o mesmo procedimento foi realizado, objetivando a geração de superfícies contínuas da ocorrência das castanheiras, porém, utilizando a Krigagem indicativa, em que seu princípio é transformar os dados originais em indicadores, transformando-os em valores acima do nível de corte recebe valor 1, ou seja, 100% de probabilidade de ocorrência e valores abaixo do nível de corte recebe valor 0, ou seja, 0% de probabilidade de ocorrência (LANDIM, 2003).

Neste contexto, o diâmetro a altura do peito (DAP), foi a variável resposta utilizada. Para os castanhais da Comunidade Lago das Pedras-Barcelos com 97 indivíduos e Propriedade Jutica – Tefé apresentando 42 indivíduos, por meio da krigagem indicativa seguiu o critério de fatiamento dos dados de $DAP \geq 50\text{cm}$ e $DAP < 50\text{cm}$, resultando em mapa de probabilidades de ocorrência dos DAPs em cada localidade que servirá para a análise subsequente (LANDIM, 2003). Em virtude do número reduzido de ocorrências de castanheiras apresentando 20 indivíduos na parcela da Comunidade Jatuarana - Manicoré, para as análises do conjunto de dados, o valor da mediana do DAP foi utilizado como variável resposta, seguindo o critério de fatiamento dos dados utilizando a mediana, $DAP \geq 145,4$ e $DAP < 145,4$. Posteriormente foi obtido um mapa de probabilidades de ocorrência dos DAPs em cada localidade que servirá para a análise seguinte.

5.2.1.3 Machine Learning – *Random Forest*

Uma vez obtidas as superfícies contínuas das variáveis de solos e de DAP, usamos a Machine Learning por meio do Algoritmo *Random Forest* para construir um modelo de predição. Utilizado como um procedimento multivariado de regressão espacial, para as realizações das predições espaciais, cujo resultado final consiste da média dos resultados de todas as árvores, gerando mapas de probabilidade de ocorrência da castanheira, para as variáveis de solos mais importantes associadas aos DAPs das castanheiras (BREIMAN, 2001; CUTLER et al., 2007; CARVALHO JUNIOR et al., 2016).

As árvores de regressão do RF foram construídas utilizando o pacote *randomForest* disponível no Software R (TEAM, 2020), para o qual definiu-se parâmetros básicos (BREIMAN, 2002): (*Ntree*) Número de árvores a serem criadas a partir da seleção das amostras pelo método *bootstrap*; (*Mtry*) número de preditores a serem amostrados aleatoriamente para montagem de cada um dos nós das árvores, ou seja, variáveis selecionadas aleatoriamente por nó e o (*Nodesize*) número de nós terminais (tamanho dos nós). Por *default* do pacote optou-se por manter 500 árvores, o valor *default* do parâmetro *mtry*, que para regressão, corresponde a um terço (1/3) do número total de variáveis utilizadas (Figura 5). Os demais parâmetros de entrada do modelo RF, passíveis de configuração, conforme descrição de Liaw e Wiener (2002), não foram alterados da sua forma padrão de implementação.

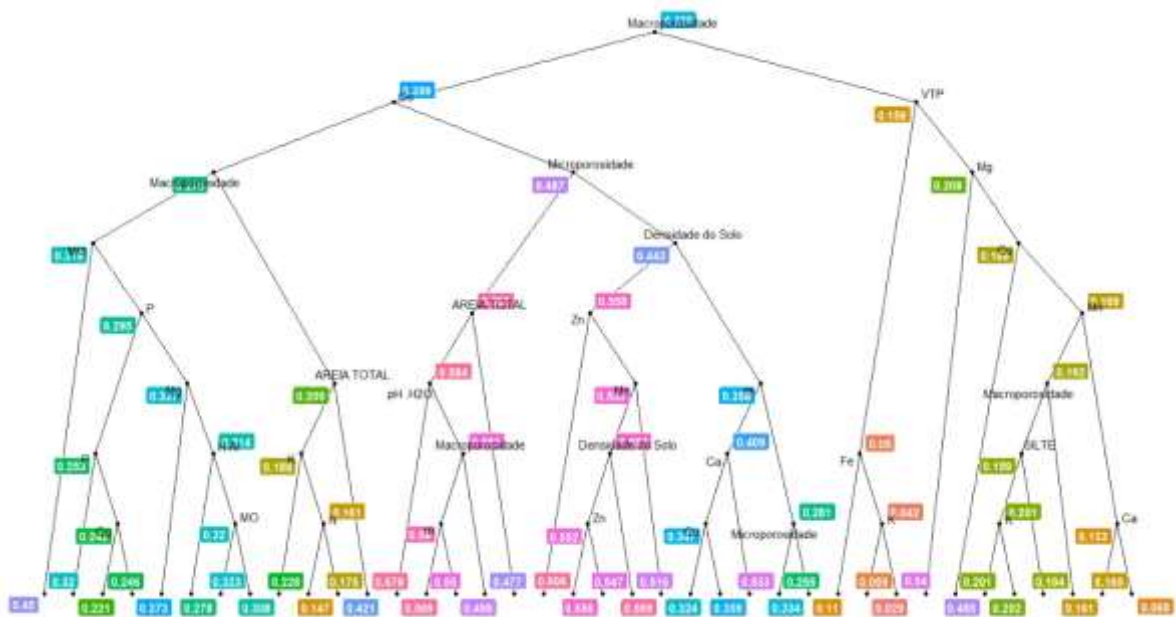


Figura 5. Exemplo de uma Árvore de Decisão que complementa uma Floresta Aleatória (*Random Forest*).

A predição foi realizada pelo pacote *randomForest* para construir o modelo, usando a função *predict*. Por fim, obteve-se a importância das variáveis preditoras no modelo ajustado, pelo critério da redução média na impureza do nó. Esse critério leva em conta a diminuição total nas impurezas do nó da divisão na variável. (LIAW E WIENER, 2002).

O software R (R CORE TEAM, 2020) foi utilizado para processamento de todas as análises dos dados em estudo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise descritiva das variáveis de solo

Os valores obtidos com os resultados das análises descritivas dos atributos físicos e químicos do solo podem ser encontrados na (Tabela 1 e 2). Os coeficientes de variação (CV) obtidos para a maioria das variáveis físicas das amostras de solo nas regiões de estudo foram considerados de média variabilidade ($12\% < CV < 60\%$) com exceção do volume total de poros (VTP) que demonstrou baixa variabilidade ($CV < 12\%$) nos dados das áreas do Lago da Pedras-Barcelos com (7,43%) e Jatuarana-Manicoré com (8,61%), e microporosidade (7,21%) nos dados da Propriedade do Jutica - Tefé (Tabela 1). Os parâmetros analisados foram de acordo com a classificação da variabilidade dos atributos definidos por Warrick e Nielson (1980), onde: ($CV < 12\%$) considerados baixos, ($12\% < CV < 60\%$) média e ($CV > 60\%$) alta variabilidade.

Conforme menciona Cressie (1991), a normalidade do conjunto de dados não é uma condição exigida nas análises geoestatísticas; é definida apenas que a distribuição não apresente valores muito discrepantes, o que poderia comprometer as análises dos conjuntos de dados.

Entre as variáveis físicas analisadas a areia total foi quem apresentou o maior coeficiente de variação nos dados de Lago das Pedras - Barcelos (39,58%) e Jatuarana - Manicoré (26,20%) e na Prop. Jutica - Tefé a macroporosidade foi o maior CV (22,30%) (Tabela 1), porém, sendo ainda classificadas como média. Simões et al. (2006) estudaram os atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico e notaram que a areia apesar de ter um dos maiores CV, ainda assim foi considerada como média variabilidade nas áreas estudadas. Aquino et al. (2014), em suas análises observaram que, apesar de o CV ser considerado baixo ou alto, ocorre maior predominância de variabilidade moderada dos atributos físicos tanto no ambiente de floresta nativa como no de pastagem na região de Manicoré, indicando que nesses locais acontece moderada heterogeneidade. Guerreiro (2017) analisando o solo de castanhal nativo na Flona do

Tapajós observou que as variáveis físicas foram consideradas baixas, exceto para silte e macroporosidade que apresentaram variabilidade moderada.

Nas três regiões do estudo houve predomínio da areia total e da macroporosidade, dentre as variáveis com maior variabilidade nas áreas (Tabela 1). Resultados semelhantes foram encontrados por Cavalcante (2017), em estudos realizados em castanhais onde obteve predominância dos macroporos em relação aos microporos, relacionando com a maior relação areia/argila e aos baixos teores de silte, concluindo que em razão da textura mais arenosa, o solo apresenta predomínio de macroporos em sua estrutura.

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis físicas: Argila, silte, areia total, densidade do solo, volume total de poros (VTP), microporosidade, macroporosidade, na profundidade de 0-20 cm do solo da Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM e Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM.

| Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM | | | | | | | | |
|--|--------|---------|------------|------------|--------------|------------|---------|---------------|
| Variável | Média | Mediana | Valor Mín. | Valor Max. | Coeficientes | | | Desvio Padrão |
| | | | | | Varição (%) | Assimetria | Curtose | |
| Areia Total (g kg ⁻¹) | 103,27 | 90,31 | 52,28 | 268,84 | 39,57 | 1,35 | 2,56 | 40,87 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 429,13 | 427,33 | 238,87 | 634,93 | 22,10 | 0,09 | -0,84 | 94,85 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 467,59 | 486,00 | 199,00 | 688,00 | 26,90 | -0,19 | -0,98 | 125,78 |
| Dens. do solo (g cm ⁻³) | 0,84 | 0,85 | 0,52 | 1,22 | 15,35 | 0,09 | 0,32 | 0,13 |
| VTP (%) | 67,38 | 67,12 | 52,86 | 79,83 | 7,43 | -0,09 | 0,32 | 5,00 |
| Microporosidade (%) | 48,75 | 48,80 | 30,87 | 65,25 | 16,51 | 0,08 | -0,76 | 8,05 |
| Macroporosidade (%) | 18,83 | 18,91 | 6,63 | 30,60 | 24,46 | 0,00 | 0,21 | 4,60 |
| Propriedade do Jutica – Tefé /AM | | | | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Valor Mín. | Valor Max. | Coeficientes | | | Desvio Padrão |
| | | | | | Varição (%) | Assimetria | Curtose | |
| Areia Total (g kg ⁻¹) | 417,74 | 424,42 | 274,92 | 594,41 | 16,76 | 0,14 | -0,58 | 70,03 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 299,85 | 289,41 | 197,85 | 482,48 | 21,39 | 0,95 | 0,58 | 64,16 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 282,40 | 284,75 | 195,00 | 383,50 | 14,47 | 0,07 | -0,45 | 40,89 |
| Dens. do solo (g cm ⁻³) | 0,86 | 0,87 | 0,60 | 1,10 | 14,37 | -0,17 | -0,59 | 0,12 |
| VTP (%) | 43,76 | 42,38 | 35,20 | 62,88 | 13,30 | 1,11 | 0,86 | 5,82 |
| Microporosidade (%) | 66,57 | 66,43 | 57,44 | 76,84 | 7,21 | 0,17 | -0,59 | 4,80 |
| Macroporosidade (%) | 22,81 | 23,28 | 6,79 | 32,52 | 22,30 | -0,61 | 0,56 | 5,08 |
| Comunidade Jatuarana – Manicoré /AM | | | | | | | | |

| Variável | Média | Mediana | Valor Mín. | Valor Max. | Coeficientes | | | Desvio Padrão |
|-------------------------------------|--------|---------|------------|------------|--------------|------------|---------|---------------|
| | | | | | Varição (%) | Assimetria | Curtose | |
| Areia Total (g kg ⁻¹) | 263,86 | 256,89 | 82,27 | 479,21 | 26,19 | 0,53 | 1,20 | 69,12 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 315,16 | 311,74 | 144,45 | 496,23 | 17,89 | -0,11 | 2,00 | 56,40 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 420,97 | 420,25 | 303,00 | 559,00 | 13,85 | 0,27 | -0,46 | 58,30 |
| Dens. do solo (g cm ⁻³) | 0,90 | 0,91 | 0,48 | 1,22 | 16,11 | -0,48 | 0,11 | 0,14 |
| VTP (%) | 65,16 | 64,73 | 52,74 | 81,16 | 8,60 | 0,48 | 0,11 | 5,61 |
| Microporosidade (%) | 43,98 | 42,73 | 31,92 | 72,74 | 15,79 | 1,35 | 3,30 | 6,94 |
| Macroporosidade (%) | 21,18 | 20,64 | 4,13 | 33,03 | 19,94 | -0,30 | 3,97 | 4,22 |

A maioria dos dados dos atributos químicos das três regiões em estudo também apresentaram variação intermediária ($12\% < CV < 60\%$), exceto para os valores de pH que apresentaram baixa variabilidade nas três regiões do estudo ($CV < 12\%$), de acordo com (WARRICK E NIELSON, 1980) (Tabela 2). Guerreiro (2017), estudando solos de castanhais nativos da Flona do Tapajós – Pará, observou que as variáveis químicas obtiveram um comportamento mais heterogêneo, com o pH também apresentando baixa variação. Souza et al., (2010) analisaram os atributos do solo e observaram que o pH, em diferentes profundidades, apresentou baixo CV ($< 12\%$) e os demais atributos químicos do solo estudados tiveram CV médio (12 a 24%) (Tabela 2). Segundo Vanni (1998), coeficiente de variação maior, revela que o conjunto de dados é heterogêneo, a média tem pouco significado e CV menor indica que a série de dados é homogênea.

Os valores mínimos e máximos de pH variaram entre 3,46 a 4,45 nas três regiões de estudos (Tabela 2), considerados solos ácidos, segundo Potafos (1998) onde pH igual a 7 é neutro e valores abaixo são considerados ácidos. De acordo Malavolta (1980) a faixa de pH que a maioria dos nutrientes se encontram disponíveis para as plantas na solução do solo está entre 5,5 e 6,5.

Locatelli et al. (2003) afirmam que a castanheira-da-amazônia apresenta bom desenvolvimento em solos com pH ácido, baixos valores de saturação de bases, solo distrófico, baixa capacidade de troca de cátions e altíssimos valores de saturação de alumínio. Passos (2014), estudando as castanheiras em plantios clonais observou que na área de maior produção, o pH do solo apresentou-se fortemente ácido entre 4,34 e 4,44. Além disso, mostrou também que os nutrientes fósforo, sódio e manganês apresentaram diferenças significativas na profundidade de 0-20 cm. Estudos realizados para avaliar os atributos químicos do solo sob

conversão da floresta amazônica para diferentes sistemas no estado do Pará, obtiveram que os valores de pH em todos os tratamentos e profundidades avaliados foram considerados baixos, o que era esperado, pois os solos da região são naturalmente ácidos (SILVA JUNIOR, BOECHAT E CARVALHO, 2012).

Dentre as principais variáveis que apresentaram maiores variabilidades em todas as áreas foram Ca, Cu e Mn (Tabela 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Cavalcante (2017), analisando a variabilidade espacial de um solo de floresta, onde encontrou dentre as variáveis estudadas o Ca apresentou maior coeficiente de variação (136,76), seguido por Mn (105,75), Cu (91,26) e Ca+Mg (90,98); as demais propriedades apresentaram CV considerados intermediário a baixo. Costa et al. (2017) estudando a relação dos atributos de solos de Roraima com a produção de castanha, observaram que a espécie é exigente em cálcio, afirmando a importância de técnicas de manejo visando a reposição do nutriente.

Dentre as maiores variabilidades encontradas no Lago das Pedras - Barcelos foram Ca (395,27%), Na (58,67%) e Mn (50,54%). Em Jutica - Tefé, foram Cu (45,43%), Ca (42,51%) e Mn (40,25%) e em Jatuarana – Manicoré, foram Ca (55,15%), Cu (43,24%) e Zn (41,65%) (Tabela 2), quanto aos menores valores de CV atribuído para as regiões foram o pH e H+Al.

Tabela 2. Estatística descritiva para as variáveis químicas: pH, Matéria Orgânica (MO), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Sódio (Na), Magnésio (Mg), Hidrogênio + Alumínio (H+Al), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cobre (Cu), na profundidade de 0-20 cm do solo da Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM e Comunidade Jatuarana – Manicoré/AM.

| Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM | | | | | | | | |
|--|--------|---------|------------|------------|--------------|------------|---------|---------------|
| Variável | Média | Mediana | Valor Mín. | Valor Max. | Coeficientes | | | Desvio Padrão |
| | | | | | Varição (%) | Assimetria | Curtose | |
| pH (H ₂ O) | 3,73 | 3,74 | 3,46 | 3,96 | 3,37 | -0,11 | -0,78 | 0,12 |
| MO (g kg ⁻¹) | 50,30 | 51,53 | 24,87 | 72,71 | 18,78 | -0,16 | -0,11 | 9,45 |
| N (g kg ⁻¹) | 1,99 | 2,01 | 1,00 | 3,76 | 22,20 | 0,81 | 2,64 | 0,44 |
| P (mg dm ⁻³) | 2,38 | 2,10 | 1,01 | 5,51 | 42,07 | 1,17 | 1,19 | 1,00 |
| K (mg dm ⁻³) | 34,06 | 31,50 | 19,00 | 92,00 | 34,22 | 2,28 | 8,15 | 11,66 |
| Na (mg dm ⁻³) | 6,95 | 6,00 | 2,00 | 24,00 | 58,66 | 2,12 | 5,41 | 4,07 |
| Ca (cmol _c dm ⁻³) | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 2,13 | 395,05 | 7,29 | 52,44 | 0,27 |
| Mg (cmol _c dm ⁻³) | 0,15 | 0,14 | 0,10 | 0,29 | 23,67 | 2,07 | 5,61 | 0,03 |
| H+Al (cmol _c dm ⁻³) | 10,50 | 10,47 | 7,06 | 16,94 | 15,77 | 0,76 | 2,43 | 1,65 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 307,33 | 303,50 | 212,00 | 520,00 | 21,22 | 0,94 | 1,18 | 65,22 |

| | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Zn (mg dm ⁻³) | 0,53 | 0,51 | 0,12 | 1,33 | 44,74 | 1,29 | 1,92 | 0,24 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 1,68 | 1,55 | 0,47 | 5,94 | 50,54 | 2,10 | 7,96 | 0,85 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,57 | 0,53 | 0,18 | 1,16 | 35,56 | 0,67 | 0,14 | 0,20 |

Propriedade Jutica – Tefé/AM

| Variável | Média | Mediana | Valor Mín. | Valor Max. | Coeficientes | | | Desvio Padrão |
|--------------------------------|--------|---------|------------|------------|--------------|------------|---------|---------------|
| | | | | | Varição (%) | Assimetria | Curtose | |
| pH (H ₂ O) | 4,07 | 4,07 | 3,75 | 4,45 | 3,40 | 0,40 | 0,76 | 0,13 |
| MO (g kg ⁻¹) | 35,02 | 33,62 | 15,75 | 66,63 | 26,37 | 0,76 | 1,25 | 9,23 |
| N (g kg ⁻¹) | 1,51 | 1,45 | 0,80 | 2,48 | 21,14 | 0,44 | 0,63 | 0,31 |
| P (mg dm ⁻³) | 2,99 | 2,86 | 1,72 | 4,59 | 19,30 | 0,35 | -0,42 | 0,57 |
| K (mg dm ⁻³) | 28,96 | 27,00 | 15,00 | 68,00 | 33,71 | 1,60 | 3,35 | 9,76 |
| Na (mg dm ⁻³) | 2,08 | 2,00 | 1,000 | 9,00 | 32,21 | 0,89 | 1,63 | 0,67 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,25 | 42,51 | 0,73 | 0,03 | 0,01 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,20 | 27,96 | 0,97 | -0,13 | 0,03 |
| H+Al (cmolc dm ⁻³) | 10,54 | 10,65 | 6,71 | 14,28 | 13,95 | -0,03 | -0,14 | 1,47 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 313,91 | 299,00 | 180,00 | 604,00 | 28,26 | 0,85 | 0,57 | 88,72 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 0,45 | 0,41 | 0,24 | 1,19 | 39,42 | 1,42 | 2,93 | 0,17 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 0,68 | 0,63 | 0,31 | 1,87 | 40,25 | 2,49 | 8,09 | 0,27 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,56 | 0,49 | 0,23 | 1,28 | 45,42 | 0,86 | 0,23 | 0,25 |

Comunidade Jatuarana- Manicoré/AM

| Variável | Média | Mediana | Valor Mín. | Valor Max. | Coeficientes | | | Desvio Padrão |
|--------------------------------|--------|---------|------------|------------|--------------|------------|---------|---------------|
| | | | | | Varição (%) | Assimetria | Curtose | |
| pH (H ₂ O) | 3,88 | 3,89 | 3,69 | 4,10 | 2,66 | 0,23 | -0,62 | 0,10 |
| MO (g kg ⁻¹) | 34,26 | 33,13 | 19,38 | 51,67 | 21,31 | 0,45 | -0,30 | 7,30 |
| N (g kg ⁻¹) | 1,59 | 1,56 | 1,13 | 2,15 | 14,61 | 0,42 | -0,15 | 0,23 |
| P (mg dm ⁻³) | 2,02 | 1,88 | 1,08 | 3,84 | 27,34 | 0,81 | 0,40 | 0,55 |
| K (mg dm ⁻³) | 31,13 | 28,00 | 17,00 | 68,00 | 35,84 | 1,24 | 1,45 | 11,15 |
| Na (mg dm ⁻³) | 1,13 | 1,00 | 1,00 | 2,00 | 30,25 | 2,10 | 2,46 | 0,34 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,19 | 55,14 | 2,26 | 5,68 | 0,03 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 0,13 | 0,12 | 0,06 | 0,24 | 29,66 | 0,79 | 0,27 | 0,03 |
| H+Al (cmolc dm ⁻³) | 8,56 | 8,62 | 6,36 | 11,41 | 13,25 | 0,30 | -0,25 | 1,13 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 340,08 | 339,50 | 211,00 | 489,00 | 16,54 | 0,33 | 0,16 | 56,26 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 0,51 | 0,45 | 0,14 | 1,06 | 41,64 | 0,57 | -0,59 | 0,21 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 2,44 | 2,29 | 0,84 | 4,99 | 35,62 | 0,74 | 0,12 | 0,86 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,70 | 0,61 | 0,26 | 1,57 | 43,24 | 1,04 | 0,38 | 0,30 |

A correlação linear entre os atributos físicos e químicos do solo nas três regiões do estudo, mostrou que a maioria das variáveis apresentaram baixa correlação entre os atributos do solo estudados, com exceção das variáveis K e Mg (Lago das Pedras - Barcelos), C e MO (Jutica - Tefé), H+Al e N (Com. Jatuarana - Manicoré) que obteve alta significância (Apêndices). As variáveis que apresentaram uma correlação negativa, ou seja, são inversamente proporcionais são a densidade do solo com VTP (dados de Lago das Pedras - Barcelos e Jatuarana - Manicoré) e densidade do solo com microporosidade (dados de Jutica - Tefé) (Apêndice A). Já as variáveis de solo que apresentaram correlação positiva com o DAP neste estudo foram Cu com 0,66 (Lago das Pedras) e 0.39 (Jutica) e VTP com 0,32 em Jatuarana (Apêndices). Souza et al. (2010) analisando os atributos do solo e a produtividade da cultura de cana-de-açúcar notou que a altitude do terreno revelou uma correlação positiva com a produtividade, indicando que, nas áreas menos elevadas do talhão, a produtividade é menor.

6.2 Análise Geoestatística

Os valores obtidos para as variáveis físico-químicas foram submetidos à análise geoestatística (dados de Lago das Pedras – Barcelos e Jutica - Tefé) a fim de verificar a dependência espacial das mesmas. Os resultados das interpolações da análise geoestatística mostraram que os atributos físico-químicos do solo apresentaram dependência espacial nas variáveis nas duas áreas (Lago das Pedras - Barcelos e Jutica - Tefé), sendo que o mesmo foi observado para os dados do DAP (Tabela 3). Assim foram ajustados e definidos os melhores modelos do semivariogramas para as variáveis. Nesta análise, para as principais variáveis físicas e químicas das duas áreas: Lago das pedras – Barcelos e Jutica – Tefé, houve predominância do ajuste ao semivariograma do modelo esférico (Figuras 3).

Tabela 3. Resultados da Análise Geoestatística para os principais atributos físicos e químicos de solo e do Diâmetro à Altura do Peito (DAP) da Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM, Propriedade do Jutica – Tefé/AM.

| Comunidade Lago das Pedras – Barcelos/AM | | | | |
|--|-------------|---------------|---------|---------|
| Variável | Modelo | Efeito Pepita | Patamar | Alcance |
| Cu (mg dm ⁻³) | Exponencial | 0 | 0,0377 | 36,7829 |
| Na (mg dm ⁻³) | Exponencial | 5,0147 | 15,908 | 22,561 |
| Macroporosidade (%) | Exponencial | 8,753 | 24,8962 | 62,8285 |
| Areia Total (g kg ⁻¹) | Esférico | 15,8852 | 1469,6 | 120,901 |
| H+Al (cmol _c dm ⁻³) | Esférico | 1,607 | 2,5142 | 88,8976 |

| P (mg dm ⁻³) | Esférico | 0,5067 | 1,5026 | 750,205 |
|--|---------------|----------------------|----------------|----------------|
| DAP (cm) | Esférico | 0,1686 | 0,5995 | 894,741 |
| Propriedade do Jutica – Tefé /AM | | | | |
| Variável | Modelo | Efeito Pepita | Patamar | Alcance |
| Ca (cmol _c dm ⁻³) | Exponencial | 0 | 0,00015 | 23,3784 |
| Na (mg dm ⁻³) | Exponencial | 0 | 0,3841 | 29,9732 |
| MO (g kg ⁻¹) | Esférico | 72,7534 | 83,7375 | 39,0512 |
| Cu (mg dm ⁻³) | Exponencial | 0 | 0,054 | 29,7518 |
| Areia Total (g kg ⁻¹) | Esférico | 1605,27 | 4704,13 | 39,0512 |
| N (g kg ⁻¹) | Esférico | 0,0824 | 0,1001 | 39,0512 |
| DAP (cm) | Esférico | 0 | 0,2115 | 55,027 |

6.3 Predição realizada pelo *Random Forest*

Após as análises univariadas dos atributos do solo e do DAP, foi utilizado o processo multivariado de regressão espacial, empregando Machine Learning (Aprendizagem de Máquina) por meio do algoritmo *Random Forest* (Floresta Aleatória), para realização das predições espaciais, cujo resultado final consiste da média dos resultados de todas as árvores de decisão, gerando mapas de probabilidade de ocorrência da castanheira e mapas para as variáveis de solo mais importantes.

A predição do algoritmo *Random Forest* demonstrou a influência em determinadas áreas com cores verdes, que representam zonas com maiores probabilidades de ocorrer indivíduos maior ou igual a 50 cm (≥ 50 cm) de DAP, classificados como indivíduos produtivos. Zonas amarelas, medianas probabilidades de ocorrer indivíduos ≥ 50 cm; áreas em salmão são zonas com relativa probabilidade e zonas brancas baixa probabilidade (Figuras 6 e 7). Os Pontos na coloração preta são definidos como DAP maior ou igual a 50 cm ($DAP \geq 50$ cm) e pontos na coloração branca são definidos como DAP menor que 50 cm ($DAP < 50$ cm) (Figuras 5 e 6). Observa-se ainda que não há pontos pretos em zonas brancas, pois em zonas brancas são considerados de baixa probabilidade de $DAP \geq 50$ cm. Assim como em zonas verdes (alta probabilidade de ocorrer $DAP \geq 50$ cm) não encontramos pontos brancos (Figuras 6 e 7).

Bhering et al. (2016) avaliaram a influência da resolução espacial do modelo digital de elevação e da eficiência de modelos *Random Forest* sobre a predição dos teores de areia, argila e carbono orgânico; observaram que a resolução espacial das covariáveis predictoras (como atributos morfométricos derivados do SRTM, dados do sensor TM do Landsat 5 e a litologia da área) tem pouca influência sobre a predição dos atributos, e a RF apresenta potencial de utilização para estimar atributos do solo. (areia, argila e carbono orgânico) com uso de uma reduzida base de dados de solos.

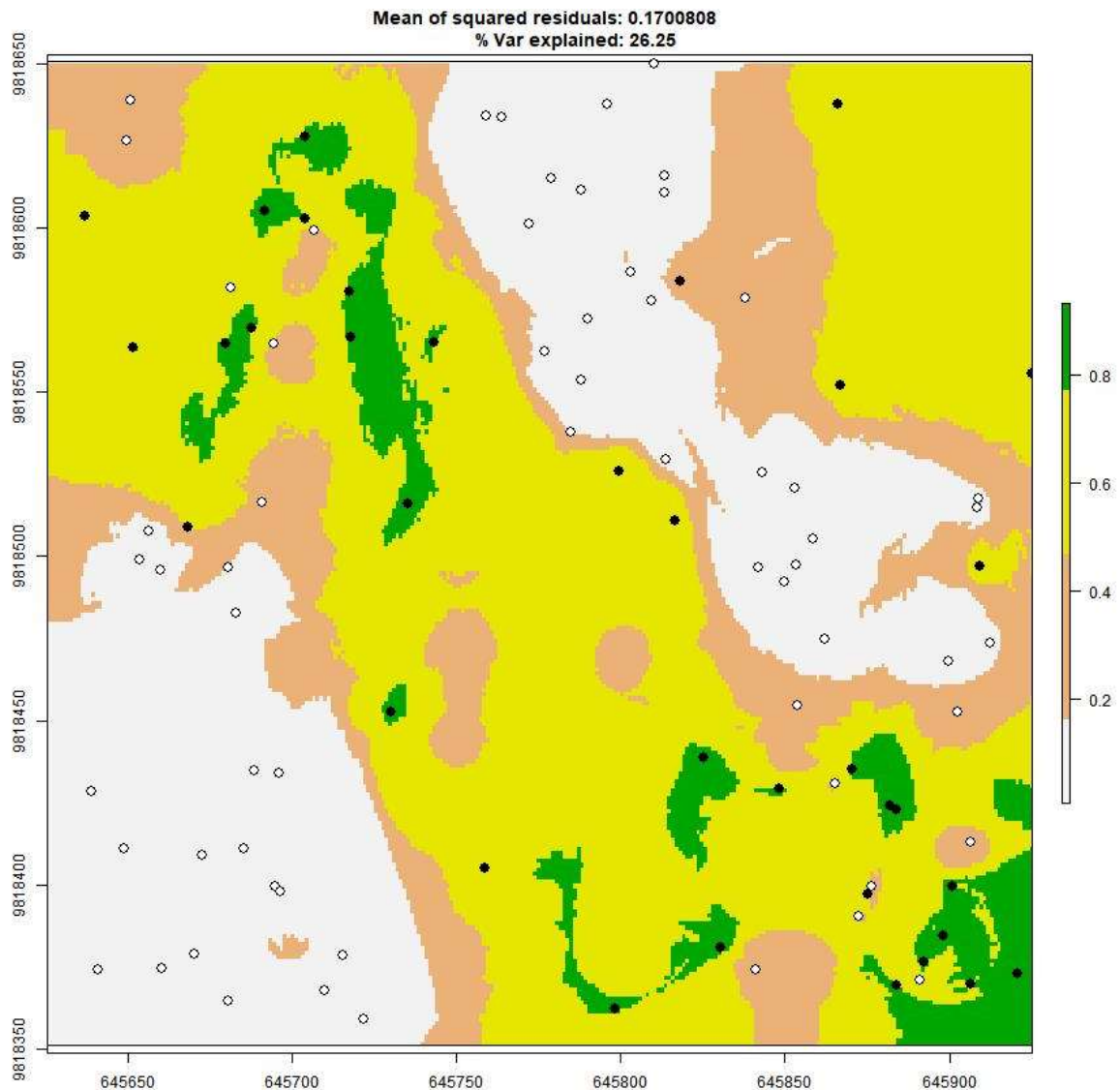


Figura 6. Mapa de probabilidade de ocorrência de DAP < 50 cm e DAP ≥ 50 cm nos dados de Lago das Pedras - Barcelos/AM, gerado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - *Random Forest*.

Observa-se que em zonas amarelas existem alguns pontos brancos (DAP < 50 cm), isso significa que os pontos podem estar naquela área, porém, ele tem todos os fatores para o seu

crescimento e atingir o DAP 50 cm. Nota-se também que existem alguns pontos pretos em zonas amarelas, pois talvez a castanheira ainda não tenha DAP de 50 cm, porém, esses indivíduos situados nesse ambiente são possíveis chegar a essas medidas (Figura 6). Pode-se considerar que o *Random Forest* se aplica bem para estimativa da probabilidade de ocorrência de castanheiras, pois a maioria dos indivíduos produtivos (pontos pretos), encontram-se em zonas de média a alta probabilidade de ocorrência, estimados pelo método, o que foi mais efetivo para a localidade de Jutica - Tefé, que apresentou MSE de 0,04881506, na qual (R^2) 77.16% da variável foi explicada (Figura 7). Comparado com os valores diferentes estimados pelo método RF para a localidade Lago das Pedras – Barcelos, que apresentou média do erro MSE: de 0,1700808, com 26.25% da variável foi explicada (Figura 6).

Com objetivo de avaliar o desempenho na predição de ocorrência de solos de amostras coletadas em pixels de perfis de solos e em pixels coletados em *buffers* com diferente raio dos perfis de solos nas bacias de dois rios Lajeado Grande e Santo Cristo, Campos et al. (2019) observaram que nos mapas preditos pelo RF, as classes Latossolos Vermelhos e Neossolos Regolíticos foram preditas como predominantes, concordando com as proporções observadas nos perfis de solos e nos mapas convencionais disponíveis para ambas às áreas de estudo.

Souza et al. (2010) utilizando outro método da aprendizagem de máquina (árvore de decisão) demonstrou a influência da altitude na variável nível de produção da cana-de-açúcar, para o talhão estudado e entre um conjunto de atributos químicos do solo, associados com a altitude, a árvore induzida estabelece limites de altitude com alta correlação com os níveis de produção.

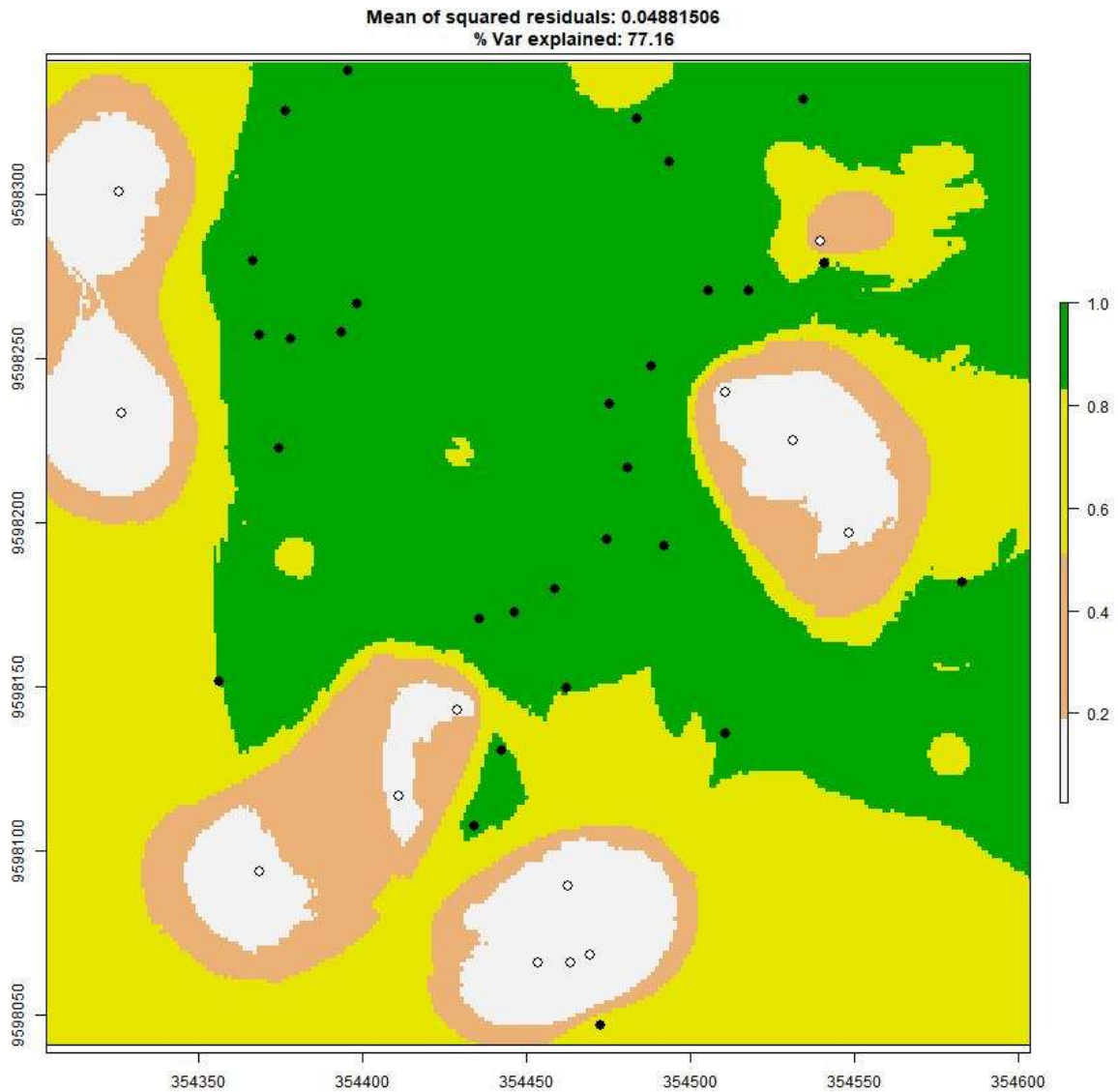


Figura 7. Mapa de probabilidade de ocorrência de $DAP < 50$ cm e $DAP \geq 50$ cm nos dados de Jutica - Tefé/AM, gerado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - *Random Forest*.

Nos dados da região de Jatuarana – Manicoré, devido à baixa densidade de indivíduos, observa-se que a região tem alta probabilidade de ocorrer $DAP \geq 145,4$, distribuídas nas zonas verdes e amarelas, já nas áreas brancas e salmão estão localizados DAPs menores que 145,4 (Figura 8). Apesar desta característica de baixa densidade, que é comum em muitas localidades da Amazônia, observa-se que o método estimou bem a probabilidade de ocorrência, o que pode ser aplicado para outras variáveis, como produção de frutos, visando selecionar os locais da parcela com maior produtividade e assim poder estimar a produtividade de castanhais em outros locais. Ressalta-se que neste caso específico, o método de interpolação IDW, teve um bom

desempenho, demonstrando o seu potencial de uso para locais onde não se tem a possibilidade de utilizar a krigagem. Com R^2 Count = 65%, ou seja que em 65% ele acertou a estimativa.

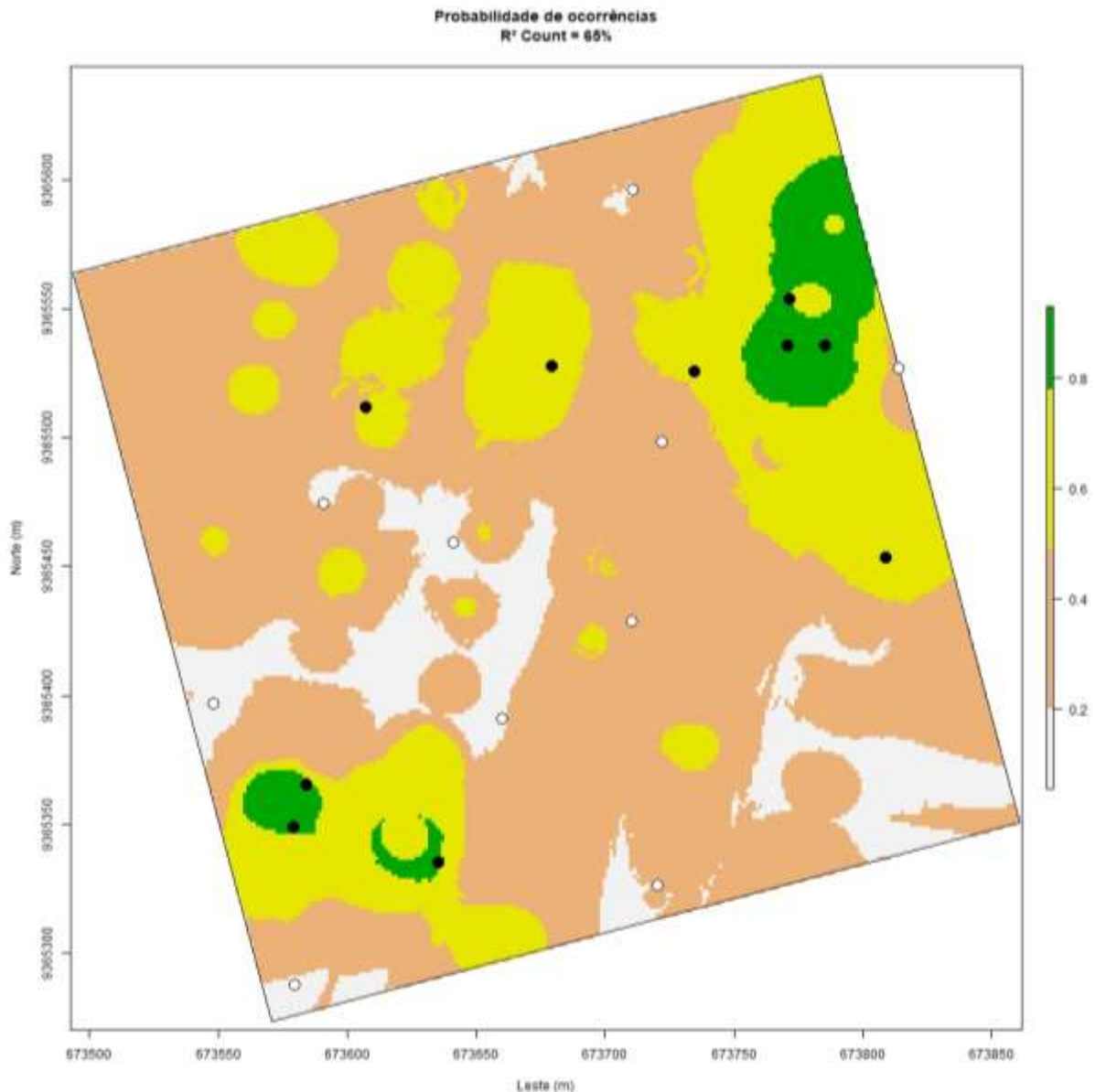


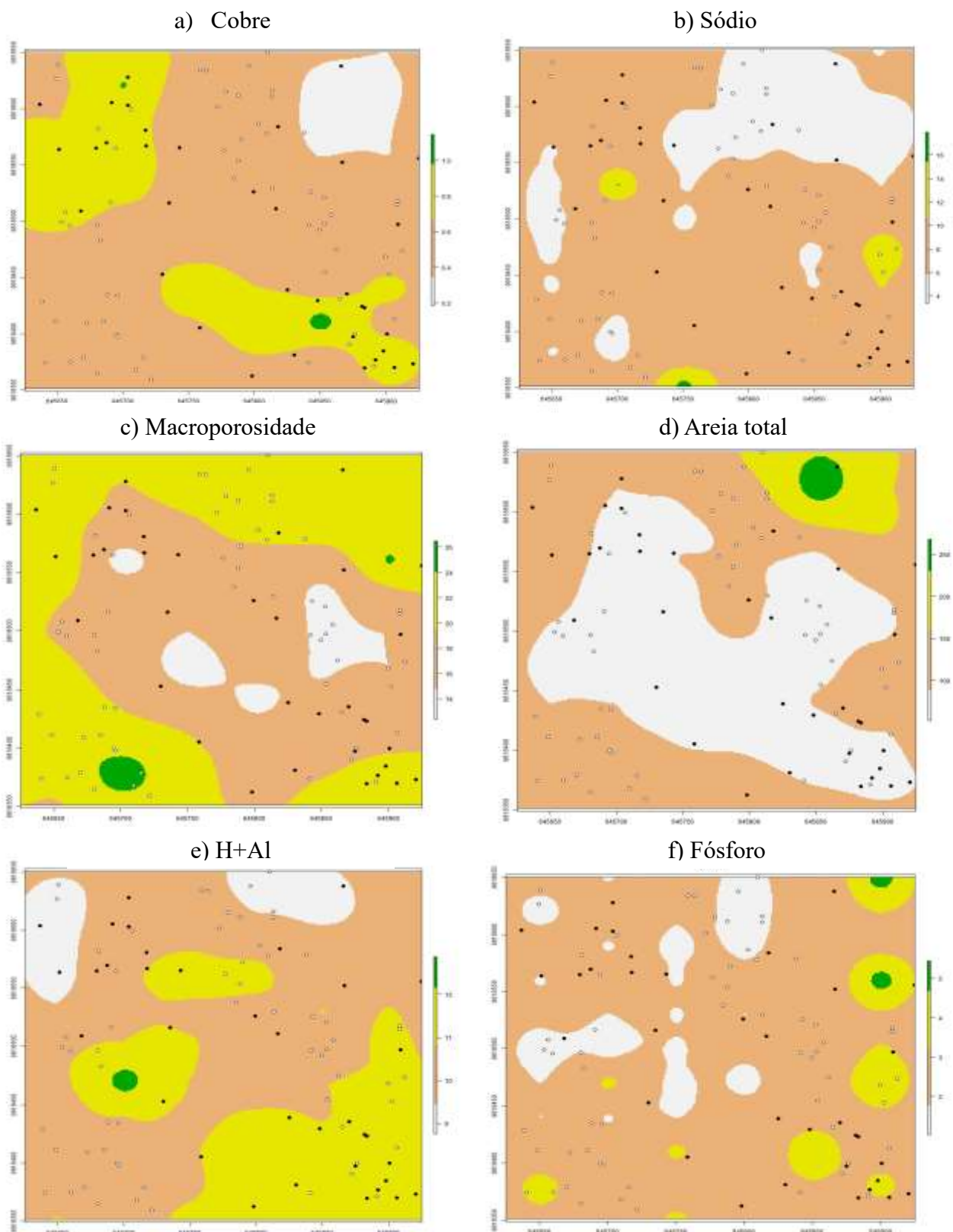
Figura 8. Mapa de probabilidade de ocorrência de $DAP < 145,4$ e $DAP \geq 145,4$ nos dados de Jatuarana - Manicoré/AM, gerado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - *Random Forest*.

Santana (2020) em sua análise mostrou que o método de regressão RF foi capaz de modelar as complexas relações dos solos com os parâmetros estudados, onde a partir do estudo das variáveis importantes de cada modelo de regressão do RF, foi possível identificar as principais regiões espectro Vis-NIR que influenciaram na quantificação de cada parâmetro

relacionado a fertilidade do solo, o que permitiu avaliar se realmente as informações capturadas pelo modelo de regressão possuíam sentido químico.

Em nosso estudo, os mapas das variáveis de solos que mais contribuíram para o modelo foram gerados pela aprendizagem de máquina - RF junto com o DAP das três regiões, onde elas foram analisadas de forma individual, e definidas através de uma medida de importância baseada na diminuição média na precisão (MSE para a regressão) (Figuras 9, 10, 11) e (Apêndice D, E, F).

Nos mapas das variáveis mais importantes, classificadas pelo modelo criado pelo RF nos dados da região do Lago das Pedras - Barcelos, mostram que em áreas verdes são definidas as zonas com maiores teores dos atributos no solo e áreas mais claras foram classificadas como zonas com pouca influência dos atributos. As principais variáveis mais importantes baseada na diminuição média na precisão (MSE para a regressão), foram: Cobre, Sódio, Macroporosidade, Areia total, H+Al e Fósforo (Figuras 9).



Figuras 9 (a, b, c, d, e, f). Mapas das variáveis mais importantes para os dados de Lago das Pedras – Barcelos/ AM, indicado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - *Random Forest* junto com DAP.

O Cobre (Cu) é um micronutriente necessário em menor quantidade pelos vegetais, considerado tão importante para as plantas quanto os macronutrientes, suas deficiências embora seja bem mais rara podem ter efeitos extremos sobre a produtividade (MALAVOLTA, 1980). Entre os elementos essenciais às plantas, o cobre possui funções nutricionais, fisiológicas e protetivas, e sua falta ou deficiência pode ocasionar distúrbios fisiológicos e facilitar a manifestação de doenças promovidas por fitopatógenos (CASTRO, 2016).

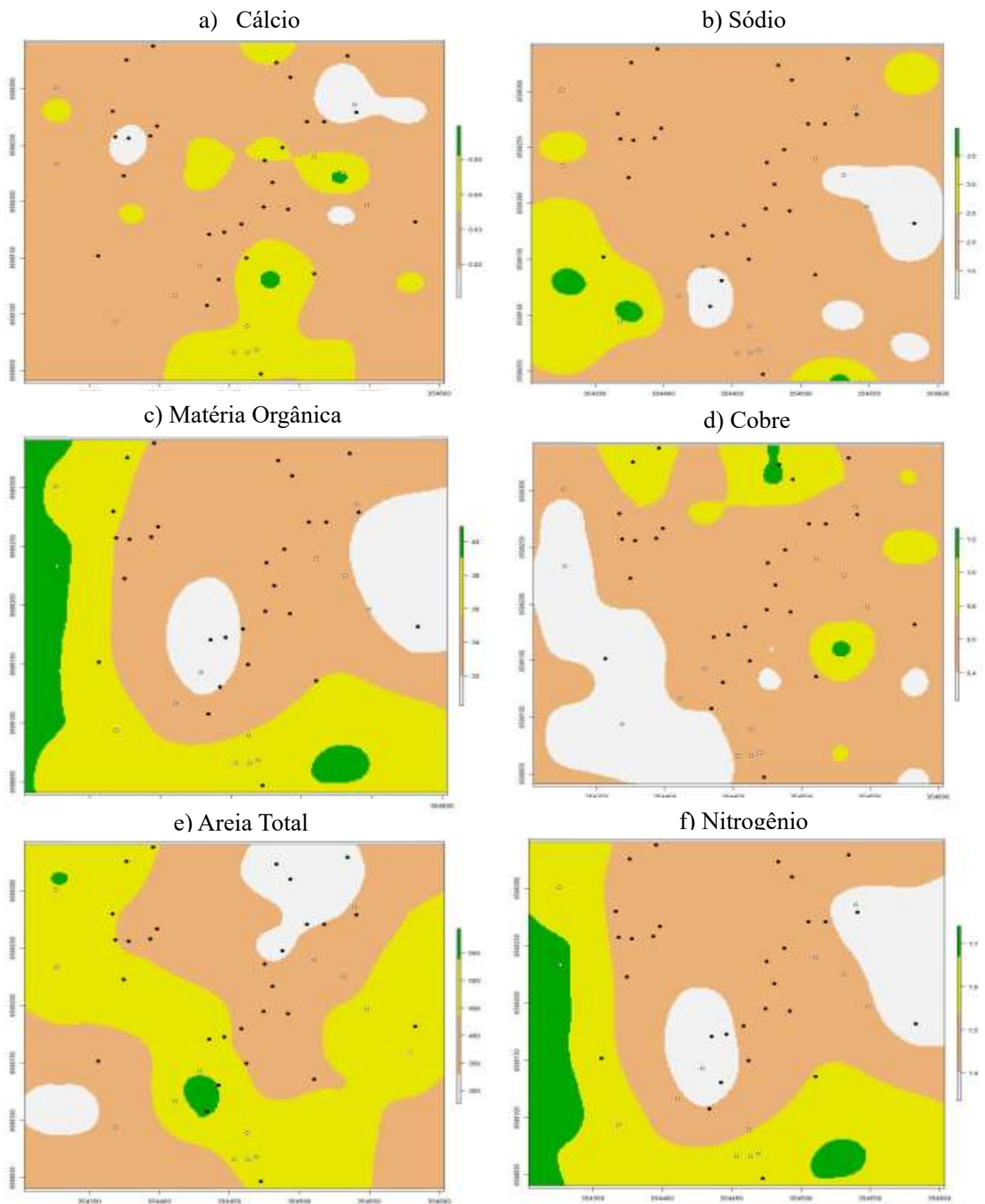
Solos arenosos apresentam maior espaço poroso constituído por macroporos, estão relacionados às trocas gasosas de oxigênio e gás carbônico, ao fluxo de água por infiltração, e ao crescimento radicular, sendo o crescimento das raízes diretamente ligado ao número de macroporos, uma vez que o sistema radicular necessita de oxigênio para a respiração das raízes e nas reações que ocorrem no solo para absorção de nutrientes (REHAGRO, 2018).

Bhering et al. (2016) realizando o mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos *Random Forest* sob diferentes resoluções espaciais, observaram que a análise realizada pelo RF mostrou que as covariáveis de nível de base do canal de drenagem, da elevação e da litologia foram as covariáveis mais importantes testadas pelo RF para explicar a variabilidade, independentemente da resolução do grid que foi utilizado.

Nos mapas das variáveis mais importantes classificadas pelo modelo criado pelo *Random Forest* na região do Jutica - Tefé, também apresentam que em áreas verdes são zonas com maiores teores dos atributos no solo e zonas brancas foram definidas como áreas com pouca influência dos atributos. As variáveis mais importantes são baseadas na diminuição média na precisão (MSE para a regressão) para essa área, foram: Cálcio, Sódio, Matéria Orgânica, Cobre, Areia Total e Nitrogênio (Figuras 10).

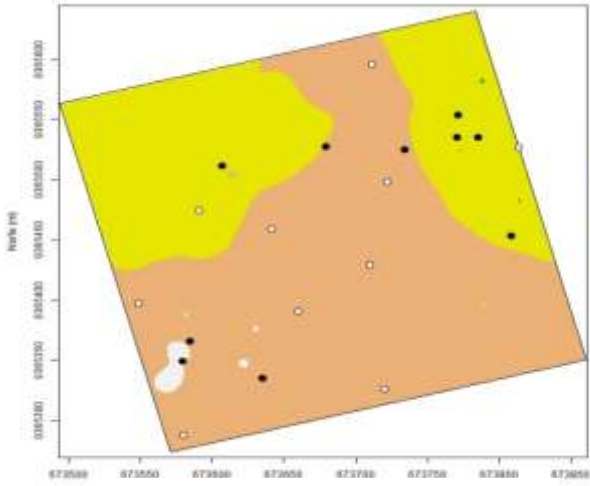
O Cálcio é muito importante para o desenvolvimento das plantas, atua na estrutura celular, sendo um dos componentes da parede da célula, auxilia na disponibilidade de Molibdênio e outros micronutrientes para as plantas. Atua como agente redutor da acidez no solo e diminui a toxidez de alumínio, cobre e manganês no solo. (Laborsolo, 2013).

A matéria orgânica do solo desempenha uma função fundamental na manutenção do solo, dada a sua influência na estrutura e estabilidade do solo, retenção de água, biodiversidade e como fonte de nutrientes para as plantas, apresenta capacidade de modificar relações físico-químicas do solo, alterando a disponibilidade de micronutrientes, aumentando relações entre microrganismos do solo e sua fauna edáfica DHALIWAL et. al, (2019).

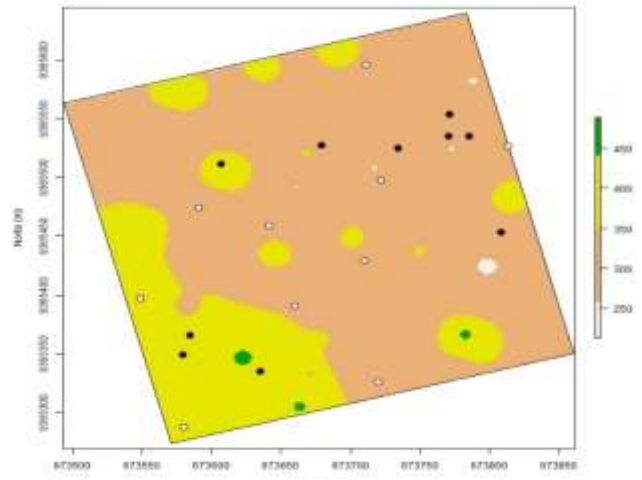


Figuras 10 (a, b, c, d, e, f). Mapas das variáveis mais importantes para os dados do Jutica – Tefé/ AM, indicado pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina - *Random Forest* junto com DAP.

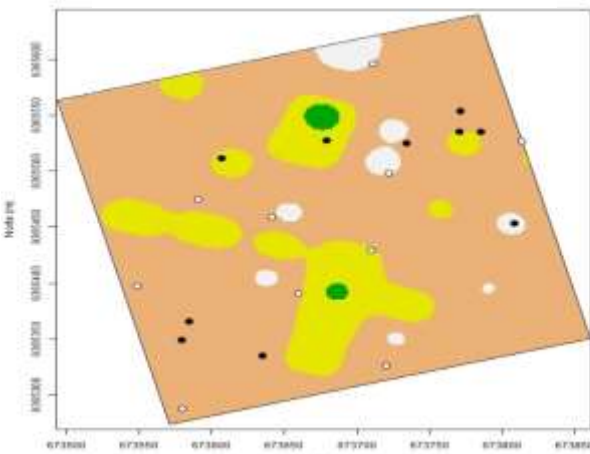
a) Matéria Orgânica



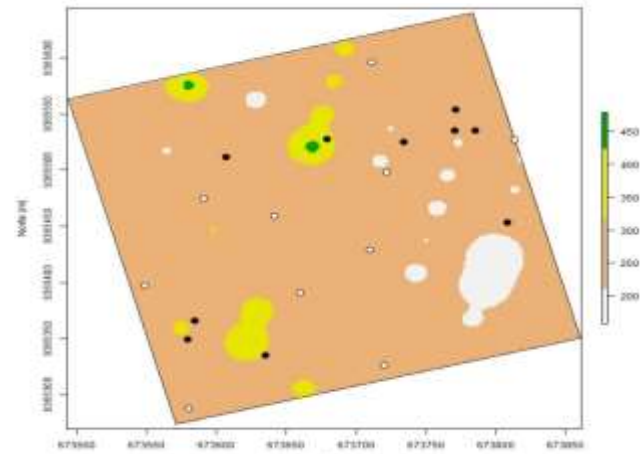
b) Ferro



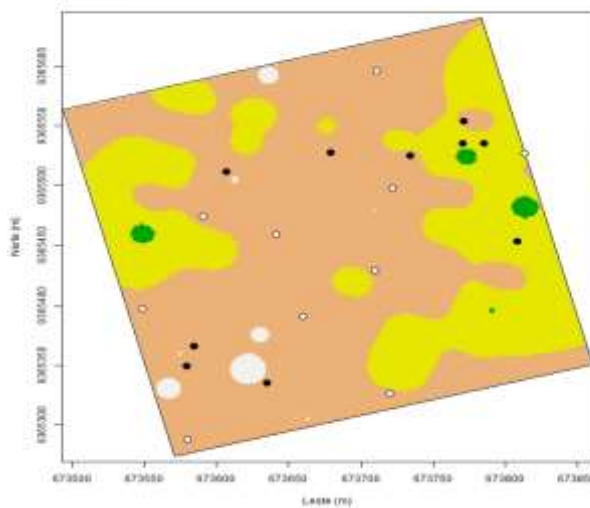
c) Manganês



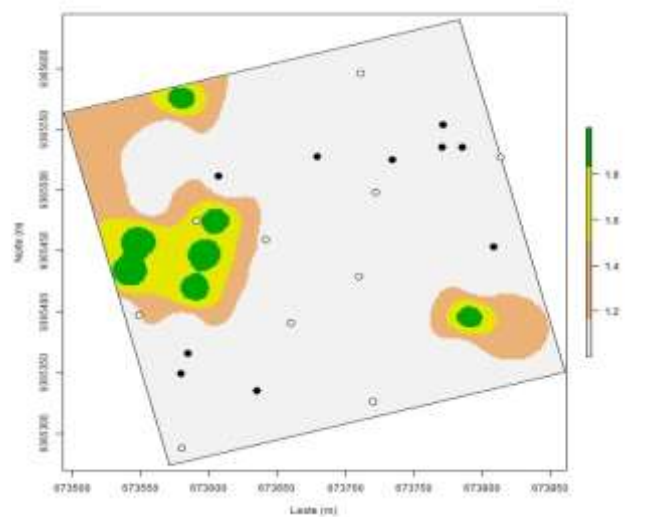
d) Areia Total



e) Nitrogênio



f) Sódio



Figuras 11 (a, b, c, d, e, f). Mapas das variáveis mais importantes para os dados de Jatuarana-Manicoré/AM., indicados pela predição realizada pela Aprendizagem de Máquina – *Random Forest* junto com DAP (mediana).

Os mapas das variáveis mais importantes indicadas pelo modelo criado pelo *Random Forest* para os dados da área de Jatuarana - Manicoré/AM, mostram que em áreas verdes são zonas com maiores teores desses atributos do solo. As variáveis mais importantes são baseadas na diminuição média na precisão (MSE para a regressão) para essa área, foram: Matéria Orgânica, Ferro, Manganês, Areia Total, Nitrogênio, Sódio (Figuras 11).

A matéria orgânica é considerada como um indicativo de fertilidade de solo, os teores de matéria orgânica em determinado solo são resultados do balanço entre a deposição de resíduos orgânicos e a decomposição dos mesmos (ANDRADE, 2020).

Os solos em geral são bastante ricos em Ferro, que é um micronutriente importante para as plantas, sendo um nutriente imóvel na planta, ou seja, ele não se locomove através dela. Por isso, as aplicações de ferro via foliar são tão importantes e devem ser realizadas repetidas vezes, além disso, o ferro tem atuação no processo de respiração das plantas com o transporte de elétrons relacionado as mitocôndrias (BRASIL RURAL, 2020).

De acordo com a predição do algoritmo *Random Forest*, dentre os principais atributos de solo a Areia total e o Sódio estão entre as variáveis mais importante nas três regiões de estudo (Figuras 9, 10, 11).

7. CONCLUSÃO

A maioria dos atributos estudados apresentam moderado grau de heterogeneidade; a Geoestatísticas (krigagem) se mostrou um método adequado para os dados de solos e de ocorrência de castanheiras para as localidades da Comunidade Lago das Pedras/Barcelos e Propriedade do Jutica/Tefé, que apresentaram maior número de indivíduos.

O modelo determinístico IDW, alternativo à krigagem, se mostrou mais adequado do que o FBR para os conjuntos de dados da Comunidade Jatuarana/Manicoré, o que mostra a sua aplicabilidade para castanhais com pequeno número de indivíduos.

O modelo criado pelo Algoritmo *RF* gerou mapas de probabilidade de ocorrências de castanheiras, contribuindo para caracterizar e compreender como estão distribuídas espacialmente as castanheiras nas áreas e em quais zonas está mais propício encontrar castanheiras com $DAP < 50$ cm e $DAP \geq 50$ cm.

O modelo criado indicou os principais atributos do solo nas regiões em estudo, gerando mapas das variáveis mais importantes na área, onde segundo o RF, os atributos mais relevantes nas três regiões são: a areia total e o sódio.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFAIA, S.S.; AYRES, M. I. C.; PUENTE, R. J. A.; NETO, J. G. F.; UGUEN, K. **Princípios agroecológicos para o manejo ecológico do solo e a saúde das áreas produtivas- Cartilha para produtores rurais.** Ed. INPA, p. 24. Manaus, 2018.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. **Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo. v. 38, p. 397-406, 2014.

ALVES, T. C. V.; SILVA, K. E. da; AGUIAR, A. L. S. **Análise da relação entre precipitação e produção de castanha-da-amazônia em uma comunidade agroextrativista no município de tefé-am.** Anais do Seminário Internacional em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, v. 5. Manaus. 2018.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Notas de Geoestatística.** Acta Geologica Leopoldensia XXV (55) 3-14, 2002.

AMARAL, L. P. **Geoestatística na caracterização do solo e da vegetação em floresta ombrófila mista.** Dissertação (mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, f.133, 2010.

APARÍCIO, W. C. S. **Estrutura da vegetação em diferentes ambientes na RESEX do Rio Cajari: interações solo-floresta e relações com a produção de castanha.** Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal Rural de Pernambuco. p. 150, 2011.

ARAÚJO, F. C.; MELLO, E. L.; SILVA, E. B.; MERCANTE; GOLIN, M. **Comparação de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Piquiri (PR).** Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE. Abr. João Pessoa-PB, 2015.

BATISTA, A. P. B.; SOUZA, R. L. S.; GUEDES, M. C.; SILVA, K. E.; MELLO, J. M. **Distribuição espacial do teor de Magnésio (Mg) em solo sob floresta nativa com presença da Castanha-da-Amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) na Amazônia oriental.** XXXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Amazônia e seus solos: Peculiaridades e Potencialidades. Embrapa Amapá. Belém/Pará. 2017.

BATISTA, A. P. B.; MELLO, J. M.; GUEDES, M. C.; REIS, A. A. **Distribuição espacial do teor de carbono em solo sob floresta nativa com presença da castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) no Amapá, Brasil.** III Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal. Ago. Piracicaba, SP. 2016.

BHERING, S.B.; CHAGAS, C. S.; CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N. R., FILHO, B. C.; PINHEIRO, H. S. K. **Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.51, n.9, p.1359-1370, set. 2016.

BHERING, S. B.; CHAGAS, C. da SILVA.; CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N. R. P.; FILHO, C. B. **Influência do modelo digital de elevação no mapeamento digital de atributos do solo por Random Forest (RF)**. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Natal, RN. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Castanha-do-Brasil: boas práticas para o extrativismo sustentável orgânico**. Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável. Departamento de Extrativismo. Brasília, DF, 2017.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**. Statistics Department University of California v.45, n.1, p.5-32, 2001.

CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística: Fundamentos e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf>. Acesso em 22 junho de 2021.

CAMPOS, A. R.; GIASSON, A.; COSTA, J. J.; COELHO, F. F. **Predição de classes de solos com dados coletados em pixels delimitados por buffers em perfis de solo georreferenciados**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. v.14, n.2, 2019.

CARDOSO, E. L.; FERNANDES, A. H. M.; FERNADEZ, F. A. **Análise de Solos: Finalidade e Procedimentos de Amostragem**. Comunicado Técnico. Embrapa Pantanal. p. 5, Corumbá-MS. Dez 2009.

CARVALHO JUNIOR, W.; CALDERANO FILHO, B.; CHAGAS, C. S.; BHERING, B. S. **Regressão linear múltipla e modelo Random Forest para estimar a densidade do solo em áreas montanhosas** Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.51, n.9, p.1428-1437, set. 2016.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. **Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CAVALCANTE, E.A; JUNIOR, R. O; GUEDES, M. C; OLIVEIRA, D. R; BRENDON, Y. **Caracterização física e química do solo sob dois castanhais nativos, na floresta nacional do Tapajós, Pará e na Resex Rio Cajari, Amapá**. Congresso de Ciência e Tecnologia da Amazônia-CEULS ULBRA, Santarém - PA, 2017.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. **Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira**. Bragantia, Campinas. v. 70, p. 598-609, 2011.

CHERUBIN, M. R. SANTI, L. A.; EITELWEIN, T. M.; AMADO, C. J.T. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 50, n. 2, p. 168–177, 2015.

CORTEZÃO, C. C.; ALEIXO, N.C.R.; SILVA, J.C.A.S. **Clima urbano de Tefé-AM: análise episódica da temperatura do ar no Centro e na Vila Boa Sorte do período de 2014-2015. I Congresso Nacional de Ciência Física, 2017.**

COSTA, J. R.; CASTRO, A. B. C.; WANDELLI, E. V.; CORAL, V. C. T.; SOUZA, S. A. G. **Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central.** Acta Amazônica. v. 39, p. 843 – 850. 2009.

COSTA, M. G. C.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. M. **Atributos do Solo Relacionados com a Produção da Castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*).** Revista Floresta e Ambiente; p. 24, 2017.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data.** New York: John Wiley; 1991.

CUTLER, D.R.; EDWARDS JR., T.C.; BEARD, K.H.; CUTLER, A.; HESS, K.T.; GIBSON, J.; LAWLER, J.J. **Random forests for classification in ecology.** Ecology, v.88, p.2783-2792, 2007.

DHALIWAL et. al, **Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review.** Environmental and Sustainability Indicators, 1-2, 2019.

DIAS, J. S. **Nutrientes: do que as plantas precisam?** Universal de fertilizantes S&A. Unifertil, Canoas, n. 2, p. 1-10, 2012. Disponível em: <http://unifertil.com.br/wp-content/uploads/2018/04/Artigo-n%C2%BA-2-Nutrientes-O-que-as-plantas-precisam.-in.pdf>. Acesso em 19 de jan. 2020.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M (Ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos.** EMBRAPA CERRADOS, 209p, Planaltinas, DF; 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. rev. e ampl. p. 574. Brasília/DF, 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006.

FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J. CARVALHO, C.P.L.F.A. **Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina.** Rio de Janeiro: LCT, 2011.

FERREIRA, D. F. F. **Estatística Básica.** 2º ed. rev, Editora UFLA, 2015.

FONSECA, F. L. CARTAXO, C. B. C.; WADT, L. H. O. **Manejo de castanhais nativos no acre: aspectos ecológicos, econômicos e sociais.** Third Internacional Conference. Agriculture and Food in na Urbanizing Society. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018.

FONSECA, F. L.; SILVA, C. A. S. ROVER, O. J.; **Um olhar sobre a ação re-territorializadora do manejo de castanhais nativos no acre.** 57º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Agricultura, Alimentação e desenvolvimento. Julho, Bahia-Ilheus. 2019.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão.** Agricultura de Precisão: Resultados de um novo olhar. EMBRAPA. Brasília, DF. 2014.

GUEDES, A. V.; **Influência de características edáficas na seletividade ambiental de espécies arbóreas ao longo de um gradiente topográfico em floresta de terra firme na Amazônia central.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) Universidade Federal do Amazonas. 82 f. 2016.

GUEDES, M. C., E. S. NEVES, E. G. RODRIGUES, P. PAIVA, J. B. P. COSTA, M. F. FREITAS & L. M. LEMOS, 2014. **‘Castanha na roça’: expansão da produção e renovação dos castanhais em áreas de agricultura itinerante no Amapá, Brasil.** Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais. 2014.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística Operacional.** Brasília: DNPM, 1988. 145p.

GUERREIRO, Q. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; RUIVO, M. L. P.; MORAES, R. C.; LEMOS, T. L. **Variabilidade espacial de atributos físicos de solo sob castanhal nativo na floresta nacional do Tapajós.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Belém/PA. Ago. 2017.

GUERREIRO, Q. L. M. **Castanhal nativo da floresta nacional do Tapajós: atributos edáficos, produção de serapilheira e perfil socioeconômico dos extrativistas.** Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Universidade Federal do Pará. Belém/Pará. 2017.

HERRAIZ, A. D. **Efeitos socioambientais das enchentes de 2013/14 do Rio Madeira no extrativismo da castanheira do Brasil (Bertholletia Excelsa H. & B) e da seringueira (Hevea Brasiliensis Müll. Arg.) na Resex Lago do Capanã Grande, Manicoré-Am.** Dissertação (Mestrado em Gestão de Áreas Protegidas) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus, 2016.

HIGUCHI, M. I. G.; HIGUCHI, N. **A floresta amazônica e suas múltiplas dimensões: uma proposta de educação ambiental.** 2. ed. rev. e ampl. p.424, Manaus-Am, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Última atualização, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 22 junho. 2021.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University Press, 600 p. 1989.

IVANOV, G. B.; FLEIG, F. D.; TONINI, H. **Fatores edafoclimáticos relacionados à produção de sementes em castanhais nativos de Roraima.** Pesquisa. Florestal Brasileira. v. 38, p. 1-6, Colombo, 2018.

JAKOB, A. A. E.; YANG A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas.** XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, realizado em Caxambu – MG – Brasil, de 18 a 22 de setembro de 2006.

KÖPPEN, W. **Climatologia; versão para o espanhol de Pedro R. Hendrichs Pérez.** México, Fondo de Cultura Económica, 466 p. 1948.

KRIGE, D. G. **A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand.** Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, v. 52, p. 151-163, 1951.

LABORSOLO. **Análise química de solo, análise de tecido foliar – macronutrientes: conhecendo o cálcio.** LABORSOLO, 2013. Disponível em: < <https://laborsolo.com.br/analise-quimica-de-solo/macronutrientes-conhecendo-o-calcio> >, acesso em: 31/09/2021.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos.** 2ªed. ver. ampl. São Paulo: UNESP, 2003.

LANDIM, P.M.B. 2006. **Sobre Geoestatística e mapas.** Terra e Didática, 2(1): 19-33. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/TED/article/view/8334/7607>. Acessado em 02 julho de 2021.

LIAW, A.; WIENER, M. **Classification and regression by randomForest.** R News, v.2/3, p.18-22, 2002.

LINCOLN, T.; EDUARDO, Z.; MOLLER M. I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

LOCATELLI, M.; SILVA FILHO, E. P.; VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; PEQUENO, P. L. de L. **Castanha-do-Brasil: opção para solo de baixa fertilidade na Amazônia.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DEGRADAÇÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL. Anais... p. 7. Foz do Iguaçu: Sobrade, 2003.

LUCAS, T.P.B.; PLEC, D.; ABREU, M. L.; PARIZZI, M. G. **Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos.** Revista Brasileira de Climatologia (Eletrônica). Ano 9 – Vol. 13 – Dez 2013.

MACHADO, F. S. **Manejo de Produtos Florestais Não Madeireiros: um manual com sugestões para o manejo participativo em comunidades da Amazônia.** PESACRE e CIFOR, p. 105, Rio Branco, Acre, 2008.

MAIA, M. A. M. Geodiversidade do estado do Amazonas. **Programa Geologia do Brasil Levantamento da Geodiversidade.** CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Manaus, 2010.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Editora Agronômica Ceres. p. 254. São Paulo, SP, 1980.

MAPA-MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Boas Práticas para o Extrativismo Sustentável Orgânico (Castanha-do-pará, castanha, castanha-do-brasil, *Bertholletia excelsa* H.B.K.)** Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. MAPA/ACS. p. 41. Brasília, 2014.

MATHERON, G. **Les variables régionalisées et leur estimation**. Paris: Masson, 1965. 306 p.

MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; NETTO, A. C.; KIEHL, J. C. **Fertilidade do solo**. Escola Superior de Agricultura “LUIZ DE QUEIROZ”. ed. 3. Piracicaba, São Paulo: Nobel, 1989.

MELO, M. S. **Florística, fitossociologia e dinâmica de duas florestas secundárias antigas com história de uso diferentes no nordeste do Pará-Brasil**. Dissertação (Mestrado em recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. p.116, Piracicaba, 2004.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano de Manejo Participativo da RESEX do Rio Unini**, p. 85- 92. Novo Airão, AM, 2014.

MENDES, W. S.; DEMATTÊ, J. A. M.; MOLIN, J. P.; CORRÊDO, L. P.; TAVARES, P. A. **Geoestatística na variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos em solo tropical**. III Congresso Nacional das Ciências Agrárias. 2018.

MITAS, L.; MITASOVA, H. **Spatial Interpolation**. In: P.Longley, MF Goodchild, DJ Maguire, DWRhind (Eds.), **Sistemas de Informação Geográfica: Princípios, Técnicas, Gestão e Aplicações**, GeoInformation International, Wiley, 481-492. 1999.

MORI, S. A.; PRANCE, G. T. **Taxonomy, ecology and economic botany of Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. E Bonpl.: Lecytidaceae)**. *Advances in Economic Botany*, v.8 p. 130-150. 1990.

MORAES, B. L. T; GUERREIRO, Q. L. M; JÚNIO, R. C. O; RUIVO, M. L. P; LEMOS, T. A. **Teores de carbono, nitrogênio e ph em solo de castanhal nativo da flona do Tapajós**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Belém-PA, 2017.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N. K. **Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil**. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Goias, 2009.

MÜLLER, C. H. FIGUEIREDO, F. J. C.; KATO, A. K.; CARVALHO, J. E. U. **A cultura da castanha-do-brasil**. Brasília: Embrapa, CPATU. Coleção Plantar, v. 23, p. 65, 1995.

NORONHA, R. L. **Modelos preditivos de estoque de carbono do solo em terra preta arqueológica – natural e transformada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2019.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, B. R., NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p .1017. Viçosa, MG. 2007.

OLIVEIRA, D. D. L. **Modelagem e deformação de superfícies baseadas em traços**. RJ. Tese de doutorado apresentada à COPPE/UFRJ) RJ. 2008.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o vesper**. EMBRAPA. Brasília, DF. 2015.

OLIVEIRA, I. A. **Caracterização de solos sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 105p. São Paulo. 2013.

OLIVEIRA, D. **O solo sob nossos pés**. (Projeto Ciência) Ed. 1. São Paulo. 2010.

PACHECO, N. P.; **Diversidade vegetal associada à castanheiras produtivas nas principais regiões produtoras do estado do Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) Universidade Federal do Amazonas. 77 f. 2018.

PACHECO, A. M.; SCUSSEL, V. M. Selenium and aflatoxin levels in raw Brazil nuts from the amazon basin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 26, p. 11087–11092, Dec. Washington, 2007.

PAES, C. O.; MORAES, D. A.C.; REISSLER, J.; MANZIONE, R.L. **Krigagem indicativa na determinação da propabilidade de ocorrência de níveis críticos de compactação do solo**. Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias. Botucatu – SP. 2014.

PAIVA, P. M.V. **A coleta intensiva e a agricultura itinerante são ameaças para os castanhais da Reserva Extrativista do Rio Cajari?** Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) Universidade Federal do Amapá. Macapá, 2009.

PASSOS, R. M. O. **Características biométricas, edáficas, nutricionais e produção de frutos de castanha-da-amazônia em plantios clonais na Amazônia Central**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais). Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2014.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., & MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

PLANO DIRETOR MUNICIPAL. **Relatório do Plano**. 1º Revisão do Plano Director Municipal. Barcelos, AM. 2014.

PLANO DE MANEJO DA FLORESTA NACIONAL DE TEFÉ. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Volume 1, Diagnostico, Brasília, DF. 2014.

PEDROSO, M. P e PEREIRA, R. S. **Gestão Florestal: Produtos Florestais Não Madeireiros**. Cidades Florestais. Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentáveis da Amazonia - IDESAM. 2018.

PINTO, A.; AMARAL, P.; GAIA, C.; WANDERLÉIA, O. **Boas práticas para manejo florestal e agroindustrial de produtos florestais não madeireiros: açaí, andiroba, babaçu,**

castanha-do-brasil, copaíba e unha-de-gato. Belém, PA: Imazon; Sebrae-AM, Manaus, AM. 2010.

POTAFOS. **Manual internacional de fertilidade do solo** / Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. Campos Luiz de Queiroz/USP. 2º ed. Rev. e ampl. p. 177, Piracicaba, 1998.

RADAMBRASIL. **Folha SA.19 Içá: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, uso Potencial da Terra.** Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 1978.

RADAMBRASIL. **Folha SA.20 Manaus: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, uso Potencial da Terra.** Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 1978.

RADAMBRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Folha SB.20 Purus: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, uso Potencial da Terra.** p. 566, Rio de Janeiro. 1978.

RAIJ, B. V. **Avaliação da fertilidade do solo.** / Instituto da Postassa&Fosfato. p. 142. Piracicaba, 1981.

RIGHI, E.; BASSO, L. E. **Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas.** *Ambiência Guarapuava (PR)* v.12 n.1 p. 101 - 117 Jan./Abr. 2016.

ROCHA, L., S.C.; LIMA, G. **Financiando Paisagens Sustentáveis: Acre, Brasil.** Relatório completo. Global Canopy Programme e CDSA, UK, 2017. Disponível em: <https://financingsustainablelandscapes.org/sites/default/files/files/paragraphs/20177/FSL%20relatorio%20sobre%20Acre_PORTUGUES.pdf> Acesso em 15 de jan. 2020.

SALOMÃO, R. P.; ROSA, N. A.; CASTILHO, A.; MORAIS, K. A. C. **Castanheira-do-brasil recuperando áreas degradadas e provendo alimento e renda para comunidades da Amazônia Setentrional.** *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, v. 1, n. 2, p. 65-78, maio-ago. Belém, 2006.

SANTANA, F. B. **Floresta aleatória para desenvolvimento de modelos multivariados de classificação e regressão em química analítica.** (Tese de Doutorado do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas). Campinas, SP. 2020.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional.** *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 32, p. 1369-1377, Viçosa, 2008.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Manejo da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia Excelsa*) Orientações para as boas práticas de manejo, coleta e pós coleta das castanha-do-brasil,** Bioma Brasileiro. 2014.

SILVA, F. M.; CHAVES, M. S.; LIMA, Z. M.; **Propriedades dos solos - características químicas e mineralógicas.** *Geografia Física II*. p. 240, EDUFRRN. Natal, RN. 2009.

SILVA, K. E.; PEREIRA, K. P. **Alterações na cobertura vegetal dos municípios do Sul do Amazonas**. Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 1667 – 1671. Goiânia 2005.

SILVA, P. F.; Barbosa, J. I; Oliveira, G. B. **Investigação da variabilidade interanual e interdecenal do clima do estado do Amazonas**. Ciência e Natura, Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas. v. 38, n. 3, p. 1426-1439 Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 2016.

SILVA, M. L.; VALVERDE, S.R.; PASSOS, C.A.M.; COUTO, L. Viabilidade do reflorestamento do eucalipto consorciado com a cultura do feijoeiro um estudo de caso. **Revista Árvore**, v.21, n.4, p.527-535, Viçosa, 1997.

SILVA JUNIOR, C. A.; BOECHAT, C. L.; CARVALHO, L. A. **Atributos químicos do solo sob conversão de floresta amazônica para diferentes sistemas na região norte do Pará, Brasil**. Bioscience Journal., Uberlândia, v. 28, n. 4, p. 566-572, July/Aug. 2012.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; GRAZIANO, P. S. **Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão**. Ciência Rural, v.40, n.4, abr, 2010.

SOUSA, D. G.; ALMEIDA, S. S.; AMARAL, D. D. **Estrutura de uma população manejada de castanheira (*Bertholletia excelsa*) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará**. Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais., v. 9, n. 2, p. 353-370, Belém, 2014.

SPERA, S. T.; MAGALHÃES, C. A. S.; BALDONI, A. B.; CALDERANO, S. B. **Caracterização pedológica de locais de estudo de populações naturais de castanheira-do-brasil no estado de Mato Grosso**. Pesquisas Agrárias e Ambientais. v. 7, n. 2, p. 145-161, mar/abr. Nativa, Sinop. 2019.

TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <<http://www.r-project.org/index.html>>. 2020.

TEIXEIRA, C. P. DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa DF. 3. ed. rev. e ampl., p. 574, Brasília, DF. 2017.

TONINI, H.; BALDONI, A. B. **Estrutura e regeneração de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em castanhais nativos da Amazônia**. Ciência Florestal de Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 607-621, abr./jun. 2019.

TOURNE, D. C. M. **Combining species distribution modelling and environmental perceptions to support sustainable strategies for Amazon-nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) planting and conservation**. Tese (Doutorado da USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”) Piracicaba, 2018.

VANNI, S.M. **Modelos de regressão: estatística aplicada**. São Paulo: Legmar Informática & Editora, 1998. 177p.

VELOSO, H. P. In: IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro, 1992.

VIANA, R. S. M. **O uso da geoestatística espaço-temporal e aprendizagem de máquina na predição da temperatura máxima do ar**. Tese (Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria- Doctor Scientiae). Universidade Federal de Viçosa, MG. 2019.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; MARIA, I.C. **Uso de geoestatística no mapeamento de atributos de solo e planta** In: Congresso e Feira para usuários de geoprocessamento da America Latina GIS Brasil 98, 4., 1998, Curitiba. **Anais Curitiba: 1998**. CD-ROM.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos especiais em ciências do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2000. p.1-54.

WADT, L. H. O.; SANTOS, L.M.H.; MAROCOLO, F.J.; REGO, D. S.G; EMIDIO, K. **Panorama geral da produção extrativista de castanha-da-amazônia no Estado de Rondônia** – Porto Velho, Doc.166, RO: Embrapa Rondônia, Jan. 2019.

WADT, L. H. O; SANTOS, L. M. H. BENTES, M. P. M.; OLIVEIRA, V. B. V. **Avaliação edáfica e nutricional em espécies arbóreas**. Produtos florestais não madeireiros: guia metodológico da Rede Kamukaia. EMBRAPA. cap. 1.Ed. téc. Brasília, DF, 2017.

WADT, L. H. O. **Tecnologias para o fortalecimento da cadeia de valor da castanha da Amazônia**. Nota técnica. CGPE 11543. 1 Ed. Dez. 2014.

WADT, L. H. O.; KAINER, A. K. **Domesticação e Melhoramento de Castanheira**. Domesticação e Melhoramento: Espécies Amazônicas. Universidade Federal de Viçosa. Cap. 15, p.321. 2009.

WADT, L. H. O.; KAINER, A. K.; CARTAXO, C. B. C.; NUNES, G. M.; LEITE, F. M. N.; E OUTROS. **Manejo da Castanheira (Bertholletia excelsa) para produção de castanha-do-brasil**. Secretaria de extrativismo e Produção Familiar, ed. 19, p. 42, Rio Branco. AC. 2005.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.

WOJCIECHOWSKI, J. C., SCHUMACHER, M. V.; PIRES, C. A. F.; MADRUGA, P. R. A.; KILCA, R. V.; BRUN, E. J.; SILVA, C. R. E.; VACCARO, S.; NETO, R. M. R. **Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual**. Ciência Florestal, v.19, n. 4, p. 383-391, out-dez. Santa Maria, 2009.

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

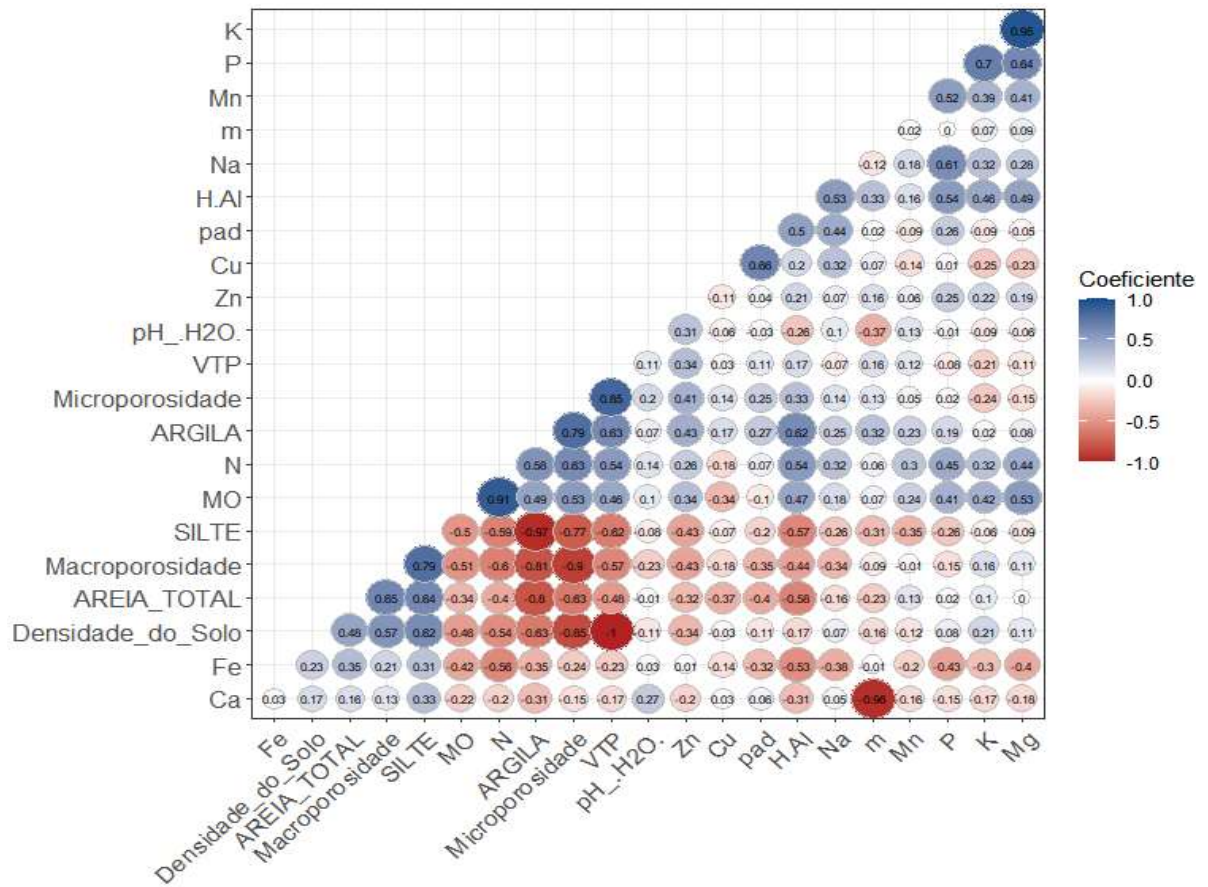
ZATORRE, N. P. **Influência da mudança do uso do solo em ecossistema na Amazônia Sul Ocidental**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Seropédica, 2009.

ZEIDEMANN, V. K. **O Rio das Águas Negras**. In: Florestas do rio Negro. Org. Oliveira A.A., Daly D.C. São Paulo: Cia das Letras. 2001.

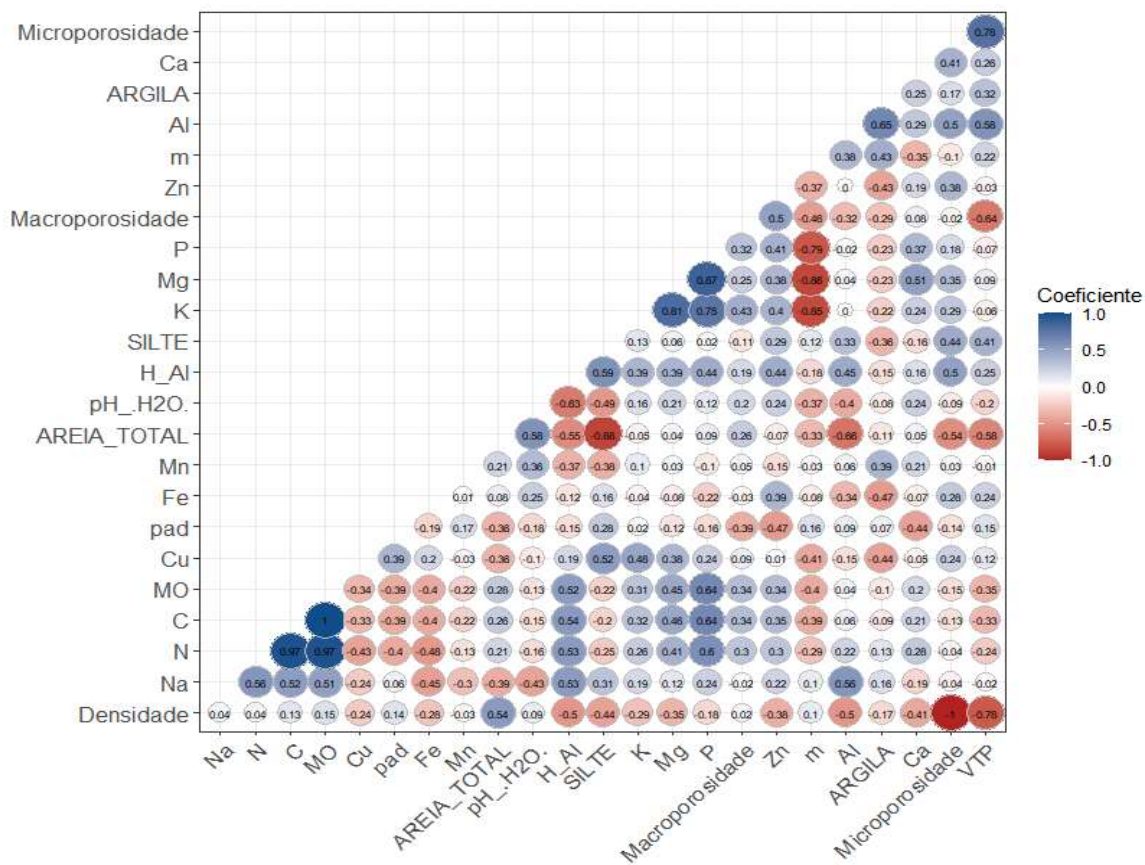
ZUIDEMA, P.A.; BOOT, R.G.A., **Demography of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) in the Bolivian Amazon: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics**. J. Trop. Ecol. 18, 1–31, 2002.

9. APÊNDICES

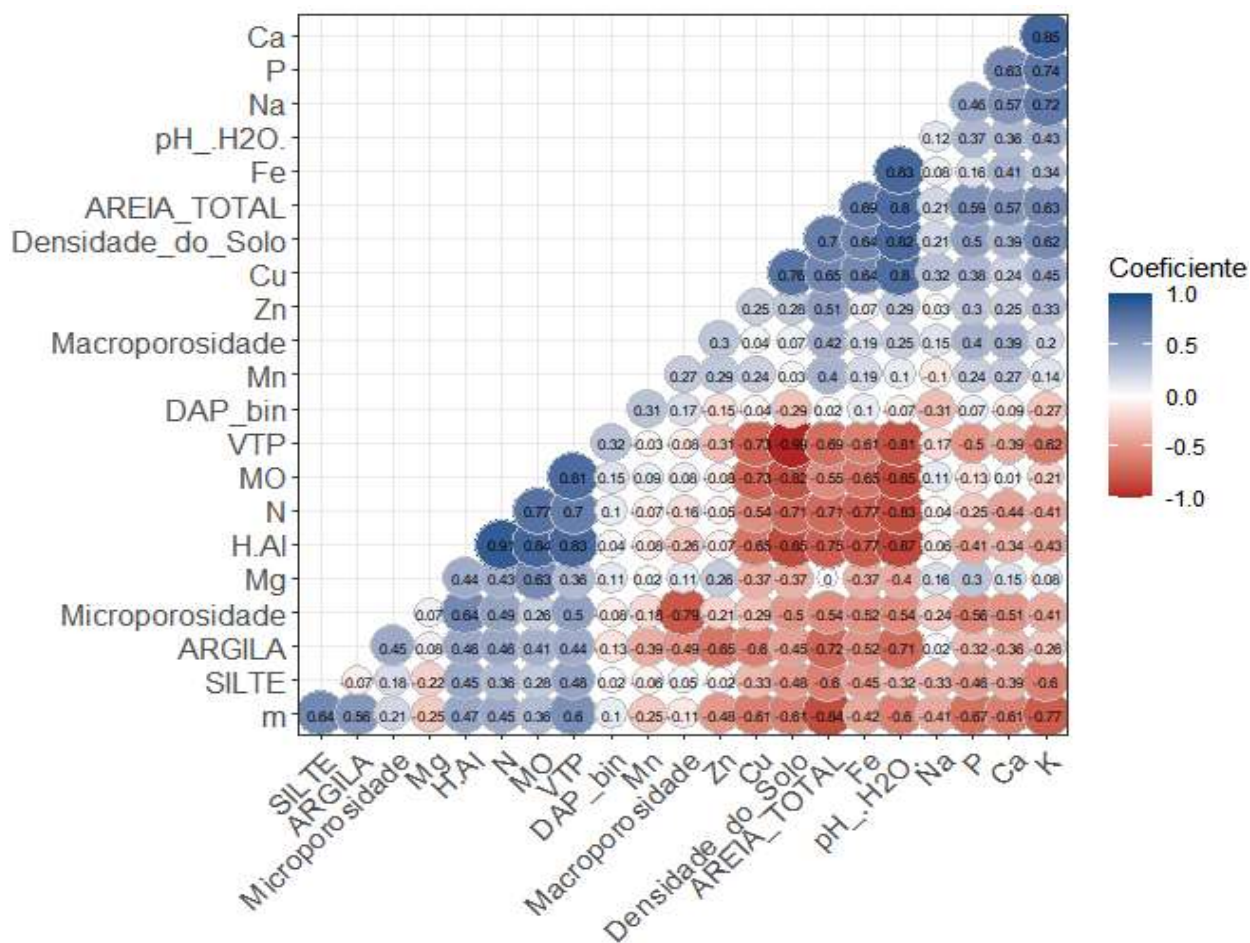
APÊNDICE A – Matriz geral da análise de correlação linear entre as variáveis de solo e DAP (dados da Comunidade Lago das Pedras - Barcelos/ AM).



APÊNDICE B – Matriz geral da análise de correlação linear entre as variáveis de solo e DAP (dados da Propriedade do Jutica - Tefé/AM).



APÊNDICE C – Matriz geral da análise de correlação linear entre as variáveis de solo e DAP (dados da Comunidade Jatuarana - Manicoré/AM).

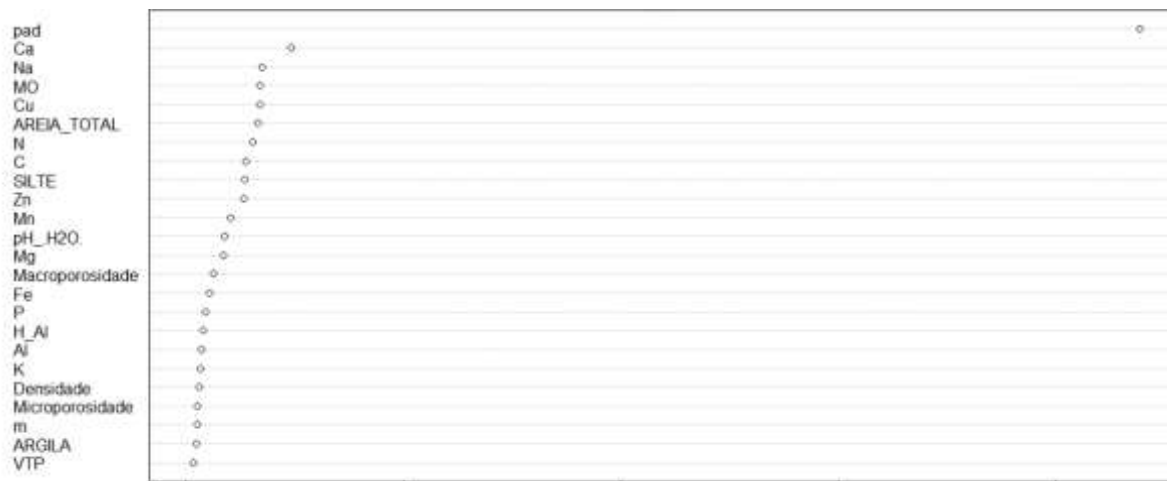


APÊNDICE D – Gráfico das variáveis de solo mais importantes de acordo com a tabela de medida de importância da variável baseada na soma da diminuição média na precisão (MSE para a regressão) - dados da Comunidade Lago das Pedras - Barcelos/AM.



| | |
|-------------------|-----------|
| AREIA_TOTAL | 0.8085001 |
| ARGILA | 0.3420506 |
| Ca | 0.8398136 |
| Cu | 2.8144945 |
| Densidade_do_Solo | 0.3728343 |
| Fe | 0.5743270 |
| H.Al | 0.6633312 |
| K | 0.4271272 |
| m | 0.5588716 |
| Macroporosidade | 0.9662921 |
| Mg | 0.5715926 |
| Microporosidade | 0.4603981 |
| Mn | 0.4957928 |
| MO | 0.5899924 |
| N | 0.3862854 |
| Na | 0.9678943 |
| P | 0.6429451 |
| DAP | 6.5442810 |
| pH_.H2O. | 0.3684434 |
| SILTE | 0.4939884 |
| VTP | 0.3709036 |
| Zn | 0.5305898 |

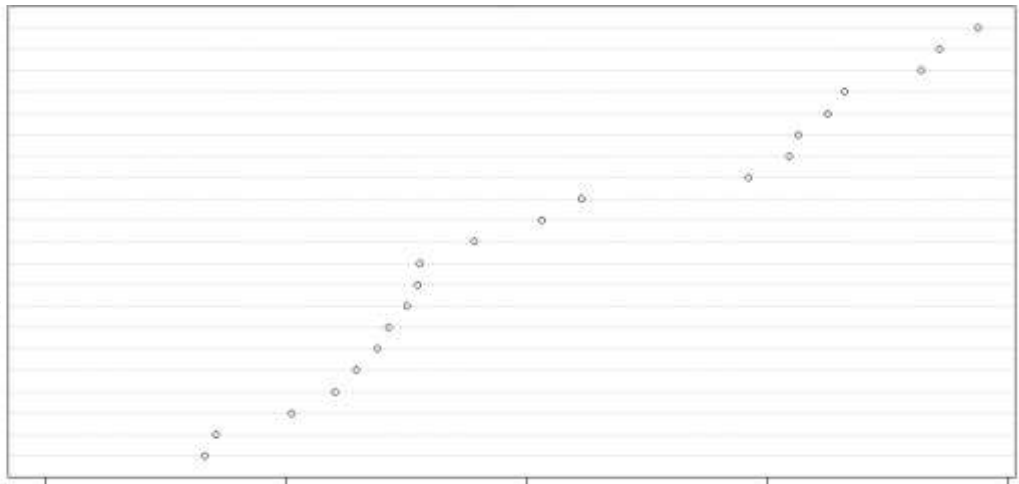
APÊNDICE E – Gráfico das variáveis de solo mais importantes de acordo com a tabela de medida de importância da variável baseada na soma da diminuição média na precisão (MSE para a regressão) – dados da Propriedade do Jutica - Tefé/AM.



| | |
|-----------------|------------|
| Al | 0.06954058 |
| AREIA_TOTAL | 0.32838847 |
| ARGILA | 0.04563103 |
| C | 0.27350824 |
| Ca | 0.47866498 |
| Cu | 0.33637474 |
| Densidade | 0.05799995 |
| Fe | 0.10442431 |
| H_Al | 0.07896572 |
| K | 0.06170424 |
| m | 0.04707203 |
| Macroporosidade | 0.12252082 |
| Mg | 0.16927588 |
| Microporosidade | 0.05075481 |
| Mn | 0.20354495 |
| MO | 0.33920687 |
| N | 0.30515057 |
| Na | 0.34712834 |
| P | 0.08401124 |
| pad | 4.38463930 |
| pH_.H2O. | 0.17501597 |
| SILTE | 0.26825590 |
| VTP | 0.03005320 |
| Zn | 0.26152976 |

APÊNDICE F – Gráfico das variáveis de solo mais importantes de acordo com a tabela de medida de importância da variável baseada na diminuição média na precisão (MSE para a regressão) – dados da Comunidade Jatuarana - Manicoré/AM.

MO
 Fe
 Mn
 AREIA_TOTAL
 N
 Na
 Zn
 H.AI
 pH_H2O.
 Cu
 P
 SILTE
 Macroporosidade
 Densidade_do_Solo
 K
 Mg
 VTP
 m
 Ca
 ARGILA
 Microporosidade



| | |
|-------------------|------------|
| AREIA_TOTAL | 0.33191459 |
| ARGILA | 0.07113448 |
| Ca | 0.10224419 |
| Cu | 0.20618303 |
| Densidade_do_Solo | 0.15009821 |
| Fe | 0.37148983 |
| H.AI | 0.29224288 |
| K | 0.14284307 |
| m | 0.12040546 |
| Macroporosidade | 0.15459171 |
| Mg | 0.13795585 |
| Microporosidade | 0.06618247 |
| Mn | 0.36385357 |
| MO | 0.38755300 |
| N | 0.32485195 |
| Na | 0.31282576 |
| P | 0.17814034 |
| pH_H2O. | 0.22271350 |
| SILTE | 0.15547518 |
| VTP | 0.12918952 |
| Zn | 0.30922187 |